



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

**ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**«ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝ-ΚΑΥΣΗ ΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟΥ ΚΑΙ  
ΖΩΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ CRETA FARM ΣΕ  
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ. »**

**ΠΑΠΑΣ ΜΑΡΚΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Δ.ΒΑΜΒΟΥΚΑ-ΚΑΛΟΥΜΕΝΟΥ (Επιβλέπουσα)  
ΑΝΑΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ  
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΛΕΒΙΖΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΜΑΡΤΙΟΣ ΧΑΝΙΑ 2015



<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Θεωρητικό Μέρος.....</b>	<b>10</b>
2.1 Το Παγκόσμιο Ενεργειακό Πρόβλημα και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	10
2.2 Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας.....	12
2.2.1 Κύριες Εφαρμογές Βιομάζας.....	13
2.2.2 Τύποι και Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά Βιομάζας.....	15
2.3 Υπολειμματικές Μορφές Βιομάζας.....	18
2.3.1 Αγροτικά Υπολείμματα.....	18
2.3.2 Αξιοποίηση υποπροϊόντων από την ελαιουργία.....	19
2.3.4 Αξιοποίηση αστικής και βιομηχανικής λυματολασπής.....	21
2.3.5 Αξιοποίηση Κρεατάλευρου.....	24
2.4 Η Τεχνολογία της Καύσης σε Ρευστοποιημένη Κλίνη.....	25
2.4.1 Περιγραφή τεχνολογίας καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη (Fluidised bed combustion, FBC).....	25
2.4.2 Εκπομπές CO και NOx από την Καύση Βιομάζας σε Ρευστοποιημένη Κλίνη.....	26
<b>3. Πειραματικό Μέρος.....</b>	<b>28</b>
3.1 Πειραματική Διάταξη.....	28
3.1.1 Σύστημα Τροφοδοσίας.....	30
3.1.2 Αντιδραστήρας.....	30
3.1.3 Σύστημα Συλλογής Ιπτάμενης τέφρας.....	31
3.1.4 Σύστημα Δειγματοληψίας και Ανάλυσης Καυσαερίων.....	31
3.2 Τα Καύσιμα.....	32
3.2.1 Επιλογή και προέλευση καυσίμων.....	32
3.2.2 Προετοιμασία δειγμάτων.....	34
3.2.3 Ποιοτικός Χαρακτηρισμός Καυσίμων.....	36
3.2.4 Προσεγγιστική ανάλυση.....	36
3.3 Το Αδρανές Υλικό.....	38
3.4 Καθορισμός Υδροδυναμικών Χαρακτηριστικών Ρευστοποίησης.....	39
3.4.1 Θερμοκρασία λειτουργίας.....	39
3.4.2 Ποσότητα και κοκκομετρία αδρανούς.....	39
3.5 Είδος Ποσότητα και κοκκομετρία Καυσίμου.....	39
3.6 Πειραματικές διαδικασίες.....	40
3.6.1 Προετοιμασία Πειραμάτων.....	40
3.6.2 Μεθοδολογία Διεξαγωγής Πειραμάτων.....	40



<b>4. Αποτελέσματα και Συζήτηση.....</b>	<b>42</b>
Χημικές αναλύσεις αρχικών δειγμάτων.....	42
Προφίλ θερμοκρασίας εκπομπές ρύπων και απόδοση καύσης για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου και περίσσεια αέρα.....	47
4.2.1 Αρχικά δείγματα.....	47
4.2.2 Μίγματα.....	49
4.3 Επίδραση της περιόσσειας του αέρα στις χαρακτηριστικές παραμέτρους καύσης.....	53
4.3.1 Αρχικά δείγματα .....	53
4.3.2 Μίγματα.....	57
4.4 Επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου στις χαρακτηριστικές παραμέτρους καύσης.....	64
4.4.1 Αρχικά δείγματα.....	64
4.4.2. Μίγματα.....	67
<b>5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>77</b>
<b>6. Παράρτημα.....</b>	<b>79</b>
<b>7. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>83</b>



**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

Διάγραμμα 2.1.1: Σενάριο ενέργειας στην Ευρώπη.....	11
Διάγραμμα 2.3.1: % Ποσοστό συμμετοχής των γεωργικών υπολειμμάτων στην παραγωγή της διαθέσιμης βιομάζας στην Κρήτη [ΚΑΠΕ].....	19
Διάγραμμα 2.3.3 : Εκτίμηση παραγωγής ζωικών αποβλήτων στην Ελλάδα .....	21
Διάγραμμα 3.1 : Ρευστοποιημένη κλίνη.....	29
Διάγραμμα 4.1.1: Περιεκτικότητα σε κύρια στοιχεία στις τέφρες των δειγμάτων.....	43
Διάγραμμα 4.1.2: Μέση περιεκτικότητα σε ιχνοστοιχεία των δειγμάτων.....	45
Διάγραμμα 4.2.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	47
Διάγραμμα 4.2.2 : Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	48
Διάγραμμα 4.2.3: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου-MBM</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	49
Διάγραμμα 4.2.4: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Πυρηνόξυλου-MBM</b> για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	50
Διάγραμμα 4.2.5: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου-Λάσπης</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	51
Διάγραμμα 4.2.6: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Πυρηνόξυλου -Λάσπης</b> για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	51
Διάγραμμα 4.3.1: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	53
Διάγραμμα 4.3.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx πυρηνόξυλου για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	53
Διάγραμμα 4.3.3: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Λάσπης</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	55
Διάγραμμα 4.3.4: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Λάσπης</b> για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	55
Διάγραμμα 4.3.5: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου- MBM (90/10)</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	57
Διάγραμμα 4.3.6: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Πυρηνόξυλου – MBM (90/10)</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	57
Διάγραμμα 4.3.7: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου - MBM (80/20)</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	58
Διάγραμμα 4.3.8: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Πυρηνόξυλου-MBM (80/20)</b> για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	59
Διάγραμμα 4.3.9: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30)</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	60
Διάγραμμα 4.3.10: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Πυρηνόξυλου –Λάσπης (70/30)</b> για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	60
Διάγραμμα 4.3.11: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου-Λάσπης (50/50)</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	61
Διάγραμμα 4.3.12: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx <b>Πυρηνόξυλου – Λάσπης (50/50)</b> για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	62
Διάγραμμα 4.3.13: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου-Λάσπης (30/70)</b> κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	63



[illegible]



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1.1: Προσεγγιστική ανάλυση(% επί ξηρού) δειγμάτων βιομάζας.....	42
Πίνακας 4.1.2 : Στοιχειακή ανάλυση (επί ξηρού %) δειγμάτων βιομάζας.....	42
Πίνακας 4.1.3: Χημική ανάλυση τέφρας σε κύρια οξείδια (% κ.β) .....	42
Πίνακας 4.1.4 :Μέση Περιεκτικότητα Ιχνοστοιχείων.....	44
Πίνακας 4.1.5: Δείκτες επικαθίσεων και επισκωρίσεων.....	46
Πίνακας 4.2.1: Προφίλ Θερμοκρασίας, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για $F=12 \text{ g/min}$ και $\lambda=1.4$ .....	47
Πίνακας 4.2.2: Μίγματα με τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$ .....	49
Πίνακας 4.3.1 : Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	56
Πίνακας 4.4.1 : Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση <b>Πυρηνόξυλου</b> συναρτήσει της τροφοδοσία καυσίμου.....	64
Πίνακας 4.4.2: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου - MBM</b> , εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για τροφοδοσία καυσίμου $F=10,12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.....	67
Πίνακας 4.4.3: Προφίλ θερμοκρασιών <b>Πυρηνόξυλου – Λάσπης</b> , εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.....	71

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.2.1: Κύκλος Βιομάζας.....	13
Εικόνα 2.2.2: Θέρμανση θερμοκηπίου με στερεά Βιομάζα.....	15
Εικόνα 2.3.2: Πυρήνας ελιάς.....	20
Εικόνα 2.3.4: Βιολογικός καθαρισμός Creta farm.....	23
Εικόνα 2.3.5 : Υπολείμματα σφαγείων.....	25
Εικόνα 2.3.6 : Τελικό προϊόν MBM.....	25
Εικόνα 2.4.1 Βιομηχανική εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης .....	27
Εικόνα 3.1: Ρευστοποιημένη κλίνη.....	28
Εικόνα 3.1.4: Ο αναλυτής Madur Ga-40plus .....	32
Εικόνα 3.2.2 : Τελικό προϊόν MBM.....	33
Εικόνα 3.2.3 : Τελικό προϊόν Πυρηνόξυλου.....	33
Εικόνα 3.2.4 : Τελικό προϊόν Λάσπης.....	34
Εικόνα 3.2.5 : Όργανα προετοιμασίας δειγμάτων.....	35



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας διεκπεραιώθηκε με βοήθεια και καθοδήγηση ορισμένων ατόμων. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Δ. Βάμβουκα-Καλουμένου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας .

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εργαστηριακό συνεργάτη του Εργαστηρίου ‘Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων’ του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Στέλιο Σφακιωτάκη για τη βοήθεια του στο εργαστηριακό κομμάτι της διπλωματικής αυτής μελέτης.

Ευχαριστίες αποδίδω στους καθηγητές κ. Σταμπολιάδη, κ. Πεντάρη και κ. Γιδαράκο για τη διάθεση συσκευών και μηχανημάτων των εργαστηρίων τους, καθώς και το προσωπικό των παραπάνω εργαστηρίων για τη βοήθεια που μου προσέφεραν. Ακόμη ευχαριστίες προσδίδω στις εταιρίες Μύλοι Κρήτης και Creta Farm για τη διάθεση των υλικών με στόχο τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Σημαντική βοήθεια έλαβα από στενούς φίλους και φίλες του ακαδημαϊκού περιβάλλοντος .Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, σε άτομα που βρίσκονται κοντά μου και πίστεψαν στις δυνατότητες μου, δίνοντας μου δύναμη και θέληση να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την εξέταση υπολειμματικών μορφών βιομάζας, όπως είναι τα αγροτοβιομηχανικά και ζωικά απόβλητα. Επικεντρώνεται στη συν-καύση αυτών των υλικών σε μια μονάδα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων και στη μελέτη των αέριων ρύπων που παράχθηκαν για τη χρησιμοποίησή τους ως πιθανά εναλλακτικά καύσιμα.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πυρηνόξυλο, λυματολάσπη και κρεατάλευρο (MBM). Αρχικά πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις των δειγμάτων για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε πτητικά συστατικά, μόνιμο άνθρακα και τέφρα, καθώς και θερμογόνο δύναμη. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδων και μελετήθηκε η απόδοση καύσης και οι εκπομπές αέριων ρύπων ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  και  $\text{SO}_2$ ). Το ποσοστό της λάσπης στα μίγματα κυμάνθηκε από 0 έως 70%, ενώ του MBM από 0 έως 20%. Μελετήθηκε η μεταβολή δυο παραμέτρων, η αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου και η μεταβολή της περισσειας του αέρα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας οι διαφορές στις θερμοκρασίες τόσο εντός όσο και στο ελεύθερο όριο της ρευστοποιημένης κλίνης ήταν μικρές. Μείωση της θερμοκρασίας εντός του κλιβάνου είχε σαν αποτέλεσμα αύξηση των εκπομπών  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$ . Επίσης, με την αύξηση της περισσειας του αέρα οι εκπομπές  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$  αυξήθηκαν σταδιακά. Η αύξηση του ποσοστού λάσπης και κρεαταλεύρου στο πυρηνόξυλο είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας της κλίνης και κατά συνέπεια την αύξηση των  $\text{CO}$ . Για όλα τα ποσοστά μιγμάτων, ο σχηματισμός  $\text{NO}_x$  έμεινε σε χαμηλά επίπεδα. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) ήταν πολύ μικρές για όλα τα πειράματα καύσης.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων του πλανήτη μας (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, σχάσιμα υλικά) σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και τη βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να στραφούν αφενός σε τεχνικές εξοικονόμησης της ενέργειας, αφετέρου στην αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι γνωστές αυτές ενεργειακές πηγές αποτελούν ανεξάντλητα (ανανεώσιμα) ενεργειακά αποθέματα, και η χρήση τους είναι “φιλική” προς το περιβάλλον. Μια σημαντική αυτού του είδους μορφή ενέργειας είναι και η βιομάζα.

Με τον όρο βιομάζα νοείται οποιοδήποτε οργανικό υλικό προέρχεται από φυτικούς ή ζωικούς οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η βιομάζα, μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες, στις υπολειμματικές μορφές (κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και απορρίμματα), καθώς και στη βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την εξέταση υπολειμματικών μορφών βιομάζας, όπως είναι τα αγροτοβιομηχανικά και ζωικά απόβλητα. Επικεντρώνεται στη συν-καύση αυτών των υλικών σε μια μονάδα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων και στη μελέτη των αέριων ρύπων που παράχθηκαν, με σκοπό τη χρησιμοποίησή τους ως πιθανά εναλλακτικά καύσιμα.

Τα καύσιμα που επιλέχθηκαν ήταν πυρηνόξυλο (Εταιρεία Μύλοι Κρήτης), κρεατάλευρο (MBM-Meat and bone Meal) και λυματολάσπη (sewage sludge) από την εταιρεία Creta Farm. Αρχικά πραγματοποιήθηκε χημικός χαρακτηρισμός των καυσίμων προσδιορίζοντας το ποσοστό υγρασίας, καύσιμης ύλης και τέφρας, τη θερμογόνο δύναμη καθώς και τα ποσοστά C, H, N, O, S. Η καύση των υλικών πραγματοποιήθηκε σε ρευστοποιημένη κλίνη στο εργαστήριο της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Η τεχνολογία καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη (Fluidised Bed Combustion, FBC) φαίνεται να είναι η κατάλληλη μέθοδος για μετατροπή των γεωργικών και ζωικών υπολειμμάτων σε ενέργεια, λόγω της υψηλότερης απόδοσης της έναντι άλλων μεθόδων και της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας που επιφέρει λειτουργικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων μελετήθηκε η απόδοση της καύσης, οι εκπομπές αέριων ρύπων (CO, SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>), καθώς και η μεταβολή των θερμοκρασιών του καυστήρα συναρτήσει του λόγου περίσσειας του αέρα και της τροφοδοσίας του καυσίμου. Για τον υπολογισμό της απόδοσης της καύσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απώλειας θερμότητας (heat-loss method). Η παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν σε 0,72 ή 0,84 kg/h, ενώ ο λόγος περίσσειας αέρα (λ) κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 1,2 και 1,7. Οι αναλογίες ποσοτήτων στο μίγμα Πυρηνόξυλου – Λάσπης ήταν 100/0, 30/70, 50/50, 70/30 και 0/100, ενώ στο μίγμα Πυρηνόξυλου-MBM ήταν 90/10 και 80/20.



## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Το Παγκόσμιο Ενεργειακό Πρόβλημα και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ενέργεια μπορεί να οριστεί ως το φυσικό μέγεθος που συνοδεύει άρρηκτα κάθε μεταβολή στο φυσικό κόσμο του ανθρώπου, από την πιο απλή και ανεπαίσθητη, έως την πιο πολύπλοκη και έντονα αντιληπτή. Γίνεται ευδιάκριτη εκ του αποτελέσματος της, που καλείται «*έργο*» και ευθύνεται για τις διάφορες μεταβολές που παρατηρούνται στον υλικό κόσμο.

Η ενέργεια υποστηρίζει το ανθρώπινο ον και είναι υψίστης σημασίας για τη συνέχιση της ανθρώπινης ανάπτυξης. Στην προσπάθεια του ο άνθρωπος να αναπτύξει το βιοτικό του επίπεδο και τη βιομηχανία οδηγήθηκε στην αναζήτηση και αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο πλανήτης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ορυκτές καύσιμες ύλες, όπως γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και σχάσιμα πυρηνικά υλικά, για να αντεπεξέλθει στις ενεργειακές του απαιτήσεις, οδηγεί την παγκόσμια κοινότητα απέναντι σε δύο κορυφαία και σημαντικά προβλήματα που είναι τα εξής: α) η διαθεσιμότητα και η επάρκεια των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων με την ταχεία παγκόσμια αύξηση της καταναλώσής τους θα εξαντληθούν γρηγορότερα και β) οι επιπτώσεις που θα επέλθουν μετέπειτα στο περιβάλλον θα είναι βλαβερές, αφού η χρήση των ορυκτών καυσίμων και η κατανάλωση της πυρηνικής ενέργειας απειλούν την ανθρώπινη υγεία. Στα αποτελέσματα της επιμόλυνσης του περιβάλλοντος μπορούν να συγκαταλεχθούν η ρύπανση του αέρα, αφού με την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα υπερθερμαίνεται ο πλανήτης (φαινόμενο του θερμοκηπίου) και πέραν από το διοξείδιο του άνθρακα απελευθερώνονται και άλλες επιβλαβείς ουσίες στην ατμόσφαιρα π.χ νιτρικά και θειϊκά οξέα, τα οποία είναι υπεύθυνα για το σχηματισμό της όξινης βροχής. Επιπρόσθετα, ρυπαίνονται τα ύδατα αλλά ταυτόχρονα και το έδαφος, αφού η παραγωγή στερεών αποβλήτων αντιστοιχεί σε σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Το ενεργειακό πρόβλημα εμπίπτει στα σημαντικότερα και πολυπλοκότερα παγκόσμια προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών. Μπορεί η ενέργεια να υποστηρίζει την ανθρώπινη ζωή, πρέπει όμως να αναλογιστούν και οι επιπτώσεις με τη διακοπή κάποιων από τις μορφές ενέργειας. Ο συνεχής αυξανόμενος αριθμός των ανθρώπων, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους και με τη μεγαλύτερη και συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση των ενεργειακών πόρων, επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα στο Παγκόσμιο Ενεργειακό Πρόβλημα.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας μπορούν να οδηγήσουν την ανθρωπότητα προς ένα σχετικά βιώσιμο και ισορροπημένο σύστημα ενεργειακής ζήτησης και προσφοράς. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μη μπορώντας να αγνοήσει το μέγεθος των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον, προχώρησε σταδιακά την εδραίωση μιας περιβαλλοντικής πολιτικής και νομοθεσίας, με κύριο άξονα τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, προβάλλοντας ένα ενεργειακό σενάριο με τις μορφές ενέργειας που πρέπει να εφαρμόζονται μέχρι το έτος 2050 (Διάγραμμα 2.1.1). Βέβαια, ένας ακόμη βασικός λόγος που οδηγήθηκε

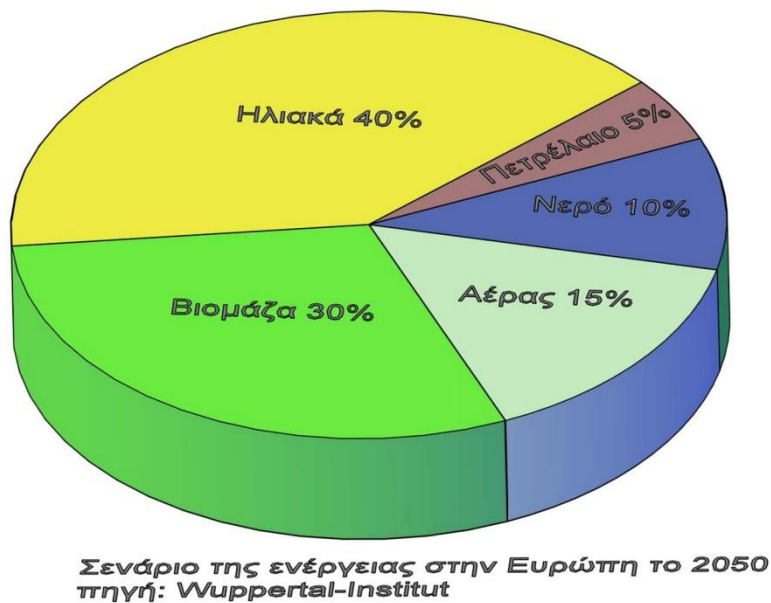


προς την κατεύθυνση αυτή είναι η ενεργειακή εξάρτησή της από τρίτες χώρες και από εξαντλήσιμους φυσικούς πόρους. Το αποτέλεσμα είναι το αυστηρό νομικό πλαίσιο της απόφασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που επιβάλλεται μέσω προστίμων απέναντι στις βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας και τις οδηγεί σε αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων, που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και κοστίζουν, με ανανεώσιμες πηγές που δεν επιβαρύνουν καθόλου το περιβάλλον [1,2].

Οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να μετριάσουν την υφιστάμενη τάση προς την ενεργειακή εξάρτηση, και για αυτό αποτελούν πολιτική προτεραιότητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν:

- A) την ηλιακή ενέργεια
- B) την αιολική ενέργεια
- Γ) την κυματική ενέργεια
- Δ) τη βιομάζα
- Ε) τη γεωθερμική ενέργεια
- Ζ την υδροηλεκτρική ενέργεια



Διάγραμμα 2.1.1: Σενάριο ενέργειας στην Ευρώπη [3]

## 2.2 Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας



Η βιομάζα αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, γνωστή στον άνθρωπο εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Με τον όρο βιομάζα ονομάζουμε οποιοδήποτε υλικό περιέχει οργανική ύλη, όπως είναι το ξύλο και άλλα δασικά προϊόντα, αγροτικά υπολείμματα, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων, αστικά απόβλητα κλπ, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Το βιοαέριο είναι αέριο πλούσιο σε μεθάνιο, το οποίο παράγεται από οργανικά απόβλητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρική ενέργειας, αλλά και ως καύσιμο, για μηχανές εσωτερικής καύσης.

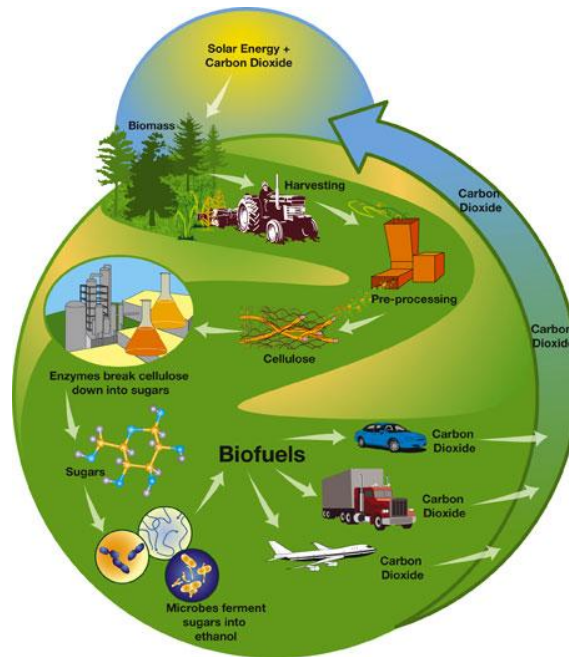
Η βιομάζα είναι δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή ηλιακής ενέργειας, αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών και αποτελείται κυρίως από ενώσεις που βασικά στοιχεία έχουν τον άνθρακα και το υδρογόνο. Η Εικόνα 2.2.1 παρουσιάζει τον κύκλο της βιομάζας, από την αρχή της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, μέχρι και τα τελικά προϊόντα. Οι κυριότερες μορφές βιομάζας είναι :

- ❖ Αγροτικά παραπροϊόντα (υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών, υπολείμματα επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων όπως κουκούτσια καρπών, πυρηνόξυλο κ.λ.π.)
- ❖ Κτηνοτροφικά απόβλητα και απορρίμματα
- ❖ Βιομάζα δασικής προέλευσης
- ❖ Ενεργειακά φυτά (καλάμι, μίσχανθος, γλυκό σόργο, ευκάλυπτος κ.λ.π.)
- ❖ Οργανικό μέρος των αστικών στερεών αποβλήτων

Τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από τη βιομάζα είναι :

- ❖ Η καύση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και δε συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- ❖ Η μηδαμινή ύπαρξη του θείου στη βιομάζα συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) που είναι υπεύθυνο για την όξινη βροχή.
- ❖ Λόγο του ότι η βιομάζα είναι εγχώρια πηγή ενέργειας, η αξιοποίησή της συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και συνάμα στην εξοικονόμηση συναλλάγματος.
- ❖ Η εξασφάλιση εργασίας και η συγκράτηση των αγροτικών πληθυσμών στις παραμεθόριες και τις άλλες γεωργικές περιοχές.
- ❖ Η απεξάρτηση των περιοχών από τα «παιγνίδια πολέμου και πλούτου»[4] .





Εικόνα 2.2.1: Κύκλος Βιομάζας [5]

### 2.2.1 Κύριες εφαρμογές βιομάζας

Η θέρμανση με ξύλα είναι ένα παράδειγμα χρησιμοποίησης της βιομάζας ως ενεργειακής πηγής και είναι γνωστή εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Σήμερα οι κύριες εφαρμογές της βιομάζας ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι:

- **Θέρμανση θερμοκηπίων:** χρησιμοποιείται η βιομάζα σαν καύσιμο σε κατάλληλους λέβητες για τη θέρμανση θερμοκηπίων.
- **Θέρμανση κτιρίων με καύση βιομάζας σε ατομικούς/κεντρικούς λέβητες:** χρησιμοποιούνται ατομικοί/κεντρικοί λέβητες πυρηνόξυλου για τη θέρμανση κτιρίων.
- **Παραγωγή ενέργειας σε γεωργικές βιομηχανίες:** χρησιμοποιείται από γεωργικές βιομηχανίες στις οποίες η βιομάζα προκύπτει σε σημαντικές ποσότητες σαν υπόλειμμα ή υποπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας και έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε θερμότητα. Ελαιοτριβεία, πυρηνελαιουργεία, βιομηχανίες ρυζιού, καθώς και βιοτεχνίες κονσερβοποίησης καίνε τα υπολείμματά τους (υπολείμματα εκκοκκισμού, πυρηνόξυλο, φλοιοί και κουκούτσια, αντίστοιχα) για την κάλυψη των θερμικών τους αναγκών, ή/και μέρος των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια .



- **Παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανίες ξύλου:** Τα υπολείμματα βιομηχανιών επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι, πούδρα, ξακρίδια κλπ) χρησιμοποιούνται για τη κάλυψη των θερμικών αναγκών της διεργασίας, καθώς και για τη θέρμανση των κτιρίων.
- **Τηλεθέρμανση:** είναι η θέρμανση χώρων, καθώς και θερμού νερού χρήσης σε ένα σύνολο κτιρίων, έναν οικισμό, ένα χωριό ή μια πόλη, από έναν κεντρικό σταθμό παραγωγής θερμότητας χρησιμοποιώντας ως καύσιμο βιομάζα. Η θερμότητα μεταφέρεται με προ-μονωμένο δίκτυο αγωγών από το σταθμό προς τα θερμαινόμενα κτίρια.
- **Παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο:** Το βιοαέριο που παράγεται από βιομάζα καίγεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, μπορεί να αξιοποιείται η θερμική ενέργεια των καυσαερίων και του ψυκτικού μέσου των μηχανών για να καλυφθούν ανάγκες τις διεργασίας, ή/και άλλες ανάγκες θέρμανσης (π.χ θέρμανση κτιρίων).
- **Παραγωγή βιοκαυσίμων :**Υγρά καύσιμα που παράγονται από διάφορους τύπους βιομάζας. Τα βιοκαύσιμα παράγονται από φυτικά υλικά, συγκεκριμένα είδη καλλιεργειών και από ανακυκλωμένα ή χρησιμοποιημένα σπορέλαια. Η χρήση των βιοκαυσίμων στα οχήματα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τον τομέα των μεταφορών [6].
- **Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας :** Η ενεργειακή χρήση της βιομάζας μπορεί να μειώσει αφενός την ανάγκη για εισαγωγές ορυκτών καυσίμων και αφετέρου την εκπομπή βλαβερών ρύπων, όπως τα οξείδια του θείου και του άνθρακα. Με την καύση της βιομάζας παράγουμε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια (τελευταία και ψύξη). Η ενέργεια αυτή συγκαταλέγεται στις ήπιες, καθαρές και ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ). Τα ορυκτά καύσιμα βγάζουν στην επιφάνεια το διοξείδιο του άνθρακα που είναι αποθηκευμένο στο υπέδαφος για εκατομμύρια χρόνια. Αντίθετα, τα φυτά δεσμεύουν διοξείδιο με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και όταν καίγονται, αυτό επιστρέφει στην ατμόσφαιρα για να ξαναδεσμευτεί την επόμενη χρονιά με αποτέλεσμα ένα ισοσκελισμένο ισοζύγιο εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η χρήση της βιομάζας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα, επιτρέπει τη λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρισμού σε διάφορες κλίμακες (από λίγα kW έως εκατοντάδες MW) [7].





**Εικόνα 2.2.2:** Θέρμανση θερμοκηπίου με στερεά βιομάζα [8]

### **2.2.2 Τύποι και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά βιομάζας**

Ανεξαρτήτως της πηγής προέλευσής της, οι διεργασίες μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια επηρεάζονται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της. Οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών δεν είναι σταθερές και μπορεί να διαφέρουν σημαντικά, αναλόγως της πηγής προέλευσης της βιομάζας.

Τα εν λόγω χαρακτηριστικά δεν επηρεάζουν μόνο από τεχνικής πλευράς τα έργα αξιοποίησης της βιομάζας αλλά, τελικά, τη βιωσιμότητα ολόκληρης της επένδυσης. Κατά συνέπεια, η πλήρης κατανόηση της σημασίας τους είναι βασική για την εξέταση της κάθε διεργασίας ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας.

Οι ιδιότητες που θεωρούνται περισσότερο καθοριστικές είναι:

- Η περιεκτικότητα σε υγρασία
- Η περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά
- Η περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά
- Η θερμογόνος δύναμη
- Η πυκνότητα



### **Περιεκτικότητα σε υγρασία**

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ορίζεται ως η ποσότητα νερού που βρίσκεται στη βιομάζα και μετράται ως ποσοστό επί του βάρους του υλικού. Η περιεκτικότητα σε υγρασία έχει πολύ σημαντική επίδραση στην ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας, είτε πρόκειται για θερμοχημική μετατροπή (π.χ. καύση) ή για βιοχημική (π.χ. ζύμωση). Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση της συγκεκριμένης ιδιότητας στην ποιότητα της βιομάζας, σημειώνεται ότι η αύξηση της από το 0 μέχρι το 40% μειώνει τη θερμογόνο δύναμή της κατά 66%.

Η υγρασία μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο του 10%, για κάποια αγροτικά υπολείμματα όπως το άχυρο και τα τσόφλια, μέχρι πάνω από 60%, π.χ. για τη βαγιάση. Το ξύλο, το οποίο είναι βασική πηγή μεγάλων ποσοτήτων βιομάζας, έχει κατά μέσο όρο υγρασία μεταξύ 40 και 50%. Η βιομάζα που προέρχεται από κτηνοτροφικά απόβλητα (π.χ. κοπριά) ή από οργανικά υγρά απόβλητα (π.χ. τυρόγαλα) έχει γενικά πολύ υψηλή υγρασία, γεγονός που την καθιστά ευκολότερη στη μεταφορά της μέσω αντλιών [7].

### **Περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά**

Τα περισσότερα είδη βιομάζας έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε πτητικά σε σύγκριση με τους άνθρακες. Επίσης, η ποώδης βιομάζα τείνει να έχει σχετικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε πτητικά από τη ξυλώδη και ορισμένα αγροβιομηχανικά υπολείμματα – μια γενική τάση είναι ότι όσο μικρότερη η περιεκτικότητα σε λιγνίνη, τόσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα σε πτητικά της βιομάζας.

Σε εφαρμογές καύσης, μια μεγάλη περιεκτικότητα σε πτητικά σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του καυσίμου ελευθερώνεται γρήγορα στην αέρια φάση. Έτσι, ο θάλαμος καύσης πρέπει να σχεδιάζεται καταλλήλως, ώστε να εξασφαλίζει την πλήρη καύση των αερίων αυτών [9].

### **Περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά**

Η συνολική οργανική ύλη προσδιορίζεται με τη μέθοδο διαφοράς από το 100 από το ποσοστό περιεκτικότητας σε ανόργανη ύλη, το οποίο προκύπτει από την αποτέφρωση δειγμάτων βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας πρότυπες μεθόδους [10]. Τα ανόργανα συστατικά, ή αλλιώς τέφρα, είναι το υπόλειμμα που παραμένει μετά την πλήρη οξείδωση της καύσιμης ύλης. Η σύστασή τους διαφέρει ανάλογα με το είδος της βιομάζας [11].



### Θερμογόνος Δύναμη

Θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου ορίζεται ως το ποσό της παραγόμενης ενέργειας κατά την καύση μιας μονάδας μάζας του καυσίμου. Αναλόγως της φύσης του νερού που παράγεται κατά την αντίδραση της καύσης, η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε: α) ανώτερη (ΑΘΔ), όπου το νερό βρίσκεται σε υγρή μορφή και β) κατώτερη (ΚΘΔ), όπου το παραγόμενο νερό απαντάται σε αέρια μορφή (υδρατμοί). Η διαφορά μεταξύ ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης είναι η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης των ατμών νερού. Ως εκ τούτου, η κατώτερη θερμογόνος δύναμη των καυσίμων υπολογίζεται από την ανώτερη θερμογόνο δύναμη με αφαίρεση της λανθάνουσας θερμότητας των ατμών. Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι υψηλότερη από 100°C. Επομένως, η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου είναι αυτή που θα δώσει το θερμικό περιεχόμενο που εκλύεται κατά την καύση ενός καυσίμου [12].

### Διαστάσεις Σωματιδίων, Πυκνότητα Υλικού Χύδην

Ανάλογα με τη διεργασία προετοιμασίας του καυσίμου, τα καύσιμα βιομάζας είναι διαθέσιμα είτε σαν υλικό χύδην (π.χ. θρύμματα ξύλου, πριονίδι), είτε σαν υλικό σε τεμάχια (π.χ. δεμάτια αχύρου, καυσόξυλα). Το μέγεθος των σωματιδίων και η κατανομή μεγεθών των σωματιδίων προσδιορίζει το κατάλληλο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και την τεχνολογία καύσης. Η πυκνότητα του υλικού χύδην κυμαίνεται μεταξύ 150-200 kg/m<sup>3</sup> για το άχυρο και το στάρι, ενώ 600-900 kg/m<sup>3</sup> για το ξηρό ξύλο.

### 2.3 Υπολειμματικές Μορφές Βιομάζας

Τα παραπροϊόντα που προέρχονται από τη βιομηχανική επεξεργασία των φυτικών, ζωικών και δασικών υλικών, μαζί με τα αστικά απόβλητα και τα σκουπίδια καλούνται υπολειμματικές μορφές βιομάζας. Περιλαμβάνουν κυρίως α) αγροτικά υπολείμματα, όπως κοπριά ζώων και υπολείμματα από συγκομιδή σοδειών σε αγροτικές και συναφείς διεργασίες, (β) υπολειμματικές μορφές ξύλου και σχετικά υπολείμματα στα δάση από δασοκομικές δραστηριότητες και από παραγωγή κούτσουρων, (γ) τα απόβλητα της αγροτικής και της σχετικής με δάση βιομηχανίας, όπως η βιομηχανία πολτού και χάρτου και η βιομηχανία παραγωγής τροφών και (δ) τα στερεά αστικά απόβλητα.



### 2.3.1 Αγροτικά υπολείμματα

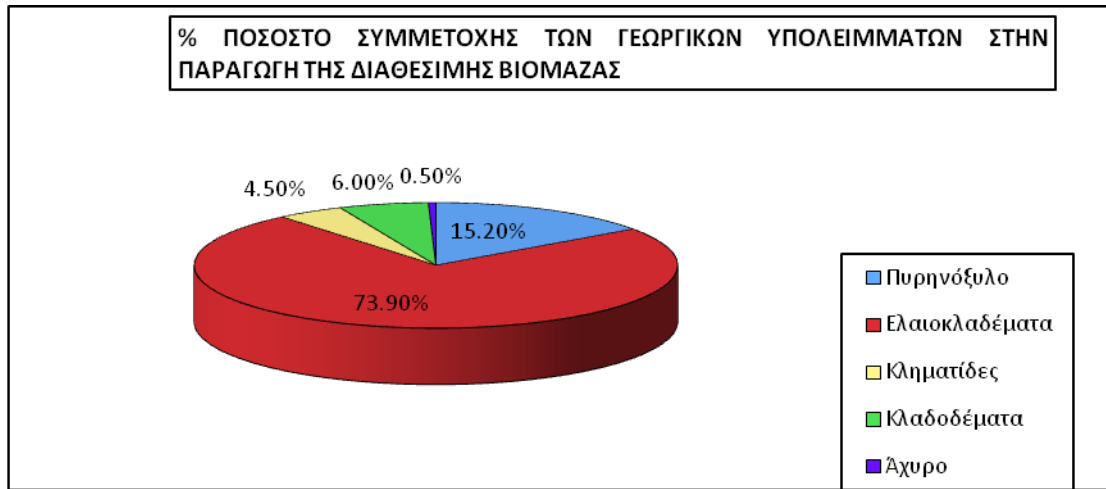
Ένας από τους κοινοτικούς στόχους είναι η ανάπτυξη της Γεωργίας και Βιομηχανίας χωρίς επιβάρυνση του περιβάλλοντος για το γενικό σύνολο. Δυστυχώς, σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, όπως και στην Ελλάδα, γεωργικά παραπροϊόντα και υπολείμματα γεωργικών βιομηχανιών και δραστηριοτήτων συνήθως απορρίπτονται σαν άχρηστα και πολλές φορές αποτελούν σοβαρά προβλήματα ρύπανσης και μόλυνσης του περιβάλλοντος. Θα μπορούσαν όμως πολλά από αυτά μετά από κατάλληλη επεξεργασία να αποτελέσουν νέο οικονομικό πόρο, υπακούοντας ταυτόχρονα στους κανόνες περιβαλλοντικής προστασίας. Η αξιοποίηση αυτών των πρώτων υλών, αποβλήτων ή παραπροϊόντων, που συνήθως είναι χαμηλού ή και αρνητικού κόστους, μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής ανά μονάδα και ταυτόχρονα να δημιουργήσει νέες θέσεις εργασίας που θα προκύψουν από την αξιοποίηση αυτή.

Μεταξύ των οργανικών στερεών ή ημιστερεών οργανικών αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, από πλευράς ποσοτήτων για τον Ελλαδικό χώρο, μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Άχυρα δημητριακών
- Στελέχη καλαμποκιού και βαμβακιού
- Υποπροϊόντα ελαιουργείων
- Υπολείμματα βιομηχανιών χυμών εσπεριδοειδών
- Στέμφυλα οиноποιίας

Τέλος, η αξιοποίηση και η διαχείριση τέτοιων αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων και παραπροϊόντων αποβλέπει και στην έκδοση οικολογικού σήματος (Eco-label) των προϊόντων, το οποίο σήμα θα δίνεται σε εκείνα τα οποία προέρχονται από διαδικασίες με μικρή ή καθόλου περιβαλλοντική επίπτωση. Το πιο κάτω διάγραμμα (2.3.1) απεικονίζει το ποσοστό συμμετοχής των αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων στην Κρήτη.





**Διάγραμμα 2.3.1:** % Ποσοστό συμμετοχής των γεωργικών υπολειμμάτων στην παραγωγή της διαθέσιμης βιομάζας στην Κρήτη [ΚΑΠΕ] [13]

### 2.3.2 Αξιοποίηση υποπροϊόντων από την ελαιοουργία

Ένα από τα πιο σημαντικά υποπροϊόντα που παράγει η Ελαιοουργία είναι το πυρηνόξυλο (Εικόνα 2.3.2). Το πυρηνόξυλο ελαιοπυρήνων είναι παραπροϊόν της διαδικασίας εξαγωγής του πυρηνελαίου. Η ετήσια παραγωγή πυρηνόξυλου στην Ελλάδα ανέρχεται περίπου σε 300.000 τόνους, και προέρχεται από τους 460.000 τόνους ελαιοπυρήνα που παράγονται σε 3.500 ελαιοτριβεία σε όλη την επικράτεια. Το πυρηνόξυλο αν και πλούσιο σε θρεπτικές ουσίες, στην φυσική του κατάσταση δεν είναι εύληπτο από τα ζώα, λόγω του υψηλού ποσοστού σε ξυλώδη ιστό που περιέχει.

Στα διάφορα πυρηνελαιοουργεία το πυρηνόξυλο διαχωρίζεται στη σάρκα (ψίχα), που δεν περιέχει ξυλώδη ιστό, και που είναι πλέον κατάλληλο για ζωοτροφή, και σε ξύλο.

Στην πράξη όμως, συνήθως, δεν υπάρχει αγορά για την ψίχα σαν ζωοτροφή και εξάγονται δύο ποιότητες πυρηνέλαιο από ψίχα (καλύτερο) και από ξύλο (δεύτερης ποιότητας). Οι παραγωγοί μετά από ανάμιξη των δύο αυτών ειδών πυρηνελαίου επιτυγχάνουν τιμές με σημερινά στοιχεία γύρω στις 110 ευρώ / tn.

Το πυρηνόξυλο όταν αναμιχθεί με υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων και κομποστοποιηθεί παράγει ένα εδαφοβελτιωτικό πολύ καλής ποιότητας, με ταυτόχρονη εξάλειψη της τοξικότητας των απονέρων ελαιοουργείων. Επίσης, το πυρηνόξυλο χρησιμοποιείται για παραγωγή θερμικής ενέργειας, όπου ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής αυτής είναι αρκετά υψηλός περίπου 70-80%. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μετά από καύση και παραγωγή ατμού. Ωστόσο ο βαθμός απόδοσης που προκύπτει από τη διαδικασία αυτή είναι χαμηλός, της τάξης του 20% [9].

Άλλες πιθανές χρήσεις του πυρηνόξυλου είναι η παραγωγή ενεργού άνθρακα, φουρφουρόλης, μοριοσανίδες κτλ [9].





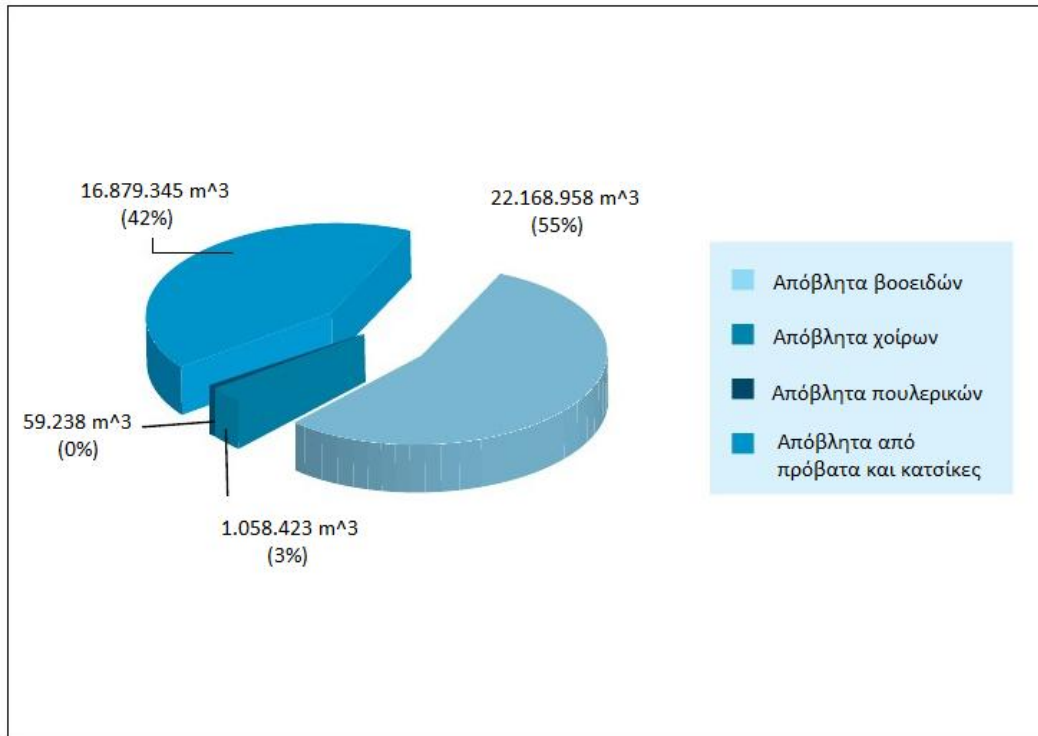
**Εικόνα 2.3.2:** Πυρήνας ελιάς

### **2.3.3 Αξιοποίηση ζωικών υποπροϊόντων**

Λόγω της ανάπτυξης της κτηνοτροφίας στην Ελλάδα, τα ζώα παράγουν μία σημαντική ποσότητα αποβλήτων (κοπριά, λυματολάσπη, οστά κτλ). Σύμφωνα με οδηγία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, κανονισμός 1774/2002, επιβάλλεται στα Κράτη μέλη η μη χρησιμοποίηση ζωικών αποβλήτων στη διατροφική αλυσίδα των ζώων, εφόσον αυτά πρόκειται να καταναλωθούν από ανθρώπους. Αποτέλεσμα της πράξης αυτής είναι η ανεκμετάλλευτη ποσότητα απόβλητων. Η εφαρμογή του κανονισμού οδήγησε στη συρρίκνωση της αγοράς διάθεσης των ζωικών αποβλήτων και στην επακόλουθη πτώση της εμπορικής τους αξίας, με άμεσο αντίκτυπο στις μονάδες σφαγής ζώων και πτηνών, στις οποίες παράγονται σημαντικές ποσότητες ζωικών αποβλήτων, ως υποπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας. Η τεχνολογία της καύσης για την ενεργειακή αξιοποίηση ζωικών αποβλήτων δεν έχει τύχει ευρείας εφαρμογής σε διεθνές επίπεδο, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν κατευθυντήριες βιβλιογραφικές αναφορές, σχετικά με την ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση τέτοιου είδους μονάδων.

Ωστόσο, το δυναμικό τους για παραγωγή ενέργειας θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Βάση των στοιχείων από την απογραφή του ζωικού κεφαλαίου της Αγροτικής Τράπεζας, ο συνολικός αριθμός των βουστασίων, χοιροτροφείων και ορνιθοτροφείων ανέρχεται στις 803 μονάδες, με το μεγαλύτερο μέρος να αναφέρεται στην εκτροφή αγελάδων (355), ενώ οι μονάδες εκτροφής χοίρων και κοτόπουλων είναι 277 και 171, αντίστοιχα. Ο όγκος των παραγόμενων αποβλήτων ημερήσια που προκύπτουν από τα βουστάσια, τα χοιροτροφεία και τα ορνιθοτροφεία στην Ελλάδα είναι  $22.168.958 \text{ m}^3$ ,  $16.879.345 \text{ m}^3$  και  $1.058.423 \text{ m}^3$  και παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.3.3 [12].





**Διάγραμμα 2.3.3 :** Εκτίμηση παραγωγής ζωικών αποβλήτων στην Ελλάδα [14].

#### 2.3.4 : Αξιοποίηση αστικής και βιομηχανικής λυματολάσπης

Η ιλύς (λυματολάσπη ή κατακάθι) που παράγεται από τις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων έχει μεγάλη υγρασία (75-85%), μικρή συνοχή (δεν επιτρέπει την απόθεση σε μεγάλους σωρούς) και χαρακτηρίζεται από δυσάρεστη οσμή. Περιέχει οργανικές ουσίες, θρεπτικά συστατικά, βαρέα μέταλλα (κατά περιοχές) και παθογόνους μικροοργανισμούς. Η διαχείριση της ιλύος περιλαμβάνει τη συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία και διάθεση αυτής με στόχο την ελάττωση του όγκου, την αποδόμηση των οργανικών ουσιών, τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών και την προστασία του γεωπεριβάλλοντος.

Οι τεχνικές προδιαγραφές διαχείρισης ιλύων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών αποβλήτων καθορίζονται με την ΚΥΑ 114218/97 (ΦΕΚ 1016Β/17-11-1997) «Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων».

Η επεξεργασία της ιλύος πριν την τελική διάθεση περιλαμβάνει τη συμπύκνωση, τη βιολογική χώνευση (αποδόμηση οργανικών ουσιών), την παχυρευστοποίηση (αφαίρεση νερού με μηχανικά μέσα), την αφυδάτωση και ξήρανση (μέγιστη δυνατή απομάκρυνση νερού). Η ξήρανση μπορεί να γίνει σε αμμοκλίνες ξήρανσης, σε δεξαμενές εξάτμισης, με διύλιση υπό πίεση (φιλτρόπρεσσα), με φυγοκέντρωση και δόνηση και τέλος με θερμική ξήρανση. Με την ξήρανση επιτυγχάνεται μείωση του νερού της λάσπης



από 70% σε 5-8%, καθώς και ολοσχερής εξόντωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Η ξήρανση αποτελεί μέθοδο επεξεργασίας και όχι μέθοδο τελικής διάθεσης της ιλύος. Η τελική διάθεση της ιλύος γίνεται με: 1) υγειονομική ταφή, 2) καύση και 3) παραγωγή εδαφοβελτιωτικού αξιοποιώντας τα οργανικά και ανόργανα θρεπτικά συστατικά της. Κάθε μία από τις ανωτέρω λύσεις έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

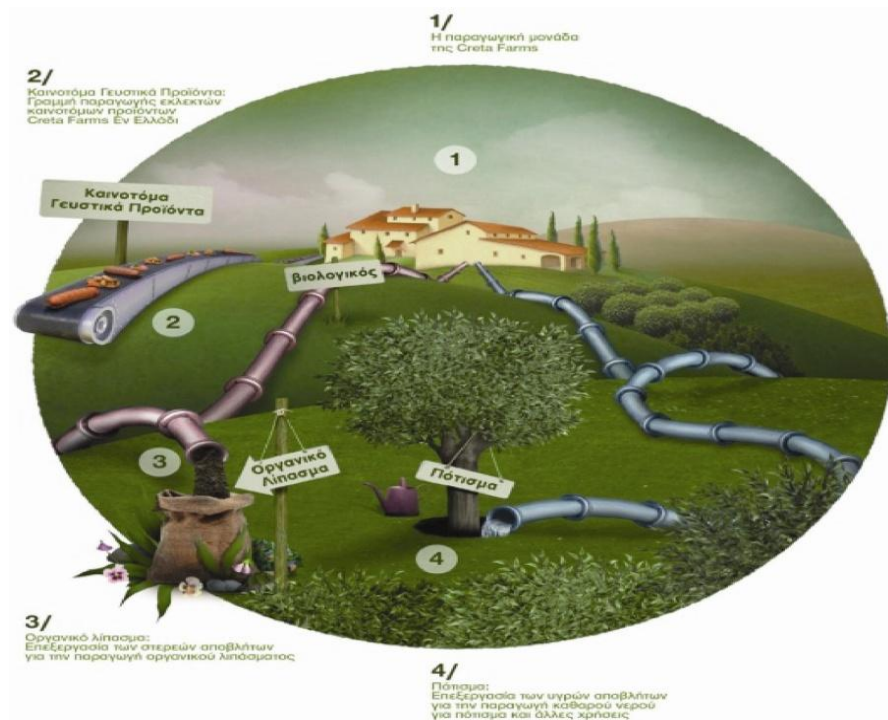
Η μέθοδος της καύσης της ιλύος στοχεύει στη μείωση του όγκου της στο ελάχιστο δυνατό, στην παραγωγή αποστειρωμένου αδρανούς υπολείμματος και στην παραγωγή ενέργειας. Η παραγόμενη τέφρα περιέχει βαρέα μέταλλα και η διάθεσή της σε ΧΥΤΑ εγκυμονεί κινδύνους για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Επίσης, κατά την καύση της λάσπης εκπέμπονται διοξίνες και φουράνια (PCDD/PCDF), που είναι επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία. Η καύση ιλύος στην τσιμεντοβιομηχανία έχει τα κάτωθι πλεονεκτήματα: περιορίζει εκπομπές CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>, εξασφαλίζει την καταστροφή των μικροοργανισμών, δεν αφήνει υπολείμματα, υποκαθιστά ορυκτά καύσιμα και τέλος τα βαρέα μέταλλα της τέφρας γίνονται αδιάλυτα συστατικά του τσιμέντου. Για την καύση της ιλύος στην τσιμεντοβιομηχανία απαιτείται αφυδάτωση πριν την καύση της, αποστείρωση και έλεγχος των παραγόμενων αερίων και ιδιαίτερα του υδραργύρου. Εναλλακτική λύση αποτελεί η καύση της ιλύος στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Πειράματα έχουν δείξει ότι ανάμειξη τσιμέντου και βιομηχανικής στάχτης (fly ash) στερεοποιεί την ιλύ [15].

Ένα πολύ σημαντικό ζητούμενο που προκύπτει από την «πράσινη» στρατηγική της CRETA FARM όσο αφορά το υλικό που εκπονείται η συγκεκριμένη μελέτη, είναι η μεγιστοποίηση της δυνατότητας ανακύκλωσης υλικών, παραπροϊόντων και αποβλήτων. Η μεγιστοποίηση αυτή μπορεί και επιτυγχάνεται μόνο μέσω σημαντικών και κυρίως συνεχών επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες, παρά το υψηλό κόστος των επενδύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων της χοιροτροφικής μονάδας και του εργοστασίου αλλαντικών γίνεται σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού. Το παραγόμενο νερό του βιολογικού χρησιμοποιείται για το πότισμα όλων των δέντρων και καλλωπιστικών φυτών που υπάρχουν στην εταιρία. Ένα μεγάλο μέρος του αξιοποιείται σε διάφορες χρήσεις, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις για καθαρό νερό, ενώ προβλέπεται στο άμεσο μέλλον και η χρήση του για άρδευση αγροτικών καλλιεργειών αλλά και περιαστικού πρασίνου.

Στα στερεά απόβλητα, η φιλοσοφία της ανακύκλωσης βρίσκει την καλύτερη εφαρμογή της στη σύγχρονη, μοναδική στο είδος της, υψηλής τεχνολογίας μονάδα επεξεργασίας (κομποστοποίησης), η οποία αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία και χρησιμοποιείται για την επεξεργασία της χοιρινής κοπριάς. Το προϊόν της μονάδας κομποστοποίησης χρησιμοποιείται ως πλούσιο σε θρεπτικά μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία εδαφοβελτιωτικό, συνεισφέροντας στη σημαντική μείωση της χρήσης χημικών λιπασμάτων από τους καλλιεργητές, αλλά και την ουσιαστική βελτίωση της δομής των αγροτικών εδαφών, αυξάνοντας σημαντικά τις αποδόσεις των καλλιεργειών.



Αξίζει λοιπόν να σημειωθεί ότι σε ολόκληρη την Κρήτη, με την τόσο ανεπτυγμένη κτηνοτροφία, η CRETA FARMS έχει τη μοναδική πλήρως αδειοδοτημένη μονάδα αδρανοποίησης ζωικών αποβλήτων. Η Εικόνα 2.3.4 παρουσιάζει την πορεία που ακολουθείται για το βιολογικό καθαρισμό στην εταιρεία της Creta Farm [16]. Παρ'όλα αυτά, η εταιρεία έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των στερεών αποβλήτων για την παραγωγή τόσο θερμότητας για ίδια χρήση, όσο και ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.3.4: Βιολογικός καθαρισμός Creta farm[16]

### 2.3.5: Αξιοποίηση Κρεατάλευρου

Το κρεατάλευρο αποτελείται από κρέας και οστεάλευρα, αλλά και είδη αλλαντοποιίας (MBM), που παράγονται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υπολειμμάτων σφαγίων, όπου τα εντόσθια των ζώων και τα οστά αναμιγνύονται, συνθλίβονται και οδηγούνται σε αυτόκλειστο (είδος κλιβάνου, του οποίου η λειτουργία είναι πολύ παρόμοια με μια χύτρα ταχύτητας), όπου αφυδατώνονται και θερμαίνονται για



τουλάχιστον 20 λεπτά σε θερμοκρασία τουλάχιστον 133 °C και πίεση τουλάχιστον 3bar (Εικόνα 2.3.5). Η ευρωπαϊκή νομοθεσία έχει εκδώσει νόμο για τον καθορισμό των κατάλληλων συνθηκών για την παροχή MBM (ΕΕ) αριθ. 142/2011 (σελ. 30) για την 1<sup>η</sup> μέθοδο μεταποίησης [16]. Στη συνέχεια, το ζωικό λίπος εκχυλίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θέρμανσης (Εικόνα 2.3.6). Η ασφαλής διάθεση του κρεατάλευρου είναι απαραίτητη για την αποφυγή προβλημάτων υγιεινής και παθολογικά μεταδοτικών ασθενειών. Η διάθεση σε χώρο υγειονομικής ταφής δεν αποτελεί επιλογή, γιατί απλά το θάψιμο του υλικού δεν μπορεί να καταστρέψει τυχόν σπογγώδη εγκεφαλοπάθεια των βοοειδών. Σήμερα, είναι φανερό ότι η πιο πιθανή εναλλακτική λύση για την εξάλειψη τους είναι η θερμική επεξεργασία, όπως καύση ή αεριοποίηση. Με αυτό τον τρόπο καταστρέφονται πιθανά παθογόνα παραγόντες της σπογγώδους εγκεφαλοπάθειας στις υψηλές θερμοκρασιακές διεργασίες, όπου το υλικό παραμένει σε αρκετά θερμούς αποτεφρωτήρες για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, με επαρκή παροχή οξυγόνου, και ως εκ τούτου αποκλείει τον κίνδυνο μεταγενέστερης λοίμωξης όσο το δυνατόν. Μια επιλογή είναι η συν-καύση του άνθρακα και του MBM, ώστε να εξασφαλιστεί ότι κάθε ζωντανός οργανισμός έχει εντελώς καταστραφεί και ταυτόχρονα αξιοποιείται το ενεργειακό δυναμικό [17].

Το MBM έχει θερμαντική αξία περίπου 17-20 MJ / kg και περιέχει μεγάλη ποσότητα λιπών και οργανικών ενώσεων, γεγονός που το καθιστά ελκυστικό υλικό για την ανάκτηση ενέργειας [18]. Η ρευστοποιημένη κλίνη καύσης έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες διεργασίες καύσης, ιδιαίτερα στη δυνατότητα χρήσης με διαφορετικούς τύπους υλικών. Αυτή η ιδιότητα όσον αφορά τη φύση του καυσίμου καθιστά πολύ κατάλληλο το σύστημα για μόνο-και συν-καύσης διεργασίες. Η συν-καύση του MBM με το γαιάνθρακα, θεωρείται μια βιώσιμη επιλογή, διότι το MBM θα μπορούσε να καταστραφεί σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν τεχνολογία ρευστοποιημένης κλίνης, στην οποία ο εξοπλισμός για τον καθαρισμό του φυσικού αερίου και το χειρισμό τέφρας έχει ήδη ενσωματωθεί, έτσι ώστε το κόστος για την αποβολή MBM θα είναι σχετικά σε χαμηλά επίπεδα.

Ωστόσο, η συμπεριφορά του MBM κατά την καύση πρέπει να κατανοηθεί καλύτερα, για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης. Ορισμένα θα μπορούσαν να συνδέονται με τη φύση των ανόργανων συστατικών του MBM, όπως η παρουσία του P, Cl, K, κτλ. Τα στοιχεία P και K μπορεί να οδηγήσουν σε συσσωμάτωση στην κλίνη, κάτι το οποίο έχει ήδη παρατηρηθεί [18].

Το Cl θα μπορούσε να εκπέμπεται ως HCl, ή θα μπορούσε να συνδυαστεί με K ή άλλα ανόργανα υλικά, με αποτέλεσμα τη ρύπανση και τη διάβρωση. Η παρουσία υψηλών ποσοτήτων οστών μπορεί να προκαλέσει απορευστοποίηση της κλίνης με συνεχή τροφοδοσία του καυσίμου, αν δεν έχουν ληφθεί μέτρα για την απομάκρυνση του υλικού της κλίνης, για να αποφευχθεί η συσσώρευση στο στρώμα.

Ένα άλλο πρόβλημα που σχετίζεται με την αξιοποίηση των MBM είναι η φύση της τέφρας που παράγεται. Η τέφρα πρέπει να χαρακτηρίζεται για τον προσδιορισμό της σύνθεσης και της τοξικότητάς της [16].





**Εικόνα 2.3.5 :** Υπολείμματα σφαγείων



**Εικόνα 2.3.6 :** Τελικό προϊόν MBM

## **2.4 Η Τεχνολογία της Καύσης σε Ρευστοποιημένη Κλίνη**

### **2.4.1 :Περιγραφή τεχνολογίας καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη (fluidised bed combustion, FBC)**

Τα συστήματα καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη βρίσκονται σε εφαρμογή από το 1960 για την καύση οικιακών και βιομηχανικών αποβλήτων. Από τότε, έχουν αναπτυχθεί σε παγκόσμια κλίμακα εκατοντάδες εγκαταστάσεις. Επίσης χρησιμοποιούνται στις χημικές βιομηχανίες και ειδικά στις Φυσικές Διεργασίες (ανάμειξη, θέρμανση ή ξήρανση των σωματιδίων), στις Χημικές Διεργασίες (καταλυτικές, χημικές αντιδράσεις όπως η διάσπαση υψηλών κλασμάτων πετρελαίου για την παρασκευή χαμηλότερων) και στην Μεταλλουργία (φρύξη, εναλλαγή θερμότητας).

Η ρευστοποιημένη κλίνη είναι ένα είδος κλειστού κλιβάνου που απαρτίζεται από ένα κυλινδρικό δοχείο με μία διάτρητη πλάκα στη βάση του, που είναι πληρωμένο με μία κλίνη θερμού, αδρανούς και κοκκώδους υλικού σε αιώρηση. Ρευστοποίηση (fluidization) στερεών σωματιδίων καλείται η μετατροπή μιας σταθερής κλίνης σωματιδίων σε κατάσταση που μοιάζει με ρευστή. Αυτό γίνεται με ροή αέριου ή υγρού. Τότε οι δυνάμεις τριβής μεταξύ σωματιδίων και ρευστού ισούνται με τη δύναμη βαρύτητας και τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την πλήρωση της κλίνης είναι κυρίως πυριτική άμμος, δολομίτης και άστριος. Το υλικό της κλίνης αποτελεί το 90-98% του μίγματος καυσίμου και υλικού κλίνης.

Το βασικό πλεονέκτημα των ρευστοποιημένων έναντι των σταθερών κλινών είναι η πολύ καλή ανάμειξη των σωματιδίων και του ρευστού. Έτσι επιτυγχάνεται πιο αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και μάζας



και επομένως ταχύτερες χημικές αντιδράσεις και περισσότερο ομοιόμορφες θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις συστατικών. Οι ρευστοποιημένες κλίνες προτιμούνται για διεργασίες με σωματίδια μικρού σχετικά μεγέθους, όπου οι σταθερές κλίνες παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες λόγω αυξημένης πτώσης πίεσης και χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας [4,19,20].

Η έντονη μεταφορά θερμότητας και η πολύ καλή ανάμιξη του καυσίμου, του αέρα και του υλικού κλίνης, σε συνδυασμό με τον υψηλό χρόνο παραμονής του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, παρέχει καλές συνθήκες για πλήρη καύση με χαμηλές ανάγκες για περίσσεια αέρα. Η θερμοκρασία της καύσης έχει ομοιόμορφη κατανομή και πρέπει να παραμένει χαμηλή (συνήθως μεταξύ 750-900 °C), ώστε να αποφεύγεται η τήξη της τέφρας στην κλίνη [14].

#### 2.4.2 Εκπομπές NO<sub>x</sub> και CO από την καύση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη

FBC (fluidized bed

combustion

, με . Κατά τη διάρκεια της καύσης, τα σχηματιζόμενα NO<sub>x</sub> (95% NO, 5% NO<sub>2</sub>) δημιουργούνται μέσω τριών διαφορετικών διεργασιών και αντίστοιχα ονομάζονται ως θερμικά, άμεσα και καυσίμου NO<sub>x</sub>.

Τα θερμικά NO<sub>x</sub> σχηματίζονται όταν το άζωτο αντιδρά με το οξυγόνο στην αέρια φάση σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 1300 °C. Ο σχηματισμός των θερμικών NO<sub>x</sub> είναι ανάλογος με τη θερμοκρασία.

Τα άμεσα NO<sub>x</sub> σχηματίζονται σε φλόγες πλούσιες σε υδρογονάνθρακες από διάσπαση ελευθέρων ριζών που περιέχουν άζωτο στο μόριό τους και πρακτικά δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία καύσης.

Παράλληλα, τα NO<sub>x</sub> του καυσίμου σχηματίζονται μέσω φυσικοχημικών μετασχηματισμών του καυσίμου κατά τη διάρκεια της καύσης. Η παραγωγή τους είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, σε κανονικές συνθήκες καύσης.

Το περισσότερο σημαντικό τελικό ενδιάμεσο προϊόν της καύσης βιομάζας σε FBC είναι το CO. Ο ρύπος αυτός προέρχεται κύρια από ατελή καύση, η οποία είναι το αποτέλεσμα χαμηλής θερμοκρασίας καύσης, μη αρκετής ανάμειξης του καυσίμου με αέρα καύσης και πολύ βραχέων χρόνων παραμονής των καυσίμων αερίων στη ζώνη καύσης. Οι μεγάλης κλίμακας εφαρμογές καύσης βιομάζας προσφέρουν συνήθως καλύτερες ευκαιρίες για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας της καύσης, από ότι οι μικρής κλίμακας εφαρμογές καύσης βιομάζας. Έτσι, τα επίπεδα εκπομπών CO, είναι συνήθως χαμηλότερα σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές καύσης βιομάζας [13].



Μια βιομηχανική εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 2.4.1.



**Εικόνα 2.4.1:** Ρευστοποιημένη κλίνη για την καύση άνθρακα[21]



### 3.1 Πειραματική Διάταξη

Η πραγματοποίηση των πειραμάτων έλαβε χώρο στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε μια εργαστηριακής κλίμακας συσκευή ρευστοποιημένης κλίνης (Εικόνα 3.1).

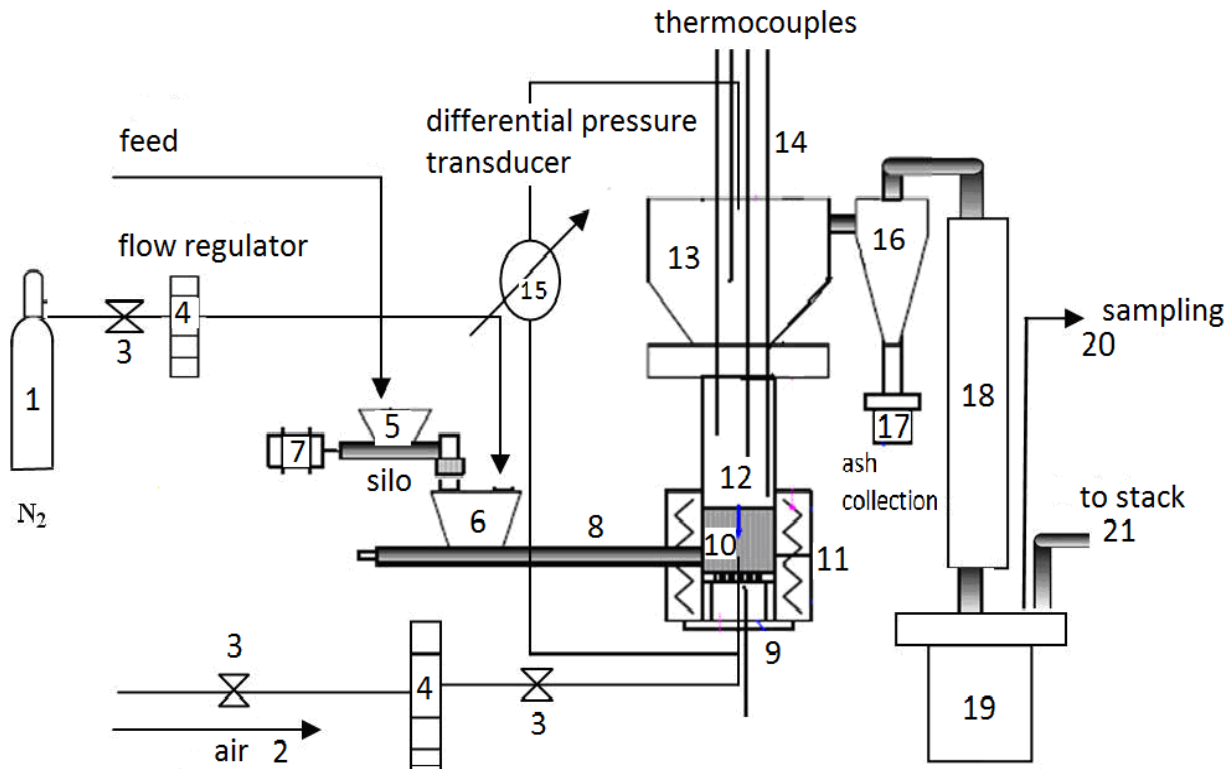
Η συσκευή αυτή απαρτίζεται από 5 μέρη :

- 1) Το σύστημα τροφοδοσίας
- 2) Τον αντιδραστήρα
- 3) Σύστημα συλλογής της ιπτάμενης τέφρας
- 4) Σύστημα καταγραφής αερίων εξόδου
- 5) Σύστημα καταγραφής παραμέτρων



**Εικόνα 3.1:** Ρευστοποιημένη κλίνη





1	Παροχή αζώτου	12	Κλίνη σωματιδίων
2	Παροχή αέρα	13	Ελεύθερο όριο (freeboard)
3	Βαλβίδα	14	Θερμοστοιχεία
4	Ροόμετρο	15	Διαφορικό μανόμετρο
5, 6	α' και β' σιλό τροφοδοσίας καυσίμου	16	Κυκλώνας
7	Inverter + ηλεκτρικό μοτέρ	17	Δοχείο συλλογής τέφρας
8	Κοχλίας	18	Ψύκτης
9	Φλάτσα	19	Δοχείο συμπύκνωσης
10	Διασκορπιστής	20	Γραμμή δειγματοληψίας
11	Ηλεκτρικές αντιστάσεις	21	

Διάγραμμα 3.1 : Ρευστοποιημένη κλίνη



### 3.1.1 Σύστημα τροφοδοσίας

Η τροφοδοσία του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω δύο σιλό, τα οποία περιέχουν κοχλίες που περιστρέφονται από ηλεκτρικό κινητήρα και μειωτήρα. Στο πρώτο σιλό γίνεται η αποθήκευση του καυσίμου και στη βάση του σιλό βρίσκεται ο πρώτος ατέρμονας κοχλίας, ο οποίος καλείται δοσιμετρικός. Ο δοσιμετρικός κοχλίας τροφοδοτεί το δεύτερο σιλό με μικρά «πακέτα» καυσίμου μέσω κατακόρυφα τοποθετημένου σωλήνα διαμέτρου 2΄΄.

Ακολουθώντας, στη βάση του δεύτερου σιλό υπάρχει ο τροφοδοτικός κοχλίας, ο οποίος τροφοδοτεί το καύσιμο μέσα στην κλίνη σε σημείο 20mm πάνω από το διασκορπιστή του αέρα ρευστοποίησης. Η περιστροφή του κοχλία στο δεύτερο σιλό γίνεται πιο γρήγορα, για την αποφυγή της συγκέντρωσης καυσίμου και έτσι επιτυγχάνεται εξομάλυνση παροχής καυσίμου στην κλίνη. Η παροχή του καυσίμου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα που δίνει κίνηση στον τροφοδοτικό κοχλίας. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ρυθμίζεται μέσω κατάλληλου αντιστροφέα συχνότητας (inverter). Στο δεύτερο σιλό διοχετεύεται μια μικρή ροή αζώτου, προκειμένου να αποφευχθεί αναστροφή της ροής των καυσαερίων. Ένα υδρόψυκτο στεφάνι τοποθετήθηκε γύρω από το σωλήνα που καλύπτει τον κοχλίας τροφοδοσίας, για να αποτρέψει την καύση των καυσίμων στο εσωτερικό του σωλήνα, πριν από την είσοδο τους στον καυστήρα. Οι κοχλίες τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από ανοξείδωτο χάλυβα για τσιμέντο.

Ο αέρας εισέρχεται κάτω από το εξωτερικό μέρος της κλίνης μέσα στον αντιδραστήρα, περνώντας μέσα από τις οπές του διασκορπιστή, οι οποίες εξασφαλίζουν ομοιόμορφη ροή. Για τη ρύθμιση της παροχής του αέρα χρησιμοποιούνται ροόμετρα.

### 3.1.2 Αντιδραστήρας

Ο πυρήνας του αντιδραστήρα αποτελείται από έναν κυλινδρικό σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα (SS310), διαμέτρου 7cm και ύψους 150cm, και ένα κωνικό τμήμα 40cm στο επάνω μέρος. Σε ύψος 50cm από τη βάση του αντιδραστήρα τοποθετείται μια πορώδης πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 5mm (διασκορπιστής), η οποία συγκρατεί το αδρανές υλικό στο κέντρο περίπου του πυρήνα, ενώ επιτρέπει στον αέρα, ο οποίος εισέρχεται από τη βάση του κυλίνδρου, να περνάει και να προκαλεί τη ρευστοποίηση του αδρανούς υλικού. Ο χώρος πάνω από την κλίνη του αδρανούς υλικού ονομάζεται freeboard (ελεύθερο όριο), και μέσα σε αυτόν επιτυγχάνεται η μείωση της ταχύτητας του καυσαερίου και ο περιορισμός της απομάκρυνσης του υλικού της κλίνης λόγω συμπαρασυρμού.

Η κλίνη περιβάλλεται από ηλεκτρικές αντιστάσεις για την προθέρμανσή της και τη διατήρηση της θερμοκρασίας της. Το σύστημα των ηλεκτρικών αντιστάσεων ελέγχεται από PID ρυθμιστές. Η κλίνη είναι μονωμένη εξωτερικά από στρώσεις κεραμοβάμβακα.



Ο έλεγχος της θερμοκρασίας πραγματοποιείται μέσω ενός ρυθμιστή θερμοκρασιών με 5 θερμοστοιχεία, τύπου K, εσωτερικά του πυρήνα του αντιδραστήρα και μέσω ενός ενσωματωμένου στις αντιστάσεις θερμοστοιχείου.

### 3.1.3 Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας

Το καυσαέριο που παράγεται από την κλίνη σωματιδίων κατευθύνεται μέσω σωληνώσεων σε έναν κυκλώνα, για να απομακρυνθεί η ιπτάμενη τέφρα από την καύση, όπως επίσης και άλλα σωματίδια (άκαυστα ή αδρανές). Η τέφρα που ανακτάται συλλέγεται σε δοχείο, που έχει προσαρμοστεί στο κάτω μέρος του κυκλώνα.

Το αέριο καθαρό από σωματίδια διοχετεύεται σε σύστημα ψύξης / συμπύκνωσης με νερό, για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συμπυκνώσιμων ενώσεων. Τα συμπυκνώματα συλλέγονται σε δοχείο που διαθέτει βάνα για το άδειασμά του όταν γεμίσει. Για λόγους ασφαλείας, στην έξοδο της εγκατάστασης το απαέριο διοχετεύεται μέσω σωληνώσεων σε απαγωγό.

### 3.1.4 Σύστημα δειγματοληψίας και ανάλυσης καυσαερίων

Η γραμμή δειγματοληψίας καυσαερίου τοποθετείται μετά από τον κυκλώνα και το δοχείο συλλογής της ιπτάμενης τέφρας.

Το δείγμα του καυσαερίου ψύχεται για να απομακρυνθούν οι υδρατμοί. Στη συνέχεια το πλέον ξηρό δείγμα καυσαερίου διοχετεύεται σε on-line αναλυτή καυσαερίων τύπου Madur Ga-40plus της Sick-Maihak, (Εικόνα 3.1.4) που είναι εξοπλισμένος με ενσωματωμένο φίλτρο και ξηραντήρα. Ο αναλυτής καταγράφει την περιεκτικότητα του καυσαερίου σε οξυγόνο ( $O_2$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) και οξείδια του αζώτου ( $NO_x$ ). Επίσης, ο αναλυτής μετρά την απώλεια θερμότητας, τη θερμοκρασία των καυσαερίων και το συντελεστή περίσσειας αέρα λ. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου γίνεται επεξεργασία τους.





**Εικόνα 3.1.4:** Ο αναλυτής Madur Ga-40plus

## 3.2 Καύσιμα

### 3.2.1 Επιλογή και προέλευση καυσίμου

Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν το πυρηνόξυλο (Εταιρεία Μύλοι Κρήτης), κρεατάλευρο (Meat and bone Meal) και λυματολάσπη (sewage sludge) από την εταιρεία Creta Farm.

Το πυρηνόξυλο είναι ένα ξυλώδες υλικό που προκύπτει από τη διεργασία διάσπασης της ελιάς σε ελαιόλαδο και βιομάζα (σπασμένο κοκκούτσι) (Εικόνα 3.2.3). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους παρακάτω σκοπούς:

- (α) Παραγωγή ενέργειας σε αγροτικές βιομηχανίες  
(πυρηνελαιουργεία, ελαιουργεία, ραφιναρία λαδιών, σαπωνοποιείο).
- (β) Παραγωγή ενέργειας σε βιοτεχνίες, βιομηχανίες  
(τυροκομία, φούρνοι, πλυντήρια ρούχων, καζάνια τσικουδιάς, ασβεστοποιείες).
- (γ) Θέρμανση κατοικιών, ξενοδοχείων.
- (δ) Θέρμανση θερμοκηπίων.
- (ε) Παραγωγή α' ύλης για ζωοτροφές



Το κρεατάλευρο χρησιμοποιείται ως τροφή. Μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη ζωοτροφών μόνο για ζώα κατοικίδια (σκύλοι, γάτοι κτλ). Η διαδικασία παραγωγής της τροφής είναι: Όλα τα υποπροϊόντα από τη σφαγή, αλλά και από όλη την παραγωγική διαδικασία του τεμαχιστηρίου κρέατος και της αλλαντοποίησης (κομματάκια κρέατος, δοκιμαστικά προϊόντα, ληγμένα αλλαντικά που επιστρέφουν στην εταιρεία για επεξεργασία, αποστεωμένα κόκκαλα κλπ) οδηγούνται σε αυτόκλειστο (είδος κλιβάνου), του οποίου η λειτουργία είναι πολύ παρόμοια με χύτρα ταχύτητας, όπου αφυδατώνονται και θερμαίνονται για τουλάχιστο 20 λεπτά σε θερμοκρασία περίπου 133 °C. Η πίεση που επικρατεί είναι 3 bar. Αυτές οι προδιαγραφές έχουν τεθεί με βάση τον κανονισμό (ΕΕ) αριθ. 142/2011 (σελ. 30) για την 1<sup>η</sup> μέθοδο μεταποίησης. Αμέσως μετά το τέλος της διεργασίας αυτής διαχωρίζεται το λίπος από το κρεατάλευρο. Τελευταίο στάδιο είναι η άλεση του κρεατάλευρου, ώστε να πάρει μια «αλευρώδη» μορφή (Εικόνα 3.2.2).

Για τη λυματολάσπη δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη επεξεργασία. Η πρωτοβάθμια λάσπη αποτελείται από όλα εκείνα τα στερεά (οργανικά κατά το μεγαλύτερο μέρος) που διαχωρίζονται από το υγρό των αποβλήτων του χοιροστασίου πριν από οποιαδήποτε άλλη φυσικοχημική επεξεργασία. Ο διαχωρισμός γίνεται με φυγοκεντρικούς διαχωριστές (decanters). Η δευτεροβάθμια λάσπη είναι αυτή που προκύπτει από το διαχωρισμό της περίσσειας βιομάζας του βιολογικού με τη χρήση φιλτρόπρεσσας [15]. Στην πειραματική διαδικασία ως καύσιμο χρησιμοποιήθηκε η πρωτοβάθμια λάσπη (Εικόνα 3.2.4).

Τα συγκεκριμένα καύσιμα επιλέχθηκαν με σκοπό την αξιοποίησή τους για καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη.



**Εικόνα 3.2.2 :** Τελικό προϊόν MBM



**Εικόνα 3.2.3 :** Τελικό προϊόν Πυρηνόξυλου





**Εικόνα 3.2.4 :** Τελικό προϊόν Λάσπης

### **3.2.2 Προετοιμασία δειγμάτων**

Τα δείγματα αρχικά προξηράνθηκαν με φυσικές μεθόδους (ήλιος), λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία. Ακολούθως ξηράνθηκαν σε φούρνο (Εικόνα 3.2.5α) στο εργαστήριο σε θερμοκρασία από 80-100<sup>0</sup>C, έπειτα χρησιμοποιήθηκε μαχαιρόμυλος (Pulverisette 15 της εταιρίας FRITSCH) (Εικόνα 3.2.5β) για την άλεση του πυρηνόξυλου και κατόπιν πραγματοποιήθηκε κοσκίνιση σε μια συσκευή δονούμενων κόσκινων (μοντέλο Analysette 3 PRO της εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.2.5δ), προκειμένου να αποκτήσουν τα υλικά κοκκομετρία +850 -2800μm. Για τη λάσπη χρησιμοποιήθηκε σιαγωνοτός σπαστήρας (Pulverisette 1 της εταιρίας FRITSCH) (Εικόνα 3.2.5γ), σφαιρόμυλος (ball mill της εταιρίας SEPOR INC) (Εικόνα 3.2.5ε) και δονούμενα κόσκινα. Στο κρεατάλευρο πραγματοποιήθηκε μόνο κοσκίνιση. Η κοκκομετρία των δειγμάτων προσδιορίστηκε με βάση την συμπεριφορά τους σε πειραματική βαθμονόμηση στη ρευστοποιημένη κλίνη.





α) Φούρνος ξήρανσης



β) Μαχαιρόμυλος



γ) Σιαγωνοτός Σπαστήρας



δ) Δονούμενα κόσκινα



ε) Σφαιρόμυλος (ball mill)

**Εικόνα 3.2.5 : Όργανα προετοιμασίας δειγμάτων**



### 3.2.3 Ποιοτικός χαρακτηρισμός καυσίμων

Για το χαρακτηρισμό των καυσίμων βιομάζας που μελετήθηκαν λήφθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα από όλα τα υλικά, κοκκομετρίας  $-425\mu\text{m}$ . Κατά το χημικό χαρακτηρισμό που ακολούθησε έγινε προσεγγιστική ανάλυση σε προγραμματιζόμενους κλιβάνους υψηλών θερμοκρασιών (προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας, καύσιμης ύλης και τέφρας), του εργαστηρίου Εξευγενισμός και Τεχνολογία Στερεών Καυσίμων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, στοιχειακή ανάλυση με το στοιχειακό αναλυτή CHNS της εταιρείας Eurovector (προσδιορισμός ποσοστών C, H, N, O, S), καθώς και υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης με θερμιδόμετρο οβίδας τύπου AC – 350 της εταιρείας LECO στο

της Σχολής

### 3.2.4 Προσεγγιστική ανάλυση

Ένας πιο τυπικός τρόπος κατηγοριοποίησης της οργανικής σύστασης της βιομάζας είναι η λεγόμενη προσεγγιστική ανάλυση: ο διαχωρισμός της σύστασης της βιομάζας σε υγρασία, πτητικά, μόνιμο άνθρακα και τέφρα. Η προσεγγιστική ανάλυση δίνεται συνήθως επί ξηρού και μετράται σε εργαστήριο με χρήση των σχετικών Ευρωπαϊκών προτύπων (EN 15148 για τα πτητικά, EN 14775 για τέφρα και υγρασία EN 14774).

#### Προσδιορισμός υγρασίας:

Σύμφωνα με τα πρότυπα BS EN 14774, αντιπροσωπευτικό δείγμα 2 g ζυγίζεται σε αναλυτικό ζυγό με ακρίβεια 0,1 mg ( $m_1$ ) και έπειτα θερμαίνεται για 1 ώρα στους 105 °C. Στη συνέχεια, τοποθετείται για 20 λεπτά σε πυριαντήριο όπου επικρατεί έλλειψη υγρασίας και στη συνέχεια ξανά ζυγίζεται ( $m_2$ ). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρι 2 διαδοχικές τιμές να έχουν διαφορά βάρους μικρότερη των 0,2 mg.

Η υγρασία υπολογίζεται από τη σχέση 2.1 :

$$\text{Υγρασία \%} = [(m_1 - m_2)/m_1] \cdot 100 \quad (2.1)$$

Όπου,  $m_1$  = το αρχικό βάρος του δείγματος σε g

$m_2$  = το τελικό βάρος του δείγματος μετά ξήρανση σε g



### Προσδιορισμός τέφρας:

Ο όρος τέφρα χρησιμοποιείται για την περιγραφή των ανόργανων συστατικών ενός καυσίμου. Ο προσδιορισμός της τέφρας πραγματοποιήθηκε κατά τα πρότυπα BS EN 14775, σύμφωνα με τα οποία τα δείγματα καίγονται σε θερμοκρασία 550 °C. Μετά την καύση, τα δείγματα μεταφέρονται σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας, έως ότου να φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατόπιν ζυγίζονται στον αναλυτικό ζυγό και ο προσδιορισμός της τέφρας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Τέφρα \%} = (\text{υπόλειμμα καύσης}) / (\text{αρχικό ξηρό βάρος}) \quad (2.2)$$

Η χημική ανάλυση των τεφρών των δειγμάτων σε κύρια οξείδια και ιχνοστοιχεία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του οργάνου ICP – MS τύπου 7500cx της εταιρίας Agilent Technologies, στο εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών, της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος.

### Προσδιορισμός πτητικών συστατικών:

Τα πτητικά συστατικά προσδιορίστηκαν μέσω πειραμάτων σε αδρανή ατμόσφαιρα, χρησιμοποιώντας θερμοζυγό TGA- Perkin Elmer, στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων. Η σχέση που δίνει το ποσοστό των πτητικών είναι:

$$\text{Πτητικά (\% επί ξηρού)} = [(W_{110^{\circ}\text{C}} - W_{850^{\circ}\text{C}}) / W_{110^{\circ}\text{C}}] * 100. \quad (2.3)$$

$$W_{110^{\circ}\text{C}} \quad 110^{\circ} \quad W_{850^{\circ}\text{C}}$$

850°.

### Προσδιορισμός μόνιμου άνθρακα:

Ως μόνιμος άνθρακας χαρακτηρίζεται το ποσοστό του άνθρακα που δεν αντιδρά για την παραγωγή πτητικών προϊόντων (πτητικός άνθρακας), αλλά παραμένει και δημιουργεί το εξανθράκωμα μετά την πυρόλυση της βιομάζας.

$$) = 100 - \quad - \quad )$$



### Στοιχειακή ανάλυση:

EN15104

και EN

, του αζ

Euro Vector, Elemental Analysis CHNS-O

της Σχολής

. Στη στοιχειακή ανάλυση

προσδιορίζεται η κατά βάρος σύσταση της βιομάζας σε άνθρακα (C), υδρογόνο(H), οξυγόνο(O), άζωτο(N) και θείο (S). Ακόμα, συνηθίζεται και η μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλώριο (Cl). Με βάση τη στοιχειακή ανάλυση, μπορεί να γίνει λεπτομερής και επακριβής περιγραφή της διεργασίας της θερμοχημικής μετατροπής. Επίσης, η στοιχειακή σύνθεση της βιομάζας έχει άμεση επίδραση στο σχηματισμό ανεπιθύμητων εκπομπών ρύπων κατά την καύση της, π.χ το περιεχόμενο άζωτο της καίμενης βιομάζας συνεισφέρει σημαντικά στην εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) σε μονάδες καύσης βιομάζας (20-70% του αζώτου μετατρέπεται σε NO<sub>x</sub> ανεξάρτητα της θερμοκρασίας της αντίδρασης). Επίσης, το θείο σχηματίζει, κατά την καύση, οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>), τα οποία είναι διαβρωτικά και αντιδρώντας με υδρατμούς παράγουν θειικό οξύ, το οποίο είναι ανεπιθύμητο (όξινη βροχή κλπ).

### Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης:

EN14918. Η θερμογόνος δύναμη εκφράζει την ενέργεια που α

AC-350 της Leco

της Σχολής

[22].

### **3.3 Το Αδρανές Υλικό**

Χρησιμοποιήθηκε Na-ούχος άστριος, πυκνότητας  $\rho_s = 2670 \text{ kg/m}^3$  και μέσης διαμέτρου κόκκων  $d_s = 421 \mu\text{m}$  (κλάσμα  $355 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$ ). Η σύσταση του άστριου ήταν η ακόλουθη: SiO<sub>2</sub>=67.7%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=20.3%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.05%, CaO=0.5%, MgO=0.05%, TiO<sub>2</sub>=0.05%, Na<sub>2</sub>O=11.2% και K<sub>2</sub>O=0.15%. Για την επίτευξη της κατάλληλης κοκκομετρίας χρησιμοποιήθηκε ένας πλανητικός σφαιρόμυλος για τη λειοτρίβηση του υλικού και κατόπιν μια συσκευή δονούμενων κοσκίνων.



Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι το αδρανές υλικό αποτελείται κατά κύριο λόγο από πυριτικά και αργιλικά άλατα, ενώ η περιεκτικότητά του σε ασβέστιο είναι αμελητέα, που σημαίνει ότι ο άστριος δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση φυσικής αποθείωσης των καυσαερίων. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αναλλοίωτη διατήρησή του κατά τη διάρκεια της καύσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν περίπου 1000g αστρίου για την πλήρωση της κλίνης.

### **3.4 Καθορισμός Υδροδυναμικών Χαρακτηριστικών Ρευστοποίησης**

#### **3.4.1 Θερμοκρασία λειτουργίας**

Η θερμοκρασία λειτουργίας της κλίνης επιλέχθηκε ώστε να διατηρείται μεταξύ 800 και 900 °C. Αυτή η περιοχή τιμών αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργούν οι καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης, ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης που ασκεί αυτή, στην ορυκτολογία και τη χημεία της ιπτάμενης τέφρας που προκύπτει, καθώς και στη τάση του καυσίμου να προκαλεί επικαθίσεις, επισκωριώσεις και συσσωματώματα. Η προθέρμανση της κλίνης έγινε στους 700 °C, ενώ του αέρα της καύσης περίπου στους 550 °C.

#### **3.4.2 Ποσότητα και κοκκομετρία Αδρανούς**

Αυτές οι παράμετροι του αδρανούς υλικού της κλίνης προσδιορίστηκαν πειραματικά. Η ποσότητα και η κοκκομετρία του νατριούχου αστρίου, που επιλέχθηκε σαν αδρανές υλικό, προσδιορίστηκε παραμετρικά, με στόχο να μπορεί να επιτευχθεί ρευστοποίηση, χωρίς το αδρανές υλικό να παρασύρεται εκτός αντιδραστήρα και να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αυτού και της παραγόμενης από τη καύση τέφρας. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 1000g αστρίου κοκκομετρίας 355μm – 500 μm.

### **3.5 Είδος, Ποσότητα και Κοκκομετρία Καυσίμου**

Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στα πειράματα είναι το πυρηνόξυλο, η λυματολάσπη και το κρεατάλευρο (MBM). Η ροή καυσίμου ήταν 0,72 ή 0,84 kg/h. Τέλος, η κοκκομετρία προσδιορίστηκε παραμετρικά, με σκοπό να αποφεύγονται φαινόμενα άκαυστων σωματιδίων και να είναι σαφής ο διαχωρισμός της παραγόμενης από το καύσιμο τέφρας και του αδρανούς υλικού της κλίνης. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις αυτές, η κοκκομετρία που προέκυψε ήταν μεταξύ 850μm–2800μm για το πυρηνόξυλο, για τη λυματολάσπη 850μm–2800μm και για τη ζωοτροφή 850μm—2000μm.



### 3.6 Πειραματική Διαδικασία

#### 3.6.1 Προετοιμασία πειραμάτων

Για την σωστή διεξαγωγή των πειραμάτων, γίνονταν ορισμένες ενέργειες πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Η προετοιμασία περιλάμβανε τα ακόλουθα στάδια:

Αντιδραστήρας: Άδειασμα του αντιδραστήρα και των σιλό, αφαίρεση και καθαρισμό του δίσκου (διασκορπιστή).

Ιπτάμενη τέφρα: Καθαρισμό δοχείου τέφρας, προκειμένου να διασφαλιστεί η καθαρότητα των παραγόμενων τεφρών.

Υλικό κλίνης: Αρχικά, αφαίρεση ολόκληρης της ποσότητας του αδρανούς υλικού της κλίνης από το προηγούμενο πείραμα. Στη συνέχεια, κοσκίνηση του υλικού για να αφαιρεθούν τα άκαυστα υλικά και να ανακτηθεί η ποσότητα που βρίσκεται στην επιθυμητή κοκκομετρία. Κατόπιν, προσθήκη ποσότητας αδρανούς υλικού της ίδιας κοκκομετρίας, μέχρις ότου συμπληρωθεί η ποσότητα των 1000g

Αντιδραστήρας: Προσεκτικό καθαρισμό του αντιδραστήρα με αέρα, που διοχετεύεται από δύο σημεία εισαγωγής: από το επάνω μέρος του κωνικού τμήματος και από τη μέση του κυλινδρικού τμήματος του αντιδραστήρα. Κατόπιν, κλείσιμο του αντιδραστήρα και συναρμολόγηση.

Θερμοστοιχεία: Πριν το κλείσιμο του αντιδραστήρα έλεγχο των θερμοστοιχείων, εάν έχουν μετακινηθεί από τις προκαθορισμένες θέσεις τους.

Καύσιμο: Ξήρανση του δείγματος προτού εισέλθει στον καυστήρα, στους 100 °C για 2 ώρες.

Παροχή τροφοδοσίας: Βαθμονόμηση παροχής υλικού τροφοδοσίας στο πρώτο σιλό. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε μία φορά για κάθε υλικό.

Μονώσεις: Επικάλυψη σωληνώσεων με υαλοβάμβακα, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας.

#### 3.6.2 Μεθοδολογία διεξαγωγής πειραμάτων

Για κάθε είδος καυσίμου, επιλέχθηκαν δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: η παροχή καυσίμου τροφοδοσίας και ο λόγος περίσσειας αέρα. Η παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν σε 0,72 ή 0,84 kg/h, ενώ ο λόγος λ της περίσσειας αέρα κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 1,2 και 1,7.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων ρευστοποίησης ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η προθέρμανση της κλίνης με κατάλληλη ρύθμιση των ηλεκτρικών αντιστάσεων και κατόπιν ξεκίνησε η τροφοδοσία του καυσίμου. Η παροχή του καυσίμου στην κλίνη



ρυθμίστηκε μέσω inverter που ελέγχει τον κινητήρα του τροφοδοτικού κοχλία. Παράλληλα με την τροφοδοσία του καυσίμου, τροφοδοτήθηκε το σύστημα με αέριο άζωτο. Στην αρχή και για λίγο χρονικό διάστημα, η παροχή του αζώτου ρυθμίστηκε σε υψηλά επίπεδα, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σωστή τροφοδοσία της βιομάζας. Στο επόμενο διάστημα, η παροχή του αζώτου είχε μειωθεί στα επιθυμητά επίπεδα και η θερμοκρασία της κλίνης αυξήθηκε λόγω της καύσης.

Κατά τη λειτουργία του καυστήρα, μετά από 15 min περίπου η κλίνη βρέθηκε σε σταθερή κατάσταση (steady state) και έγιναν μόνο μικρές ρυθμίσεις στην παροχή αέρα, όταν παρατηρήθηκαν κάποιες αυξομειώσεις. Η παροχή του καυσίμου διατηρήθηκε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Αφού συμπληρώθηκε η προβλεπόμενη διάρκεια πειράματος, τότε διακόπηκε η παροχή καυσίμου και άρχισε η ψύξη της κλίνης, μέσω της παροχής αέρα που συντηρεί τη ρευστοποίηση. Μόλις η κλίνη απέκτησε θερμοκρασία δωματίου, περίπου 18 ώρες αργότερα, αφαιρέθηκε η βάση του αντιδραστήρα, αποσπώντας τον εσωτερικό κύλινδρο του πυρήνα και το αδρανές συλλέχθηκε σε σακούλα. Ακολούθησε ζύγιση του αδρανούς, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλη η ποσότητά του παρέμεινε στον αντιδραστήρα και λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος για αναλύσεις. Τέλος, αφαιρέθηκε η τέφρα από το δοχείο συλλογής του κυκλώνα, ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε σε σακουλάκια για περαιτέρω εργαστηριακή ανάλυση.

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιούνταν συνεχής καταγραφή των εκπομπών μέσω του συστήματος καταγραφής. Στο τέλος του πειράματος τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη μορφή αρχείων excel.



## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 Χημικές Αναλύσεις Αρχικών Δειγμάτων

Στους Πίνακες 4.1.1 , 4.1.2 και 4.1.3 παρουσιάζονται οι προσεγγιστική ανάλυση, οι στοιχειακή ανάλυση και η χημική ανάλυση της τέφρας των δειγμάτων.

**Πίνακας 4.1.1** Προσεγγιστική ανάλυση (% επί ξηρού) δειγμάτων βιομάζας

Δείγμα	Υγρασία (*)	Πτητικά	Τέφρα	Μόνιμος Άνθρακας
Πυρηνόξυλο	5.30	73.63	7.15	19.22
Λάσπη	11.12	62.92	27.40	9.73
MBM	1.97	56.10	32.10	11.91

(\*αεροξηρανθέν )

**Πίνακας 4.1.2 :** Στοιχειακή ανάλυση (επί ξηρού %) δειγμάτων βιομάζας

Δείγμα	C	H	S	N	O	Cl	A.Θ.Δ (MJ/kg)
Πυρηνόξυλο	49.67	6.61	0.33	2.09	34.15	0.08	20.82
Λάσπη	43.26	6.51	1.15	4.26	17.42	0.01	17.99
MBM	34.99	5.21	0.51	8.75	18.54	0.06	15.62

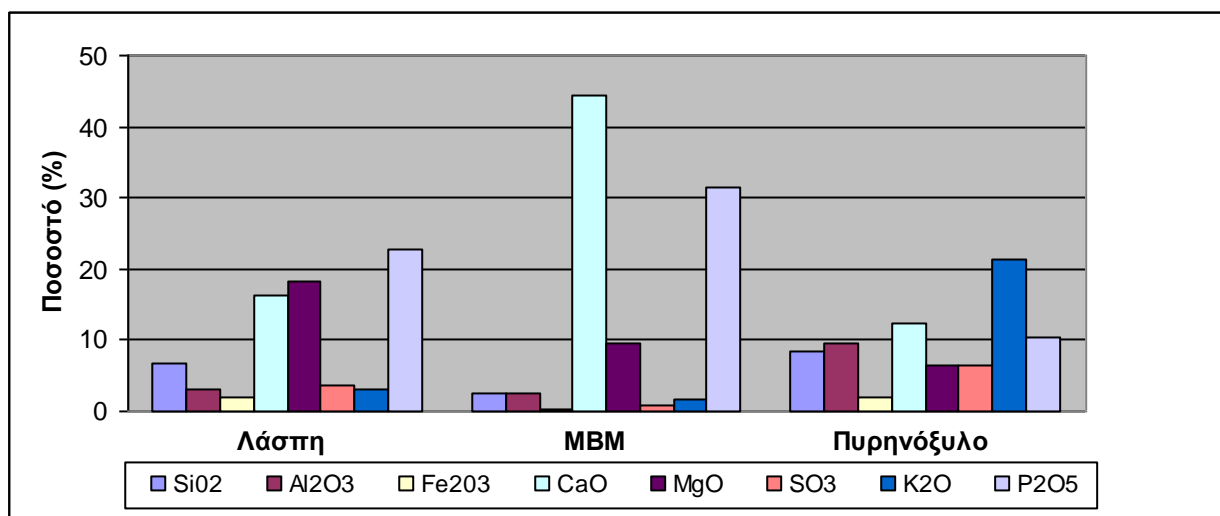
**Πίνακας 4.1.3:** Χημική ανάλυση τέφρας σε κύρια οξείδια (% κ.β)

Δείγμα	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Απώλεια πύρωσης(1050°C)
Λάσπη	6.67	3.04	1.97	16.25	18.33	3.57	3.05	3.33	0.04	0.14	22.81	22.80
MBM	2.58	2.47	0.25	44.29	9.69	0.9	1.67	4.13	-	-	31.6	2.60
Πυρηνόξυλο	8.34	9.55	1.84	12.31	6.52	6.52	21.25	-	-	0.01	10.26	23.40



Από τον Πίνακα 4.1.1 παρατηρείται ότι το πυρηνόξυλο εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πτητικά και μικρότερο ποσοστό τέφρας σε σχέση με τα άλλα δυο είδη καυσίμων. Η υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά του πυρηνόξυλου, το καθιστά καύσιμο με υψηλή αντιδραστικότητα. Η ανώτερη θερμογόνο δύναμη του πυρηνόξυλου, της λάσπης και του κρεατάλευρου (Πίνακας 4.1.2) οφείλεται στην αυξημένη ποσότητα πτητικών, την χαμηλή ποσότητα τέφρας, καθώς επίσης στον υψηλό στοιχειακό άνθρακα (C) και υδρογόνο (H). Το κρεατάλευρο παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε N εν συγκρίσει με τα άλλα καύσιμα, άρα και δυνητικά περισσότερες εκπεμπόμενες ποσότητες ενώσεων του αζώτου. Στη χημική ανάλυση τέφρας των δειγμάτων (Πίνακας 4.1.3), παρατηρείται ότι οι τέφρες των καυσίμων περιέχουν περισσότερο Mg, P και Ca. Το Mg είναι στοιχείο χαρακτηριστικό της τέφρας της βιομάζας που προέρχεται από τη χλωρίδα, καθώς αποτελεί βασικό συστατικό της χλωροφύλλης, περιέχεται σε πολλά λιπάσματα και είναι ιδιαίτερα διαλυτό στο νερό, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται σε δέντρα και φυτά μέσω του εδάφους και να περιλαμβάνεται στην τροφική αλυσίδα των ζώων

Ca σχετικά Ca του πυρηνόξυλου. Το K στο πυρηνόξυλο είναι υψηλό και πιθανόν οφείλεται στη χρήση λιπασμάτων. Για το κρεατάλευρο το Ca υπάρχει στα οστά των ζωικών οργανισμών, καθώς επίσης και ο P, άρα δικαιολογείται η υψηλή περιεκτικότητα σε αυτά τα στοιχεία. Τέλος, παρατηρείται ότι το Cl και το S βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα σε όλα τα δείγματα, άρα δεν αναμένονται να δημιουργηθούν προβλήματα εξαιτίας των ενώσεων που δημιουργούν κατά την καύση.



**Διάγραμμα 4.1.1:** Περιεκτικότητα σε κύρια στοιχεία στις τέφρες των δειγμάτων

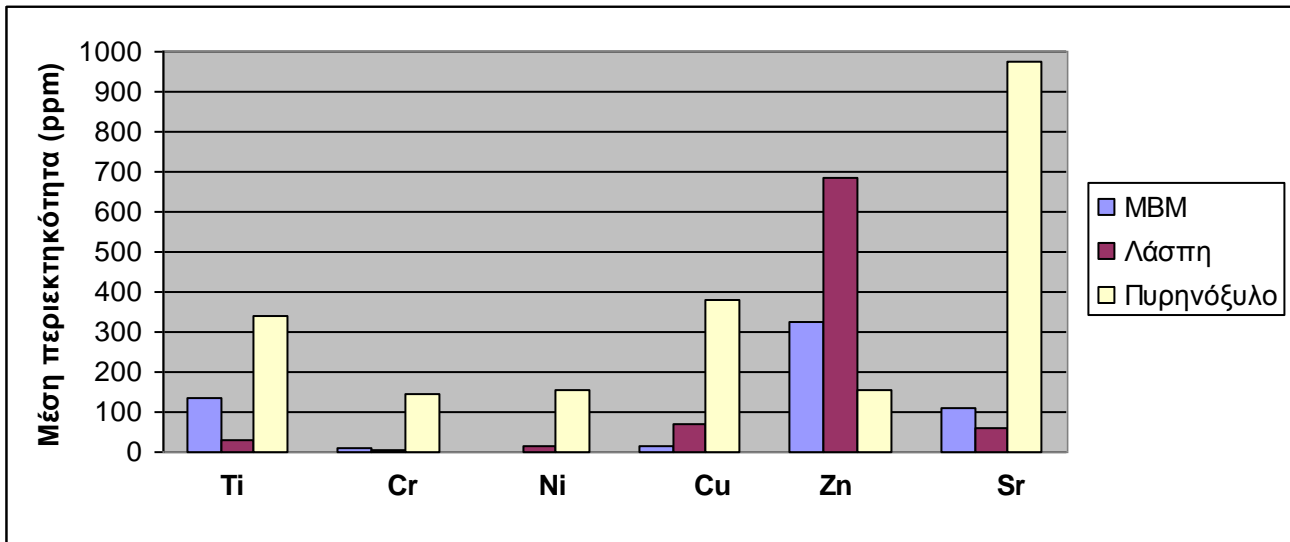


**Πίνακας 4.1.4 :Μέση περιεκτικότητα ιχνοστοιχείων**

Πυρηνόξυλο		Λάσπη		MBM	
Όνομα Στοιχείου	Μέση Περιεκτικότητα (ppm)	Όνομα Στοιχείου	Μέση Περιεκτικότητα (ppm)	Όνομα Στοιχείου	Μέση Περιεκτικότητα (ppm)
Ti	342,17	Ti	27,63	Ti	135,28
Cr	145,41	Cr	4,27	Cr	8,2
Mn	476,48	Ni	13,65	Ni	1,57
Fe	8,79	Cu	67,83	Cu	13,23
Ni	156,81	Zn	685,85	Zn	325,51
Cu	381,09	As	<DL	As	<DL
Zn	155,88	Sr	61,57	Sr	111,37
As	<DL	Cd	<DL	Cd	<DL
Sr	975,09	Hg	<DL	Hg	<DL
Cd	<DL	Pb	<DL	Pb	10,46
Hg	<DL				
Pb	<DL				

<DL κάτω από το όριο ανίχνευσης.





**Διάγραμμα 4.1.2:** Μέση περιεκτικότητα σε ιχνοστοιχεία των δειγμάτων

Από το Διάγραμμα 4.1.2 παρατηρείται ότι η τέφρα του δείγματος πυρηνόξυλου είναι πλούσια σε Sr, Cu καθώς και Ti. Το δείγμα λάσπης παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε Zn. Το MBM εμφανίζει χαμηλή περιεκτικότητα σε όλα τα στοιχεία. Εντούτοις, τα αποτελέσματα των αναλύσεων των πιο πάνω στοιχείων συμπεριλαμβανομένων των Cr και Ni κυμαίνονται εντός των αποδεκτών περιβαλλοντικών ορίων [26].



**Πίνακας 4.1.5: Δείκτες επικαθίσεων και επισκωρώσεων**

Δείγμα	Rb/a	Δείκτης Αλκαλικότητας (AI)	Πιθανότητα δημιουργίας επικαθίσεων /επισκωρώσεων
Πυρηνόξυλο	2,34	0,73	Βέβαιη
Λάσπη	4,40	0,97	Βέβαιη
MBM	11,88	1,19	Βέβαιη

Με βάση την ανάλυση των τεφρών υπολογίστηκαν οι δείκτες επικαθίσεων, δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πιλοτικές εργοστασιακές δοκιμές για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της τέφρας και της τάσης της για τη δημιουργία επικαθίσεων στα συστήματα καύσης. Οι δείκτες αυτοί είναι οι εξής:

$$\alpha) AI = \frac{kg(K_2O + Na_2O)}{GJ} / \text{kg καυσίμου} \quad [22] \quad (4.1)$$

Για τον δείκτη αλκαλίων (AI), η δημιουργία επικαθίσεων είναι πιθανή όταν  $0.17 < AI < 0.34 \text{ kg/GJ}$  και βέβαιη όταν  $AI > 0.34 \text{ kg/GJ}$ .

$$\beta) Rb/a = \frac{\%(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O)}{\%(SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)} \quad [23] \quad (4.2)$$

Rb/a: Δείκτης βασικών προς όξινων οξειδίων

Από τον Πίνακα 4.1.5 και για όλα τα υλικά παρατηρείται ότι η πιθανότητα δημιουργίας επικαθίσεων /επισκωρώσεων χαρακτηρίζεται ως βέβαιη για τον λόγο ότι  $AI > 0.34 \text{ kg/GJ}$  και  $Rb/a > 1$ .

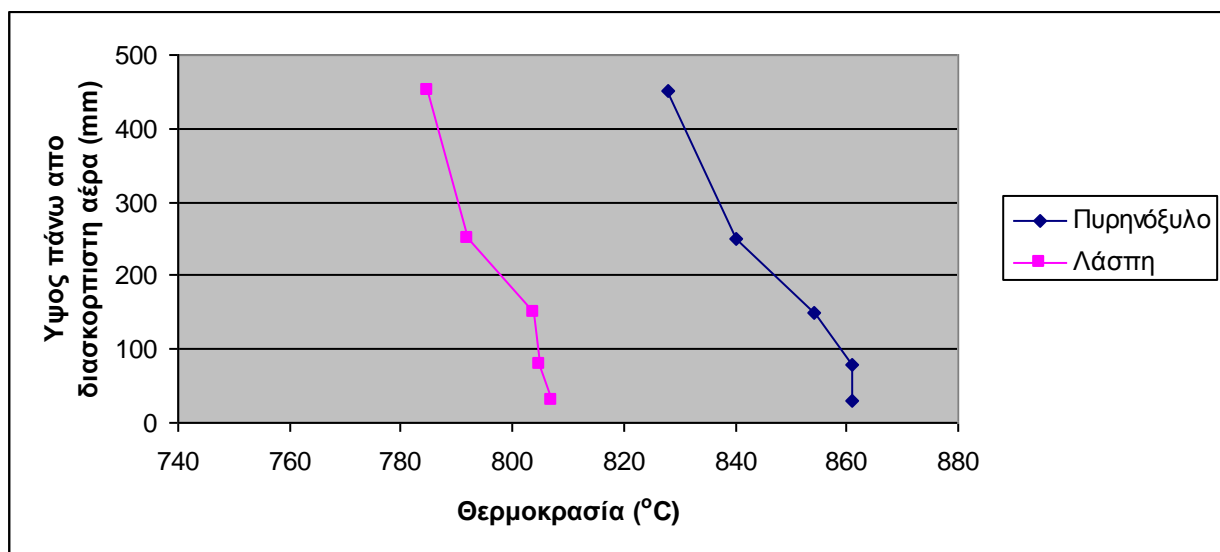


## 4.2. Προφίλ Θερμοκρασίας, Εκπομπές Ρύπων και Απόδοση Καύσης για Σταθερή Τροφοδοσία Καυσίμου και Περίσσεια Αέρα.

### 4.2.1 Αρχικά δείγματα

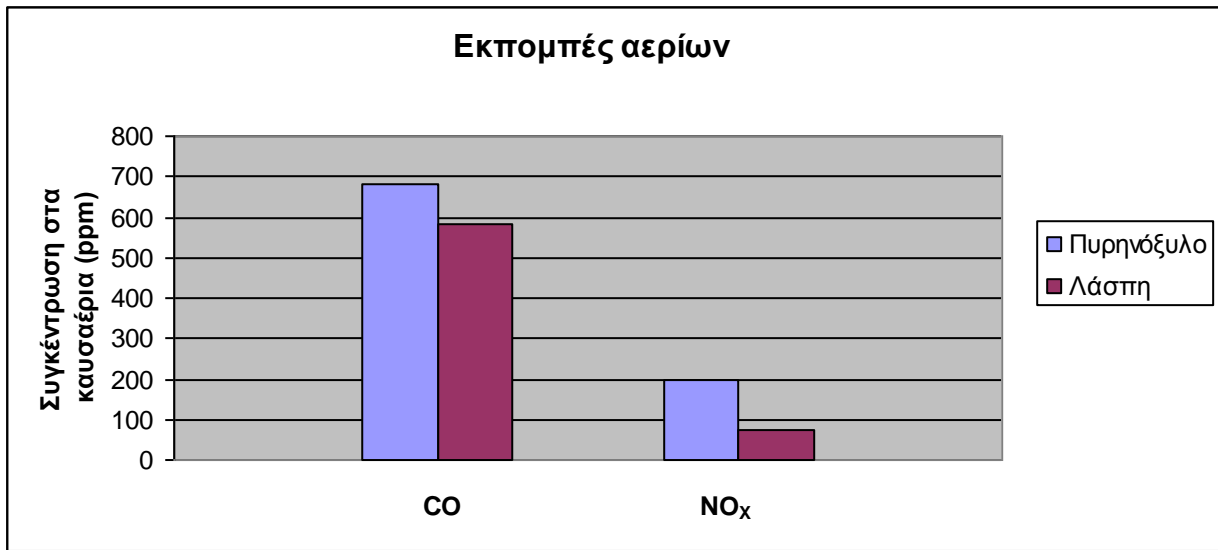
**Πίνακας 4.2.1 :** Προφίλ Θερμοκρασίας, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για  $F=12 \text{ g/min}$  και  $\lambda=1.4$

	Θερμοκρασία (°C)									
Ποσότητα (%)	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)									
Πυρηνόξυλο-Λάσπη	30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	n(%)
100/0	861	861	854	840	828	680	1,8	196	0,99	99
0/100	807	805	804	792	785	580	0	76	0,99	99



**Διάγραμμα 4.2.1:** Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$





**Διάγραμμα 4.2.2 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$

Το προφίλ της θερμοκρασίας κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.2.1. Παρατηρείται ότι τόσο στο Πυρηνόξυλο όσο και στη Λάσπη η μέγιστη θερμοκρασία επιτυγχάνεται μερικά εκατοστά πάνω από το διασκορπιστή αέρα, με τιμές  $861^\circ\text{C}$  και  $807^\circ\text{C}$ , αντίστοιχα. Στο Πυρηνόξυλο η θερμοκρασία έχει φθάσει την μέγιστη τιμή στους  $861^\circ\text{C}$  στα πρώτα 30mm και στη συνέχεια βαίνει διαρκώς μειούμενη μέχρι το κωνικό μέρος του αντιδραστήρα. Όσο αφορά τη λάσπη παρατηρείται ότι αναμειγνύεται αρκετά καλά με το αδρανές υλικό και η καύση μέσα στο αδρανές είναι σταθερή.

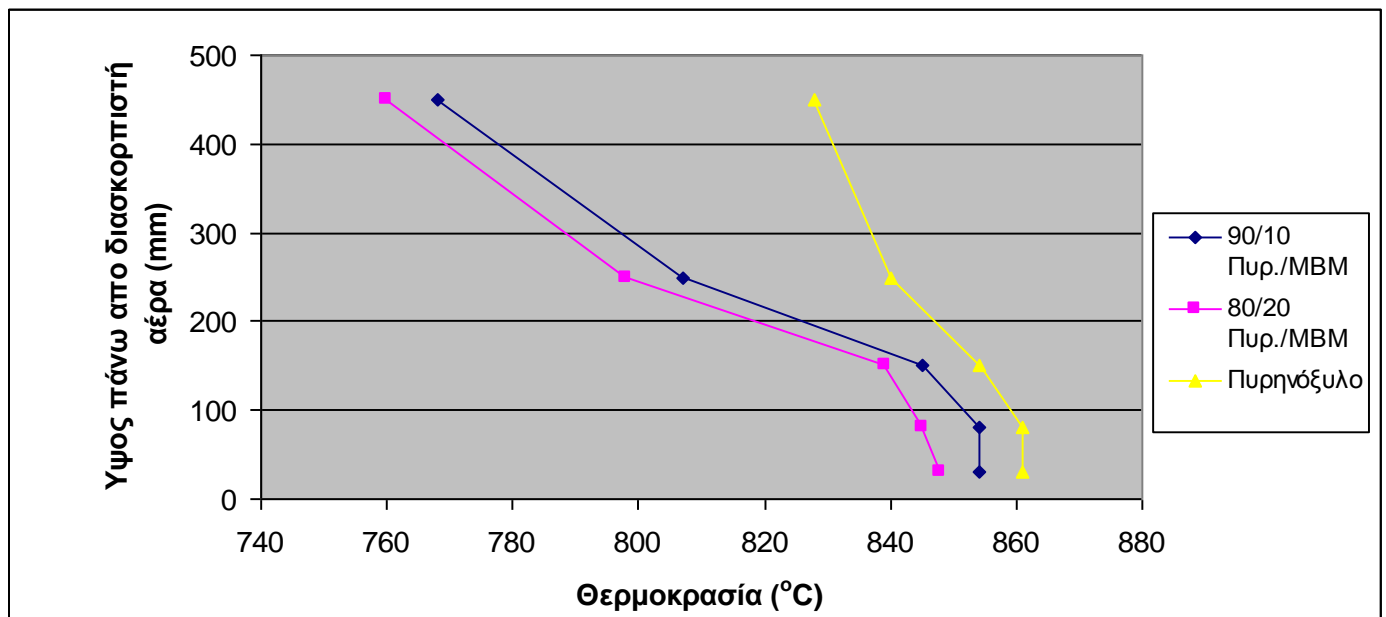
Στο Διάγραμμα 4.2.2 παρουσιάζεται ο μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> από την καύση των δυο υλικών βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ . Αναλύοντας το πιο πάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές CO εμφανίζονται από την καύση του Πυρηνόξυλου, όπως επίσης και οι μεγαλύτερες εκπομπές NO<sub>x</sub>. Η αυξημένη εκπομπή CO που εμφανίζεται κατά την καύση του Πυρηνόξυλου πιθανόν οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες πτητικών που απελευθερώνονται από την καύση. Παρόλο που η περιεκτικότητα σε N της λάσπης είναι μεγαλύτερη του πυρηνόξυλου (Πίνακας 4.1.2), η έκλυση NO<sub>x</sub> εμφανίζεται χαμηλότερη, μάλλον λόγω σχηματισμού άλλων ενώσεων αζώτου σε ανηγμένη μορφή [24].



#### 4.2.2 Μίγματα

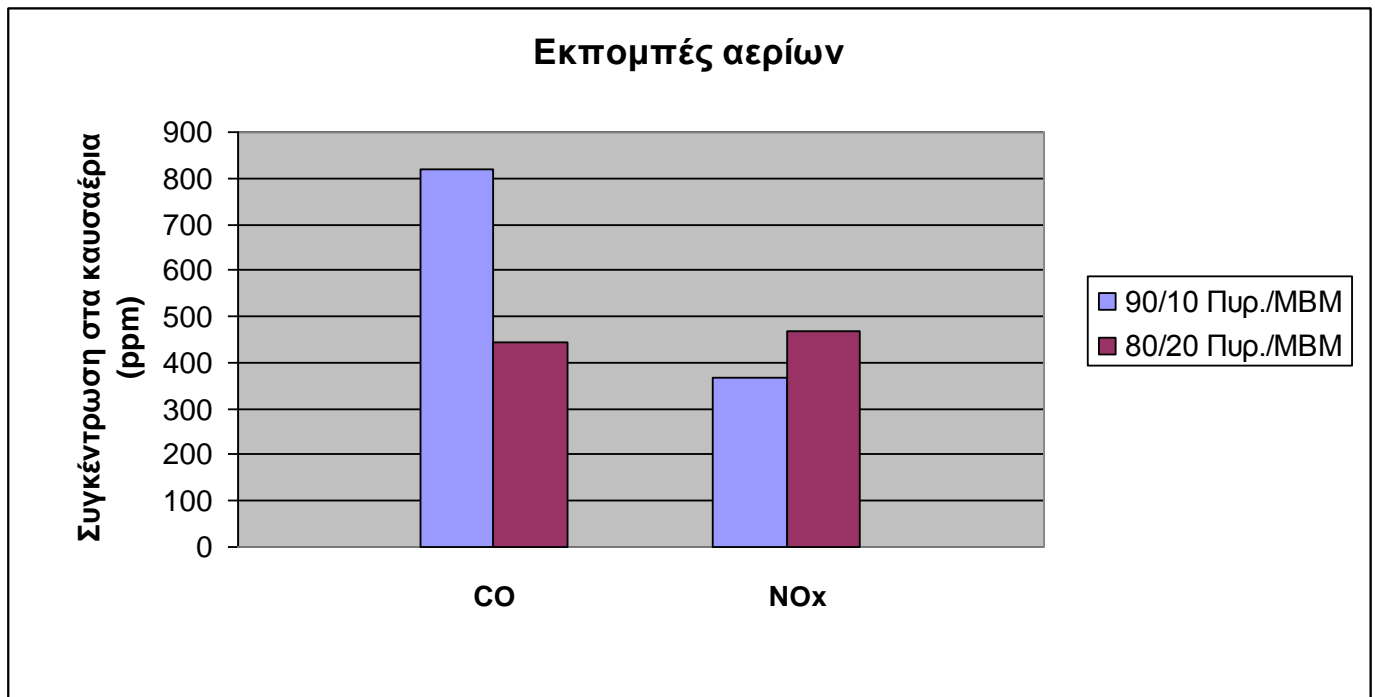
**Πίνακας 4.2.2:** Μίγματα με τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$

	Θερμοκρασία (°C)									
Ποσότητα (%)	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)									
Πυρηνόξυλο- MBM	30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	n(%)
90/10	854	854	845	807	768	817	14	369	0,99	99
80/20	848	845	839	798	760	443	7	467	0,99	99
Πυρηνόξυλο -Λάσπη										
100/0	861	861	854	840	828	680	1,8	196	0,99	99
70/30	848	848	843	820	791	834	0	128	0,99	99
50/50	845	842	840	818	796	694	24	149	0,99	99
30/70	813	810	807	795	779	348	0	61	0,99	99
0/100	807	805	804	792	785	580	0	75	0,99	99



**Διάγραμμα 4.2.3:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-MBM** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$





**Διάγραμμα 4.2.4 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx **Πυρηνόξυλου-MBM** για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$

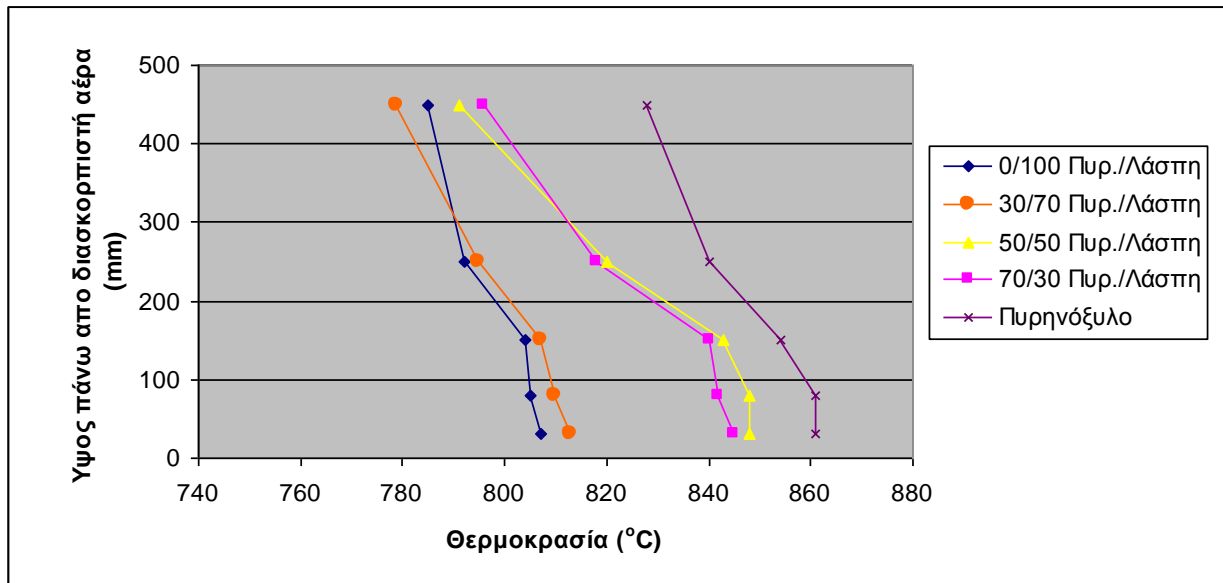
Το Διάγραμμα 4.2.3 παρουσιάζει το προφίλ θερμοκρασίας των δύο υλικών (Πυρηνόξυλο, MBM) σε μίγματα 90/10 και 80/20. Τα δύο μίγματα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με το αρχικό δείγμα (κίτρινη καμπύλη) μέχρι τα 150mm περίπου πάνω από την πλάκα κατανομής του αέρα, ενώ μετά η θερμοκρασία μειώνεται αισθητά μέχρι το κωνικό τμήμα του καυστήρα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι τα πτητικά συστατικά κάηκαν μέσα στην κλίνη φτάνοντας τους  $854^{\circ}\text{C}$  και  $848^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Αντίθετα, στο αρχικό δείγμα παρατηρείται υψηλή θερμοκρασία ακόμη και στα 450 mm πάνω από το διασκορπιστή αέρα, υποδεικνύοντας ότι η πτητική ύλη εξακολουθεί να αντιδρά με το οξυγόνο στην αέρια φάση.

Στο Διάγραμμα 4.2.4 παρουσιάζεται ο μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση των δύο μιγμάτων βιομάζας στη ρευστοποιημένη κλίνη για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12\text{g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ . Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι εκπομπές CO των δυο μιγμάτων Πυρ./MBM. 90/10 και 80/20 διαφέρουν λόγω του ποσοστού πυρηνόξυλου που συμμετέχει στην αντίδραση. Οι εκπομπές CO παραμένουν μέσα στα επιτρεπτά όρια [25].

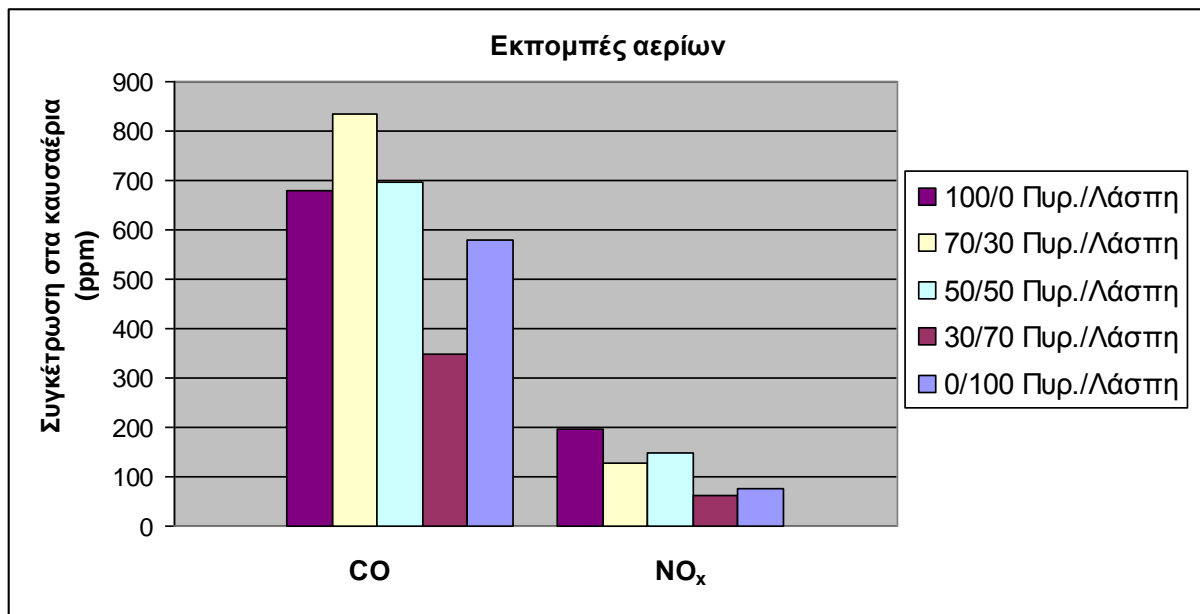
Όσο αφορά τις εκπομπές NOx, αυξάνονται στο μίγμα 80/20 σε σχέση με το μίγμα 90/10 για το λόγο ότι αυξάνεται το ποσοστό MBM στο μίγμα, το οποίο περιέχει μεγαλύτερα ποσοστά αζώτου (Πίνακας 4.1.2).



Να σημειωθεί ότι οι εκπομπές NO<sub>x</sub> επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Οι εκπομπές SO<sub>2</sub> κατά την καύση παρέμειναν χαμηλές.



**Διάγραμμα 4.2.5 :** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12$  g/min και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$



**Διάγραμμα 4.2.6:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης** για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12$  g/min και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$



Το Διάγραμμα 4.2.5 απεικονίζεται το προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου-Λάσπης κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  για διαφορετικές αναλογίες καυσίμων. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες όλων των δειγμάτων επιτυγχάνονται στα πρώτα εκατοστά πάνω από το διασκορπιστή αέρος και στη συνέχεια μειώνονται μέχρι το κωνικό μέρος του αντιδραστήρα. Οι θερμοκρασίες στο ελεύθερο όριο ( $>150\text{mm}$ ) είναι υψηλές, λόγω της καύσης των πτητικών συστατικών των δειγμάτων.

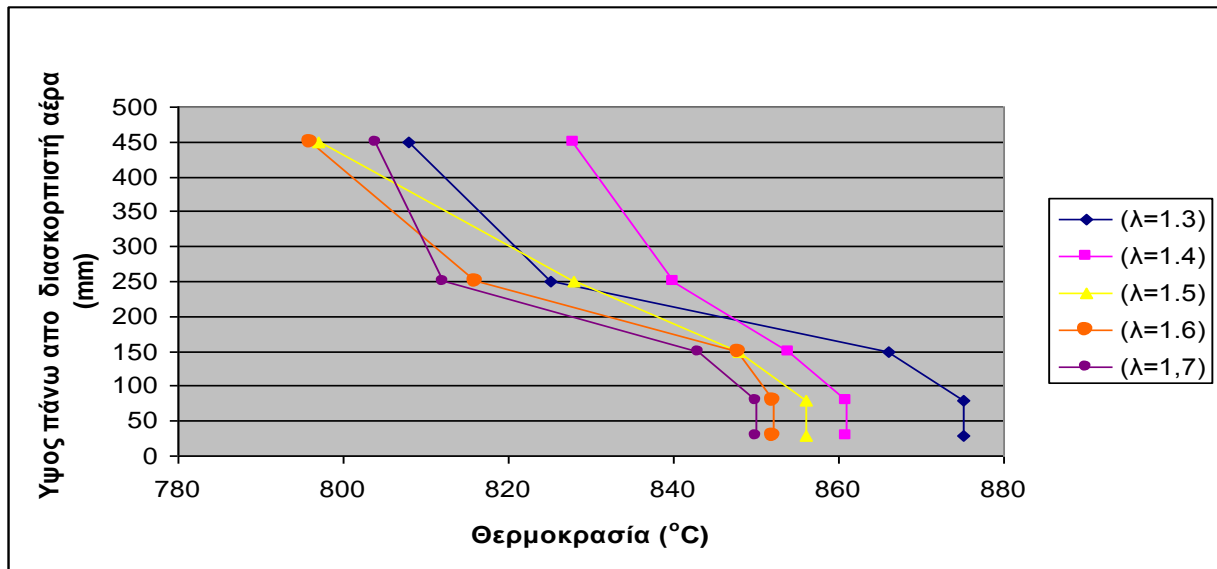
Σε σύγκριση με το αρχικό δείγμα προκύπτει ότι τα μίγματα παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες λόγω του ότι είναι κατώτερα καύσιμα από το πυρηνόξυλο, καθώς έχουν μικρότερες ποσότητες πτητικών, λιγότερο στοιχειακό άνθρακα και χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη.

Το Διάγραμμα 4.2.6 παρουσιάζει τον μέσο όρο εκπομπών  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$  Πυρηνόξυλου-Λάσπης για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ . Παρατηρείται ότι οι εκπομπές  $\text{CO}$  είναι σχεδόν παρόμοιες σε όλα τα ποσοστά Πυρηνόξυλου-Λάσπης λόγω παρόμοιων θερμοκρασιών που επιτεύχθηκαν στα πειράματα. Στο μίγμα Πυρηνόξυλου-Λάσπη (30/70) η συγκέντρωση  $\text{CO}$  είναι χαμηλότερη και αυτό πιθανόν οφείλεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία που καταγράφηκε και ίσως τα πτητικά δεν πρόλαβαν να καούν. Τα  $\text{NO}_x$  των μιγμάτων φαίνεται ότι είναι σημαντικά μειωμένα και σε επιτρεπτά όρια διότι λόγω των χαμηλών σχετικά θερμοκρασιών ( $800\text{-}900^\circ\text{C}$ ) δεν ευνοείται ο σχηματισμός θερμικών  $\text{NO}_x$  [25].

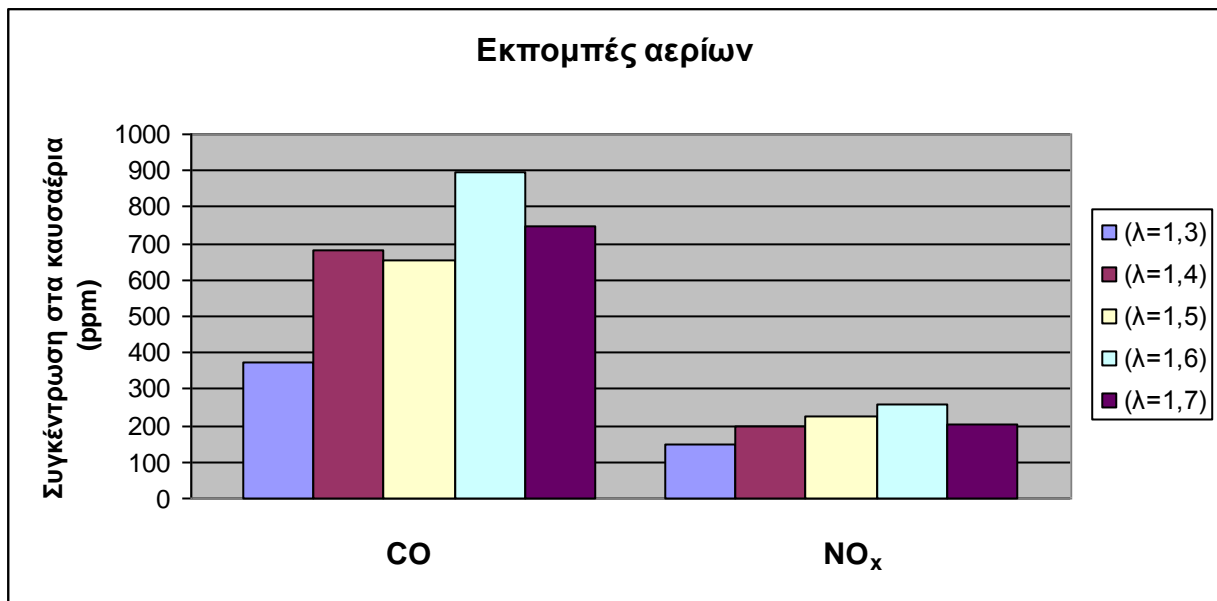


### 4.3: Επίδραση της Περίσσειας του Αέρα στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους Καύσης.

#### 4.3.1 Αρχικά δείγματα



**Διάγραμμα 4.3.1:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσεως της περίσσειας αέρα

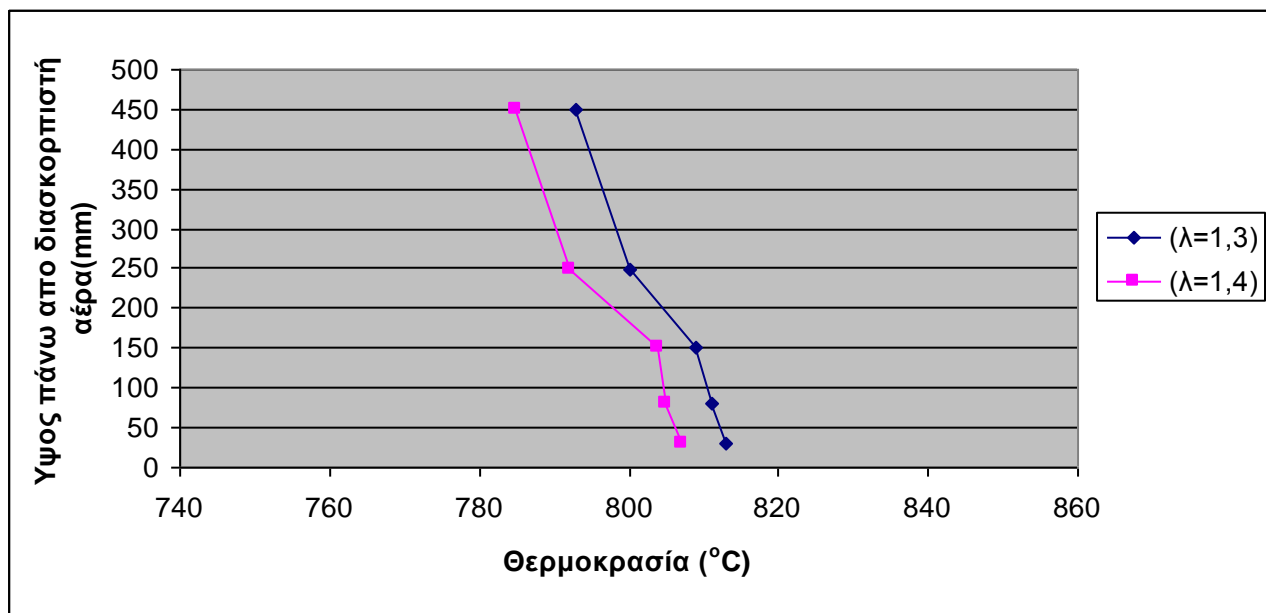


**Διάγραμμα 4.3.2:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου** για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσεως της περίσσειας αέρα.



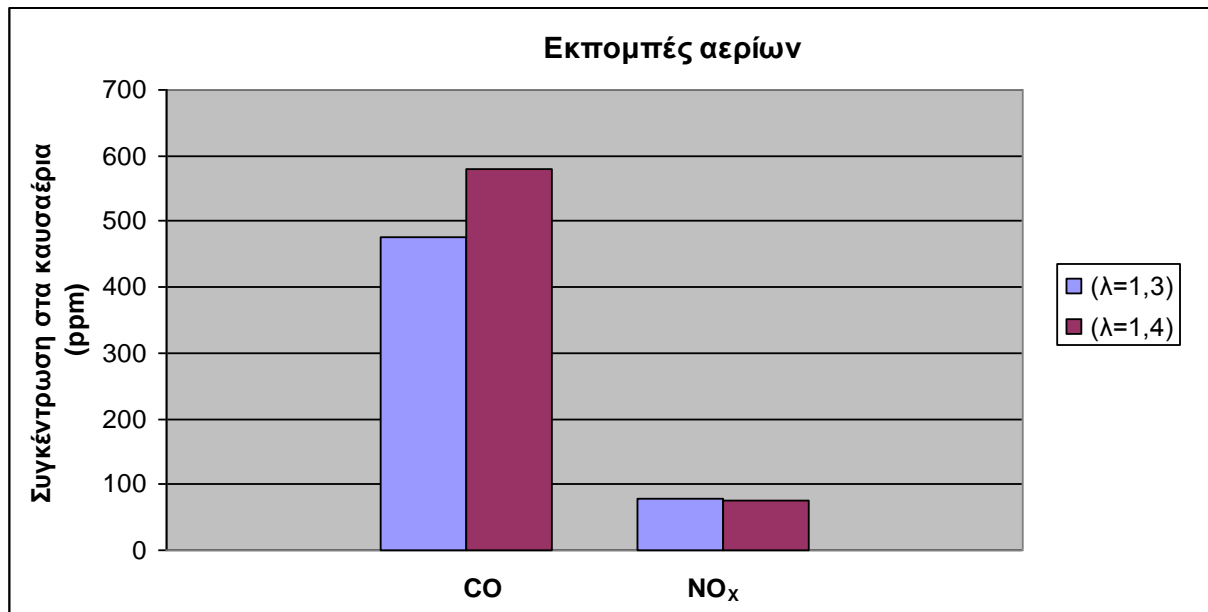
Στο Διάγραμμα 4.3.1 παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασιών με σταθερή τροφοδοσία καυσίμου 12g/min και μεταβλητό λόγο περίσσειας αέρα. Όπως παρατηρείται, από  $\lambda=1.3$  μέχρι  $\lambda=1.7$  για ομοιογενές υλικό Πυρηνόξυλου η προσθήκη περίσσειας αέρα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του προφίλ των θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα. Η ταχύτητα διέλευσης των κόκκων του καυσίμου μέσα από την κλίνη αυξάνει, προκαλώντας μερική ψύξη στον κλίβανο.

Όσο αφορά τις εκπομπές ρύπων, από το Διάγραμμα 4.3.2 διακρίνεται ότι η αύξηση της περίσσειας αέρα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας των καυσαερίων CO, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας. Παρατηρείται μικρή άνοδος των NOx συναρτήσει της περίσσειας αέρα, λόγω αυξημένης οξείδωσης του καυσίμου.



**Διάγραμμα 4.3.3:** Προφίλ θερμοκρασιών **Λάσπης** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12$  g/min και συναρτήση της περίσσειας αέρα .





**Διάγραμμα 4.3.4:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Λάσπης για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

Στο Διάγραμμα 4.3.3 παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασιών της Λάσπης κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα. Σε σχέση με την αρχική εφαρμογή περίσσειας αέρα με  $\lambda=1.4$  παρατηρούμε ότι μειώνοντας την παροχή σε  $\lambda=1.3$  έχουμε ακριβώς το ίδιο προφίλ καμπύλης, με τη διαφορά ότι αυξάνεται η θερμοκρασία.

Οι εκπομπές αερίων με σταθερή παροχή καυσίμου και διαφορετική περίσσεια αέρα για τη Λάσπη παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.3.4. Για  $\lambda=1.3$  η συγκέντρωση του CO σε ppm είναι μικρότερη σε σχέση με  $\lambda=1.4$ . Αυτό οφείλεται στο ότι με τη μείωση της παροχής αέρα αυξάνεται η θερμοκρασία και δίνεται περισσότερος χρόνος στο καύσιμο να αντιδράσει και να γίνει η καύση. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> βρίσκονται σε επιτρεπτά όρια, ενώ όσο αφορά τις εκπομπές SO<sub>2</sub> είναι αμελητέες [25]. Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.3.1.

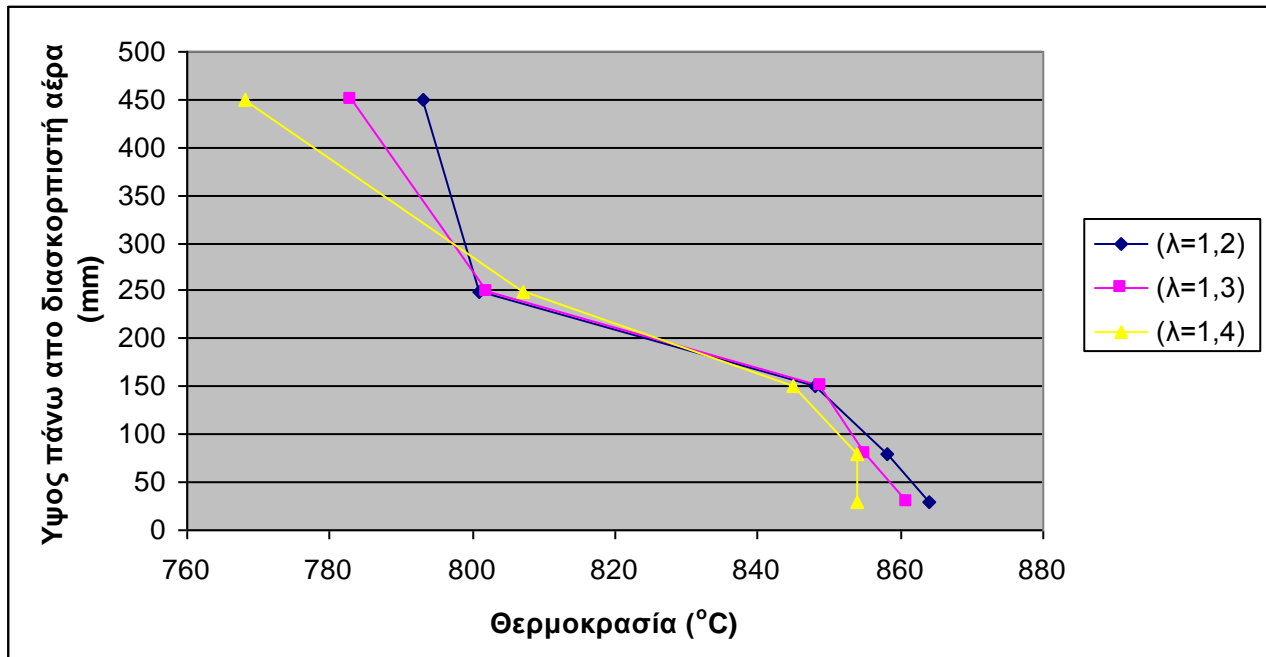


**Πίνακας 4.3.1 :** Προφίλ θερμοκρασιών , εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για τροφοδοσία καυσίμου **F=12 g/min** συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

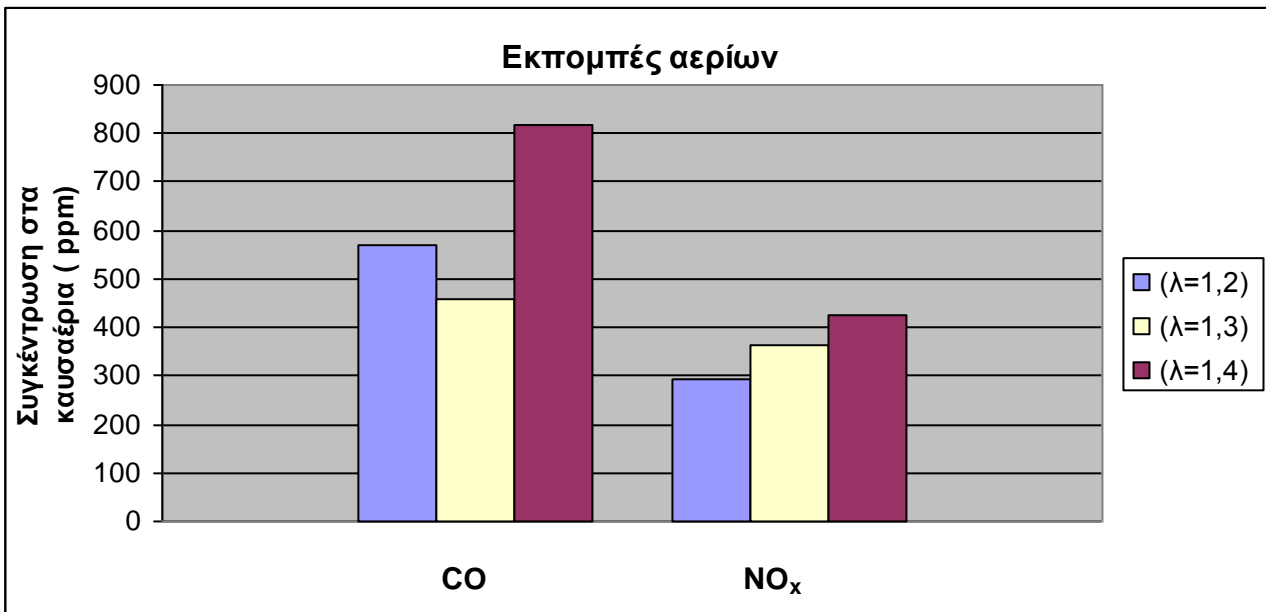
		Θερμοκρασία(°C)									
Ποσότητα (%)	Λόγος περίσσεια αέρα λ	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα(mm)									
Πυρηνόξυλο		30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	η(%)
100	1,3	875	875	866	825	808	371	0,1	147	0,99	99
100	1,4	861	861	854	840	828	680	0,1	196	0,99	99
100	1,5	856	856	848	828	797	652	0,9	226	0,99	99
100	1,6	852	852	848	816	796	897	13	258	0,96	99
100	1,7	850	850	843	812	804	748	1,2	203	0,98	99
Πυρηνόξυλο- MBM	λ	30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	η(%)
90/10	1,2	864	858	848	801	793	571	7	294	0,99	99
90/10	1,3	861	855	849	802	783	457	1,3	363	0,99	99
90/10	1,4	854	854	845	807	768	817	14	423	0,99	99
80/20	1,2	861	859	855	817	790	818	0	382	0,99	99
80/20	1,3	850	848	844	810	773	488	0	441	0,99	99
80/20	1,4	848	845	839	798	760	443	7,6	467	0,99	99
Πυρηνόξυλο-Λάσπη	λ	30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	η(%)
70/30	1,3	848	847	845	829	820	649	0	79	0,99	99
70/30	1,4	848	848	843	820	791	834	0	128	0,99	99
50/50	1,3	854	854	850	827	807	398	1	94	0,99	99
50/50	1,4	845	842	840	818	796	694	25	149	0,99	99
30/70	1,3	834	834	832	819	805	280	0	70	0,99	99
30/70	1,4	813	810	807	795	779	348	0	61	0,99	99
0/100	1,3	813	811	809	800	793	474	0	78	0,99	99
0/100	1,4	807	805	804	792	785	580	0	75	0,99	99



#### 4.3.2: Μίγματα



**Διάγραμμα 4.3.5:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου- MBM (90/10)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα

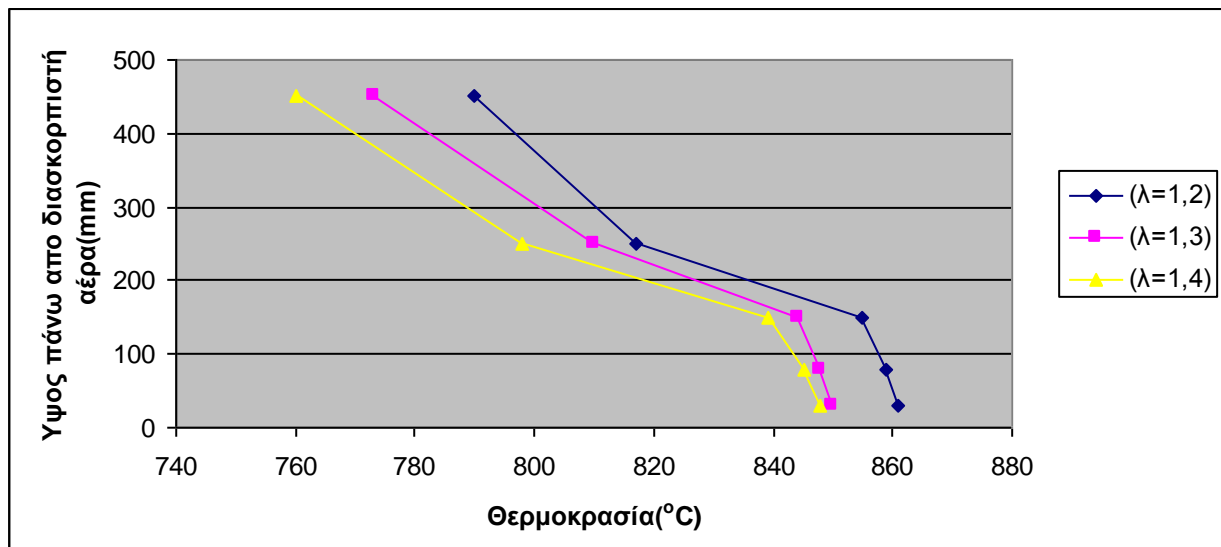


**Διάγραμμα 4.3.6:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου – MBM (90/10)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα



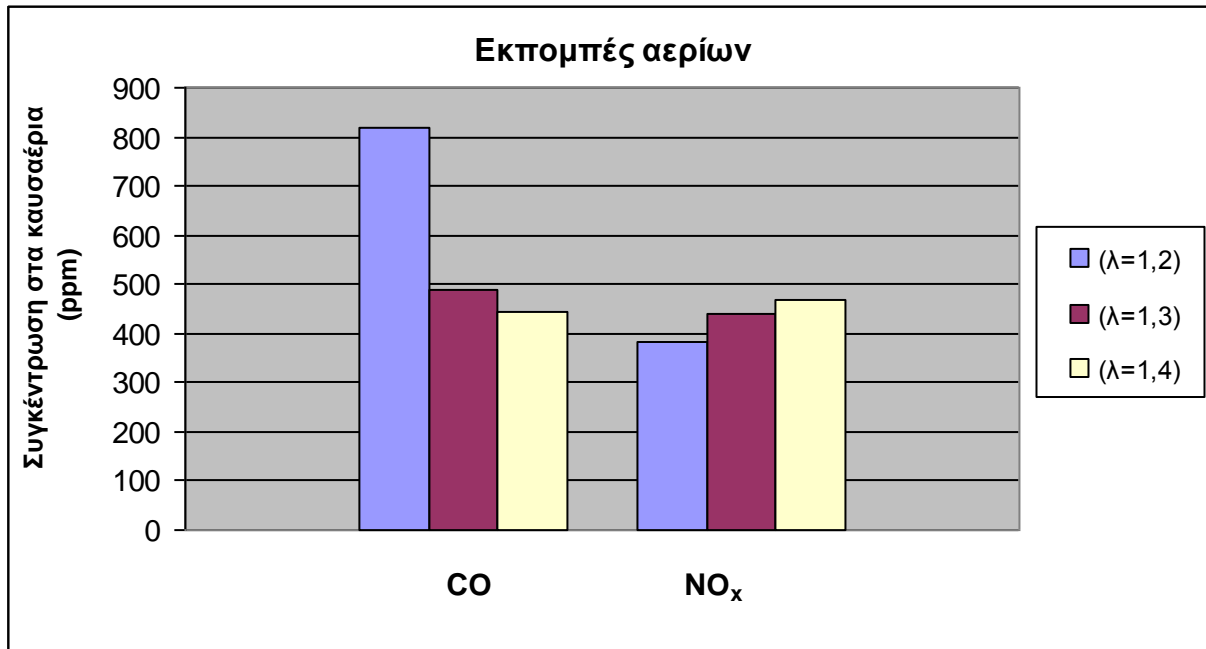
Στο προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου - MBM (90/10) του Διαγράμματος 4.3.5 για διάφορες παροχές περίσσειας αέρα παρατηρείται ότι για  $\lambda=1.2$  και  $\lambda=1.3$  οι τιμές των θερμοκρασιών ταυτίζονται, ενώ για  $\lambda=1.4$  οι τιμές είναι ελάχιστα πιο χαμηλές. Οι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας παράγονται όταν η παροχή αέρα είναι χαμηλή  $\lambda=1.2$ . Γενικά όσο απομακρύνεται το υλικό από την πλάκα κατανομής αέρα η θερμοκρασία μειώνεται.

Το Διάγραμμα 4.3.6 παρουσιάζει τον μέσο όρο εκπομπών CO και NOx Πυρηνόξυλου – MBM (90/10). Όπως προκύπτει από το διάγραμμα με την αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα, τόσο οι εκπομπές CO όσο και τα NOx αυξάνονται σταδιακά για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι εκπομπές SO<sub>2</sub> ήταν αμελητέες και δεν ήταν σημαντικές οι αλλαγές στις τιμές, με τις διαφορετικές αναλογίες του αέρα.



**Διάγραμμα 4.3.7:** Προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου - MBM (80/20) κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσεως της περίσσειας αέρα



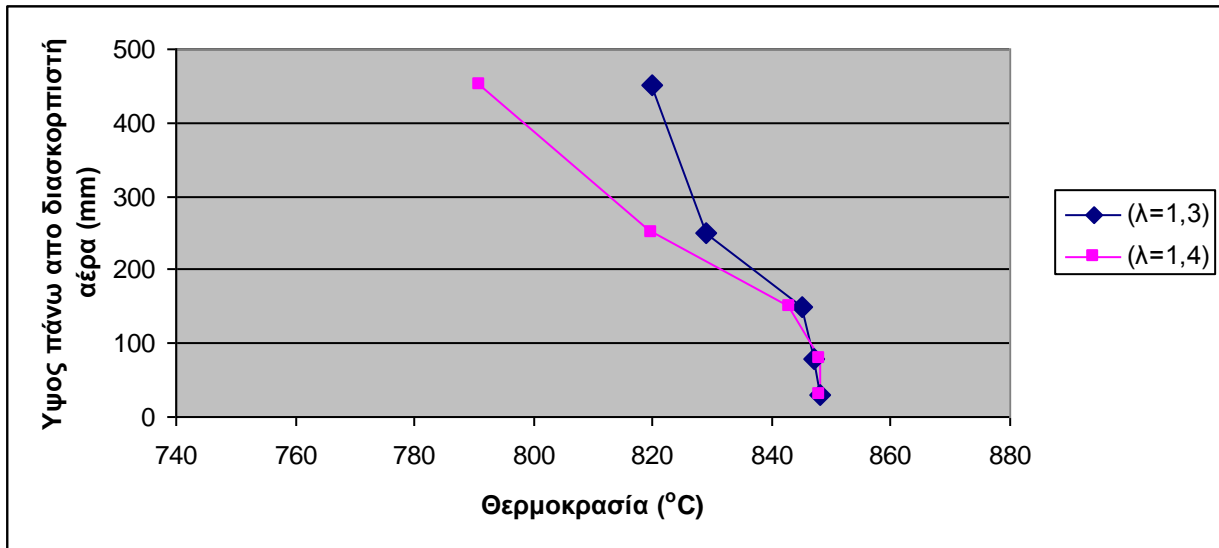


**Διάγραμμα 4.3.8 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-MBM (80/20)** για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα

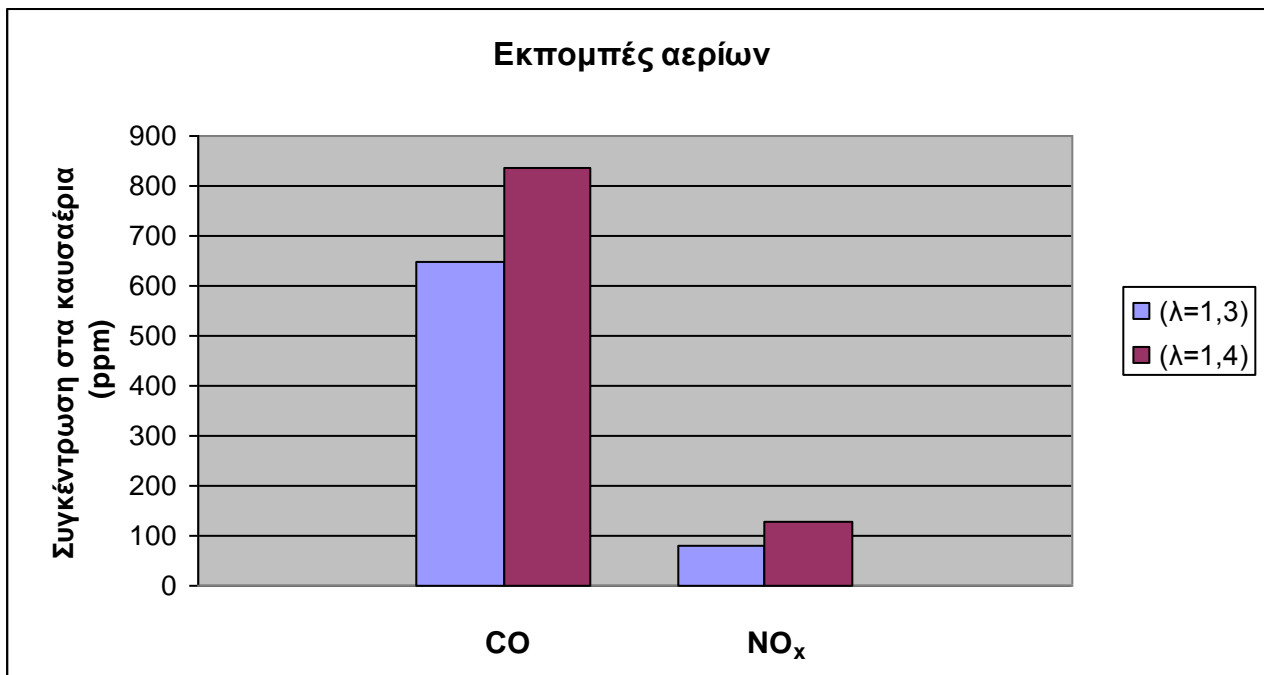
Αυξάνοντας τη ποσότητα των ζωικών αποβλήτων στο μίγμα κατά 10% (80/20) και κρατώντας σταθερή την τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$ , (Διάγραμμα 4.3.7) παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες που επιτεύχθηκαν μέσα στην κλίνη είναι πολύ κοντά με αυτές του μίγματος 90/10, και για τις 3 παροχές αέρα που εφαρμόστηκαν. Η παροχή με το χαμηλότερο  $\lambda$  ( $\lambda=1.2$ ) έχει τις πιο υψηλές θερμοκρασίες.

Στο Διάγραμμα 4.3.8 φαίνεται ότι για  $\lambda=1.2$  οι εκπομπές CO είναι υψηλές σε σχέση με το  $\lambda=1.3$  και 1.4. Αυτό πιθανό να οφείλεται στην μη καλή ανάμειξη του υλικού (καυσίμου) με το αδρανές υλικό της κλίνης. Οι συγκεντρώσεις των NO<sub>x</sub> αυξάνονται λίγο με την αύξηση της περίσσειας αέρα.





**Διάγραμμα 4.3.9:** Προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30) κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα

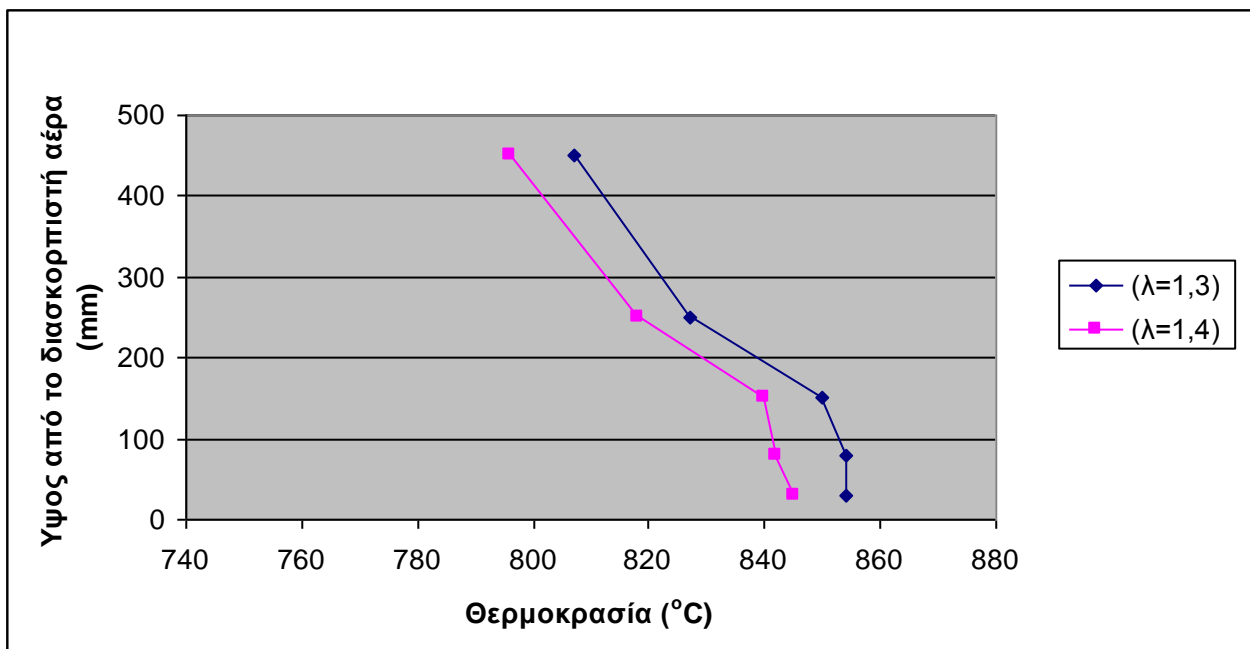


**Διάγραμμα 4.3.10:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου –Λάσπης (70/30) για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα.



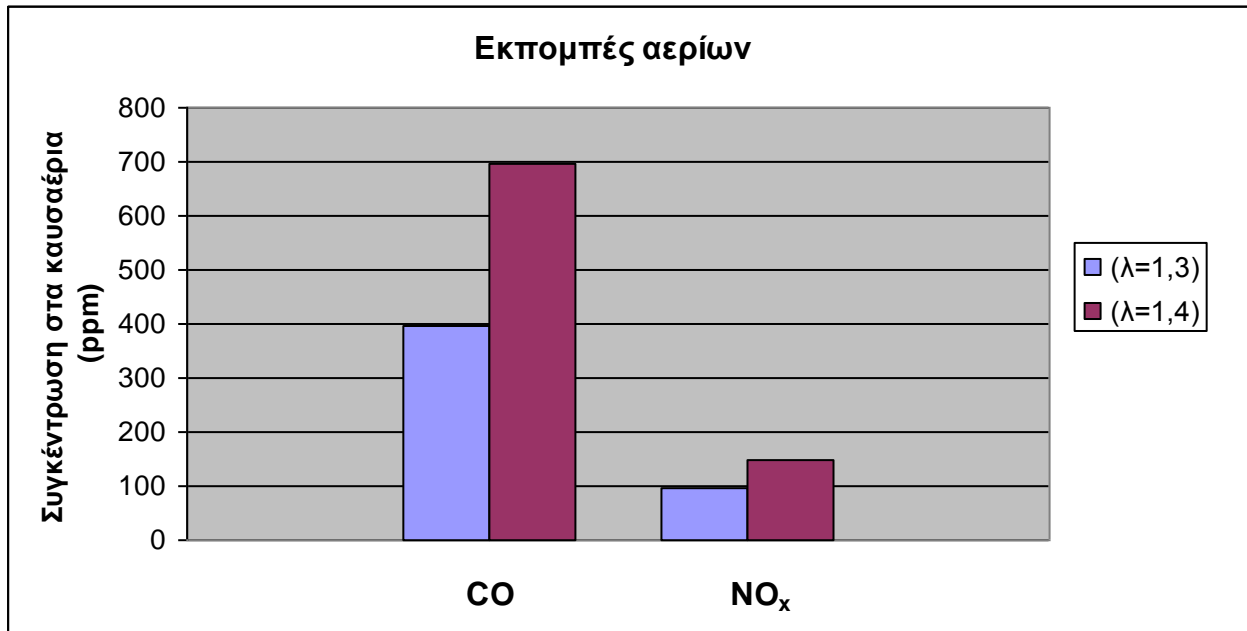
Τα αποτελέσματα του μίγματος Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30) για σταθερή τροφοδοσία  $F=12$  g/min παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.3.9. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες για  $\lambda=1.3$  και  $\lambda=1.4$  εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά μέχρι τα 150 mm περίπου πάνω από την πλάκα κατανομής του αέρα, ενώ όσο πλησιάζουν προς το κωνικό τμήμα του αντιδραστήρα μειώνονται, με αυτή του  $\lambda=1.4$  να παρουσιάζει μεγαλύτερη πτώση. Αυτό πιθανό να οφείλεται στο ότι τα πτητικά κάηκαν μέσα στην κλίνη, ενώ για  $\lambda=1.3$  η πτητική ύλη εξακολούθησε να αντιδρά με το οξυγόνο στην αέρια φάση.

Όσο αφορά τις εκπομπές καυσαερίων, από τον Πίνακα 4.3.1 και το Διάγραμμα 4.3.10 μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι εκπομπές  $SO_2$  για τα καύσιμα είναι αμελητέες, ενώ η συγκέντρωση CO αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας και την υψηλότερη περίσσεια αέρα. Επίσης, ο σχηματισμός  $NO_x$  ευνοείται ελάχιστα με την αύξηση της περίσσειας του αέρα στο θάλαμο καύσης.



**Διάγραμμα 4.3.11:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12$  g/min συναρτήσεως της περισσειας αέρα.





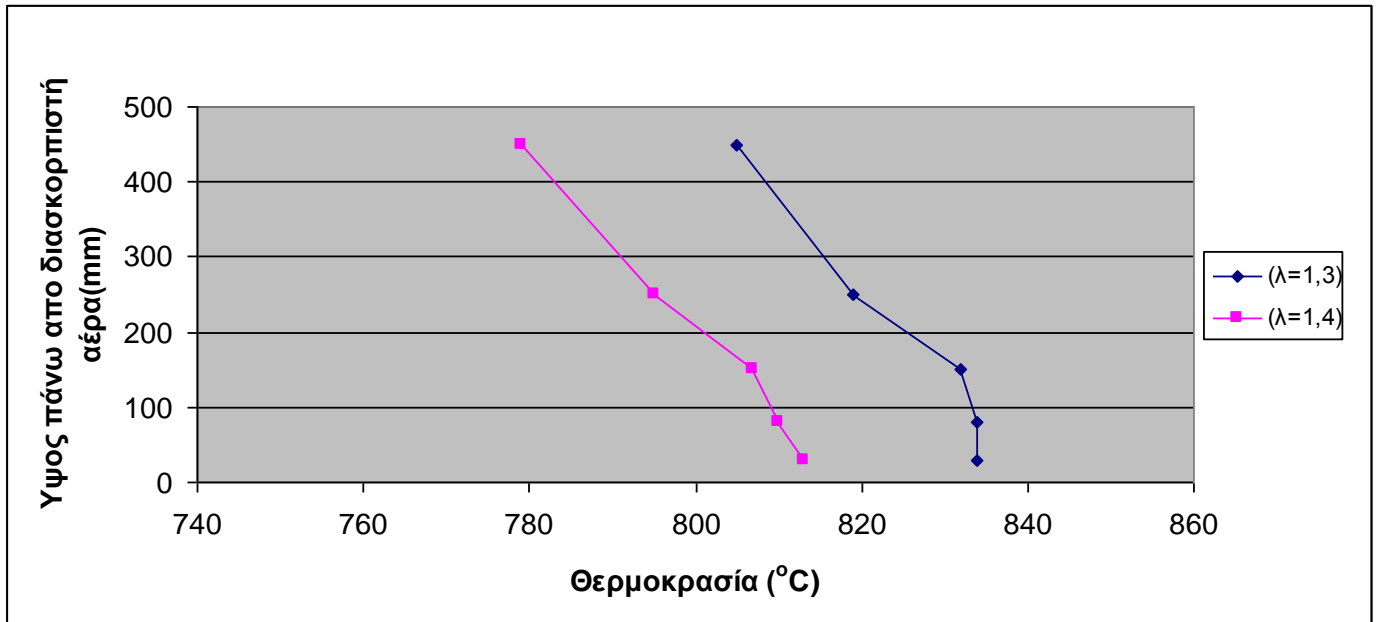
**Διάγραμμα 4.3.12:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου – Λάσπης (50/50) για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12$  g/min συναρτήσει της περίσσειας αέρα

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν τα Διαγράμματα 4.3.11 Πυρηνόξυλου - Λάσπης (50/50) και 4.3.13 Πυρηνόξυλου –Λάσπης ( 30/70) όσο αφορά το προφίλ θερμοκρασιών για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου. Με την αύξηση της περίσσειας του αέρα η θερμοκρασία μετά τα 150mm βαίνει διαρκώς μειούμενη .

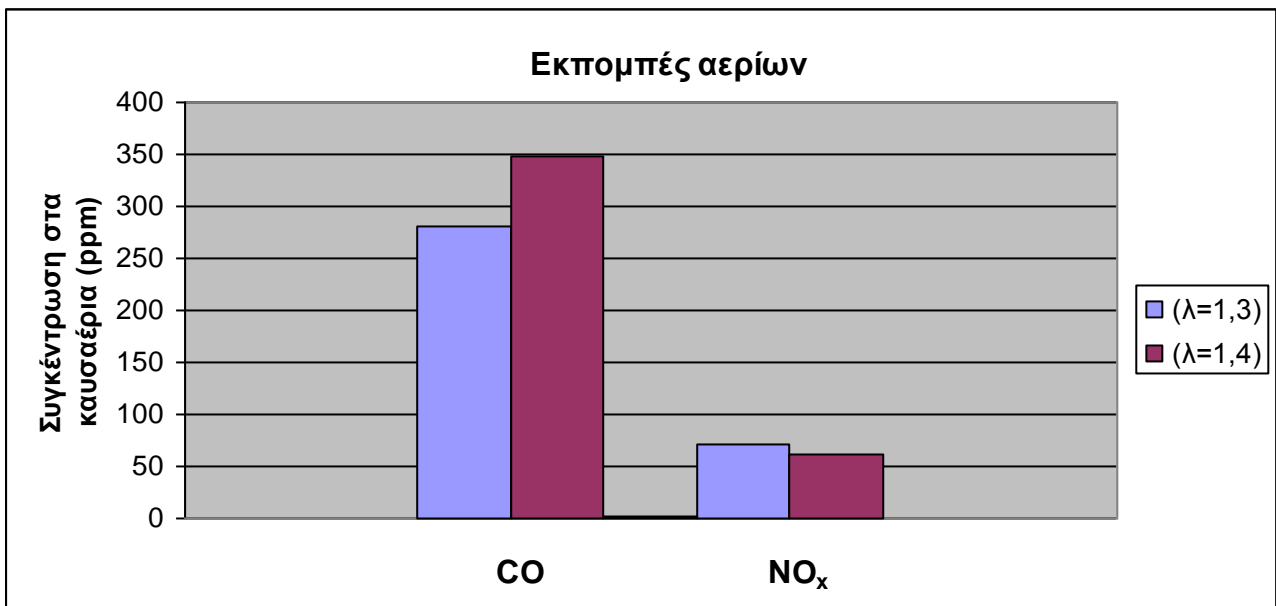
Στα Διαγράμματα 4.3.12 και 4.3.14 εμφανίζεται ο μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου – Λάσπης. Το Διάγραμμα 4.3.12 δείχνει τα αποτελέσματα για αναλογία Πυρηνόξυλου – Λάσπης 50/50 και το Διάγραμμα 4.3.14 για αναλογία 30/70. Όπως αναφέρθηκε, με την αύξηση της Λάσπης στα μίγματα και με την περίσσεια αέρα να αυξάνεται, η θερμοκρασία μειώνεται, ενώ οι εκπομπές του CO αυξάνονται .

Επίσης, ο σχηματισμός NO<sub>x</sub> με την αύξηση της περίσσειας του αέρα στο θάλαμο καύσης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα και για τα δυο ποσοστά μιγμάτων. Όσον αφορά τις εκπομπές SO<sub>2</sub> αυτές είναι μηδενικές.





**Διάγραμμα 4.3.13:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (30/70)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα



**Διάγραμμα 4.3.14 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου –Λάσπης (30/70)** για τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  συναρτήσει της περίσσειας αέρα

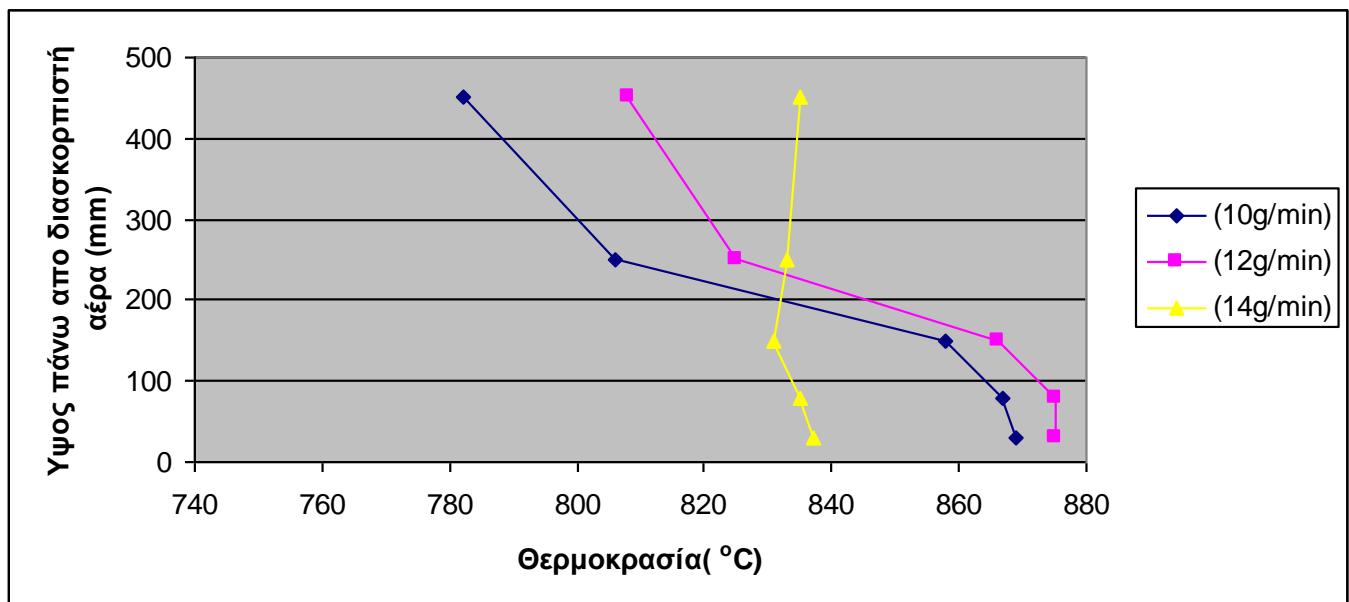


#### 4.4: Επίδραση του Ρυθμού Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παραμέτρους καύσης

##### 4.4.1 Αρχικά δείγματα

**Πίνακας 4.4.1 :** Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση **Πυρηνόξυλου** συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

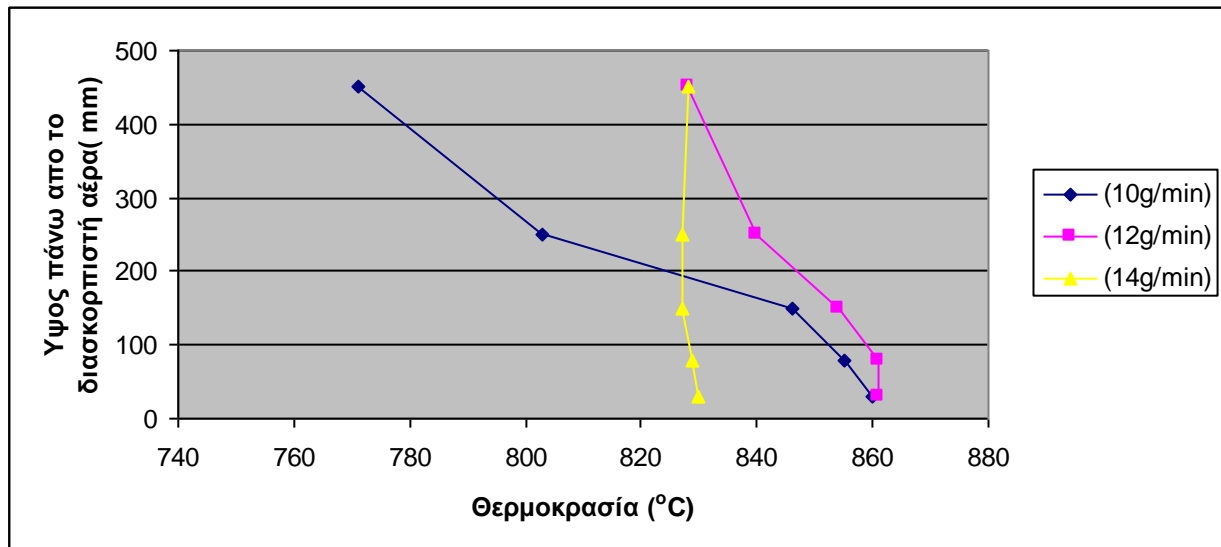
Λόγος περίσσειας αέρα λ	Τροφοδοσία (g/min)	Θερμοκρασία (°C)					CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	n(%)
		Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)									
		30	80	150	250	450					
1.3	10	869	867	858	806	782	475	7,6	272	0,99	99
1.3	12	875	875	866	825	808	371	0,1	147	0,99	99
1.3	14	837	835	831	833	835	499	0	236	0,99	99
1.4	10	860	855	846	803	771	538	13,8	325	0,99	99
1.4	12	861	861	854	840	828	680	1,8	196	0,99	99
1.4	14	830	829	827	827	828	639	0	231	0,99	99



**Διάγραμμα 4.4.1 :** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου** κατά μήκος του καυστήρα για λ=1.3 συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου



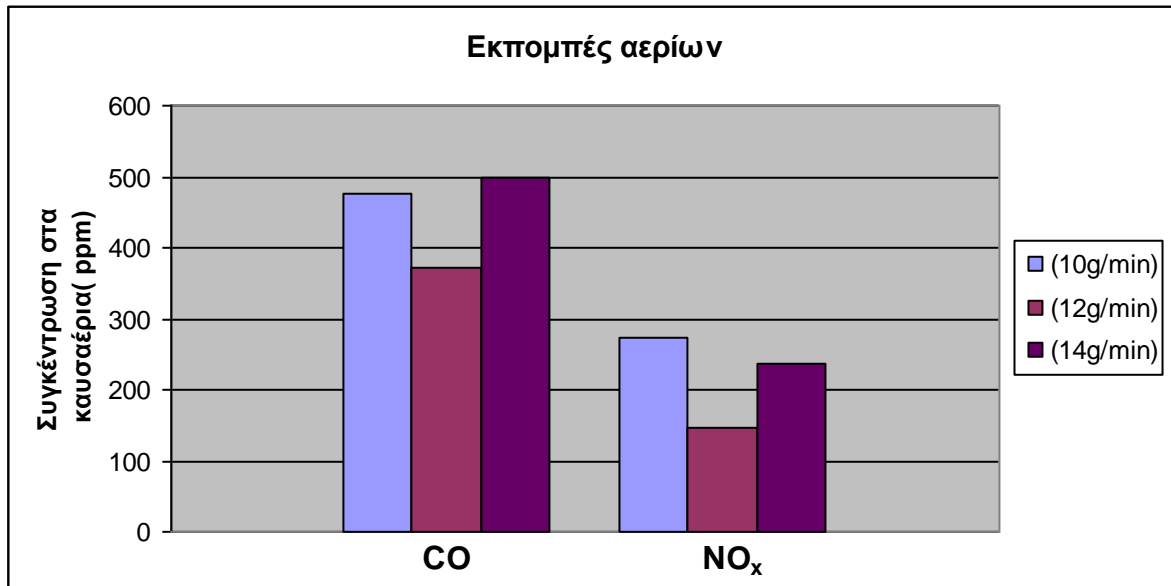
Από τον Πίνακα 4.4.1 και από το Διάγραμμα 4.4.1 για σταθερή περίσσεια αέρα  $\lambda=1.3$  και για τρεις διαφορετικές τροφοδοσίες 10,12 και 14 g/min παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία επιτεύχθηκε για  $F=12\text{g/min}$  με τιμή  $875^\circ\text{C}$ , ενώ στη συνέχεια μειώθηκε μέχρι το κωνικό μέρος του αντιδραστήρα. Για τροφοδοσία  $F=10\text{g/min}$  η καμπύλη παρουσιάζει την ίδια μορφή με  $F=12\text{g/min}$ , μόνο που η θερμοκρασίες είναι πιο χαμηλές. Όσο αφορά την τροφοδοσία  $F=14\text{g/min}$ , η θερμοκρασία ξεκίνησε από τους  $837^\circ\text{C}$  και παρέμεινε σταθερή καθόλο το τμήμα του καυστήρα.



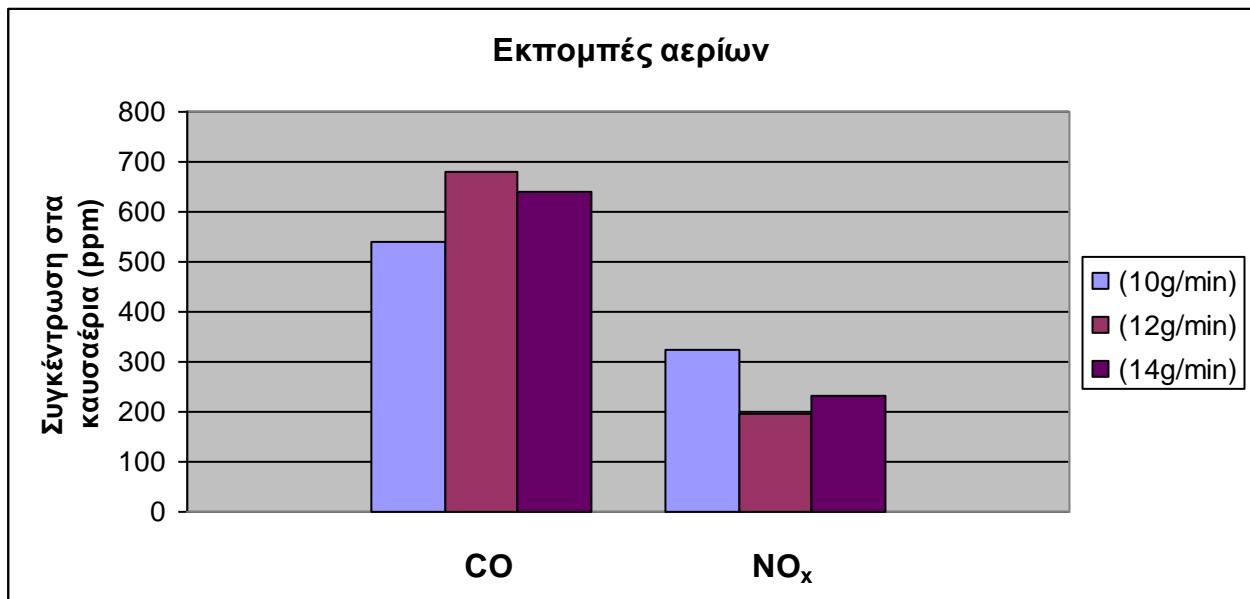
**Διάγραμμα 4.4.2:** Προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου κατά μήκος του καυστήρα για  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου

Το Διάγραμμα 4.4.2 παρουσιάζει το προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου κατά μήκος του καυστήρα για  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δυο Διαγραμμάτων 4.4.1 και 4.4.2 είναι ότι λόγω της αύξησης της περίσσειας του αέρα οι θερμοκρασίες για  $\lambda=1.4$  είναι πιο χαμηλές. Αυτό οφείλεται στη μερική ψύξη του κλιβάνου, λόγω του αέρα που ρέει σε ένα υψηλότερο ποσοστό.





**Διάγραμμα 4.4.3:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου για λόγο περίσσειας αέρα λ=1.3 συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.



**Διάγραμμα 4.4.4 :**Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου για λόγο περίσσειας αέρα λ=1.4 συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Τα Διαγράμματα 4.4.3 και 4.4.4 παρουσιάζουν τον μέσο όρο εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> του Πυρηνόξυλου για λόγο περίσσειας αέρα λ=1.3 και λ=1.4 αντίστοιχα, συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου. Παρατηρείται ότι με βάση και τον Πίνακα 4.4.1, για λ=1.3 η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση των ρύπων CO, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για λ=1.4. Για 12 g/min και για 14 g/min τα NO<sub>x</sub> είναι

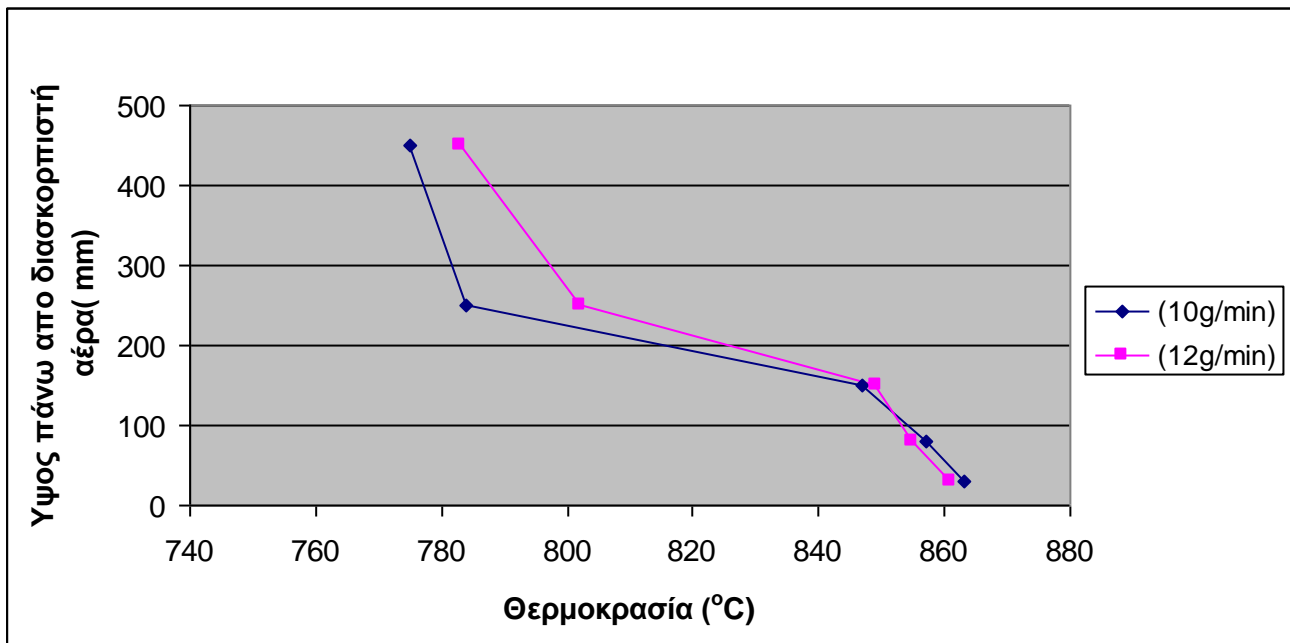


μειωμένα, σε σχέση με την παροχή καυσίμου 10 g/min, γιατί η θερμοκρασία στο ελεύθερο όριο παρουσιάζει υψηλές τιμές και μάλλον εκεί καίγονται πτητικά συστατικά (η ατμόσφαιρα δηλαδή είναι πιο αναγωγική).

#### 4.4.2 Μίγματα

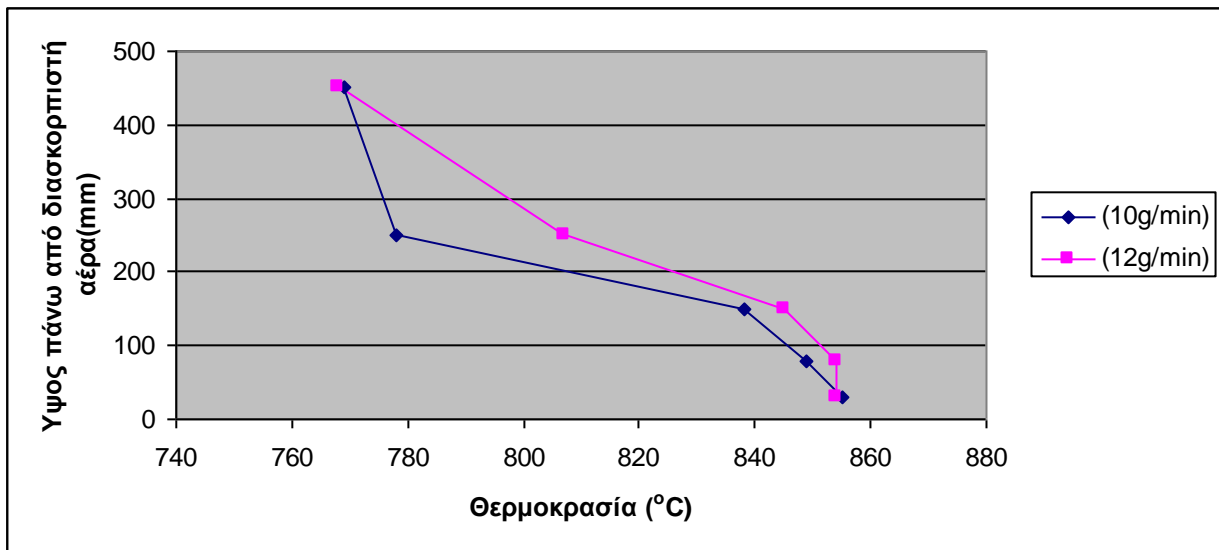
**Πίνακας 4.4.2:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου - MBM**, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

			Θερμοκρασία (°C)									
			Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)									
Πυρ/MBM	λ	Τροφοδοσία (g/min)	30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx (ppm)	Lco	η (%)
90/10	1.3	10	863	857	847	784	775	637	0	395	0,99	99
	1.3	12	861	855	849	802	783	457	0	363	0,99	99
	1.4	10	855	849	838	778	769	468	14,9	354	0,99	99
	1.4	12	854	854	845	807	768	817	14,4	423	0,99	99



**Διάγραμμα 4.4.5 :** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου- MBM (90/10)** κατά μήκος του καυστήρα για λ=1.3 συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

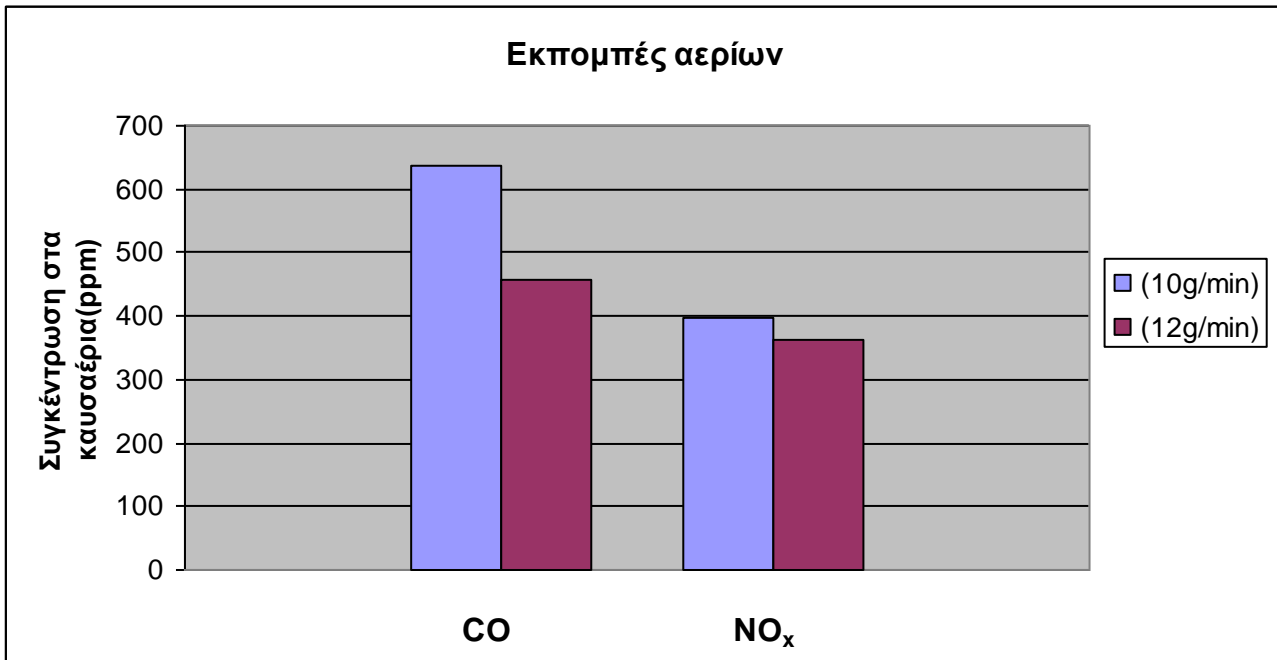




**Διάγραμμα 4.4.6:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-MBM (90/10)** κατά μήκος του καυστήρα για  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

Τα Διάγραμματα 4.4.5 και 4.4.6 δείχνουν το προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου-MBM (90/10) για  $\lambda=1.3$  και  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες με  $\lambda=1.3$  για 10g/min και 12g/min ταυτίζονται από απόσταση 30mm μέχρι τα 150mm από τον διασκορπιστή του αέρα και μειώνονται σταδιακά μέχρι το κωνικό τμήμα του αντιδραστήρα. Όταν το  $\lambda=1.4$  οι θερμοκρασίες είναι κατά πολύ λίγο χαμηλότερες, ωστόσο η μορφή των καμπυλών που διακρίνεται είναι η ίδια.

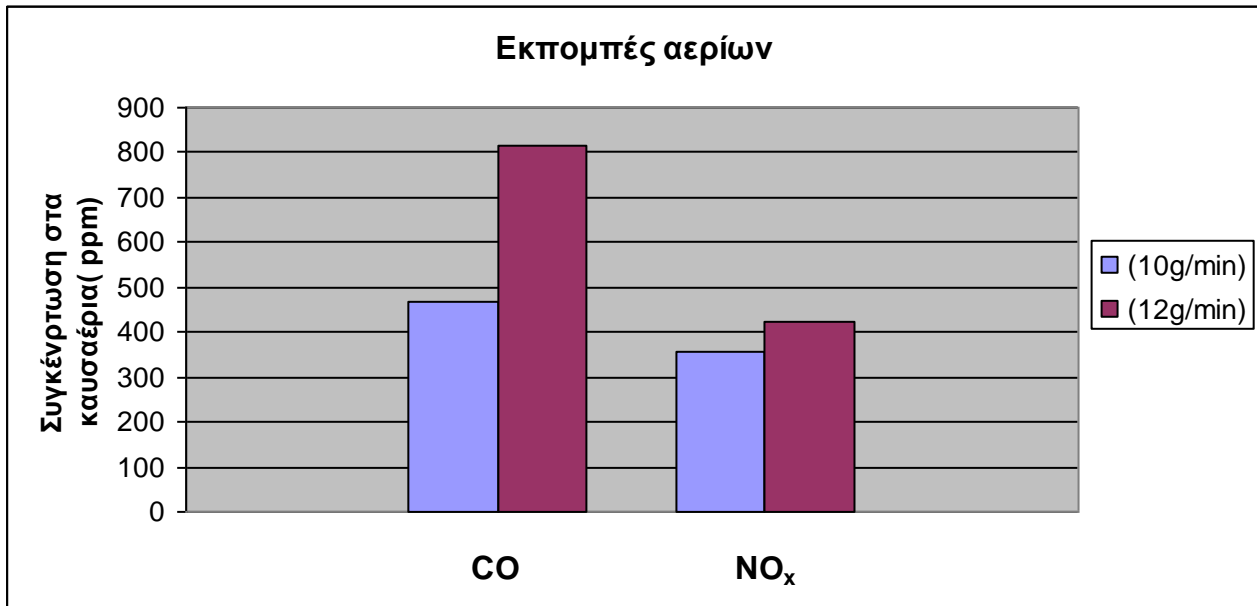




**Διάγραμμα 4.4.7:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου - MBM (90/10)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

Οι εκπομπές ρύπων για 10g/min όσο αφορά το CO (637ppm) και τα NO<sub>x</sub> (395ppm) παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με τροφοδοσία 12g/min με CO (457ppm) και NO<sub>x</sub> (363ppm). Για  $\lambda=1.3$  παρατηρείται ότι η βέλτιστη τροφοδοσία είναι 12g/min, όπου η θερμοκρασία στην κλίνη είναι σχετικά ομοιόμορφη και επίσης οι εκπομπές ρύπων είναι μειωμένες.





**Διάγραμμα 4.4.8:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου-MBM (90/10) για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Το Διάγραμμα 4.4.8 παρουσιάζει το μέσο όρο εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> Πυρηνόξυλου-MBM (90/10) για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου. Σε σχέση με το Διάγραμμα 4.4.7 παρατηρείται ότι η αύξηση της τροφοδοσίας του μίγματος αύξησε τις εκπομπές κατά λίγο.



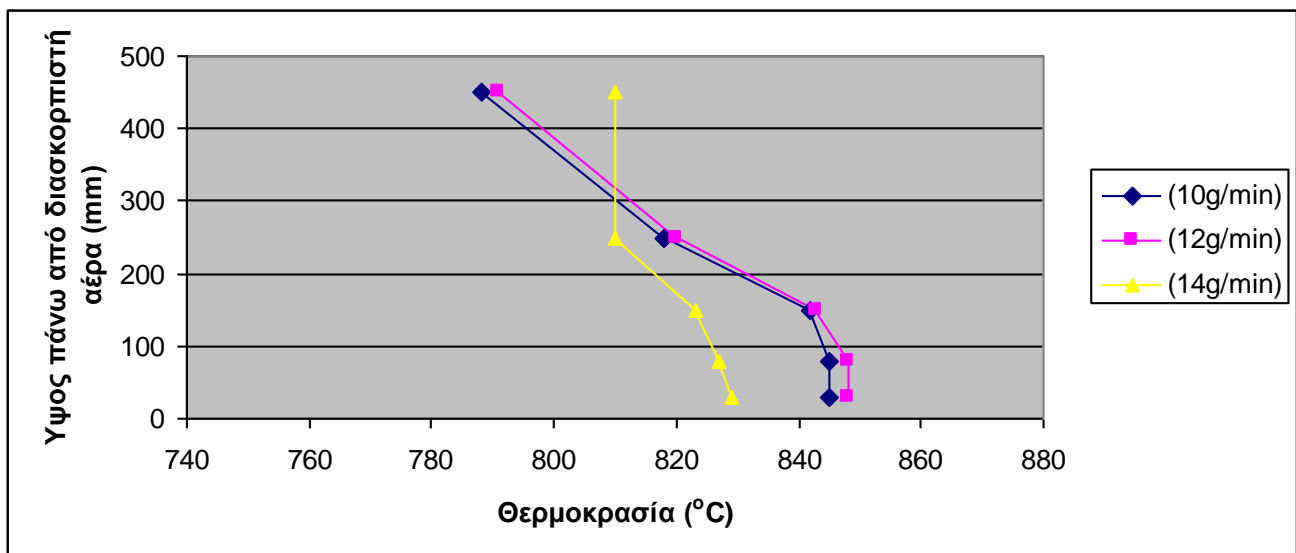
**Πίνακας 4.4.3:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου–Λάσπης** , εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Αναλογία Πυρ./ Λάσπης	λ	Τροφοδοσία (g/min)	Θερμοκρασία(°C)					Απόσταση από διασκορπιστή αέρα(mm)				
			30	80	150	250	450	CO(ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NOx(ppm)	Lco	η(%)
<b>(70/30)</b>	1.3	10	847	846	844	824	803	595	0	65	0,99	99
	1.3	12	848	847	845	829	820	649	0	79	0,99	99
	1.3	14	831	829	825	818	818	688	0	86	0,99	99
	1.4	10	845	845	842	818	788	792	0	91	0,99	99
	1.4	12	848	848	843	820	791	834	0	128	0,99	99
	1.4	14	829	827	823	810	810	870	0	111	0,99	99
<b>(50/50)</b>	1.3	10	844	842	836	810	788	477	0	65	0,99	99
	1.3	12	854	854	850	827	807	398	0,9	94	0,99	99
	1.3	14	816	815	810	796	797	824	0	78	0,99	99
	1.4	10	840	839	836	811	775	418	0	95	0,99	99
	1.4	12	845	842	840	818	796	694	24,9	149	0,99	99
	1.4	14	815	814	812	800	804	544	0	64	0,99	99
<b>(30/70)</b>	1.3	10	824	823	819	798	781	210	0	66	0,99	99
	1.3	12	834	834	832	819	805	280	0	70	0,99	99
	1.3	14	824	822	820	810	809	456	0	78	0,99	99
	1.4	10	820	819	817	793	770	308	0	58	0,99	99
	1.4	12	813	810	807	795	779	348	0	61	0,99	99
	1.4	14	823	822	821	806	800	436	0	80	0,99	99
<b>(0/100)</b>	1.3	10	817	816	815	814	793	404	0	66	0,99	99
	1.3	12	813	811	809	800	793	474	0	78	0,99	99
	1.3	14	808	807	806	800	803	1276	0	86	0,98	99
	1.4	10	816	814	813	809	779	614	0	92	0,99	99
	1.4	12	807	805	804	792	785	580	0	75	0,99	99
	1.4	14	803	802	801	792	793	879	0	86	0,99	99



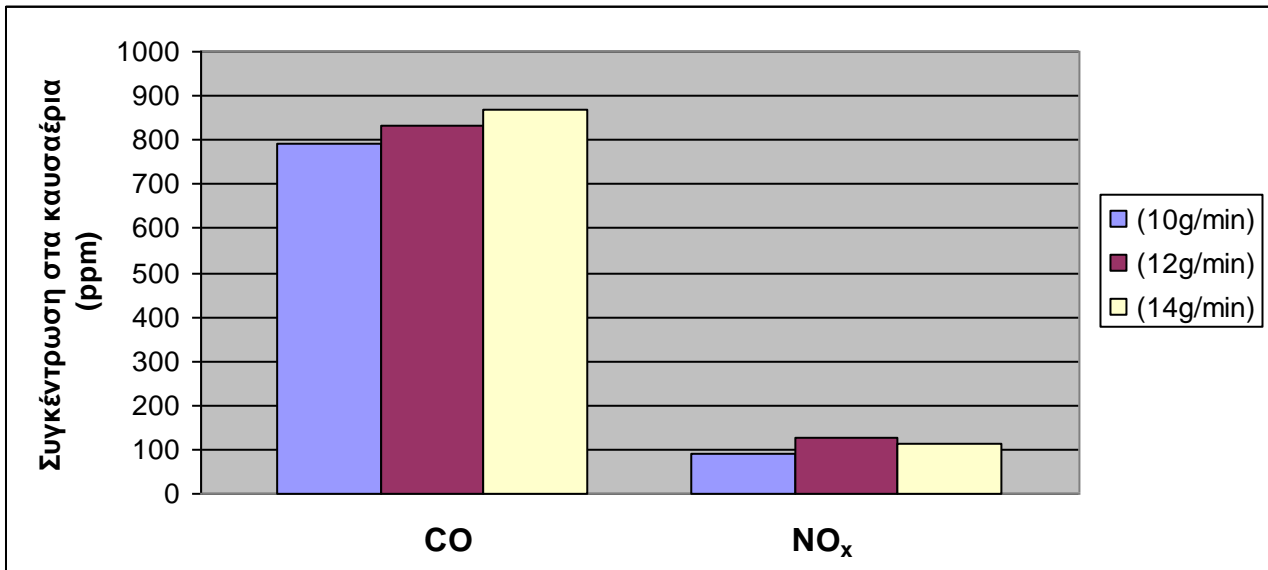
Στον Πίνακα 4.4.3 παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου–Λάσπης, οι εκπομπές αερίων ρύπων και η απόδοση συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου. Γενικά παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται η τροφοδοσία από 10g/min σε 12g/min οι διαφορές που προκύπτουν στις θερμοκρασίες τόσο εντός της κλίνης, όσο και στο ελεύθερο όριο, μέχρι την αναλογία Πυρηνόξυλου–Λάσπης 50/50 είναι μικρές. Αυτό φαίνεται και από τα Διαγράμματα 4.4.9 και 4.4.11. Για τροφοδοσία καυσίμου ίση με 14g/min η θερμοκρασία πέφτει καθ' ύψος του καυστήρα, με αποτέλεσμα οι εκπομπές CO να αυξάνονται (Διαγράμματα 4.4.10, 4.4.12). Επίσης, τα NOx γενικά αυξάνονται με την παροχή του καυσίμου. Στις περιπτώσεις όπου οι τιμές NOx είναι λίγο μικρότερες οφείλεται στο ότι είναι πολύ ευαίσθητες οι εκπομπές στις αλλαγές θερμοκρασίας, καθώς επίσης και στο ποσοστό των πτητικών που καίγονται στο ελεύθερο όριο (Διαγράμματα 4.4.10 και 4.4.12). Η βέλτιστη τροφοδοσία φαίνεται να είναι αυτή των 10g/min όπου η θερμοκρασία στην κλίνη είναι ομοιόμορφη και σε αποδεκτό επίπεδο για ρευστοποιημένη κλίνη, ενώ οι εκπομπές ρύπων είναι χαμηλότερες.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα του Παραρτήματος Ι, όπου ο λόγος περίσσειας αέρα αντιστοιχεί σε  $\lambda=1.3$ , παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες και οι εκπομπές ρύπων σαφώς χαμηλότερες από τους ρύπους με  $\lambda=1.4$ .

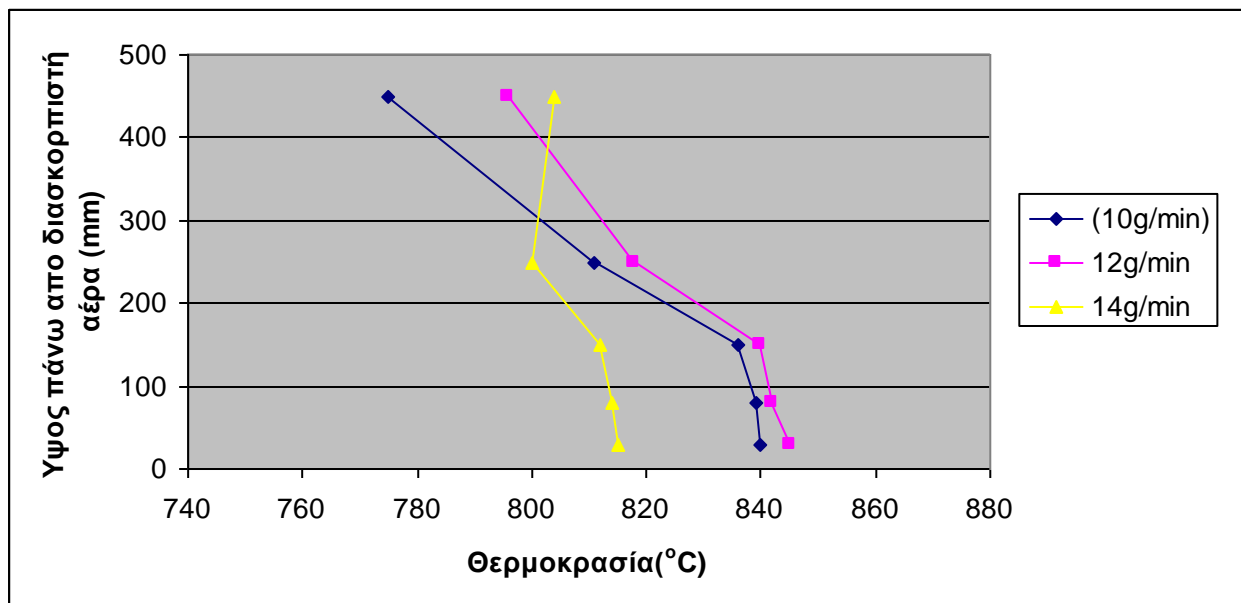


**Διάγραμμα 4.4.9:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



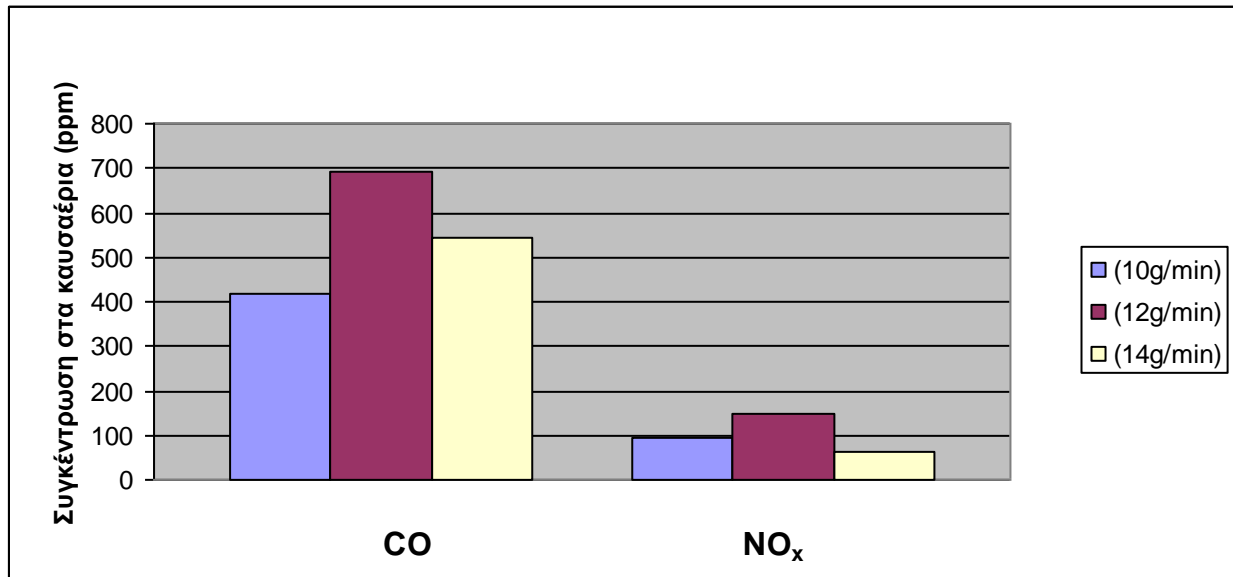


**Διάγραμμα 4.4.10:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



**Διάγραμμα 4.4.11:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

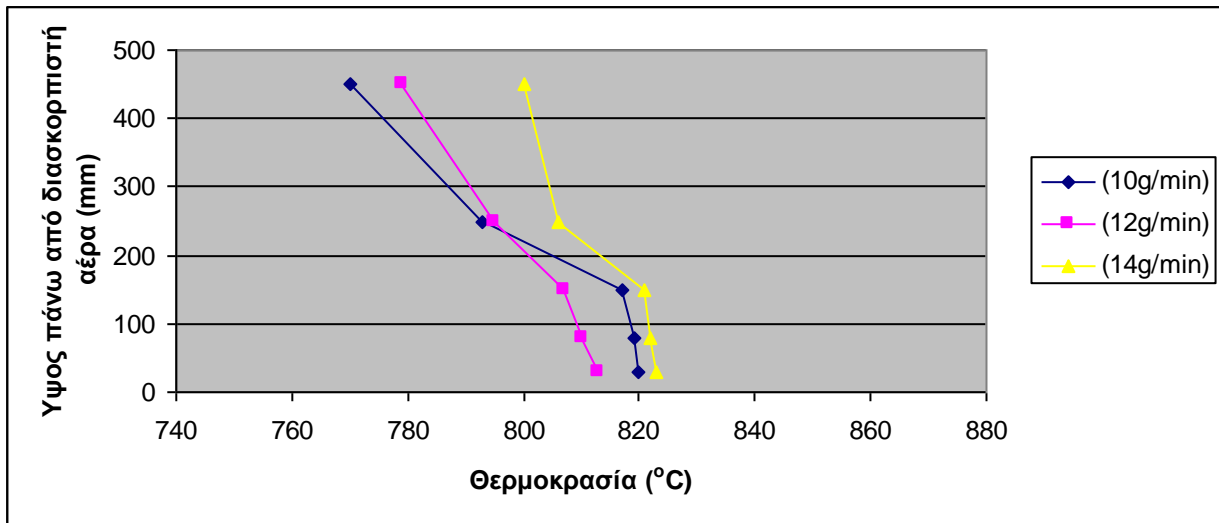




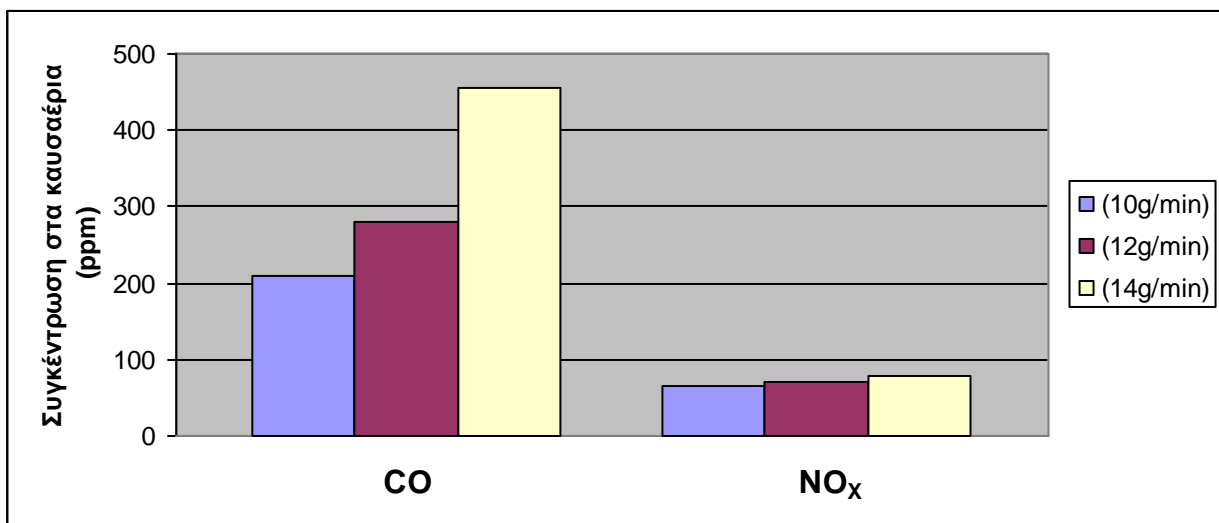
**Διάγραμμα 4.4.12:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (50/50)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου

Από τον Πίνακα 4.4.3 και τα Διαγράμματα 4.4.13 και 4.4.15 διακρίνεται ότι, με την αύξηση του λύματος στο ποσοστό του μίγματος με το πυρηνόξυλο και την αύξηση της παροχής του καυσίμου η θερμοκρασία εντός της κλίνης μειώνεται. Οι εκπομπές ρύπων που παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4.4.14 και 4.4.16 δείχνουν ότι για τροφοδοσία καυσίμου ίση με 14g/min, όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη οι εκπομπές CO αυξάνονται. Οι τιμές των ρύπων NO<sub>x</sub> είναι αποτέλεσμα της περίσσειας αέρα, της θερμοκρασίας και της αύξησης του λύματος στα μίγματα.



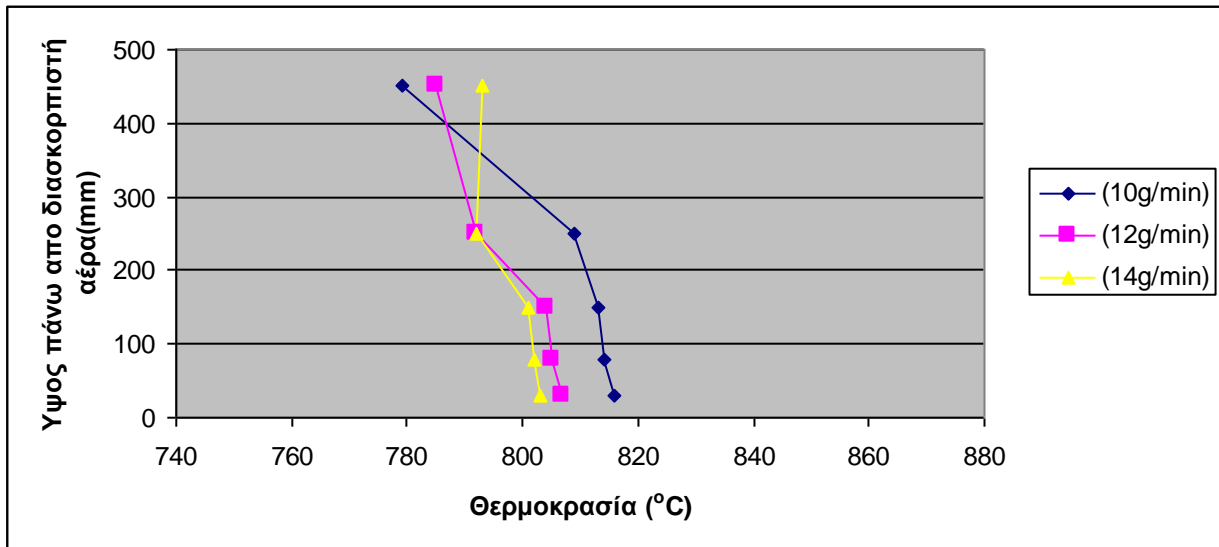


**Διάγραμμα 4.4.13 :** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (30/70)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

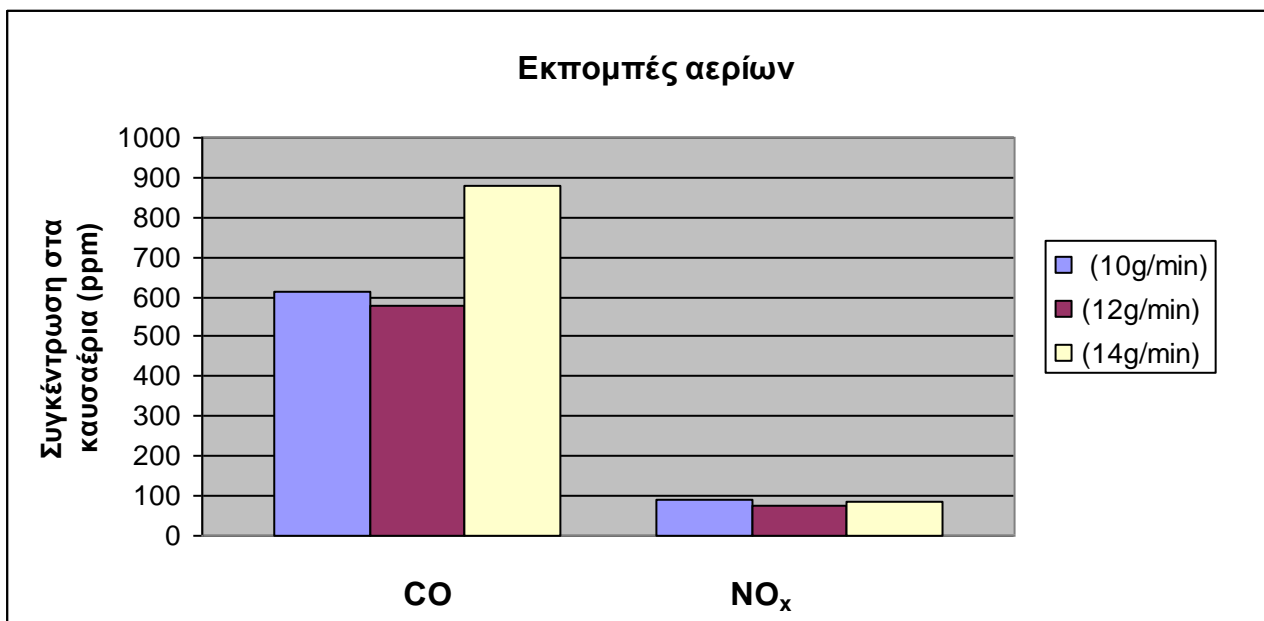


**Διάγραμμα 4.4.14 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (30/70)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.





**Διάγραμμα 4.4.15 :** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (0/100)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



**Διάγραμμα 4.4.16 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (0/100)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων καύσης καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα :

- ❖ Από την προσεγγιστική ανάλυση, παρατηρείται ότι το πυρηνόξυλο εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά και μικρότερο ποσοστό σε τέφρα απ'ότι η λάσπη και το κρεατάλευρο. Η ανώτερη θερμογόνο δύναμη των δειγμάτων είναι παραπλήσια με τους γαϊάνθρακες χαμηλής τάξης. Η περιεκτικότητα σε άζωτο είναι αυξημένη μόνο στη λάσπη και το κρεατάλευρο. Τέλος, η συγκέντρωση θείου είναι χαμηλή σε όλα τα δείγματα.
- ❖ Οι τέφρες των καυσίμων χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε Mg, P και Ca, ενώ το πυρηνόξυλο εμφανίζει και υψηλό ποσοστό σε K. Στο κρεατάλευρο το Ca και ο P είναι πολύ υψηλά. Τα ιχνοστοιχεία των δειγμάτων κυμαίνονται γενικά σε χαμηλά επίπεδα και δεν υπερβαίνουν ευρωπαϊκά περιβαλλοντικά όρια.
- ❖ Οι μέγιστες θερμοκρασίες των αρχικών δειγμάτων που επιτεύχθηκαν κατά την καύση πυρηνόξυλου και λάσπης με  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$ , ήταν  $861^\circ\text{C}$  και  $807^\circ\text{C}$ , αντίστοιχα. Οι εκπομπές ρύπων CO και NO<sub>x</sub> στο πυρηνόξυλο ήταν αυξημένες. Παρόλο που η περιεκτικότητα σε άζωτο της λάσπης ήταν μεγαλύτερη του πυρηνόξυλου, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ήταν χαμηλότερες, μάλλον, λόγω σχηματισμού άλλων ενώσεων αζώτου σε ανηγμένη μορφή.
- ❖ Για τα μίγματα Πυρηνόξυλου/MBM, σε τροφοδοσία  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας σε σχέση με το πυρηνόξυλο. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι τα πτητικά συστατικά κάηκαν μέσα στην κλίνη. Ακόμα, οι εκπομπές CO και NO<sub>x</sub> ήταν αυξημένες κατά την συν-καύση Πυρ/MBM, λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών συγκριτικά με την καύση σκέτου πυρηνόξυλου και επίσης υψηλότερου αζώτου στο MBM.
- ❖ Για τα μίγματα Πυρηνόξυλου/Λάσπη σε τροφοδοσία  $F=12 \text{ g/min}$  και λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.4$  παρατηρήθηκε ότι παρουσίασαν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το πυρηνόξυλο. Οι εκπομπές CO και NO<sub>x</sub> ήταν παρεμφερείς λόγω παρόμοιων θερμοκρασιών. Τα NO<sub>x</sub> των μιγμάτων ήταν σημαντικά μειωμένα και σε επιτρεπτά όρια.

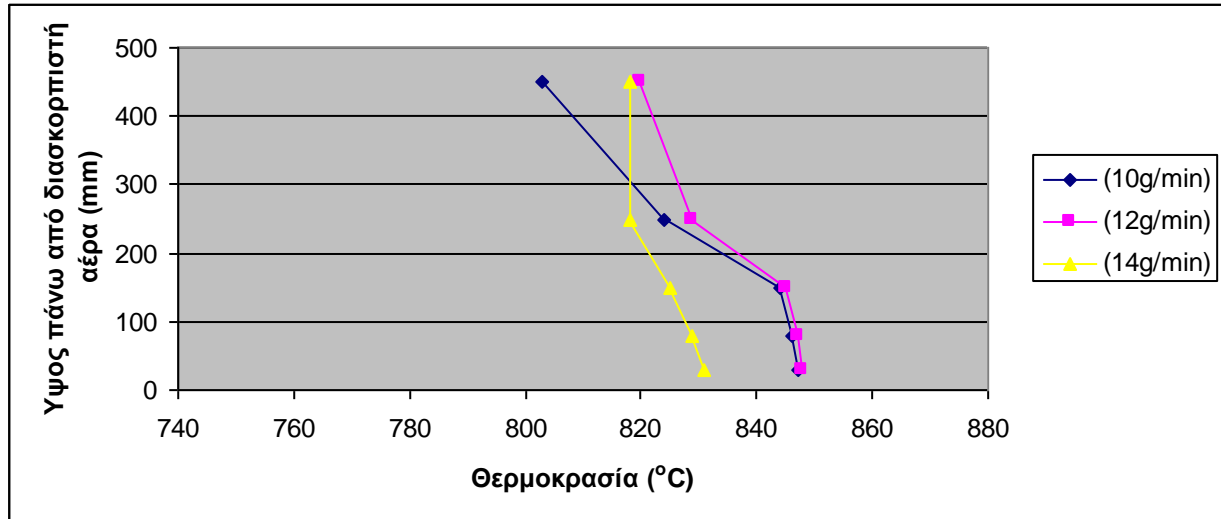


- ❖ Όσον αφορά την επίδραση της περίσσειας αέρα στο πυρηνόξυλο και τη λάσπη, για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου  $F=12 \text{ g/min}$  γενικά παρατηρήθηκε μείωση του προφίλ των θερμοκρασιών και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοτήτων των καυσαερίων  $\text{CO}$ . Τα  $\text{NO}_x$  παρουσίασαν μικρή αύξηση λόγω αυξημένης οξείδωσης των καυσίμων.
- ❖ Για τα μίγματα Πυρηνόξυλου/MBM και Πυρηνόξυλου/Λάσπη, η θερμοκρασία μειώθηκε σε σχέση με το πυρηνόξυλο. Με την αύξηση της περίσσειας του αέρα οι εκπομπές  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$  αυξήθηκαν σταδιακά. Η αύξηση του ποσοστού της λάσπης και του κρεαταλεύρου στο πυρηνόξυλο και με την περίσσεια αέρα να αυξάνεται είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας στην κλίνη και την αύξηση των εκπομπών  $\text{CO}$ . Για όλα τα ποσοστά μιγμάτων, ο σχηματισμός  $\text{NO}_x$  έμεινε σε χαμηλά επίπεδα με την αύξηση της περίσσειας του αέρα.
- ❖ Η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του πυρηνόξυλου από 10 σε 12 ή 14g/min, έδειξε γενικά ότι μειώθηκε η θερμοκρασία και αυξήθηκαν οι εκπομπές ρύπων  $\text{CO}$ . Για  $\lambda=1.3$  η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε μείωση των ρύπων  $\text{CO}$ , ενώ το αντίθετο συνέβη για  $\lambda=1.4$ . Για  $\lambda=1.4$  και τροφοδοσίες 12/min και 14g/min τα  $\text{NO}_x$  ήταν μειωμένα σε σχέση με την παροχή 10g/min, για το λόγο ότι η θερμοκρασία στο ελεύθερο όριο παρουσίασε υψηλές τιμές και πιθανό εκεί καίγονταν πτητικά συστατικά.
- ❖ Για τα μίγματα Πυρηνόξυλου/MBM και Πυρηνόξυλου/Λάσπη, με σταθερό λόγο περίσσειας αέρα και μεταβολή της τροφοδοσίας γενικά παρατηρήθηκε ότι, με την αύξηση της τροφοδοσίας από 10g/min, σε 12g/min ή 14 g/min οι διαφορές που προέκυψαν στις θερμοκρασίες τόσο εντός της κλίνης, όσο και στο ελεύθερο όριο, ήταν μικρές. Λόγω μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με την καύση του σκέτου πυρηνόξυλου οι εκπομπές  $\text{CO}$  ήταν αυξημένες. Επίσης, τα  $\text{NO}_x$  αυξήθηκαν με την αύξηση παροχής του καυσίμου.
- ❖ Γενικά, όλες οι εκπομπές διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) ήταν πολύ μικρές για όλα τα πειράματα καύσης. Αυτό οφείλεται στην αμελητέα περιεκτικότητα σε θείο (S) που προέκυψε από την στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων.

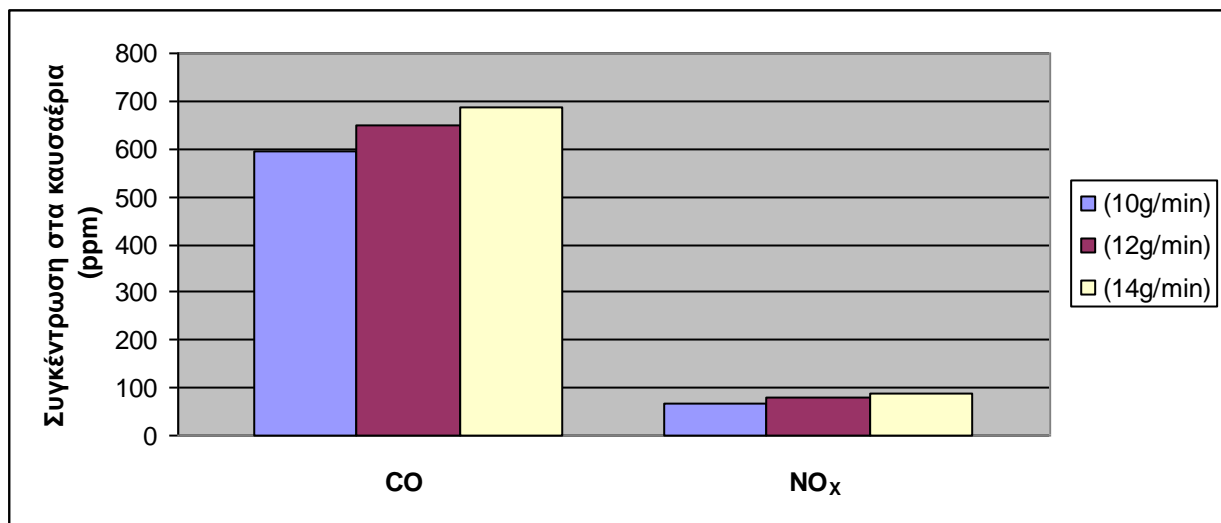
Συνολικά, τα ζωικά απόβλητα που μελετήθηκαν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σαν εναλλακτικά καύσιμα για παραγωγή ενέργειας σε ρευστοποιημένη κλίνη. Η Λάσπη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είτε αυτούσια, είτε σε μίγματα με πυρηνόξυλο, χωρίς επιβάρυνση του περιβάλλοντος, ενώ το κρεατάλευρο σε ποσοστά έως 20% με πυρηνόξυλο, τροφοδοσίες  $<12 \text{ g/min}$  και περίσσεια αέρα  $<40\%$ .



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

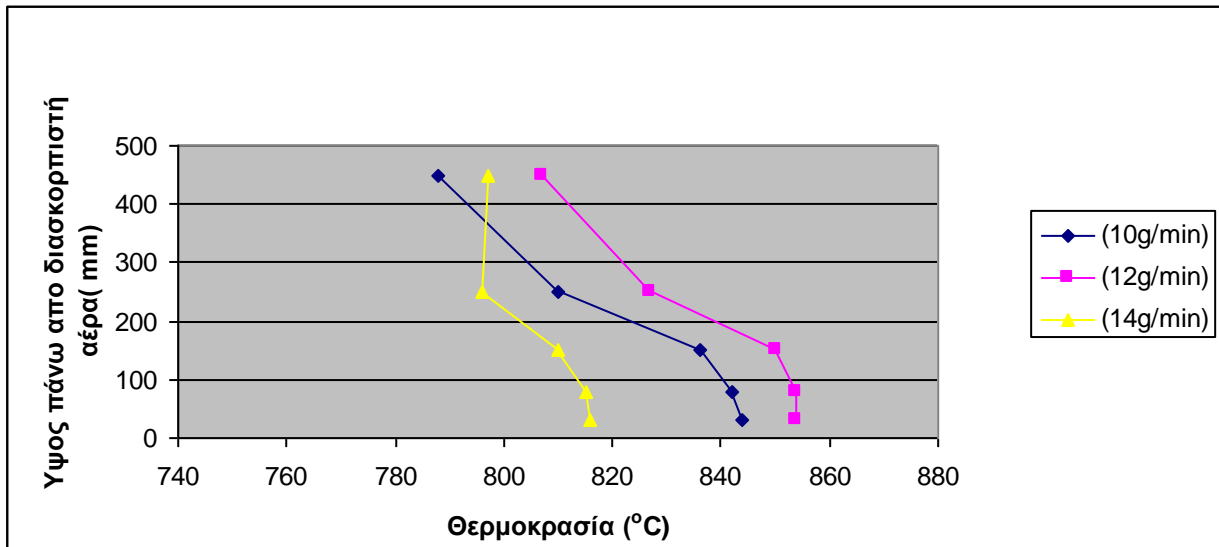


**Διάγραμμα 4.4.17:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

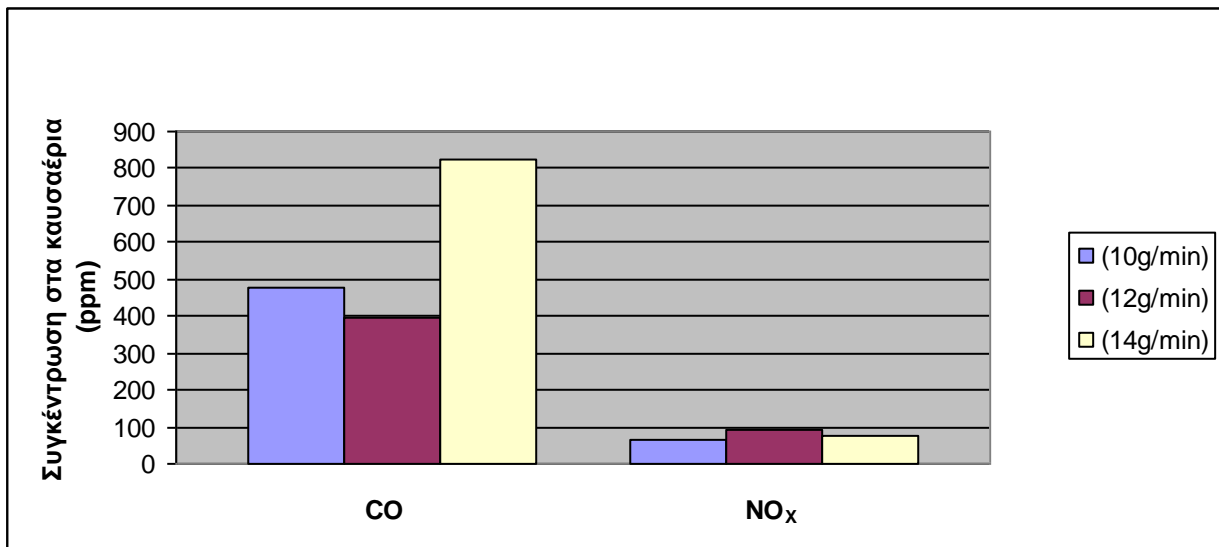


**Διάγραμμα 4.4.18:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (70/30)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



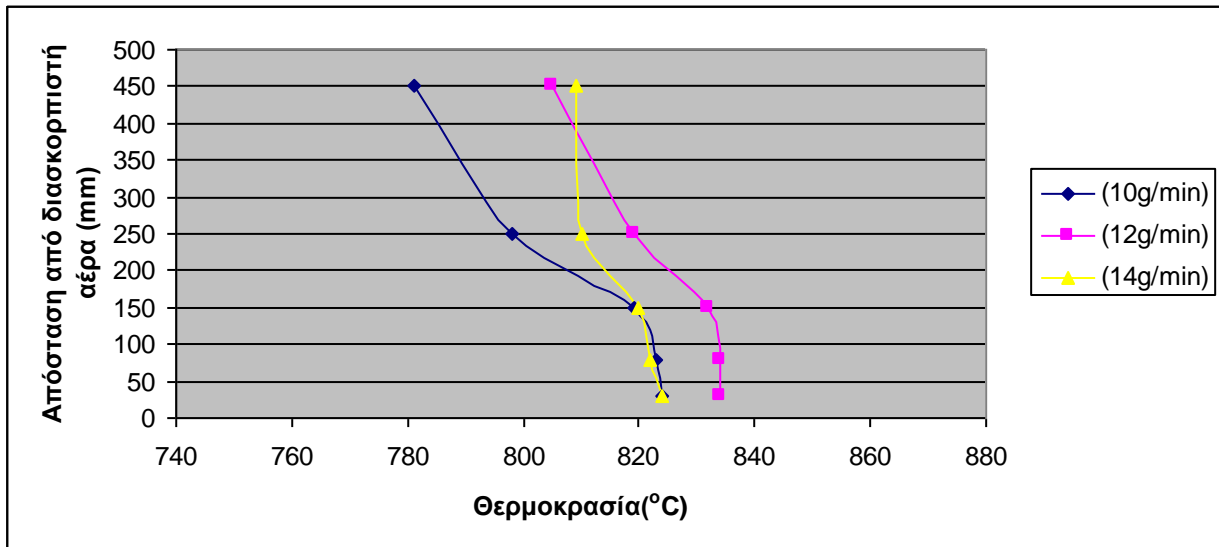


**Διάγραμμα 4.4.19:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

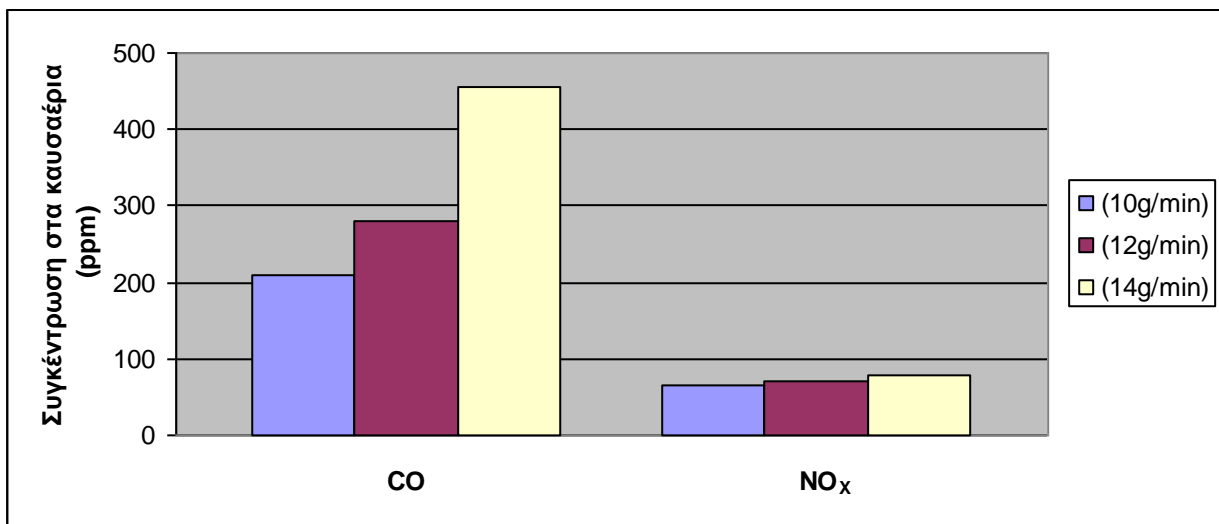


**Διάγραμμα 4.4.20:** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (50/50)** για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



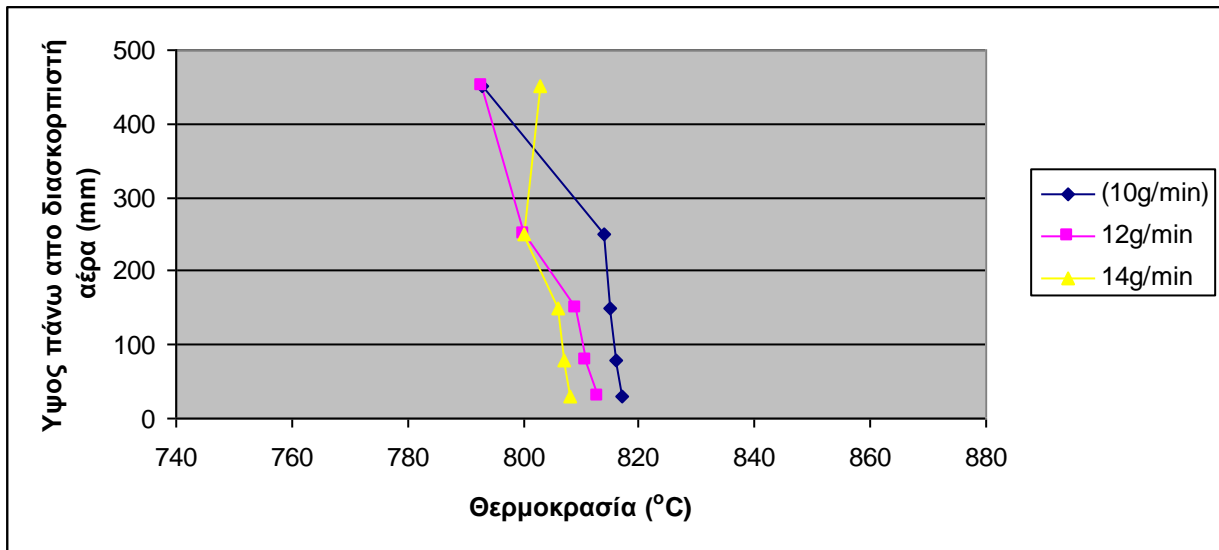


Διάγραμμα 4.4.21 : Προφίλ θερμοκρασιών Πυρηνόξυλου -Λάσπης (30/70) κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

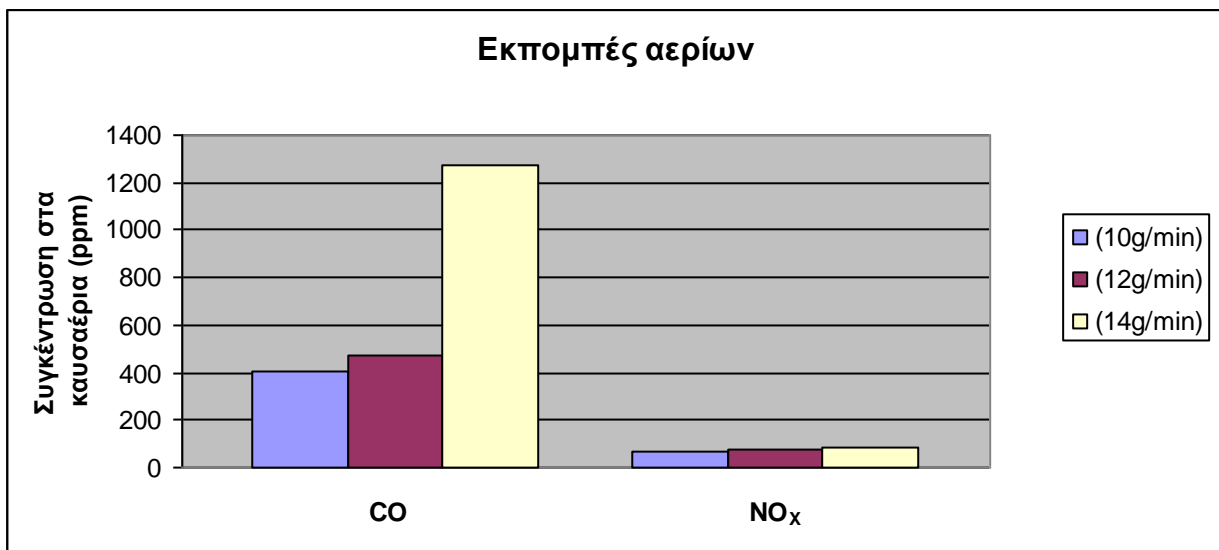


Διάγραμμα 4.4.22 : Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx Πυρηνόξυλου-Λάσπης (30/70) για λόγο περίσσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.





**Διάγραμμα 4.4.23:** Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (0/100)** κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περισσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



**Διάγραμμα 4.4.24 :** Μέσος όρος εκπομπών CO και NO<sub>x</sub> **Πυρηνόξυλου-Λάσπης (0/100)** για λόγο περισσειας αέρα  $\lambda=1.3$  συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χριστοφής .Ι. Κορωναίος, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Αθήνα, Μάρτιος 2012
- [2] Υφαντή Γεωργία, Διπλωματική Εργασία «Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ», Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2013
- [4] Κοτρωνάκης Μανώλης, Μεταπτυχιακή διατριβή: «Αξιοποίηση υπολειμμάτων εσπεριδοειδών για παραγωγή ενέργειας », Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012.
- [9] Δήμος Βασίλειος, Θέμα Εργασίας: « Αξιοποίηση του ελαιοπυρηνόξυλου για την παραγωγή βιοκαυσίμο με την διαδικασία της βιοχημικής μετατροπής » , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- [10] Κ .Ι. Ισραηλίδης, «ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΑΓΡΟΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ », Ινστιτούτο Τεχνολογίας Γεωργικών Προϊόντων – ΕΘΙΑΓΕ.
- [11] Ν. Αχ. Φιλιππόπουλος<sup>1</sup>, Ζ. Σαμαράς<sup>2</sup>, Δ. Καμίδης<sup>1</sup>, Γ. Κουφοδήμος<sup>2</sup>  
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΖΩΙΚΩΝ ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ,  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [12] Β. Αντωνόπουλος, Κ. Ακριτίδης και Κ. Τσατσαρέλης, 3<sup>ο</sup> ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, Θεσσαλονίκη, 29-31 Μαΐου 2003
- [13] Τζινευράκης Μ., Τζαβάρα Ι., Τσούτσος Θ., Βάμβουκα Δ., Ξιφαράς Κ., «Δυναμικό Βιομάζας για Ενεργειακή Αξιοποίηση στην Κρήτη», Θεσσαλονίκη, 2006.
- [14] Δ.ΒΑΜΒΟΥΚΑ, Βιομάζα, Βιοενέργεια & Περιβάλλον, εκδόσεις Τζιόλα 2009
- [17] I. Gulyurtlu, D. Boavida\*, P. Abelha, M.H. Lopes, I. Cabrita, «Co-combustion of coal and meat and bone meal», Fuel 84 (2005), 2137–2148.
- [18] Federico M. Berruti\*, Lorenzo Ferrante, Cedric L. Briens, Franco Berruti, « Pyrolysis of cohesive meat and bone meal in a bubbling fluidized bed with an intermittent solid slug Feeder.» 94 (2012), 153–162
- [19] Τρικουβέρτης Μάριος-Γεώργιος, Διπλωματική διατριβή: « Χαρακτηρισμός τεφρών από καύση υπολειμμάτων εσπεριδοειδών σε ρευστοποιημένη κλίνη», Πολυτεχνείο Κρήτης, Φεβρουάριος, 2013



- [22] D.C.Dayton, B.M. Jenkins, S.Q.Turn, R.R. Bakker, R.B.Williams, D.Belle-Omdry, L.M.Hill, Release of anorganic constituents from leached biomass during thermal combustion, and Energy Fuels 13, 1999 p.860
- [23] B.M.Jenkins, L.L.Baxter,T.R.Miles, Combustion properties of biomass, Fuel Processing Technology 54(1-3), 1998, p.17.
- [24] Di Nola., De Jong W., Spliethoff H., Fuel Processing Technology, 2010,91,103.
- [25] ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε. «Ελληνικό Ίνστιτούτο Υγιεινής & Ασφάλειας της Εργασίας», «Οδηγός Νομοθεσίας για την Προστασία του Περιβάλλοντος»

### Διαδουκτιακές Πηγές

- [1] <http://environ.survey.ntua.gr/files/mathimata/6420/APE-kef1-6.pdf>
- [2] <http://digilib.lib.unipi.gr/dspace/bitstream/unipi/5156/1/Ifantis.pdf>
- [3] Σενάριο Ενέργειας στην Ευρώπη [www.Wuppertal-institute.com](http://www.Wuppertal-institute.com)
- [5] Εικόνα 2.2.2 Κύκλος Βιομάζας [www.google.com](http://www.google.com)
- [6] <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-6>
- [7] <http://www.desmie.gr>
- [8] Θέρμανση θερμοκηπίων με Βιομάζα [www.google.com](http://www.google.com)
- [9] <http://www.chemeng.ntua.gr/courses/bpy/files/dimos.pdf>
- [15] [http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA\\_8.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_8.pdf)
- [16] [www.cretafarm.gr](http://www.cretafarm.gr)
- [20] [www.chemeng.upatras.gr/.../Notes...](http://www.chemeng.upatras.gr/.../Notes...)
- [21] <http://cerl.kmutt.ac.th/coal.php>
- [25] [http://www.elinyae.gr/el/lib\\_file\\_upload/ote.1105449426093.pdf](http://www.elinyae.gr/el/lib_file_upload/ote.1105449426093.pdf)
- [26] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31986L0278>



