



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΞΕΥΓΕΝΙΣΜΟΥ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΧΑΝΙΩΝ, ΑΠΟ ΣΥΝ-ΚΑΥΣΗ ΣΕ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ»**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΚΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

κα. ΒΑΜΒΟΥΚΑ – ΚΑΛΟΥΜΕΝΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ, Καθηγήτρια (Επιβλέπουσα)

κ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, Καθηγητής

κ. ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια και επιβλέπουσα κυρία Βάμβουκα-Καλούμενου Δέσποινα, για την εξαιρετική συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια διεκπεραίωσης της διπλωματικής μου εργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον εργαστηριακό συνεργάτη του Εργαστηρίου ‘Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων’ του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Στέλιο Σφακιωτάκη για την βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Γαλετάκη Μιχαήλ και τον κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου (ιδιαίτερα τον Βαμβακάκη Νικόλα) για την υποστήριξη και την βοήθεια που μου παρείχαν σε όλο αυτό το ταξίδι.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στα δύο μου αδέρφια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	8
2.1 Ο Ρόλος της Βιομάζας στο Παγκόσμιο Ενεργειακό Ισοζύγιο	8
2.1.1 Τύποι και δυναμικό παραγωγής.....	12
2.1.2 Τεχνολογίες αξιοποίησης για παραγωγή ενέργειας	19
2.2 Δημοτικά Απόβλητα ως Βιομαζικό Υλικό	25
2.2.1 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά λυματολάσπης.....	27
2.2.2 Τεχνολογίες αξιοποίησης λυματολάσπης για παραγωγή ενέργειας	29
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	33
3.1 Συλλογή και Προετοιμασία Δειγμάτων	33
3.1.1 Καύσιμα	33
3.1.2 Αδρανές υλικό.....	34
3.2 Ποιοτικός Χαρακτηρισμός Καυσίμων.....	36
3.2.1 Προσεγγιστική ανάλυση	36
3.2.2 Στοιχειακή ανάλυση.....	38
3.2.3 Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης.....	40
3.2.4 Ανάλυση τεφρών.....	40
3.3 Πειραματική Διάταξη Ρευστοποιημένης Κλίνης.....	45
3.3.1 Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου	46
3.3.2 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης	46
3.3.3 Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας και ψύξης αερίου	47
3.3.4 Σύστημα ανάλυσης καυσαερίων	47
3.4 Καθορισμός Συνθηκών Λειτουργίας Καύσης.....	49
3.4.1 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης	49
3.4.2 Κοκκομετρία υλικών/μιγμάτων	50
3.4.3 Ρυθμός τροφοδοσίας καυσίμου.....	51
3.4.4 Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα	51
3.4.5 Θερμοκρασία λειτουργίας.....	51
3.5 Μεθοδολογία Διεξαγωγής των Πειραμάτων	52
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	53
4.1 Αναλύσεις Αρχικών Δειγμάτων.....	53
4.1.1 Προσεγγιστική ανάλυση	53

4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση – θερμογόνος δύναμη.....	54
4.1.3 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση τέφρας	55
4.2 Θερμοκρασίες Καυστήρα, Εκπομπές Ρύπων και Απόδοση για Σταθερές Συνθήκες Καύσης	58
4.2.1 Αρχικά δείγματα	58
4.2.2 Μίγματα	62
4.3 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης συναρτήσει της Περίσσειας του Αέρα.....	65
4.3.1 Αρχικά δείγματα	65
4.3.2 Μίγματα	70
4.4 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης συναρτήσει του Ρυθμού Τροφοδοσίας του Καυσίμου.....	78
4.4.1 Αρχικά δείγματα	78
4.4.2 Μίγματα	83
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	86
Βιβλιογραφία	89

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν η απόδοση και οι εκπομπές αέριων ρύπων κατά την θερμική αξιοποίηση πυρηνόξυλου και λυματολάσπης, αλλά και μιγμάτων αυτών, σε εργαστηριακή μονάδα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε χημικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων, μέσω προσεγγιστικής και στοιχειακής ανάλυσης, αλλά και χημικής και ορυκτολογικής ανάλυσης των τεφρών τους, καθώς και καθορισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης. Τα πειράματα καύσης πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες αναλογίες μιγμάτων των δυο καυσίμων, συναρτήσει του λόγου περίσσειας του αέρα και του ρυθμού τροφοδοσίας, για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών, όσον αφορά την απόδοση και τις εκπομπές των αέριων ρύπων. Η καύση για το πυρηνόξυλο πραγματοποιήθηκε κυρίως εντός της κλίνης, ενώ η λυματολάσπη παρουσίασε ένα σχεδόν ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα. Οι εκπομπές CO ήταν αρκετά χαμηλές και εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Για το πυρηνόξυλο οι εκπομπές NO_x ήταν λίγο υψηλότερες από τα επιτρεπτά όρια, ενώ οι εκπομπές SO₂ ήταν αμελητέες, σε αντίθεση με την λυματολάσπη. Με την αύξηση της ροής του αέρα παρατηρήθηκε αύξηση του CO και των NO_x, ενώ για την λυματολάσπη οι εκπομπές ρύπων μειώθηκαν. Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας παρατηρήθηκε αύξηση στις εκπομπές SO₂ και NO_x. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, οι βέλτιστες συνθήκες καύσης επιτεύχθηκαν για συνδυασμό μιγμάτων πυρηνόξυλου/λυματολάσπης σε όλες τις αναλογίες, για λόγο περίσσειας του αέρα $\lambda=1,5$ και για ρυθμό τροφοδοσίας καυσίμου $F=12\text{g/min}$.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια είναι σε τέτοιο βαθμό συνυφασμένη με την καθημερινή μας ζωή, που μόνο η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της. Το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας. Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται ραγδαία, μαζί με την αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση και τον εκσυγχρονισμό και αναμένεται να αυξηθεί απότομα στα επόμενα έτη, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Ο πλανήτης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα, για να αντιμετωπίσει τις ενεργειακές του απαιτήσεις. Όμως, με την ταχεία παγκόσμια αύξηση της κατανάλωσης τους, τα καύσιμα αυτά και ιδίως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, θα εξαντληθούν πριν το τέλος αυτού του αιώνα. Επιπρόσθετα, τα ορυκτά καύσιμα συνδέονται στενά με την υποβάθμιση του περιβάλλοντος λόγω της απελευθέρωσης των ρυπογόνων προϊόντων. Η εμφανέστερη και πιο λειτουργική λύση, πέρα από τον περιορισμό των ρύπων, είναι η επένδυση στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται από φυσικές πηγές, διατίθενται σε αφθονία, δεν εξαντλούνται και είναι ευρέως διαθέσιμες. Η ανάπτυξη και χρήση αυτών μπορεί να συνεισφέρει στην εξασφάλιση μακροπρόθεσμα βιώσιμων πηγών ενέργειας και να βοηθήσει στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η βιομάζα είναι με μεγάλη διαφορά η σημαντικότερη πηγή.

Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε προϊόν ή υποπροϊόν ή υπόλειμμα προέρχεται από οργανική ύλη, όπως τα υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής και δασικής παραγωγής, τα αστικά απόβλητα, ενεργειακές καλλιέργειες κ.ά. Η μεγαλύτερη συνεισφορά της βιομάζας στη ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας προέρχεται από απόβλητη βιομάζα. Η απόβλητη βιομάζα αποτελείται από υλικά, τα οποία περιέχουν ενέργεια και τα οποία απορρίπτονται. Τέτοια υλικά είναι αγροτικής, δασικής, βιομηχανικής και αστικής προέλευσης.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η θερμική αξιοποίηση δημοτικών και αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων και συγκεκριμένα της λυματολάσπης και του πυρηνόξυλου, μέσω της συν-καύσης αυτών σε διάφορες αναλογίες σε ρευστοποιημένη κλίνη φουαλίδων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η προστασία

του περιβάλλοντος και ειδικότερα των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε χημικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων, όπως και καθορισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μελετήθηκε η απόδοση της καύσης, οι εκπομπές αέριων ρύπων (CO , SO_2 και NO_x), καθώς και η μεταβολή των θερμοκρασιών του καυστήρα συναρτήσει του λόγου περίσσειας του αέρα και της τροφοδοσίας του καυσίμου.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

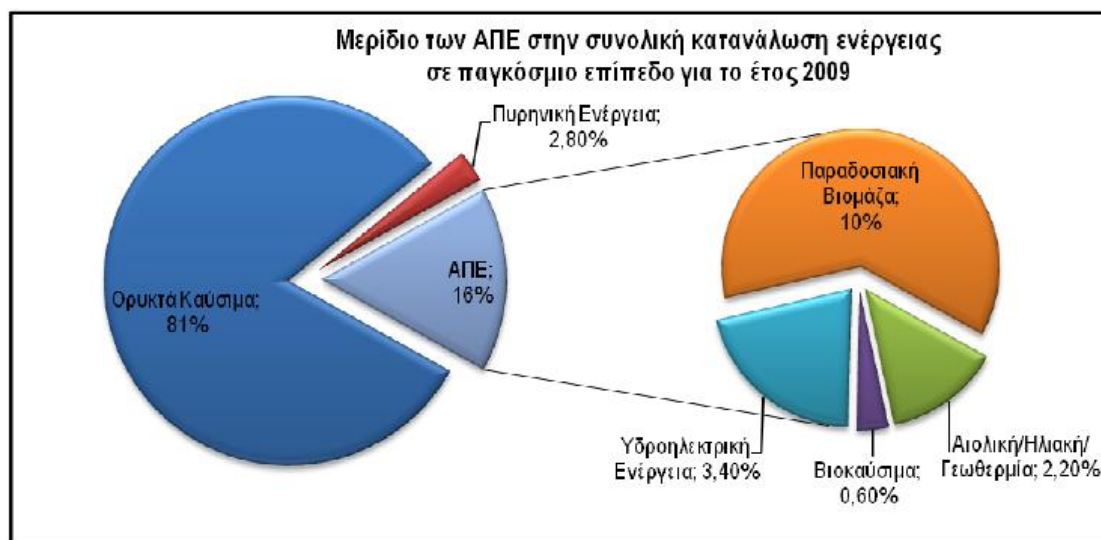
2.1 Ο Ρόλος της Βιομάζας στο Παγκόσμιο Ενεργειακό Ισοζύγιο

Σήμερα με δεδομένο ότι τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων έχουν μειωθεί σημαντικά και σε λίγα χρόνια δεν θα είναι αξιοποιήσιμα από οικονομική άποψη, αλλά και λόγω της μόλυνσης του περιβάλλοντος από αυτά, γίνεται πλέον πιο επιτακτική η ανάγκη για εύρεση και αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). [1]

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μια από τις περισσότερο αποδοτικές και αποτελεσματικές λύσεις για την εξασφάλιση της ενέργειας στο μέλλον, καθώς διατίθενται σε αφθονία, δεν εξαντλούνται, είναι ευρέως διαθέσιμες και μπορούν να συνεισφέρουν στην επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη και η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να βελτιώσει την ποικιλία προσφοράς στις αγορές ενέργειας, να συνεισφέρει στην εξασφάλιση μακροπρόθεσμα βιώσιμων πηγών ενέργειας, να βοηθήσει στη μείωση των τοπικών και παγκόσμιων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και να προσφέρει εμπορικά ελκυστικές επιλογές για την αντιμετώπιση ειδικών αναγκών παροχής ενέργειας. [2] Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ορίζονται οι ακόλουθες πηγές ενέργειας:

- Ηλιακή Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Βιομάζα
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Γεωθερμία
- Ενέργεια της Θάλασσας (παλιρροιακά κύματα)

Το 2009 το 16% περίπου της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας προερχόταν από ΑΠΕ. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη συμμετοχή της κάθε μορφής ΑΠΕ στην κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως. [3]



Εικόνα 2.1: Συμμετοχή στην Παγκόσμια Συνολική Κατανάλωση Ενέργειας (Πηγή: REN21. 2011. Renewables 2011 Global Status Report).

Στις αρχές του 2008, η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε ένα νέο στρατηγικό στόχο για την ενεργειακή της πολιτική, που είναι γνωστός και ως “τα τρία 20 έως το 2020”. Ο στόχος αυτός προβλέπει τα εξής για όλα τα κράτη-μέλη:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/EK,
- 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/EK και
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας (Εφημερίδα της Κυβέρνησης, 2010, σελ 1).

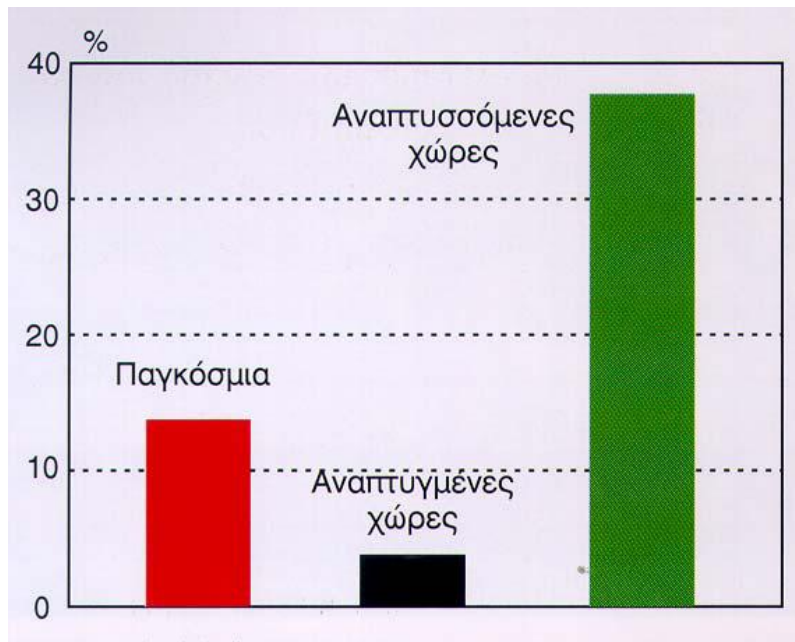
Από το προηγούμενο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η βιομάζα είναι η σημαντικότερη πηγή των ΑΠΕ.

Ο όρος βιομάζα συμπεριλαμβάνει όλα τα προϊόντα, υπολείμματα και απόβλητα φυτικής και ζωικής προέλευσης, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας, όπως τα γεωργικά και δασικά υπολείμματα (κλαδέματα, άχυρα, πριονίδια, κουκούτσια κ.ά.), τα ζωικά απόβλητα και υπολείμματα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα κ.ά.), τα ενεργειακά φυτά, τα αστικά υγρά απόβλητα και στερεά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων και της αγροτικής βιομηχανίας. [4]

Η συμμετοχή της ενέργειας από βιομάζα (βιοενέργειας) στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση διαφέρει σημαντικά μεταξύ χωρών και ιδιαίτερα μεταξύ βιομηχανικών

και αναπτυσσόμενων χωρών. Τα ποσοστά συμμετοχής της παρουσιάζονται υψηλότερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, πράγμα που προκαλείται από την χαμηλή βιομηχανική ανάπτυξη και την μεγαλύτερη εξάρτηση των νοικοκυριών από την καύση βιομάζας. [5]

Η βιομάζα που παράγεται κάθε χρόνο στον πλανήτη μας υπολογίζεται ότι ανέρχεται σε 172 δισεκ. τόνους ξηρού υλικού, με ενεργειακό περιεχόμενο δεκαπλάσιο της ενέργειας που καταναλίσκεται παγκοσμίως στο ίδιο διάστημα. Το τεράστιο αυτό ενεργειακό δυναμικό παραμένει κατά το μεγαλύτερο μέρος του ανεκμετάλλευτο, καθώς, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, μόνο το 1/7 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τη βιομάζα και αφορά κυρίως τις παραδοσιακές χρήσεις της (καυσόξυλα κλπ.). [3] Ποσοστό που αναλύεται σε πάνω από 30% για τον υπό ανάπτυξη κόσμο, και σε περίπου 3% για τις βιομηχανικές χώρες (Εικόνα 2.2). Στις τελευταίες, βιομάζα, κυρίως στην μορφή βιομηχανικών, αγροτικών αλλά και αστικών αποβλήτων, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Ταυτόχρονα όμως γίνονται σαφή βήματα προς την κατεύθυνση της καλλιέργειας φυτών, ειδικά για τον σκοπό της παραγωγής ηλεκτρισμού με την καύση τους σε θερμικούς σταθμούς. Οι τεχνολογικά και οικονομικά αναπτυγμένες χώρες επιβάλλουν την αξιοποίηση της βιομάζας με νέες τεχνολογίες, ώστε να παράγεται ενέργεια υψηλής απόδοσης, με ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση, από ενεργειακά προϊόντα χαμηλής ή αρνητικής αξίας, αλλά υψηλού ενεργειακού περιεχομένου, άρα υψηλής ενεργειακής αξίας.



Εικόνα 2.2 : Η συμμετοχή της βιομάζας (%) στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας [3]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επενδύσει με πολλούς τρόπους στην παραγωγή και αξιοποίηση της βιομάζας εδώ και αρκετά χρόνια, καθότι καλύπτει πολλαπλές ανάγκες σε ποικίλες περιοχές. Το δυναμικό της παραγωγής εναπόκειται σε πολλούς παράγοντες και διαφέρει σημαντικά από κράτος σε κράτος. Η θέρμανση είναι ο σημαντικότερος τομέας χρήσης της βιοενέργειας αυτή τη στιγμή στην Ευρώπη, καλύπτοντας περισσότερο από το 72% της συνολικής κατανάλωσης. Η ηλεκτροπαραγωγή με χρήση βιομάζας έχει σταθερή ανάπτυξη της τάξης του 13.5% κάθε χρόνο την τελευταία δεκαετία.

Για την εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού της εκτός των ορυκτών καυσίμων, που είναι κυρίως εισαγωγές, αλλά και για την καταπολέμηση των κλιματικών αλλαγών, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει λάβει διάφορες πολιτικές πρωτοβουλίες. Μια εκ των αυτών είναι η υιοθέτηση της Πράσινης Βίβλου. Στα πλαίσια της Βίβλου προτείνονται για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης:

- Η ανάπτυξη νέων και ανανεώσιμων μορφών ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων και των βιοκαυσίμων)
- Η θέσπιση φορολογικών μηχανισμών για τον προσανατολισμό της ζήτησης προς καλύτερα ελεγχόμενες μορφές κατανάλωσης
- Η εξισορρόπηση της πολιτικής προσφοράς μέσω δράσεων που να είναι σαφώς υπέρ μιας πολιτικής για την ζήτηση.

Η πρωτοβουλία αυτή θα βοηθήσει την Ευρώπη να δημιουργήσει μεγαλύτερη ανάπτυξη στον ενεργειακό τομέα και καλύτερες θέσεις εργασίας. [1,3]

2.1.1 Τύποι και δυναμικό παραγωγής

Η πολυμορφία της βιομάζας επιβάλλει να γίνει κάποιου είδους ταξινόμηση των διαφόρων μορφών της, που να βοηθά στην καλύτερη εξέτασή της. Στην πράξη υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας. Πρώτον, η βιομάζα η οποία παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες και δεύτερον, οι υπολειμματικές μορφές (τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, καθώς και ζωικά και αστικά απόβλητα). [6]

Ενεργειακές καλλιέργειες

Ως ενεργειακές καλλιέργειες αναφέρονται τα καλλιεργούμενα ή αυτοφυή είδη τα οποία διακρίνονται σε παραδοσιακά και νέα, με κύριο προϊόν παραγωγής τη βιομάζα, η οποία χρησιμοποιείται σε διεργασίες παραγωγής υγρών καυσίμων, θερμότητάς, ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά.

Στην κατηγορία των παραδοσιακών καλλιεργειών κατατάσσονται το σιτάρι, το κριθάρι, ο αραβόσιτος, τα ζαχαρότευτλα και ο ηλίανθος, το τελικό προϊόν των οποίων χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων.

Στην κατηγορία των νέων καλλιεργειών κατατάσσονται τα είδη με υψηλή παραγωγικότητα ανά μονάδα γης και διακρίνονται στις γεωργικές και δασικές νέες ενεργειακές καλλιέργειες, με τις πρώτες να διακρίνονται περαιτέρω σε ετήσιες και πολυετείς. [6]

Υπολειμματικές μορφές βιομάζας

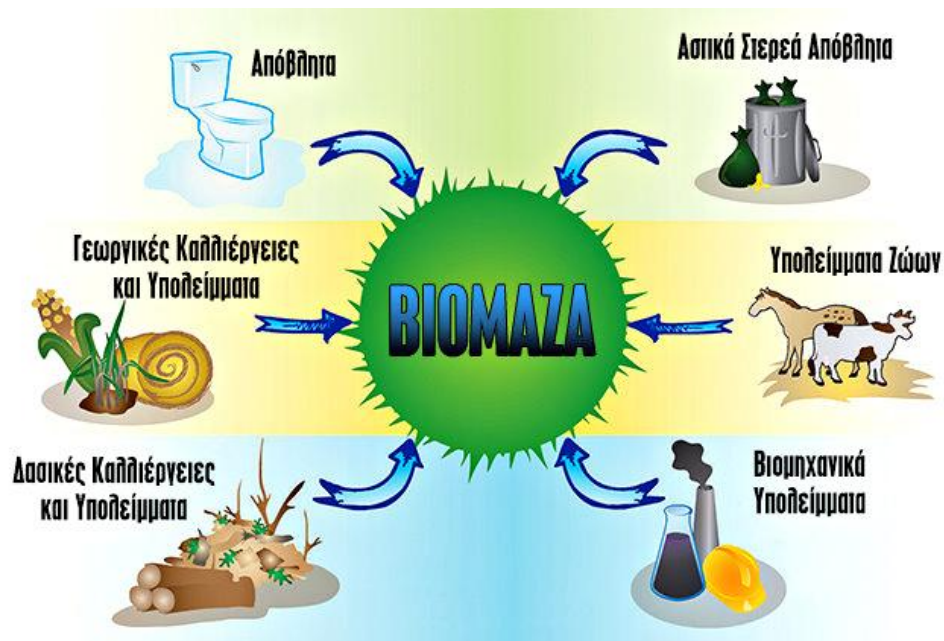
Οι υπολειμματικές μορφές βιομάζας είναι υλικά τα οποία απορρίπτονται, περιέχουν ενέργεια και προέρχονται κυρίως από παρθένα βιομάζα. Περιλαμβάνει (α) αγροτικά υπολείμματα, (β) δασικά υπολείμματα, (γ) ζωικά απόβλητα, (δ) αγροτοβιομηχανικά απόβλητα, (ε) δημοτικά απόβλητα. [6]

- Αγροτικά υπολείμματα: Παράγονται στον αγρό, διαχωρίζονται μεταξύ: (α) υπολειμμάτων, τα οποία παραμένουν στον αγρό μετά την ετήσια συγκομιδή της σοδειάς, όπως φύλλα, στελέχη, καρποί κλπ, (β) υπολείμματα από πολυετή

φυτά μετά το κλάδεμα δέντρων και αμπελιών, όπως κλαδοδέματα ελιάς, πορτοκαλιάς, αμυγδαλιάς, ροδακινιάς, αμπέλου κλπ. [6]

- Δασικά υπολείμματα: όπως τα καυσόξυλα, τα υπολείμματα υλοτομίας (υπό την μορφή φλοιών, κορυφών δένδρων, κλαδιών, φύλλων και βελόνων κωνοφόρων), τα οποία παραμένουν στο έδαφος του δάσους, τα υπολείμματα από αραιώσεις νεαρών δένδρων και το υλικό προερχόμενο από την απομάκρυνση της υπο-ορόφου βλάστησης για προστασία ενάντια στις δασικές πυρκαγιές, αποτελούν τη βιομάζα δασικής προέλευσης, η οποία χρησιμοποιείται για ενεργειακούς σκοπούς. [6]
- Ζωικά απόβλητα (κοπριά και απόβλητα σφαγείων): Το διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας ζωικής προέλευσης περιλαμβάνει κυρίως απόβλητα εντατικής κτηνοτροφίας από πτηνοτροφεία, χοιροστάσια, βουστάσια και σφαγεία. Τα ζώα, τα οποία παράγουν μεγάλες και τοπικά συγκεντρωμένες ποσότητες περιττωμάτων, είναι τα πρόβατα, τα ερίφια, οι αγελάδες, τα μοσχάρια, οι χοίροι, τα κοτόπουλα πτηνοτροφείου και τα πουλερικά εν γένει. [6,8]
- Αγροτοβιομηχανικά απόβλητα: Τα βασικά αγροτο-βιομηχανικά υπολείμματα υπό μορφή φλοιών, κελυφών, πυρήνων κλπ., προέρχονται από γεωργικές βιομηχανίες, όπως αλευροβιομηχανίες, βιομηχανίες ρυζιού, βιομηχανίες αραβόσιτου, εκκοκιστήρια βάμβακος, βιομηχανίες επεξεργασίας φρούτων, οινοποιεία, σπορελαιουργεία, βιομηχανίες παραγωγής ελαιολάδου και πυρηνελαιουργεία. Επίσης, μία άλλη πηγή είναι οι βιομηχανίες προϊόντων ξύλου, οι οποίες περιλαμβάνουν τις μονάδες παραγωγής χάρτου, τα πριονιστήρια και τις μονάδες κατασκευής επίπλων, παράγει μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων ξύλου. Τέλος, μία άλλη πηγή είναι το απόβλητο ξύλο από αστικές κατασκευαστικές εργασίες και από κατεδαφίσεις, καθώς και από συσκευασίες ξύλου. [6]
- Δημοτικά απόβλητα: Τα δημοτικά απόβλητα, τα οποία προσφέρουν ευκαιρίες για συνδυασμένη αποκομιδή απορριμμάτων και ανάκτηση ενέργειας, περιλαμβάνουν τα δημοτικά στερεά απόβλητα (αστικά απορρίμματα και σκουπίδια) και τα βιο-στερεά (λύματα, λάσπη). Τα δημοτικά απορρίμματα με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι το χαρτί και το χαρτόνι, τα πλαστικά, τα σκουπίδια, από τις αυλές, το ξύλο και τα υπολείμματα τροφών. Τα απόβλητα ύδατα από οικιακές πηγές, τη βιομηχανία, τη διήθηση των επιγείων υδάτων

και την απορροή των υδάτων των καταιγίδων, περιέχουν τα κύρια βιο-στερεά (στερεά τα οποία είτε καθαρίζουν, είτε αιωρούνται) [6,9].



Εικόνα 2.3 : Πηγές βιομάζας [27]

Δυναμικό παραγωγής

Το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες. Το θεωρητικό δυναμικό, το οποίο αποτελεί το μέγιστο ποσό της βιομάζας που μπορεί να παραχθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Το διαθέσιμο δυναμικό, το οποίο αποτελεί το ποσοστό του θεωρητικού δυναμικού που μπορεί να αποληφθεί με βάση τοπικούς (π.χ. μορφολογία εδάφους) και άλλους (π.χ. ανταγωνιστικές χρήσεις) περιορισμούς. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό, το οποίο είναι το ποσοστό του διαθέσιμου δυναμικού, που μπορεί να αξιοποιηθεί με τα υφιστάμενα τεχνικά μέσα και το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό, το οποίο είναι το ποσοστό του τεχνικά εκμεταλλεύσιμου δυναμικού, που είναι και οικονομικά εκμεταλλεύσιμο. Ορίζεται σε μονάδες βάρους ή όγκου, και υπολογίζεται με βάση την περιεχόμενη % υγρασία του υλικού κ.β. και το φαινόμενο ειδικό βάρος. Το ενεργειακό δυναμικό βιομάζας εκφράζεται σε GWh, MJ, ή kcal ανά τόνο ξηράς ουσίας. Η εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας είναι μια δυσχερής διαδικασία, κυρίως λόγω της εξάρτησής του από βιολογικούς, τεχνο-

οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες, και απρόβλεπτες φυσικές μεταβολές, καθώς και της δυσκολίας ακριβούς εκτίμησης και καταγραφής των στοιχείων της πρώτης ύλης [6,10].

➤ Ενεργειακές καλλιέργειες

Όσο αφορά το δυναμικό παραγωγής των ενεργειακών καλλιεργειών, το εύρος της καλλιεργήσιμης γης, η οποία είναι δυνητικά διαθέσιμη, κυμαίνεται μεταξύ 0 και 3.7Gha παγκοσμίως. Το εμβαδόν των υποβαθμισμένων περιοχών, οι οποίες είναι κατάλληλες για παραγωγή ενεργειακών καλλιεργειών, κυμαίνεται μεταξύ 430 και 580Mha. Το δυναμικό παραγωγής ενέργειας σε πλεονάζουσες αγροτικές εκτάσεις κυμαίνεται μεταξύ 0-988EJ ετησίως και σε υποβαθμισμένη γη μεταξύ 8-110 EJ ετησίως [6].

➤ Αγροτικά υπολείμματα

Τα υπολείμματα της καλλιέργειας είναι συνήθως ογκώδη και η μεταφορά τους είναι δύσκολη. Κατά συνέπεια, δεν είναι πρακτικό να μεταφέρονται μακριά από το σημείο παραγωγής τους. Τα υπολείμματα είναι διαθέσιμα για ένα περιορισμένο διάστημα τους έτους. Για να είναι διαθέσιμα καθ' όλη την διάρκεια του έτους, απαιτούνται εγκαταστάσεις αποθήκευσης μεγάλων διαστάσεων. Δεν είναι δυνατόν να συλλεχθούν όλα τα υπολείμματα, ενώ ορισμένα πρέπει να παραμείνουν στη γη για την αποφυγή διάβρωσης των εδαφών και κατ' αυτόν τον τρόπο να εξασφαλίσουν τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα. Το παγκόσμιο δυναμικό των αγροτικών υπολειμμάτων έχει εκτιμηθεί σε 3-4δισ τόνους ετησίως. Οι περισσότερες μελέτες υποθέτουν ότι είναι δυνατόν να συλλεχθεί 25% περίπου των παγκοσμίως διαθέσιμων αγροτικών υπολειμμάτων. Η εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού των αγροτικών υπολειμμάτων κυμαίνεται 5-27EJ ετησίως [6].

➤ Δασικά υπολείμματα

Όσοι έχουν προσπαθήσει να εκτιμήσουν την ακριβή ποσότητα των δασικών υπολειμμάτων, τα οποία μπορούν να συλλεχθούν και να χρησιμοποιηθούν σαν υπολειμματική βιομάζα, έχουν αντιμετωπίσει σημαντικές δυσκολίες.

Η ξυλώδης βιομάζα έχει μεγάλο δυναμικό, το οποίο μπορεί να προέρχεται από διάφορες πρώτες ύλες που υπάρχουν στην Ευρώπη. Οι καλές προοπτικές για αυτή τη δασική βιομάζα σχετίζονται με τη σχετικά μεγάλη έκταση των Ευρωπαϊκών δασών (περίπου 10.2 δισεκατομμύρια στρέμματα σήμερα) και την αυξανόμενη ετήσια παραγωγή ξυλώδους βιομάζας. Σχεδόν όλα τα Ευρωπαϊκά δάση καλύπτονται από σχέδια για τη μακρόχρονη διαχείριση τους. Ο όγκος του ξύλου που υλοτομείται στην Ευρώπη παραμένει σημαντικά χαμηλότερος από το ρυθμό αύξησης, επομένως τα αποθέματα ξύλου αυξάνονται. Κατά τα τελευταία 20 χρόνια, οι δασικές εκτάσεις έχουν επεκταθεί σε όλες τις περιφέρειες, με προσθήκη 8 εκατομμυρίων στρεμμάτων ετησίως. Κατά την ίδια περίοδο, το συνολικό απόθεμα των αναπτυσσόμενων δέντρων αυξήθηκε κατά 8.6 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Το συνολικό ενεργειακό δυναμικό της βιο-ενέργειας από την επιπρόσθετη ανάπτυξη των δασών και από τα δασικά υπολείμματα εκτιμάται, για το 2050, μεταξύ 27 και 140EJ ετησίως [6].

➤ Ζωικά απόβλητα

Τα ζωικά απόβλητα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτά που προέρχονται από την κοπριά των ζώων και εκείνα που αποτελούν υπολείμματα από τις βιομηχανίες παραγωγής κρέατος.

Οι εκτιμήσεις για τη διαθεσιμότητα ενέργειας από την κοπριά των ζώων παγκοσμίως, βασιζόμενες στην αύξηση του ζωικού πληθυσμού και τη δυνατότητα ανάκτησης των υπολειμμάτων κατά τα έτη 1990-2050, κυμαίνονται μεταξύ 9 έως 25 EJ ετησίως. Στην Ελλάδα, μεγάλες ποσότητες συγκεντρωμένης κοπριάς παράγονται στα εκτροφεία αγελάδων, χοίρων, και πουλερικών. Επίσης, στην Ελλάδα εκτιμάται ότι για το έτος 2011 η συνολική παραγωγή κτηνοτροφικών αποβλήτων από βοοειδή, χοίρους και κοτόπουλα ήταν περίπου 17 εκ. τόνοι/έτος και το ενεργειακό δυναμικό τους ανερχόταν σε 315 MWh ή 1.1 TJ [8].

Η δεύτερη κατηγορία των ζωικών αποβλήτων περιλαμβάνει τα υπολείμματα/μέρη των ζώων από τα σφαγεία (κόκκαλα, δέρμα, ιστοί ζώων κλπ). Σύμφωνα με την Οδηγία 1774/2002 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, επιβάλλεται μία νέα πρακτική στην επεξεργασία των ζωικών αποβλήτων, με την οποία απαγορεύεται η χρήση τους στην διατροφική αλυσίδα των ζώων, εφόσον τα ζώα

αυτά προορίζονται για κατανάλωση από ανθρώπους. Ως αποτέλεσμα, τεράστιες ποσότητες αποβλήτων, οι οποίες προηγουμένως καταναλίσκονταν ως τροφή για ζώα, παραμένουν ανεκμετάλλευτες και το δυναμικό τους για παραγωγή ενέργειας θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη (1578 εκ. τόνοι) [6].

➤ Αγροτοβιομηχανικά απόβλητα

Η παγκόσμια παραγωγή αγροτοβιομηχανικών υπολειμμάτων ανέρχεται σε 3.5 δισ. τόνους ετησίως. Εκτιμήσεις του FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) δείχνουν ότι η παγκόσμια παραγωγή καυσόξυλων και κυλινδρικών ξύλων το 1999 έφθασε το ύψος των $3268 \times 10^6 \text{ m}^3$. Τα καυσόξυλα αντιπροσωπεύουν λίγο περισσότερο από το μισό της ποσότητας αυτής και το 90% από αυτή την ποσότητα παραγόταν και καταναλισκόταν στις αναπτυσσόμενες χώρες. Από την άλλη πλευρά, η βιομηχανική παραγωγή των κυλινδρικών ξύλων γίνεται κατά κύριο λόγο στις ανεπτυγμένες χώρες, οι οποίες παράγουν το 79% της παγκόσμιας παραγωγής. Η παγκόσμια χρήση του καυσόξυλου και του κυλινδρικού ξύλου είναι $3271 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Το 55% της ποσότητας αυτής χρησιμοποιείται άμεσα σαν καύσιμο, κύρια σε αναπτυσσόμενες χώρες. Το υπόλοιπο 45% χρησιμοποιείται ως βιομηχανική πρώτη ύλη, όπου το 40% της παραπάνω ποσότητας περιλαμβάνει κύρια ή δευτερεύοντα υπολείμματα διεργασιών, κατάλληλα μόνο για παραγωγή ενέργειας.

Η χρήση της βιομάζας διαφέρει σημαντικά στις διάφορες περιοχές του κόσμου. Επί του παρόντος, η μεγαλύτερη πηγή βιομάζας στο εμπόριο είναι τα υπολείμματα από βιομηχανικές μονάδες επεξεργασίας ξύλου, υπό τη μορφή φλοιών και ροκανιδιών πριονιστηρίων. Γύρω στα 40 EJ διαθέσιμης βιομάζας χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας ετησίως.

Οι κύριοι τύποι απορριμμάτων από τη βιομηχανία παραγωγής αγροτικών τροφών στη Ελλάδα προέρχονται από τη βιομηχανία συσκευασίας φρούτων, τις μονάδες επεξεργασίας ρυζιού, τις μονάδες επεξεργασίας ελαιόλαδου και ελαιοπυρήνα και τα εκκοκκιστήρια βάμβακος. Το μεγαλύτερο ποσοστό των αποβλήτων αυτών προέρχεται από το πυρηνόξυλο και ανέρχεται σε 423110 τόνους ξηρής ύλης ανά έτος.

Στην Ελλάδα, το σύνολο της ενέργειας που παράγεται από αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα εκτιμάται στα 2.431.000 MWh ή 8.7 PJ σε ετήσια βάση. [6,8]

➤ Δημοτικά απόβλητα

Υπάρχουν βασικά δύο τύποι δημοτικών απορριμμάτων, τα οποία προσφέρουν την ευκαιρία για συνδυασμένη απόθεση αποβλήτων και ανάκτηση ενέργειας: τα στερεά αστικά απόβλητα (απορρίμματα, σκουπίδια) και τα βιο-στερεά (λύματα, ιλύς). Τα στερεά απόβλητα περιλαμβάνουν τα ιδιωτικά οικιακά απορρίμματα και τα απορρίμματα από βιομηχανικές περιοχές. Όμως, στερεά απόβλητα μπορούν να προέλθουν και από διεργασίες βιομηχανικής παραγωγής. Οι ιλύες, οι οποίες είναι ένας συνδυασμός στερεών και υγρών αποβλήτων, μπορεί να είναι λυματολάσπη, λάσπες από διεργασίες παραγωγής ατσαλιού, ή λάσπες από βιοχημικές μονάδες [6].

Η διαθεσιμότητα δημοτικών απορριμμάτων για παραγωγή ενέργειας εξαρτάται σημαντικά από παραμέτρους, όπως η οικονομική ανάπτυξη, οι καταναλωτικές συνήθειες και το κλάσμα της βιομάζας στο σύνολο των παραγόμενων απορριμμάτων.

Τα σημερινά επίπεδα παγκόσμιας παραγωγής αστικών στερεών αποβλήτων είναι περίπου 1.9δiz τόνοι ετησίως και αναμένεται να αυξηθεί σε περίπου 2.2δiz τόνους ετησίως μέχρι το 2025. Αυτό το γεγονός αντιπροσωπεύει σημαντική αύξηση των ποσοστών παραγωγής αποβλήτων κατά κεφαλήν, από 1.2 έως 1.42 kg ανά άτομο την ημέρα [12,13].

Όσο αφορά τα υγρά απόβλητα, το 2010 η παγκόσμια ετήσια συγκέντρωση οικιακών υδάτων εκτιμήθηκε σε 390km³ σύμφωνα με το μοντέλο WaterGAP3. Το μοντέλο WaterGAP υπολόγισε περαιτέρω μια παγκόσμια παραγωγή των υγρών αποβλήτων σε οικιακές και βιομηχανικές περιοχές σε 450 km³ το 2010, περίπου το 70% (315 km³) εκ των οποίων αντιστοιχούσε οικιακά απόβλητα [9]. Η παραγόμενη ιλύς από τα αστικά λύματα για την Ευρωπαϊκή Ένωση ανέρχεται σε 10.7 εκατομμυρίων τόνους ετησίως (Environment Agency, 2002).

Έχουν εκπονηθεί πολλές μελέτες για το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας, οι οποίες προσέγγισαν το ζήτημα της θεωρητικής παγκόσμιας διαθεσιμότητας οργανικών αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας. Σύμφωνα με διάφορα σενάρια, το 75% των παραγόμενων οργανικών αστικών απορριμμάτων είναι διαθέσιμο για παραγωγή ενέργειας. Επίσης, η ετήσια κατά κεφαλή παραγωγή οργανικών

απορριμμάτων είναι περίπου 0.3 τόνοι, ποσότητα η οποία αποδίδει ενέργεια ύψους 3EJ ετησίως [6,9].

2.1.2 Τεχνολογίες αξιοποίησης για παραγωγή ενέργειας

Η χρήση της βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας ήταν ανέκαθεν εκτεταμένη στις υποανάπτυκτες χώρες, καλύπτοντας έως και 90% των ενεργειακών αναγκών τους. Ωστόσο, η ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας στις χώρες του τρίτου κόσμου γίνεται με πολύ χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με τις ανεπτυγμένες χώρες, στις οποίες η χρήση της βιομάζας πραγματοποιείται σε προηγμένες τεχνολογικά εφαρμογές και καλύπτει πολύ μικρότερα ποσοστά της εγχώριας ενεργειακής κατανάλωσης [8].

Η τεχνογνωσία που έχει αναπτυχθεί έως σήμερα καλύπτει θέματα που σχετίζονται με τη χρησιμοποίηση της βιομάζας για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού και για την παραγωγή βιο-καυσίμων. Οι μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας, προκειμένου να την μετατρέψουν σε προϊόντα ενεργειακά αναβαθμισμένα και κατάλληλα για χρήση σε ενεργειακούς σκοπούς, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) θερμοχημικές και β) βιοχημικές διεργασίες. Η επιλογή της μεθόδου μετατροπής προσδιορίζεται από τα βασικά στοιχεία, που είναι η σχέση άνθρακα/αζώτου (C/N) και η περιεχόμενη υγρασία των υπολειμμάτων την ώρα της συλλογής [1].

Οι θερμοχημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για τα είδη της βιομάζας με σχέση $C/N > 30$ και υγρασία $< 50 \%$, δηλαδή για τα προϊόντα και τα υπολείμματα της κυτταρίνης. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται:

- η πυρόλυση (θέρμανση απουσία οξυγόνου)
- η απευθείας καύση
- η αεριοποίηση (θέρμανση παρουσία περιορισμένων ποσοτήτων οξυγόνου ή αέρα με σκοπό τη μέγιστη απελευθέρωση CO και H₂O)
- η υδρογονοδιάσπαση (αντίδραση H₂ με τη βιομάζα προς παραγωγή μεθανίου και αιθανίου)

Οι βιοχημικές διεργασίες ονομάζονται έτσι επειδή είναι αποτέλεσμα μικροβιακής δράσης. Χρησιμοποιούνται για τα είδη της βιομάζας με σχέση $C/N < 30$ και υγρασία $> 50 \%$, δηλαδή για προϊόντα και υπολείμματα κυρίως λαχανικών, κτηνοτροφικά απόβλητα, κλπ. Στις βιοχημικές διεργασίες περιλαμβάνονται:

- Η αερόβια ζύμωση (βιοχημική διεργασία, κατά την οποία αερόβιοι μικροοργανισμοί παρουσία αέρα, μετασχηματίζουν το οργανικό φορτίο των αποβλήτων κυρίως σε νέους μικροοργανισμούς).
- Η αναερόβια ζύμωση (βιοχημική διεργασία κατά την οποία αναερόβιοι μικροοργανισμοί σε περιβάλλον ελλειμματικό σε οξυγόνο μετασχηματίζουν το οργανικό φορτίο των αποβλήτων σε αέρια προϊόντα, κυρίως μεθάνιο, και διοξείδιο του άνθρακα).
- Η αλκοολική ζύμωση (διάσπαση της γλυκόζης παρουσία ζαχαρομυκήτων και σχηματισμός αιθυλικής αλκοόλης).

Οι τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας που εφαρμόζονται διεθνώς είναι η καύση, η αεριοποίηση, η πυρόλυση και η παραγωγή βιοαερίου.

Καύση

Η απευθείας καύση της βιομάζας για παραγωγή θερμότητας είναι ο απλούστερος τρόπος για την ενεργειακή αξιοποίησή της. Η καύση βιομάζας παράγει θερμά αέρια σε θερμοκρασίες γύρω στους $800-1000^{\circ}\text{C}$. Είναι δυνατόν να καεί οποιοσδήποτε τύπος βιομάζας, αλλά πρακτικά η καύση είναι εφικτή μόνο σε βιομάζα με περιεχόμενη υγρασία κάτω από 50% , πάνω από την οποία απαιτείται αποξήρανση [2]. Οι κυριότερες τεχνολογίες καύσης που εφαρμόζονται είναι οι εξής:

- Καύση σε εστίες με εσχάρες (συστήματα σταθερής κλίνης), σε εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης και σε συστήματα καύσης σκόνης.

Η καύση της βιομάζας σε συστήματα σταθερής κλίνης εφαρμόζεται ευρέως σε βιομηχανικούς ατμοπαραγωγούς. Οι εστίες με εσχάρες χρησιμοποιούνται για την καύση στερεών καυσίμων με υψηλή κοκκομετρία (έως και 10cm), μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία και υψηλή περιεκτικότητα σε ανόργανη ύλη.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες κλιβάνων εσχάρας: σταθερής εσχάρας, κινητής εσχάρας, μετακινούμενης εσχάρας, περιστρεφόμενης εσχάρας, δονούμενης εσχάρας και καυστήρες τύπου πούρου. Τα συστήματα σταθερής κλίνης περιλαμβάνουν κλίβανους εσχάρας και εστίες τροφοδοσίας από κάτω. Ο πρωτεύοντας αέρας περνά μέσα από τη σταθερή κλίνη, όπου γίνεται η ξήρανση, η αεριοποίηση και η καύση του εξανθρακώματος. Τα καύσιμα αέρια, τα οποία παράγονται, καίγονται μετά την προσθήκη του δευτερεύοντος αέρα.

Η καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη είναι από τους πλέον καταλληλότερους τρόπους καύσης χαμηλότερης ποιότητας καυσίμων, λόγω των συνθηκών που επικρατούν στην κλίνη και ευνοούν την ολοκλήρωση της καύσης και τη μειωμένη εκπομπή σωματιδίων και ρυπαντών. Όσον αφορά το τεχνολογικό υπόβαθρο των εγκαταστάσεων αυτών, διακρίνονται σε εφαρμογές ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων και σε εφαρμογές ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία. Σε ένα κλίβανο ρευστοποιημένης κλίνης ο αέρας εισάγεται από κάτω και το καύσιμο βιομάζας καίγεται σε μία αυτό-αναμιγνυόμενη αιώρηση του αερίου και του στερεού υλικού της κλίνης.

Η καύση σκόνης είναι η λιγότερο διαδεδομένη τεχνολογία για την καύση βιομάζας, καθώς απαιτείται η κονιοποίηση του καυσίμου σε εξαιρετικά χαμηλή κοκκομετρία, της τάξης των 20-80μm, γεγονός που καθιστά τη αξιοποίηση βιομάζας δαπανηρή και ασύμφορη. Η λειτουργία του καυστήρα σκόνης ξεκινάει με ένα μίγμα καυσίμου και πρωτεύοντα αέρα καύσης, το οποίο εγχέεται στο θάλαμο καύσης. Η καύση συνεχίζεται όσο το καύσιμο βρίσκεται σε αιώρηση και η καύση του αερίου επιτυγχάνεται με την προσθήκη δευτερεύοντα αέρα. Τεχνολογίες τέτοιου τύπου καύσης είναι τα συστήματα με εστίες διασποράς και τα συστήματα κυκλωνικών καυστήρων [14].

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση της βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Άμεσα (Θέρμανση, Ξήρανση)
- Έμμεσα (ατμός για την κίνηση στροβίλου) με σύγχρονη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.

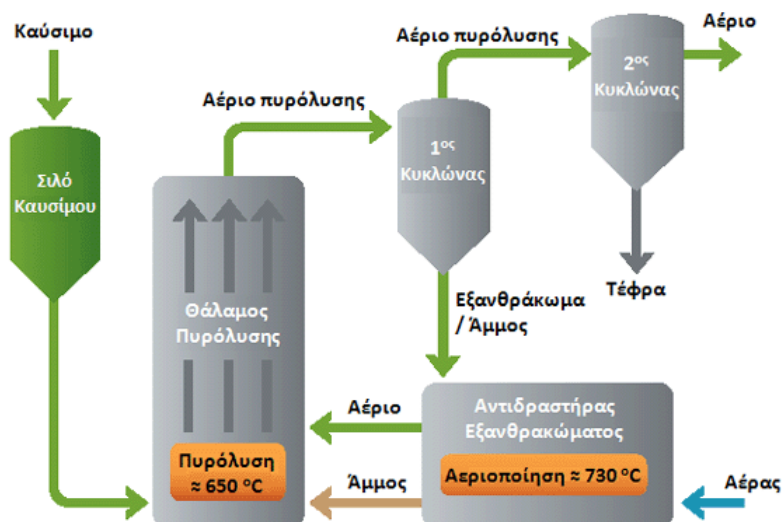
Τα βασικά προϊόντα της καύσης είναι νερό, θερμότητα και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Επίσης παράγονται μικρές ποσότητες διοξειδίου του θείου (SO_2), οι οποίες όμως δεν είναι τόσο επιβλαβείς για το περιβάλλον. Παράγονται ακόμη

μικρές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO_x) (όχι σε όλα τα συστήματα καύσης) και άκαυστων αερίων υδρογονανθράκων, οι οποίες δεν προκαλούν σημαντική ατμοσφαιρική ρύπανση. Εντούτοις, συνεχίζεται η έρευνα για καλύτερο έλεγχο και μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και κυρίως για μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου [3].

Πυρόλυση

Η πυρόλυση της βιομάζας είναι μια διεργασία κατά την οποία η πρώτη ύλη θερμαίνεται ταχύτατα και αποσυντίθεται σε θερμοκρασίες 500-650°C, σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Σε αυτές τις συνθήκες παράγονται, αέρια προϊόντα, υγρά προϊόντα (βιοέλαιο) και στερεά προϊόντα (βιοάνθρακας). Οι αποδόσεις των παραγόμενων προϊόντων εξαρτώνται από το είδος της βιομάζας και από τις συνθήκες πυρόλυσης, δηλαδή τη θερμοκρασία, την πίεση, το ρυθμό θέρμανσης και τον χρόνο αντίδρασης.

Το παραγόμενο αέριο καύσιμο χρησιμοποιείται σε ατμοπαραγωγούς, ενώ συχνή είναι και η χρήση του παραγόμενου υγρού καυσίμου στην κίνηση οχημάτων. Το ενδιαφέρον σχετικά με την πυρόλυση της βιομάζας εστιάζεται στο γεγονός ότι το παραγόμενο προϊόν μεταφέρεται και αποθηκεύεται πιο εύκολα από ότι η βιομάζα ως στερεό καύσιμο. Στα πλαίσια ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων, έχουν ερευνηθεί μέθοδοι παραγωγής βιοελαίου ως καύσιμο για θερμοηλεκτρικές εγκαταστάσεις και λέβητες, καθώς και η βελτίωση του καυσίμου με φυσικές και χημικές μεθόδους, π.χ. με χρήση καταλυτών. Το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται στην καταλληλότητα του βιοελαίου ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες αποτελούν τμήμα θερμοηλεκτρικού σταθμού [2,14].



Εικόνα 2.4 : Πυρόλυσης Βιομάζας [26]

Αεριοποίηση

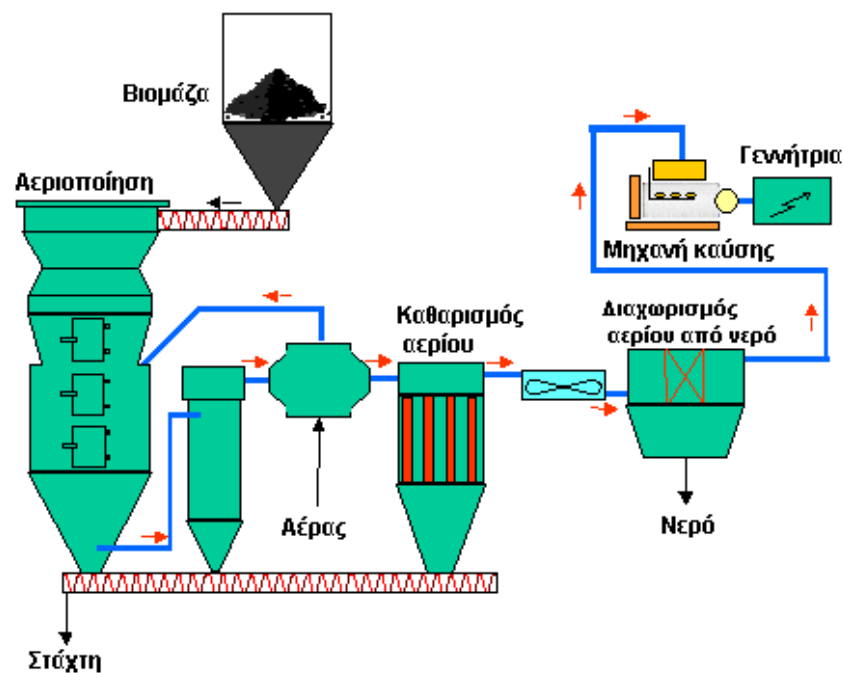
Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια ενδόθερμη θερμική διεργασία, κατά την οποία η στερεή βιομάζα μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο. Το παραγόμενο αυτό αέριο αποτελεί μίγμα πολλών καυσίμων (και μη) αερίων: μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα (CO , CO_2), υδρογόνο (H_2), μεθάνιο (CH_4), υδρατμοί (H_2O), ίχνη υδρογονανθράκων (π.χ. C_2H_6 , C_2H_4) και άζωτο (N_2 , σε περίπτωση που για την διεργασία χρησιμοποιείται αέρας και όχι καθαρό οξυγόνο). Πέραν των παραπάνω ενώσεων, στο αέριο προϊόν εμφανίζονται και διάφοροι επιμολυντές, κυριότεροι εκ των οποίων είναι η σωματίδια πίσσας, τέφρα, αμμωνία, οξέα και σύνθετοι υδρογονάνθρακες.

Το καύσιμο προϊόν της διεργασίας αεριοποίησης ονομάζεται αέριο σύνθεσης (syngas). Σε περίπτωση που η διεργασία γίνει με τη χρήση αέρα (η πιο οικονομική και συνήθης επιλογή), το αέριο σύνθεσης έχει καθαρή θερμογόνο δύναμη περίπου $4,6 \text{ MJ/m}^3$ (περίπου το 1/7 εκείνης του φυσικού αερίου). Όταν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο αντί για αέρας, η θερμογόνος δύναμη του αερίου μπορεί ακόμα και να τριπλασιασθεί. Και στις δυο περιπτώσεις, πάντως, η θερμογόνος δύναμη κάνει το αέριο σύνθεσης κατάλληλο για την παραγωγή

θερμότητας ή ηλεκτρισμού, με κατάλληλη χρήση του σε καυστήρες και αεριοστρόβιλους [2,14]

Υπάρχουν τρεις βασικές αρχές λειτουργίας αεριοποιητών:

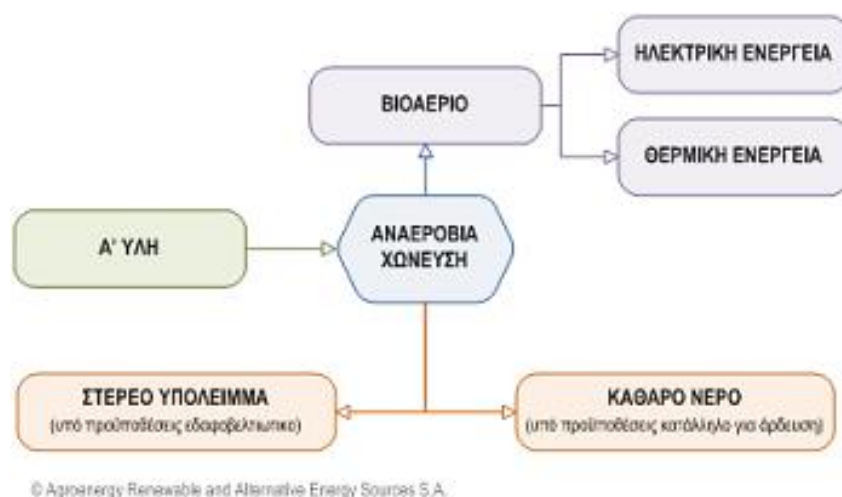
- Ομορροής, όπου το καύσιμο και το παραγόμενο αέριο ρέουν μαζί προς το κάτω τμήμα του αντιδραστήρα.
- Αντιρροής, όπου, αντίθετα με την προηγούμενη περίπτωση, τα δυο ρεύματα ρέουν προς αντίθετες κατευθύνσεις και το παραγόμενο αέριο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πίσσα.
- Ρευστοποιημένης κλίνης, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τυρβώδη ανάμιξη του υλικού της κλίνης και της βιομάζας, καθώς και από ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο εντός του αντιδραστήρα.



Εικόνα 2.5 : Αεριοποίηση Βιομάζας [25]

Παραγωγή βιοαερίου

Το βιοαέριο, είναι μια μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την παραγωγή θερμότητας ή/και ηλεκτρισμού, ενώ μετά την επεξεργασία και την αναβάθμιση του μπορεί να διοχετευτεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σαν καύσιμο για την κίνηση των μέσων μεταφοράς. Το βιοαέριο παράγεται από την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης κτηνοτροφικών κυρίως αποβλήτων (λύματα από βουστάσια, χοιροστάσια, πτηνοτροφικές μονάδες), αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων, στερεών απορριμμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, καθώς και από την ιλύ που παράγεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. [2]



Εικόνα 2.6 : Παραγωγή Βιοαερίου [24]

2.2 Δημοτικά Απόβλητα ως Βιομαζικό Υλικό

Η ανάπτυξη του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι αναπόφευκτη κατά τη συνεχιζόμενη περιβαλλοντική υποβάθμιση, εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης των ορυκτών καυσίμων, την αύξηση της ζήτησης ενέργειας και την εξάντληση των συμβατικών πηγών ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) [15].

Η βιομάζα είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να ληφθεί, μεταξύ άλλων, από επιλεγμένα αστικά απόβλητα, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτή των στερεών και αυτή των υγρών αποβλήτων (Εικόνα 2.7) [6].

Εκατομμύρια τόνοι οικιακών στερεών απορριμμάτων συλλέγονται κάθε χρόνο με τη πλειοψηφία αυτών να διατίθεται σε χωματερές. Αυτή η κατηγορία απορριμμάτων αποτελείται κυρίως από χαρτί και πλαστικά υλικά. Στις εγκαταστάσεις υγειονομικής ταφής, το αέριο που παράγεται από τη φυσική αποσύνθεση των δημοτικών στερεών αποβλήτων αποτελείται περίπου 50% μεθάνιο και 50% διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μπορεί να συλλεχθεί και να αξιοποιηθεί [16].

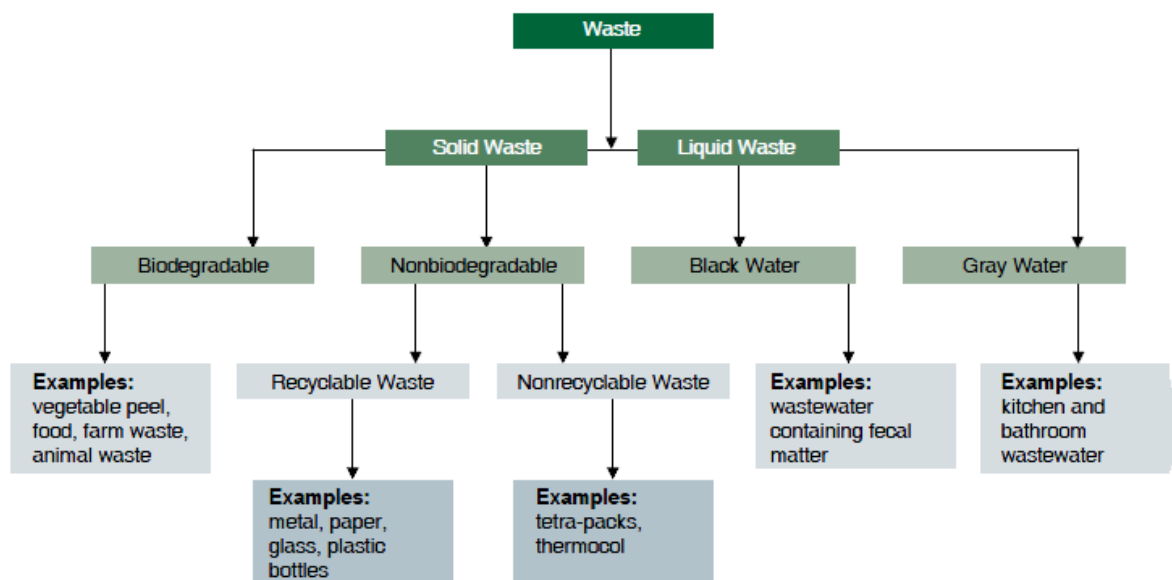
Η άλλη κατηγορία των δημοτικών αποβλήτων είναι η λυματολάσπη. Η ιλύς προέρχεται από το σύνολο των διαδικασιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι ποσότητες της αστικής ιλύος, που παράγεται στις σύγχρονες κοινωνίες ετησίως είναι τεράστια, με προοπτική συνεχούς ανόδου και με αποτέλεσμα να θεμελιώνονται σοβαρές ανησυχίες αναφορικά με τους περισσότερο πρόσφορους, σε κάθε περίπτωση, τρόπους διάθεσης αυτής [17].

Με την συνεχή αύξηση των δημοτικών αποβλήτων και τις επιβλαβείς επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία, σε συνδυασμό με την αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων από την χρήση των ορυκτών καυσίμων που συντελούν και αυτά στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος και της αυξανόμενης ζήτησης για ενέργεια, η σωστή αξιοποίηση των απορριμμάτων μπορεί να φέρει ιδανικές λύσεις σε αυτά τα προβλήματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την υιοθέτηση μεθόδων, οι οποίες είναι ταυτόχρονα οικονομικές, φιλικές προς το περιβάλλον και εξοικονομούν ενέργεια [16].

Η ενεργειακή τεχνολογία της βιομάζας είναι εγγενώς ευέλικτη. Η ποικιλία των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών σημαίνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μια μικρή, τοπική κλίμακα κυρίως για θερμότητα ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις μεγάλης δυναμικότητας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και ενώ ταυτόχρονα μπορεί να παράγει θερμότητα. Υπάρχει πλήθος τεχνολογιών για την αξιοποίηση του δυναμικού των αποβλήτων βιομάζας ως πηγής ενέργειας, που κυμαίνονται από πολύ απλά συστήματα μέχρι και σε πιο σύνθετες τεχνολογίες που μπορούν να αντιμετωπίσουν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων [18].

Μια από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους αξιοποίησης δημοτικών απορριμμάτων είναι η καύση τους, η οποία μειώνει την ποσότητά τους, ενώ ταυτόχρονα παρέχει ενέργεια. Πιο αναλυτικά για τις τεχνολογίες αξιοποίησης έγινε αναφορά στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Μια περιβαλλοντικά ορθή και τεχνικοοικονομικά βιώσιμη μεθοδολογία για τη διαχείριση βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων είναι εξαιρετικά σημαντική για τη βιωσιμότητα των σύγχρονων κοινωνιών. Η μετάβαση από συμβατικά ενεργειακά συστήματα σε συστήματα που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας και για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων [16].



Εικόνα 2.7 : Τύποι Δημοτικών Αποβλήτων [23]

2.2.1 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά λυματολάσσης

Οι δύο κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τις δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας από τα απόβλητα είναι η ποσότητα και η ποιότητα (φυσικοχημικά χαρακτηριστικά) των αποβλήτων. Τα χαρακτηριστικά και η ποιότητα της βιομάζας ως καυσίμου κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος, εξαρτώμενα κυρίως από τον τύπο της βιομάζας και την προεργασία την οποία έχει δεχθεί [6,18].

Οι κύριες ιδιότητες για την λυματολάσπη, καθώς και το εύρος τιμών που έχει καταγραφεί για αυτό το είδος βιομάζας είναι οι εξής:

- **Υγρασία(%)**: 54-86
- **Πτητικά(%)** : 15-85
- **Τέφρα (%)** : 4-65
- **Μόνιμος (%)**: 2-20
- **Άνθρακας**
- **ΑΘΔ (MJ/kg)**: 10-23

Ανάλυση τέφρας λυματολάσπης σε κύρια οξείδια:

- **CaO(%)**: 19-52
- **K₂O(%)**: 0.1-3
- **P₂O₅(%)**: 2-17
- **MgO(%)**: 0.5-3
- **SiO₂(%)**: 5-31
- **Al₂O₃(%)**: 2-13
- **Fe₂O₃(%)**: 1-15
- **TiO₂(%)**: 0.1-0.7
- **Na₂O(%)**: 0.1-0.5
- **Mn₂O₄(%)**: 0.1-0.3
- **SO₃(%)**: 0.5

Ανάλυση βαρέων μετάλλων τέφρας λυματολάσπης:

- **Zn(ppm)**: 1707
- **Cd(ppm)**: 0.6
- **Cu(ppm)**: 179
- **Ni(ppm)**: 18
- **Cr(ppm)**: 32
- **Pb(ppm)**: 95

Οι χημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν τις ποσότητες που καταλαμβάνουν διάφορα χημικά στοιχεία σε ένα δείγμα από ένα είδος βιομάζας, στην συγκεκριμένη περίπτωση της λυματολάσπης. Το εύρος τιμών των κύριων χημικών στοιχείων τα οποία μετρήθηκαν είναι τα εξής:

- **C(%)**: 23-53
- **H(%)**: 3-8
- **O(%)**: 15-30
- **N(%)**: 1.5-7
- **S(%)**: 0.5-2.5
- **Cl(%)**: 0.05-1

Πολλές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας ή αερίων, υγρών και στερεών καυσίμων από βιομάζα. Το είδος του βιοκαυσίμου, τα φυσικά του χαρακτηριστικά και η χημική του σύνθεση επηρεάζουν τη συνολική διεργασία χρησιμοποίησης της βιομάζας (παροχή καυσίμου, σύστημα μετατροπής, στερεά απόβλητα και αέριες εκπομπές). Για αυτό το λόγο, καθίσταται σημαντική η γνώση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να γίνονται οι κατάλληλες επιλογές σε μεθόδους και τεχνικές αξιοποίησης.

2.2.2 Τεχνολογίες αξιοποίησης λυματολάσπης για παραγωγή ενέργειας

Με τη συνεχή ανάπτυξη της οικονομίας και της βιομηχανίας στην Κίνα, η παραγωγή αστικής λυματολάσπης έχει ανέλθει σε 4.0 εκατομμύρια τόνους το 2010 και αναμένεται να φτάσει τα 6.0 εκατομμύρια τόνους το 2020. Στην Ευρώπη, το συνολικό ποσό αναμένεται να φθάσει τους 13.0 εκατ. τόνους το 2020. Ωστόσο, η λυματολάσπη που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας λυμάτων περιέχει ανεπιθύμητα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων οργανικών, ανόργανων και τοξικών ουσιών, καθώς και παθογόνους μικροοργανισμούς που προκαλούν ασθένειες. Για αυτό το λόγο είναι κρίσιμο ζήτημα η διάθεση της ιλύος, ο καθαρισμός των λυμάτων και η μείωση των αερίων ρύπων και της μόλυνσης του εδάφους και του νερού που προκαλεί.

Μέχρι τώρα, υπάρχουν πολυάριθμες τεχνολογίες για τη διάθεση της λυματολάσπης, όπως απόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής ως λίπασμα, απόθεση στην θάλασσα, καύση καθώς και πιο σπάνια πυρόλυση, αναερόβια χώνευση και αεριοποίηση.

Μεταξύ αυτών των μεθόδων, η καύση είναι η πιο ελκυστική μέθοδος αξιοποίησης με τα πλεονεκτήματα της μείωσης του όγκου της ιλύος, την καταστροφή των τοξικών συστατικών και την παραγωγή ενέργειας.

Ήδη η τεχνολογία της καύσης αξιοποιεί το 24% της παραγόμενης ιλύος στην Δανία, 20% στη Γαλλία, 15% στο Βέλγιο, 19% στη Γερμανία και στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία, το 25% και το 55%, αντίστοιχα.

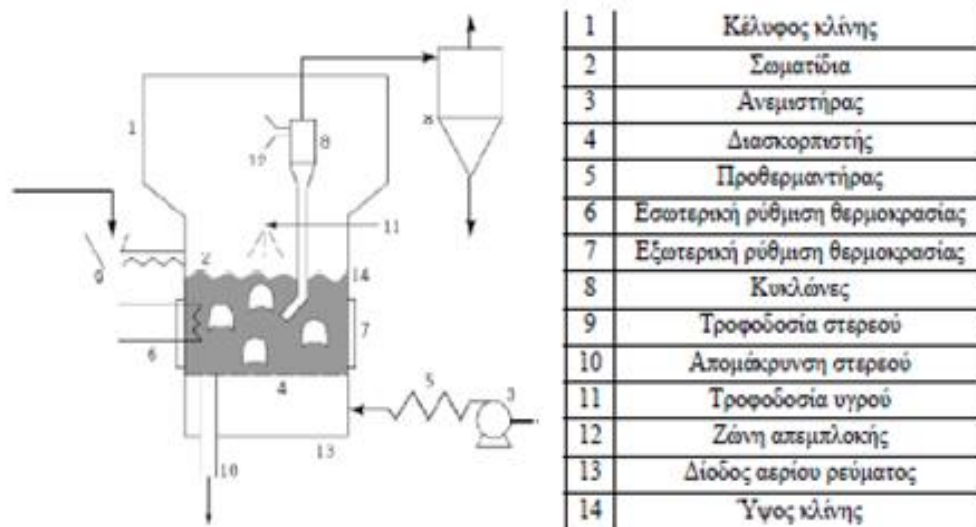
Επί του παρόντος, οι κύριοι κλίβανοι για αποτέφρωση ιλύος είναι οι ρευστοποιημένες κλίνες και οι φούρνοι με πολλαπλές εστίες. Άλλα συστήματα καύσης που χρησιμοποιούνται είναι οι περιστροφικοί κλίβανοι, οι κλίβανοι κυκλώνων, καθώς και διάφοροι τύποι καμίνων τήξης [19,20].

Τα συστήματα καύσης ρευστοποιημένης κλίνης (Εικόνα 2.8) βρίσκονται σε εφαρμογή από το 1960 για την καύση οικιακών και βιομηχανικών αποβλήτων. Σε πολλές χώρες χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης, βιομηχανικής κλίμακας για την καύση διαφόρων τύπων βιομάζας. Για παράδειγμα, στην Φιλανδία έχουν εγκατασταθεί περισσότερα από 30 συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων και ο μεγαλύτερος λέβητας σε αυτά έχει δυναμικότητα 500MW. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδων “ECOFLUID”, της Austrian Energy, η οποία εγκαταστάθηκε στη μονάδα Westfield της FIFE της Σκωτίας, στη μονάδα Langerbrugge της Stora Euso στο Βέλγιο, στη μονάδα Stendal της ZSG στη Γερμανία και στη μονάδα Timelkam της Energie AG στην Αυστρία, με δυναμικότητα παραγωγής ατμού μεταξύ 9t/h έως 290t/h, εκμεταλλευόμενη καύσιμα βιομάζας από ξύλο, φλοιούς δένδρων, υπολείμματα συγκομιδής, λυματολάσπη και οργανικά απόβλητα της αγροτικής βιομηχανίας. Με την τεχνολογική της εξέλιξη και τα σημαντικά πλεονεκτήματα που διαθέτει έναντι άλλων συστημάτων καύσης, καθίσταται η ιδανική τεχνολογία αξιοποίησης της λυματολάσπης [6].

Τα πλεονεκτήματα της ρευστοποιημένης κλίνης είναι η αποτελεσματική καύση όλων των ειδών καυσίμων, υπό σταθερές συνθήκες. Η καύση διεξάγεται υπό έντονη ανάμιξη στερεών, έτσι ώστε η θερμότητα να κατανέμεται ομοιόμορφα και

με τον τρόπο αυτό να αποφεύγεται ο σχηματισμός τοπικών θερμών σημείων. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των καυστήρων ρευστοποιημένης κλίνης είναι η ικανότητά τους να μειώνουν την εκπομπή ανεπιθύμητων αερίων, όπως οξείδια του θείου, υδραλογόνα, μονοξείδιο του άνθρακα και άκαυστους υδρογονάνθρακες, καθώς και οξειδίων του αζώτου, λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στην κλίνη και τις χαμηλές απαιτήσεις για περίσσεια αέρα. Σημαντικό ρόλο κατέχει και ο χώρος πάνω από το αδρανές υλικό (freeboard), ο οποίος λειτουργεί σαν θάλαμος μετά την καύση που παρέχει πλήρη θερμική διάσπαση των οργανικών ουσιών, το οποίο συνεισφέρει στην καλύτερη απόδοση του καυσίμου. Σε μονάδες ρευστοποιημένης κλίνης, το αδρανές υλικό λειτουργεί ως απορροφητής θερμότητας που εξαλείφει τις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και έτσι την επακόλουθη βλάβη του πυρίμαχου υλικού [21].

Η διεργασία της συν-καύσης μπορεί να επιφέρει θετικά αποτελέσματα, όσον αφορά στο κόστος, στην αποδοτικότητα και στο ύψος των εκπομπών. Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη της συν-καύσης υλικών βιομάζας σε μονάδες καύσης γαιάνθρακα. Το μεγαλύτερο μέρος της προόδου αυτής λαμβάνει χώρα στην Ευρώπη, με την βοήθεια από τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (περίπου 104 μονάδες από τις 150 παγκοσμίως). Αξιοσημείωτες αναφορές εγκαταστάσεων συν-καύσης με την χρήση λυματολάσπης για την καύση κονιοποιημένου γαιάνθρακα, είναι αυτή του Ηνωμένου Βασιλείου, με δυναμικότητα 2400MWe και αυτή της Γερμανίας, στην οποία η λυματολάσπη θεωρείται η σημαντικότερη βιομάζα για συν-καύση με κονιοποιημένο γαιάνθρακα, αλλά και με λιγνίτη [6].



Εικόνα 2.8 : Εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης [22]

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Συλλογή και Προετοιμασία Δειγμάτων

3.1.1 Καύσιμα

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη ήταν το πυρηνόξυλο, η λυματολάσπη και μίγματα αυτών.

Ο ελαιοπυρήνας (πυρηνόξυλο), ο οποίος συλλέχτηκε από την εταιρεία ΑΒΕΑ, παράγεται σαν παραπροϊόν στα ελαιοτριβεία κατά την επεξεργασία των ελιών για την παραλαβή του ελαιολάδου.

Η ιλύς (λυματολάσπη) προήλθε από τις εγκαταστάσεις υγρών αποβλήτων της μονάδας βιολογικού καθαρισμού των αστικών λυμάτων της πόλης των Χανίων. Πρόκειται για αχώνευτη λυματολάσπη, η οποία προέκυψε από τα στάδια της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας των λυμάτων, μέσω πρωτογενούς και δευτερογενούς καθίζησης.

Τα δείγματα μεταφέρθηκαν και αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων του Πολυτεχνείου Κρήτης για να υποστούν τις κατάλληλες επεξεργασίες για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των δειγμάτων περιλάμβανε την διαδικασία της αεροζήρανσης, η οποία πραγματοποιήθηκε σε ανοιχτό περιβάλλον. Στη συνέχεια ακολούθησε ξήρανση σε φούρνο (Εικόνα 3.1). Η απώλεια της υγρασίας είναι σημαντική, καθώς διευκολύνει τις διεργασίες της άλεσης και συμβάλει στην αποδοτικότερη καύση των υλικών.

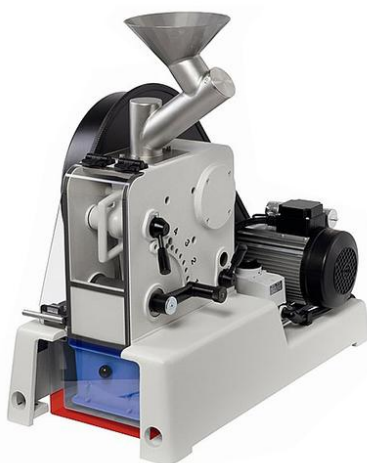
Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της ξήρανσης, επόμενο βήμα ήταν η άλεση των δειγμάτων. Για το πυρηνόξυλο χρησιμοποιήθηκε μαχαιρόμυλος (Pulverisette 15 της εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.2), ενώ για την λυματολάσπη σιαγωνοτός σπαστήρας (Pulverisette 1 της εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.3). Ακολούθησε κοσκίνηση σε δονούμενη συσκευή (μοντέλου Analysette 3 PRO της εταιρείας FRITSCH) (Εικόνα 3.4), ώστε να συλλεχθεί η κατάλληλη κοκκομετρία, η οποία ήταν τα +850 -2800μm σύμφωνα με αποτελέσματα από πειραματικές μετρήσεις στη ρευστοποιημένη κλίνη.



Εικόνα 3.1 : Φούρνος ξήρανσης



Εικόνα 3.2 : Μαχαιρόμυλος



Εικόνα 3.3 : Σιαγωνοτός σπαστήρας



Εικόνα 3.4 : Δονούμενα κόσκινα

3.1.2 Αδρανές υλικό

Η λειτουργία μίας ρευστοποιημένης κλίνης απαιτεί τη χρήση κάποιου αδρανούς υλικού, για να υπάρχει ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας και μάζας σε όλο το ύψος της κλίνης. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε Na-ούχος άστριος, με πυκνότητα $\rho_s = 2670 \text{ kg/m}^3$, μέσης διαμέτρου κόκκων $d_s = 283 \text{ }\mu\text{m}$, και σύσταση: $\text{SiO}_2 = 67.7\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20.3\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.05\%$, $\text{CaO} = 0.5\%$, $\text{MgO} = 0.05\%$, $\text{TiO}_2 = 0.05\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 11.2\%$ και $\text{K}_2\text{O} = 0.15\%$. Σύμφωνα με την παραπάνω σύσταση, προκύπτει ότι ο άστριος αποτελείται κατά κύριο λόγο από πυριτικά και αργιλικά άλατα, ενώ η περιεκτικότητά του σε ασβέστιο είναι αμελητέα, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί φυσική αποθείωση των καυσαερίων. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αναλλοίωτη διατήρησή του κατά τη διάρκεια της καύσης.

Για την συγκέντρωση της κατάλληλης κοκκομετρίας αστρίου έλαβαν χώρα οι διεργασίες της λειοτρίβησης σε σφαιρόμυλο και της κοσκίνησης σε συσκευή δονούμενων κοσκίνων. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι απαραίτητη η ποσότητα των 950-1000g αστρίου.

3.2 Ποιοτικός Χαρακτηρισμός Καυσίμων

Οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για το χαρακτηρισμό των δειγμάτων ήταν η προσεγγιστική ανάλυση (περιεκτικότητα σε υγρασία, πτητικά συστατικά, εξανθράκωμα ή μόνιμο άνθρακα και τέφρα) σε προγραμματιζόμενους κλιβάνους υψηλών θερμοκρασιών, η 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.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τις αναλύσεις των στερεών καυσίμων ήταν η λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από τα υλικά, κοκκομετρίας $-425\mu\text{m}$.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα Εργαστήρια των Σχολών Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και Μηχανικών Περιβάλλοντος σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα CEN/TC335.

3.2.1 Προσεγγιστική ανάλυση

Προσδιορισμός υγρασίας:

Για τον υπολογισμό της υγρασίας των υλικών ζυγίστηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα 2g σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας 0.1mg, το οποίο στην συνέχεια θερμάνθηκε στους 110 °C για 2 ώρες. Έπειτα τοποθετήθηκε σε ειδικό χώρο έλλειψης υγρασίας για 20 λεπτά, ώστε να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος και ζυγίστηκε ξανά. Η υγρασία για το κάθε δείγμα προσδιορίστηκε από την σχέση (1.1) :

$$\text{Υγρασία(\%)} = \left[\frac{W_{\text{αρχ}} - W_{\text{τελ}}}{W_{\text{αρχ}}} \right] \times 100 \quad (1.1)$$

Όπου, $W_{\text{αρχ}}$ είναι το αρχικό βάρος του δείγματος σε (g) και $W_{\text{τελ}}$ είναι το τελικό βάρος του δείγματος μετά την ξήρανση σε (g).

Προσδιορισμός τέφρας :

Σαν τέφρα ορίζεται το υπόλειμμα από ανόργανα συστατικά, που παραμένει μετά την καύση του ξηρού δείγματος στους 550 °C, η οποία πραγματοποιήθηκε σε προγραμματιζόμενο κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας. Επακόλουθο της διαδικασίας αυτής ήταν η μεταφορά του δείγματος στον ειδικό χώρο έλλειψης υγρασίας και η παραμονή του σε αυτόν, έως ότου αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην συνέχεια ζυγίστηκε και υπολογίστηκε η τέφρα από την σχέση (1.2) :

$$\text{τέφρα επί ξηρού(\%)} = \left[\frac{\text{Υπόλειμμα καύσης}}{\text{Αρχικό ξηρό βάρος}} \right] \times 100 \quad (1.2)$$

Προσδιορισμός πτητικών συστατικών

Σαν πτητικά συστατικά αναφέρονται τα αέρια προϊόντα που προκύπτουν κατά την θερμική διάσπαση των δειγμάτων. Για τον προσδιορισμό τους, πραγματοποιήθηκαν πειράματα πυρόλυσης με χρήση θερμοζυγού TGA-6 της εταιρίας Perkin Elmer (Εικόνα 3.5). Αντιπροσωπευτική ποσότητα (περίπου 25 mg) από κάθε δείγμα τοποθετήθηκε στον υποδοχέα του θερμοζυγού. Η θερμοκρασία αυξήθηκε σταδιακά μέχρι τους 110°C, όπου παρέμεινε για 15 λεπτά έως ότου το δείγμα έχασε όλη του την υγρασία. Κατόπιν, η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 850°C, με ρυθμό θέρμανσης 10°C/min, όπου και παρέμεινε για 10 λεπτά. Το ποσοστό των πτητικών συστατικών υπολογίστηκε για κάθε ξηρό δείγμα από την σχέση (1.3) :

$$\text{Πτητικά (\% επί ξηρού)} = \left[\frac{(W_{110^\circ\text{C}} - W_{850^\circ\text{C}})}{W_{110^\circ\text{C}}} \right] * 100 \quad (1.3)$$

όπου $W_{110^\circ\text{C}}$ είναι το βάρος του δείγματος στους 110°C, όπου έχει αποβάλει την υγρασία του και $W_{850^\circ\text{C}}$ είναι το τελικό βάρος του δείγματος στους 850°C.



Εικόνα 3.5 : Θερμοζυγός TGA-6

Προσδιορισμός απώλειας πύρωσης :

Η απώλεια πύρωσης εκφράζει την περιεκτικότητα των σωματιδίων της τέφρας σε άκαυστα στοιχεία . Ο υπολογισμός της πραγματοποιήθηκε με την καύση της τέφρας στους 950 °C για περίπου 2 ώρες. Αφού έγινε η ζύγιση της τέφρας πριν και μετά την καύση, η απώλεια πύρωσης προσδιορίστηκε από την παρακάτω σχέση (1.4) :

$$\text{Απώλεια πύρωσης(\%)} = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \quad (1.4)$$

Όπου, W_1 = το βάρος της τέφρας πριν την καύση

W_2 = το βάρος της τέφρας μετά την καύση

3.2.2 Στοιχειακή ανάλυση

Η στοιχειακή ανάλυση (CHNS-O) παρέχει πληροφορίες για την κατά βάρος σύσταση της βιομάζας σε άνθρακα (C), υδρογόνου (H), αζώτου (N), θείου (S), και οξυγόνου (O) σε ένα καύσιμο υλικό. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για

τον χαρακτηρισμό της οργανικής ύλης των καυσίμων. Η διαδικασία της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε μέσω του αυτόματου στοιχειακού αναλυτή, τύπου Flash 2000 Series, της εταιρίας Thermo Fisher Scientific (Εικόνα 3.6), στο Εργαστήριο Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων, της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.



Εικόνα 3.6 : Στοιχειακός αναλυτής Flash 2000 Series

Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην καύση του δείγματος σε υψηλή θερμοκρασία σε περίσσεια οξυγόνου και στη διαδοχική οξείδωση και αναγωγή των απαερίων της καύσης. Στη συνέχεια, τα αέρια εισέρχονται σε χρωματογραφική στήλη, διαχωρίζονται και ποσοτικοποιούνται με χρήση αναλυτή θερμικής αγωγιμότητας (TCD). Ο TCD παράγει ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα, ανάλογο της ποσότητας του στοιχείου που αναλύεται. Το ηλεκτρικό αυτό σήμα εμφανίζεται από το λογισμικό ανάλυσης ως μια κορυφή, που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο στοιχείο (π.χ. άνθρακας ή άζωτο). Η αντίδραση του ανιχνευτή σχεδιάζεται ως συνάρτηση του χρόνου που απαιτείται για το διαχωρισμό από τη στήλη, μετά από την εισαγωγή του δείγματος. Η αποτύπωση που προκύπτει είναι το χρωματογράφημα, μέσω του οποίου στη συνέχεια υπολογίζεται το εμβαδόν της κάθε κορυφής, άρα και η ποσοτικοποίηση του κάθε στοιχείου.

3.2.3 Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης

Ως θερμογόνος δύναμη ορίζεται το ενεργειακό περιεχόμενο ενός υλικού, η ενέργεια δηλαδή που εκλύεται κατά την καύση του. Η ενέργεια αυτή εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας (π.χ. kcal, MJ) ανά μοναδιαίο βάρος (kg, lb). Η γνώση του ενεργειακού περιεχομένου της οργανικής ύλης των στερεών αποβλήτων είναι χρήσιμη για την θερμική εκτίμηση αυτών. Η μέτρηση της θερμογόνου δύναμης των υλικών έγινε με αυτόματο Θερμιδόμετρο AC-350 της εταιρείας Leco (Εικόνα 3.7) , στο εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος. Το θερμιδόμετρο βασίζεται στην αρχή ότι με την καύση ενός οργανικού (καύσιμου) υλικού εκλύεται ενέργεια , η οποία απορροφάται από το νερό και αυτό οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Στην συνέχεια, με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων και της διαφοράς θερμοκρασίας του νερού υπολογίζεται η θερμογόνος δύναμη.



Εικόνα 3.7 : Θερμιδόμετρο AC-350

3.2.4 Ανάλυση τεφρών

Οι τέφρες που προέκυψαν από την καύση των δειγμάτων υπέστησαν χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις . Συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό των τεφρών σε κύρια οξείδια και ιχνοστοιχεία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Φασματογραφία Μάζας

Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος (ICP – MS), για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας του φωσφόρου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος χρωματομετρικού προσδιορισμού, για το ποσοτικό προσδιορισμό σε πυρίτιο η μέθοδος Φασματοσκοπίας Ατομικής Απορρόφησης και για την ανάλυση των ορυκτολογικών φάσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Περιθλασιμετρίας Ακτίνων-X.

Φασματογραφία Μάζας Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος (ICP – MS)

Η φασματομετρία μάζας με πηγή επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP – MS) είναι η σύζευξη δύο πολύ καλά καταρτισμένων τεχνικών. Το επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα είναι μια άριστη πηγή ιόντων για την ανόργανη φασματομετρία μάζας με την υψηλή θερμοκρασία που παρέχει στην περιοχή του, διασπά πλήρως τις ενώσεις του δείγματος στα άτομα τους και προσφέρει ικανοποιητικό ιονισμό των στοιχείων. Στη συνέχεια, τα ιόντα που δημιουργούνται, οδηγούνται στον αναλυτή μάζας, όπου και ταξινομούνται με βάση το λόγο μάζας προς φορτίο m/z . Κατά αυτόν τον τρόπο, προέκυψε ένα φάσμα μάζας, το οποίο είναι η καταγραφή του πλήθους των ιόντων που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή m/z . Έπειτα, ο ανιχνευτής ιόντων, μέσα από μία σειρά διεργασιών, πολλαπλασιάζει το σήμα, ώστε να καταγραφεί από τον επεξεργαστή σήματος. Τέλος, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Χρωματομετρικός Προσδιορισμός Φωσφόρου

Ο προσδιορισμός των οξειδίων του φωσφόρου που περιέχονταν στις τέφρες πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Χρωματομετρικού Προσδιορισμού του Φωσφόρου, με χρήση του φασματοφωτόμετρου ορατού υπεριώδους τύπου DR/4000 U, της εταιρίας Hach (Εικόνα 3.8), στο Εργαστήριο Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μέτρηση το όργανο αυτό αξιοποιεί μία από τις βασικές ιδιότητες του φωτός. Αυτή είναι η απορρόφηση τμήματος του φωτός όταν αυτό διέρχεται μέσα από ένα διάλυμα. Το φως που παράγεται από ένα λαμπτήρα κατευθύνεται με μία ορισμένη ισχύ προς ένα υδατικό διάλυμα, που περιέχει μία ουσία σε ορισμένη συγκέντρωση. Το υδατικό διάλυμα απορροφά τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και έτσι η ακτινοβολία που απομακρύνεται από αυτό έχει ισχύ μικρότερη από την αρχική.

Η απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της ουσίας μέσα στο υδατικό διάλυμα. Το φως που χρησιμοποιείται στο φασματοφωτόμετρο επιλέγεται να έχει συγκεκριμένο μήκος κύματος, ή έστω να ανήκει να ανήκει σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Αυτό το μήκος κύματος αντιστοιχεί σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που απορροφάται από τα μόρια της ουσίας την οποία θέλουμε να μετρήσουμε. Η απορρόφηση του φωτός και η συγκέντρωση της ουσίας συνδέονται με τον νόμο των Lambert-Beer.



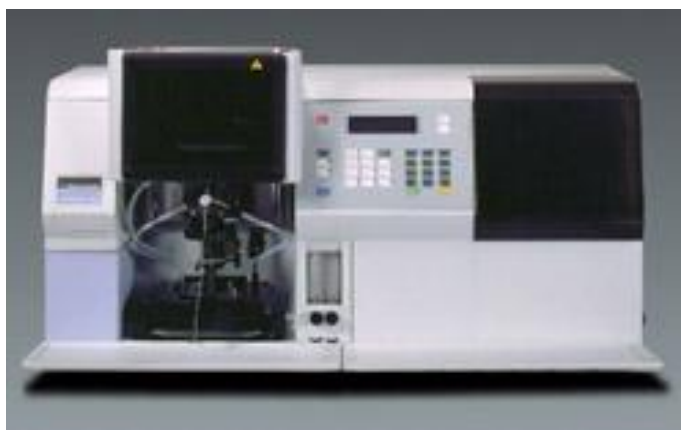
Εικόνα 3.8 : Φασματοφωτόμετρο DR/4000 U

Φασματοσκοπία Ατομικής Απορρόφησης

Με τη μέθοδο της Φασματοσκοπίας Ατομικής Απορρόφησης προσδιορίστηκε η συγκέντρωση του πυριτίου στις τέφρες. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση του φασματόμετρου τύπου AAnalyst 100 της εταιρίας Perkin Elmer (Εικόνα 3.9), στο Εργαστήριο Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

Τα άτομα κάθε μετάλλου έχουν ένα κεντρικό πυρήνα και ένα αριθμό ηλεκτρονίων γύρω από αυτόν κατανεμημένα σε στοιβάδες. Η πιο σταθερή κατάσταση των ατόμων είναι αυτή, για την οποία απαιτείται η μικρότερη δυνατή ενέργεια και ονομάζεται βασική κατάσταση. Αν σε κάποιο άτομο προσπέσει εξωτερική ακτινοβολία

συγκεκριμένου μήκους κύματος (το οποίο θα είναι διαφορετικό για το κάθε μέταλλο), τότε τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής του στοιβάδας θα μετακινηθούν σε ανώτερες ενεργειακά στοιβάδες απορροφώντας την προσπίπτουσα ενέργεια. Η ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για την μετάβαση αυτή, είναι ευθέως ανάλογη της συγκέντρωσης του μετάλλου. Η νέα αυτή κατάσταση των ατόμων ονομάζεται διεγερμένη κατάσταση και είναι εξαιρετικά ασταθής. Με τη βοήθεια θερμικής ενέργειας τα μόρια του μετάλλου μετατρέπονται σε άτομα (ατομοποίηση), τα οποία απορροφούν την προσπίπτουσα ειδική ακτινοβολία και ανεβαίνουν σε ανώτερη ενεργειακή στοιβάδα. Για την ατομοποίηση του πυριτίου, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ατομοποίησης με φλόγα. Τέλος, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του πυριτίου γίνεται με την μέτρηση της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε, σύμφωνα με το νόμο Lambert-Beer.



Εικόνα 3.9 : Φασματόμετρο AAAnalyst 100

Περιθλασιμετρία Ακτίνων – X

Η ορυκτολογική ανάλυση των τεφρών πραγματοποιήθηκε με χρήση του συστήματος αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων - X (XRD), τύπου D-8 Advance, της εταιρίας Bruker (Εικόνα 3.10), στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας, της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.



Εικόνα 3.10 : Περίθλασόμετρο D-8 Advance, Bruker

Η περίθλαση ακτίνων- X είναι μια μη καταστροφική μέθοδος για την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση κρυσταλλικών υλικών στο δείγμα. Περίθλαση ακτίνων- X είναι η ανάκλαση μίας ακτίνας- X από μια οικογένεια παράλληλων και ισαπέχοντων ατομικών επιπέδων. Σύμφωνα με τον νόμο του Bragg, όταν μία μονοχρωματική δέσμη ακτίνων- X με μήκος κύματος L προσπίπτει στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος υπό γωνία θ , πραγματοποιείται περίθλαση της δέσμης αν η διαδρομή των ακτίνων που αντανακλώνται από διαδοχικά επίπεδα (με απόσταση d) είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος L . Με μέτρηση των γωνιών περίθλασης, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ενδοκρυσταλλικές αποστάσεις d . Από την καταγραφή της γωνίας περίθλασης και του αντίστοιχου αριθμού ακτίνων- X που ανιχνεύτηκαν στην συγκεκριμένη γωνία περίθλασης, προκύπτει το φάσμα περίθλασης του υπό εξέταση υλικού. Το φάσμα συγκρίνεται με τη βάση δεδομένων φασμάτων ενός μεγάλου αριθμού υλικών και έτσι ταυτοποιείται ποιοτικά η δομή του υλικού, αλλά και ποσοτικά η περιεκτικότητα κάθε φάσης στο υλικό.

3.3 Πειραματική Διάταξη Ρευστοποιημένης Κλίνης

Η πειραματική εγκατάσταση που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές καύσης είναι ένας εργαστηριακής κλίμακας αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης (Εικόνα 3.11), στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η συσκευή της ρευστοποιημένης κλίνης αποτελείται από πέντε μέρη :

- Το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου
- Τον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης
- Το σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας
- Το σύστημα ψύξης
- Το σύστημα ανάλυσης καυσαερίων



Εικόνα 3.11 : Ρευστοποιημένη κλίνη

3.3.1 Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου

Το καύσιμο τροφοδοτείται μέσα από ένα σύστημα δύο κοχλίων, ένα δοσιμετρικό και έναν τροφοδοτικό που μεταφέρει το καύσιμο στον αντιδραστήρα. Η περιστροφή τους επιτυγχάνεται με ηλεκτρικό κινητήρα και μειωτήρα. Οι δύο κοχλίες είναι τοποθετημένοι μέσα σε σιλό, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με σωλήνα διαμέτρου 2in. Το πρώτο σιλό χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του υλικού, το οποίο μετέπειτα μεταφέρεται μέσω του κοχλία και του συνδετικού σωλήνα στο δεύτερο σιλό. Στην συνέχεια, το υλικό προωθείται μέσω του τροφοδοτικού κοχλία στο εσωτερικό της κλίνης, σε σημείο που βρίσκεται περίπου 20mm πάνω από το διασκορπιστή του αέρα ρευστοποίησης. Για την ομαλή μετάβαση του υλικού στον αντιδραστήρα, ο τροφοδοτικός κοχλίας περιστρέφεται ταχύτερα από τον δοσιμετρικό, ώστε να αποφευχθεί η συγκέντρωση καυσίμου στο δεύτερο σιλό. Επίσης, για την αποφυγή αναστροφής των αερίων καύσης στο δεύτερο σιλό, εισάγεται σε αυτό μία ροή αζώτου. Τέλος, γύρω από το σωλήνα που καλύπτει τον κοχλία τροφοδοσίας είναι τοποθετημένο ένα υδρόψυκτο στεφάνι, για να αποτρέψει την πυρόλυση του καυσίμου στο εσωτερικό του σωλήνα, πριν από την είσοδο του στον καυστήρα.

Ο αέρας, εισέρχεται στον αντιδραστήρα περνώντας μέσα από τις οπές του διασκορπιστή, οι οποίες εξασφαλίζουν ομοιόμορφη ροή. Για τη ρύθμιση της παροχής του αέρα χρησιμοποιήθηκαν ροόμετρα.

3.3.2 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης

Η ρευστοποιημένη κλίνη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο από ανοξείδωτο χάλυβα, διαμέτρου 7 cm και ύψους 150 cm, και ένα κωνικό τμήμα ύψους 50 cm στο επάνω μέρος. Στην βάση της κλίνης και σε ύψος 50cm από αυτή, βρίσκεται μία διάτρητη πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 5 mm (διασκορπιστής), η οποία συγκρατεί το αδρανές υλικό. Ο αέρας καύσης εισέρχεται στον κλίβανο μέσω της πλάκας και ρευστοποιεί την κλίνη. Ο χώρος πάνω από το αδρανές υλικό ονομάζεται freeboard (ελεύθερο όριο), και μέσα σε αυτόν επιτυγχάνεται η μείωση της ταχύτητας των αερίων και ο περιορισμός της απομάκρυνσης του υλικού της κλίνης λόγω συμπαρασυρμού.

Η προθέρμανση της κλίνης και η διατήρηση της θερμοκρασίας της επιτυγχάνεται από ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες την περιβάλλουν. Για να περιοριστούν οι απώλειες θερμότητας, τοποθετούνται σε διάφορα σημεία εξωτερικά της κλίνης στρώσεις κεραμοβάμβακα.

Η μέτρηση των θερμοκρασιών στις διάφορες θέσεις κατά μήκος του κλιβάνου πραγματοποιείται με 6 θερμοστοιχεία Ni/Cr-Ni, τύπου K, εσωτερικά του αντιδραστήρα και μέσω ενός ενσωματωμένου στις ηλεκτρικές αντιστάσεις, τα οποία ελέγχονται από PID ρυθμιστές. Τέλος, η πτώση πίεσης καταγράφεται με διαφορικό μανόμετρο.

3.3.3 Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας και ψύξης αερίου

Το αέριο προϊόν από την καύση, μετά την έξοδο από το freeboard οδηγείται μέσω σωληνώσεων σε έναν εφαπτομενικού τύπου κυκλώνα για την απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας, καθώς και άλλων σωματιδίων. Η τέφρα που δεσμεύεται συλλέγεται σε δοχείο που έχει προσαρμοστεί στο κάτω μέρος του κυκλώνα.

Το αέριο απαλλαγμένο πλέον από την ιπτάμενη τέφρα και άλλες προσμίξεις, μεταφέρεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας με νερό, όπου και ψύχεται. Με αυτή την διαδικασία επιτυγχάνεται η απομάκρυνση συμπυκνωμάτων, όπως πίσσα, υγρασία και διάφορα σωματίδια. Οι προσμίξεις αυτές συλλέγονται σε δοχείο που βρίσκεται στο κάτω μέρος του συστήματος ψύξης. Επιπρόσθετα υπάρχει μια έξοδος για το αέριο, αφού έχει ψυχθεί, η οποία μέσω σωληνώσεων οδηγεί σε απαγωγό για λόγους ασφαλείας.

3.3.4 Σύστημα ανάλυσης καυσαερίων

Το απαέριο μετά την ψύξη, διοχετεύεται σε on line αναλυτή καυσαερίων τύπου Madur Ga-40plus της Sick-Maihak (Εικόνα 3.12), που είναι εξοπλισμένος με ενσωματωμένο φίλτρο και ξηραντήρα. Ο αναλυτής καταγράφει ανά 5s 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). Καταγράφει, επίσης, την απώλεια θερμότητας, τη θερμοκρασία και παροχή

καυσαερίων και το συντελεστή περίσσειας αέρα λ. Όλα τα δεδομένα εμφανίζονται και καταγράφονται σε ένα υπολογιστή, μέσω μιας μονάδας συλλογής δεδομένων.



Εικόνα 3.12 : Αναλυτής Madur Ga-40plus

3.4 Καθορισμός Συνθηκών Λειτουργίας Καύσης

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων στην ρευστοποιημένη κλίνη αναφέρονται στις συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα και στα χαρακτηριστικά του αδρανούς υλικού και του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν.

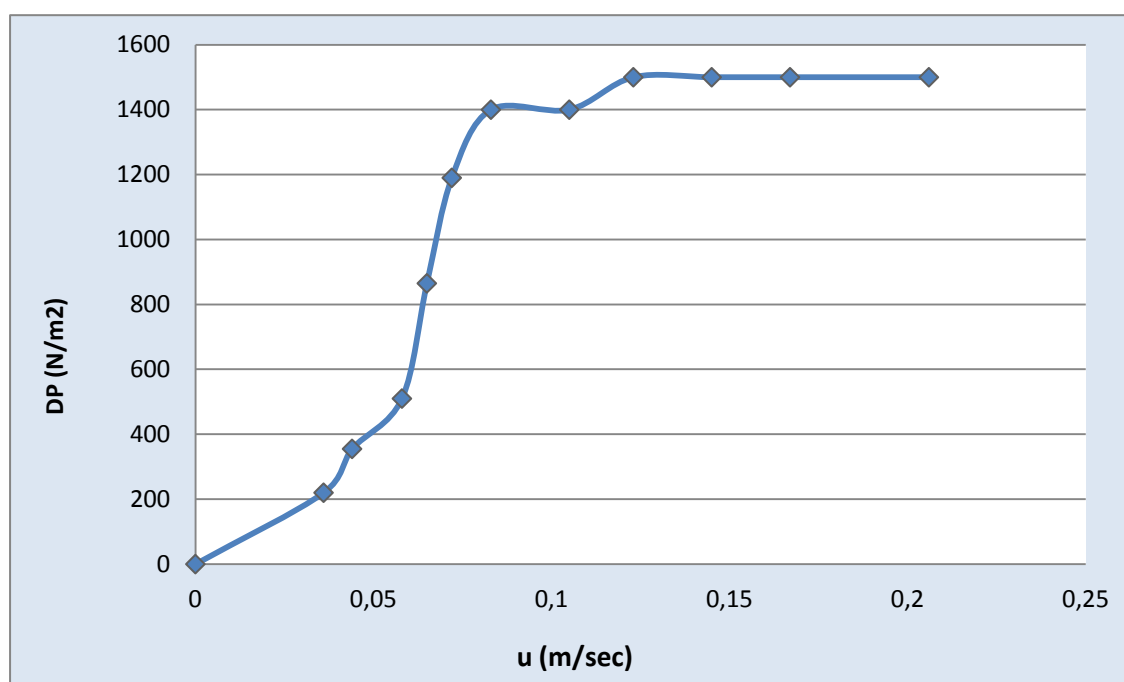
Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής :

- Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης
- Κοκκομετρία υλικών/μιγμάτων
- Ρυθμός τροφοδοσίας καυσίμου
- Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα
- Θερμοκρασία λειτουργίας

3.4.1 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης

Ρευστοποίηση καλείται η μετατροπή ενός στρώματος ακίνητων σωματιδίων σε στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων υπό την επενέργεια του αέρα σε αυτή, εφόσον η ταχύτητα του ρευστού ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή. Το στρώμα των αιωρούμενων σωματιδίων ονομάζεται ρευστοποιημένη κλίνη και συμπεριφέρεται ως ένα ρευστό με μεγάλο ιξώδες. Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης υπολογίστηκε πειραματικά, με τη βοήθεια της συσκευής του κρύου μοντέλου. Όταν ο ρυθμός ροής είναι χαμηλός, το ρευστό απλώς διεισδύει μέσω των κενών χώρων που υπάρχουν ανάμεσα από τα στατικά στερεά σωματίδια. Αυτή είναι η περίπτωση μίας *σταθερής κλίνης*. Με αύξηση του ρυθμού ροής του εισαγόμενου ρευστού, τα σωματίδια απομακρύνονται μεταξύ τους και μερικά αρχίζουν να πάλλονται και να μετακινούνται σε περιορισμένο εύρος περιοχής. Σε ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα, φθάνει ένα σημείο όπου όλα τα σωματίδια ξεκινούν να αιωρούνται οριακά και να αποκτούν συμπεριφορά ρευστού. Στο σημείο αυτό, η δύναμη τριβής μεταξύ ενός σωματιδίου και του ρευστού ανοδικής φοράς εξισώνεται με το βάρος του σωματιδίου, η κάθετη συνιστώσα της δύναμης συμπίεσης μεταξύ των γειτονικών σωματιδίων εξαφανίζεται και η πτώση πίεσης μεταξύ δύο οποιονδήποτε τμημάτων της κλίνης περίπου ισοδυναμεί με το βάρος του ρευστού και των σωματιδίων στο αναφερόμενο τμήμα. Στην περίπτωση αυτή η κλίνη θεωρείται ότι οριακά ρευστοποιείται και η ταχύτητα του αέρα που αντιστοιχεί στη ροή αυτή

αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 3.1) παρουσιάζεται η πτώση πίεσης (N/m^2), συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα (m/s), από το οποίο προσδιορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, ως η ταχύτητα στην οποία συμβαίνει αλλαγή κλίσης της ευθείας του διαγράμματος και είναι ίση με $u_{\min}=0.123 \text{ m/s}$.



Διάγραμμα 3.1 : Προσδιορισμός της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης ως συνάρτηση της πτώσης πίεσης διαμέσου στρώματος στερεών σωματιδίων

3.4.2 Κοκκομετρία υλικών/μιγμάτων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν το πυρηνόξυλο και η λυματολάσπη. Η κοκκομετρία επιλέχθηκε, με σκοπό την ομαλή καύση, την αποφυγή της απομάκρυνσης του υλικού από την περιοχή της ρευστοποίησης και να είναι σαφής ο διαχωρισμός της παραγόμενης από το καύσιμο τέφρας και του αδρανούς υλικού της κλίνης. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, η κοκκομετρία που προέκυψε ήταν $850\mu\text{m} - 2.8\text{mm}$.

Η κοκκομετρία του νατριούχου αστρίου, που επιλέχθηκε σαν αδρανές υλικό, προσδιορίστηκε με στόχο να μπορεί να επιτευχθεί ρευστοποίηση, χωρίς να δημιουργείται συσσώρευση, να αποφευχθεί συμπάρασυρση του υλικού εκτός του αντιδραστήρα και να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αυτού και της παραγόμενης από τη καύση τέφρας. Έτσι η κοκκομετρία που επιλέχθηκε ήταν 200 μ m – 400 μ m.

3.4.3 Ρυθμός τροφοδοσίας καυσίμου

Για τον ρυθμό τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε ροές από 10-12 g/min, οι οποίες επιλέχθηκαν, έπειτα από βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε στην ρευστοποιημένη κλίνη για το κάθε δείγμα, ως οι βέλτιστες ροές για την ομαλή μεταφορά του καυσίμου στον αντιδραστήρα και την επίτευξη αξιόλογης καύσης του υλικού.

3.4.4 Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εισαγωγή αέρα στην κλίνη είναι απαραίτητη για την ρευστοποίηση του υλικού. Αναλόγως του υλικού που χρησιμοποιήθηκε και τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα με τον αέρα αλλά και τις συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα, ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα για τα πειράματα κυμάνθηκε από 3.96 έως 5.52 m³/h.

3.4.5 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 και η οποία είναι κατάλληλη για την συλλογή των τεφρών χωρίς αυτές να δέχονται αλλοιώσεις λόγω υψηλών θερμοκρασιών, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα επικαθίσεων, επισκωρώσεων και συσσωματωμάτων. Η προθέρμανση της κλίνης έγινε στους 700°C, ενώ του αέρα της καύσης περίπου στους 550°C.

3.5 Μεθοδολογία Διεξαγωγής των Πειραμάτων

Για κάθε είδος καυσίμου, επιλέχθηκαν δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: η παροχή καυσίμου τροφοδοσίας και ο λόγος περίσσειας αέρα. Η παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν σε 10 ή 12 g/min, ενώ ο λόγος λ της περίσσειας αέρα κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 1.3 και 1.5.

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 κοχλίου. Παράλληλα με την τροφοδοσία του καυσίμου, τροφοδοτήθηκε το σύστημα από το δεύτερο σιλό 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 αποθηκεύτηκε 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

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αντιπροσωπευτικά δείγματα, καθώς και τα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.

Ο χημικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει προσεγγιστική ανάλυση, στοιχειακή ανάλυση και χημική ανάλυση τέφρας.

4.1 Αναλύσεις Αρχικών Δειγμάτων

4.1.1 Προσεγγιστική ανάλυση

Τα δύο υλικά (ονοματολογία πυρηνόξυλου : ΠΞ, λυματολάσπης : ΛΛ) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.1 έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά, γεγονός που τα καθιστά καύσιμα με υψηλή αντιδραστικότητα, όπως επίσης συμβάλουν έτσι θετικά στην διεργασία της καύσης, αλλά και στην θερμογόνο δύναμη του κάθε υλικού.

Τα ποσοστά υγρασίας των δύο υλικών βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, έτσι δεν επιδρούν αρνητικά στην καύση. Σε αντίθετη περίπτωση, η υγρασία μειώνει την θερμική αποδοτικότητα του καυσίμου και προκαλεί αυξημένες εκπομπές CO και CO₂.

Το ποσοστό της τέφρας παρουσιάζει χαμηλή τιμή για το πυρηνόξυλο, ενώ αρκετά υψηλή για το δείγμα της λυματολάσπης.

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

Δείγμα	Υγρασία (*)	Πτητικά	Τέφρα	Μόνιμος Άνθρακας
ΠΞ	5.3	73.6	7.1	19.3
ΛΛ	7.2	67.2	17.2	15.6

(*αεροξηρανθέν)

4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση – θερμογόνος δύναμη

Η τιμή της θερμογόνου δύναμης των υλικών, η οποία καταγράφεται στον Πίνακα 4.1.2, είναι γενικά υψηλή και συγκρίσιμη με αυτή των γαιανθράκων χαμηλής τάξης. Στην τιμή αυτή συμβάλει η υψηλή περιεκτικότητα στοιχειακού άνθρακα, η περιεκτικότητα στοιχειακού υδρογόνου, τα ποσοστά χαμηλής τέφρας, καθώς και η αυξημένη ποσότητα πτητικών.

Επίσης, από τον πίνακα παρατηρείται ότι η λυματολάσπη έχει μεγαλύτερα ποσοστά αζώτου σε σύγκριση με το πυρηνόξυλο, άρα αναμένονται μεγαλύτερες τιμές σε εκπομπές οξειδίων αζώτου.

Οι εκπομπές θείου αναμένονται αμελητέες για το πυρηνόξυλο, καθώς η περιεκτικότητά του σε θείο είναι αρκετά χαμηλή. Στην λυματολάσπη οι εκπομπές θείου αναμένονται αυξημένες, εξαιτίας της υψηλότερης τιμής θείου που εμπεριέχεται στο καύσιμο αυτό.

Τα επίπεδα χλωρίου είναι χαμηλά και στα δύο υλικά, μειώνοντας έτσι τις αναμενόμενες εκπομπές HCl, Cl₂ και αλκαλικών χλωριδίων, τα μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην διαδικασία της καύσης.

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

Δείγμα	C	H	S	N	O	Cl	Α.Θ.Δ (MJ/kg)
ΠΞ	49.7	6.6	0.33	2.0	34.3	0.06	20.8
ΛΛ	42.4	6.7	1.7	8.1	23.9	0.01	18.8

4.1.3 Ορυκτολογική και χημική ανάλυση τέφρας

Στον Πίνακα 4.1.3 και στα Διαγράμματα 4.1.1 και 4.1.2 παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες των τεφρών σε ορυκτά.

Στην τέφρα του πυρηνόξυλου κυριαρχεί το ορυκτό φαιρχιλνίτης, από το οποίο προέρχεται και η μεγάλη ποσότητα K στην τέφρα. Σημαντικό ποσοστό καλίου παρουσιάζεται και στο ορυκτό του αρκανίτη και λιγότερο στα ορυκτά του συλβίνη και του μικροκλινούς, τα οποία εντοπίζονται στην τέφρα του πυρηνόξυλου. Η τέφρα του πυρηνόξυλου περιέχει επίσης σημαντικές ποσότητες ασβεστίου υπό τη μορφή του ασβεστίτη, δολομίτη και ανυδρίτη και μικρότερες ποσότητες υπό την μορφή του υδροξυαπατίτη, στον οποίο οφείλεται η εμφάνιση φωσφόρου στην τέφρα. Οι ποσότητες πυριτίου που βρέθηκαν στην χημική ανάλυση, εμφανίζονται κυρίως υπό την μορφή του χαλαζία.

Γουιλοκίτης μαγνησιούχος είναι το ορυκτό που κυριαρχεί στην τέφρα της λυματολάσπης, στο οποίο οφείλονται οι σημαντικές ποσότητες ασβεστίου και φωσφόρου κατά την χημική ανάλυση αυτής. Σημαντικές ποσότητες ασβεστίου προέρχονται και από το ορυκτό του ασβεστίτη και λιγότερο από το ορυκτό του ανυδρίτη. Η ποσότητα σιδήρου στην τέφρα της λυματολάσπης εμφανίζεται κυρίως υπό την μορφή του αιματίτη, ενώ του θείου υπό την μορφή του ανυδρίτη. Τέλος, η ποσότητα πυριτίου βρίσκεται στην μορφή του χαλαζία.

Στον Πίνακα 4.1.4 παρουσιάζεται η χημική ανάλυση της τέφρας των δύο καυσίμων. Στην τέφρα του πυρηνόξυλο παρατηρείται ότι κυριαρχούν τα στοιχεία Ca, K, P και λιγότερο το Mg, τα οποία αποτελούν φυτικά θρεπτικά συστατικά και παράγοντες βελτίωσης του εδάφους. Αξιοσημείωτη είναι και η συγκέντρωση του Si.

Στην τέφρα της λυματολάσπης κυριαρχούν τα στοιχεία Si, Fe, Ca, και ιδιαίτερα το P (πιθανόν λόγω της χρήσης οικιακών απορρυπαντικών).

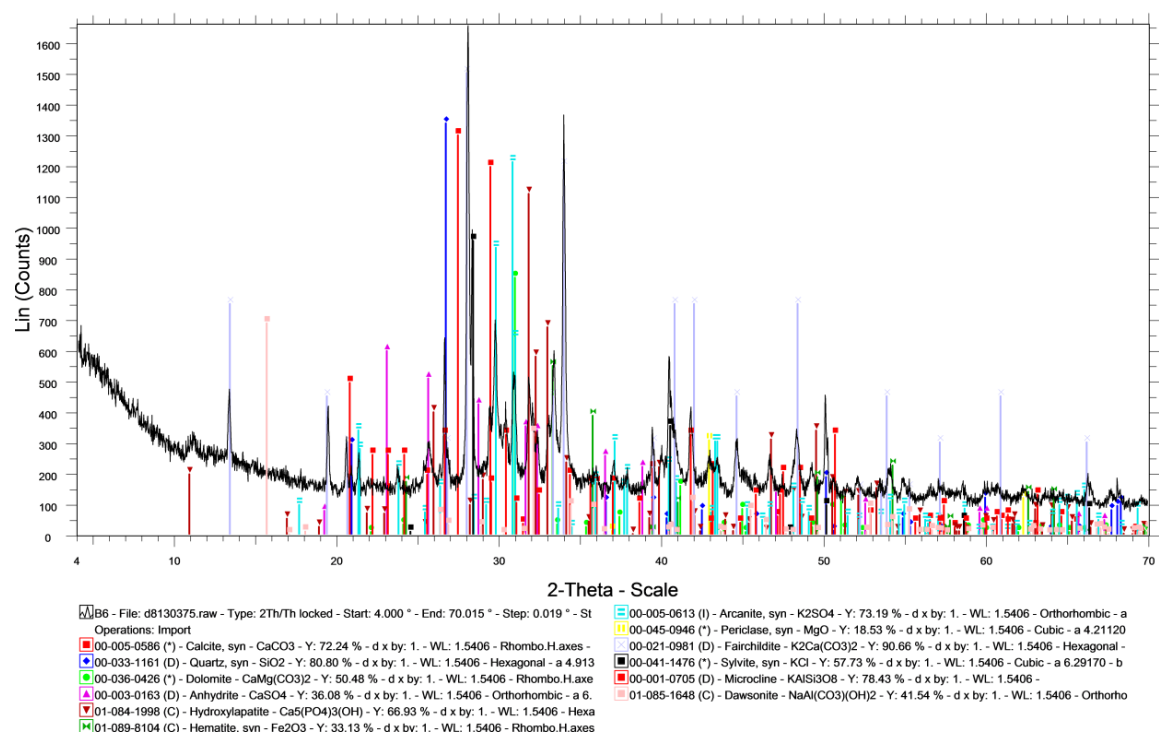
Πίνακας 4.1.3 : Ορυκτολογική ανάλυση τέφρας 550 °C

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ	ΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟ	ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗ
Χαλαζίας SiO_2	++	++
Ασβεστίτης CaCO_3	++	++
Ανυδρίτης CaSO_4	+	+
Οξείδιο Ασβεστίου CaO		+
Γουιτλοκίτης μαγνησιούχος $\text{Ca}_{18}\text{Mg}_2\text{H}_2(\text{PO}_4)_{14}$		+++
Περίκλαστο MgO	+	
Αιματίτης Fe_2O_3	+	++
Φαιρχιλντίτης $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	+++	
Υδροξυαπατίτης $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	++	
Δολομίτης $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$	++	
Μικροκλινής KAlSi_3O_8	+	
Νταουζονίτης $\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	+	
Συλβίνης KCl	+	
Αρκανίτης K_2SO_4	++	
Γιανσίτης $\text{CaMn}_2\text{Fe}_5\text{Mg}_2\text{Al}_2$ $(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_{2 \cdot x}\text{H}_2\text{O}$		+
Διάσπορο $\text{AlO}(\text{OH})$		+

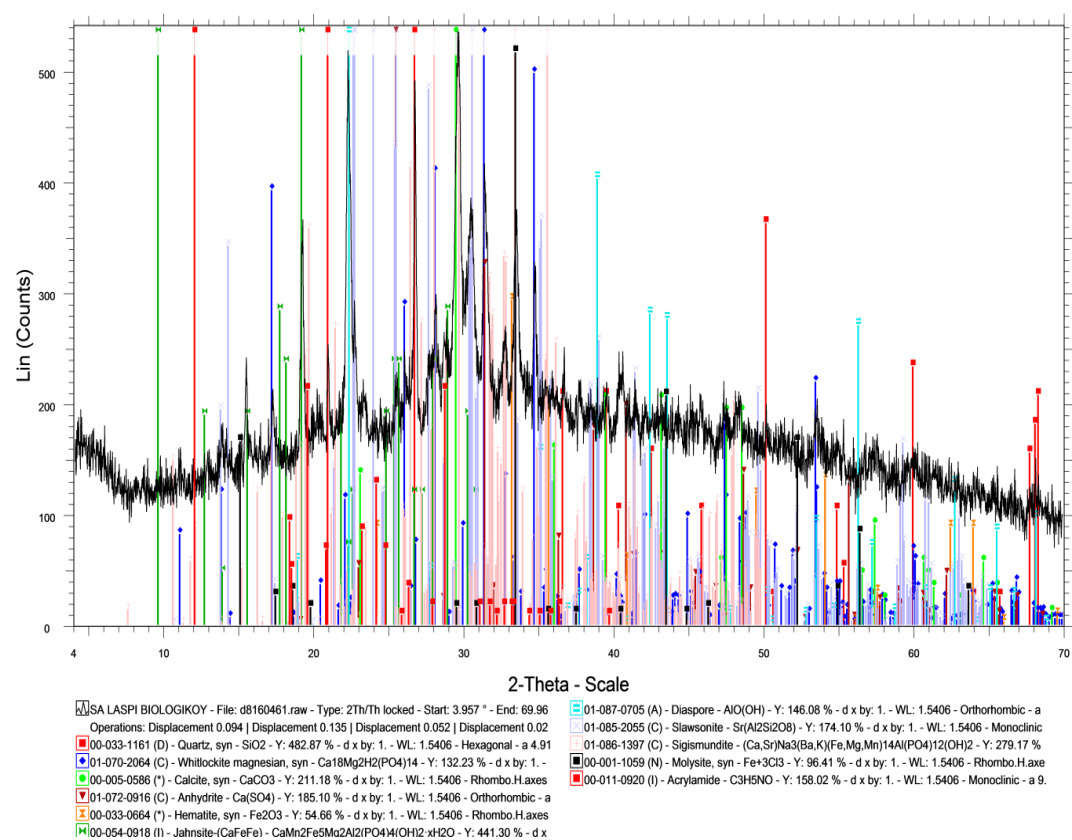
(+) Περιεκτικότητα τέφρας σε ορυκτό: + χαμηλή, ++ μέτρια, +++ υψηλή

Πίνακας 4.1.4 : Χημική ανάλυση τέφρας 550 °C σε κύρια οξείδια (% κ.β)

Δείγμα	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	Απώλεια πύρωσης (1050°C)
ΠΞ	8.3	2.6	1.8	22.3	6.5	3.5	21.3	-	-	0.01	10.3	23.40
ΛΛ	15.5	5.1	14.2	17.3	5.4	2.6	6.4	-	0.97	0.07	29.2	3.26



Διάγραμμα 4.1.1 : Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων της τέφρας του Πυρηγόξυλου 550 °C



Διάγραμμα 4.1.2 : Κατανομή ορυκτολογικών φάσεων της τέφρας της Λυματολάσσης 550 °C

4.2 Θερμοκρασίες Καυστήρα, Εκπομπές Ρύπων και Απόδοση για Σταθερές Συνθήκες Καύσης

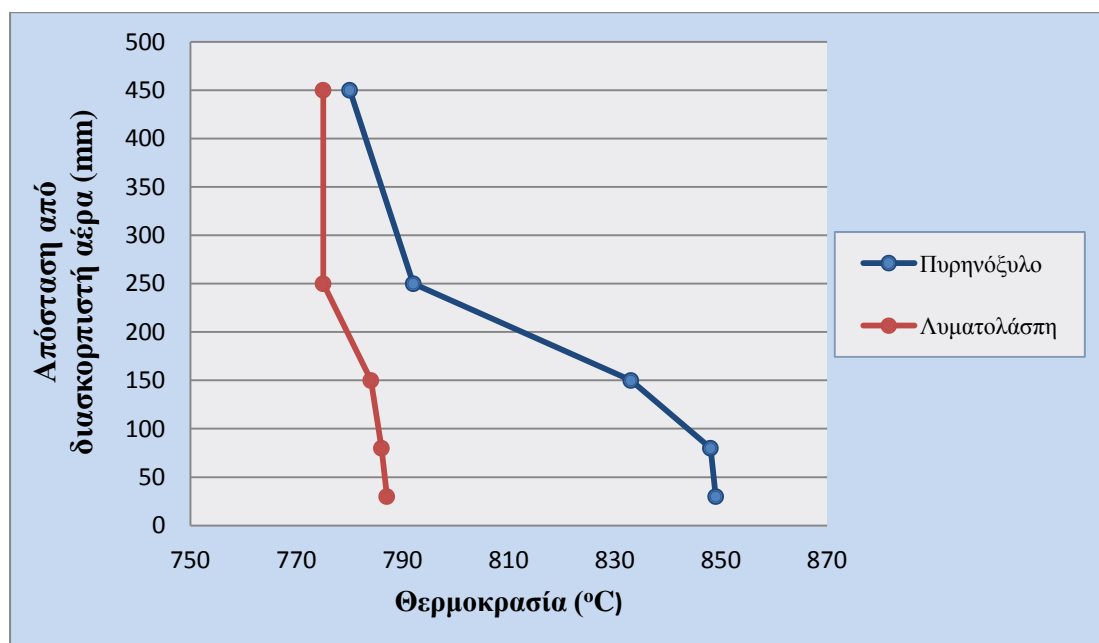
4.2.1 Αρχικά δείγματα

Στον Πίνακα 4.2.1 παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασίας, οι εκπομπές ρύπων, οι απώλειες θερμότητας και η απόδοση, από πυρηνόξυλο και λυματολάσπη σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για τροφοδοσία καυσίμου $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$.

Πίνακας 4.2.1 : Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων, απώλειες θερμότητας και απόδοση από πυρηνόξυλο και λυματολάσπη σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για τροφοδοσία καυσίμου $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$

Είδος καυσίμου	Θερμοκρασίες (°C)						Εκπομπές CO (ppm _v)	Εκπομπές SO ₂ (ppm _v)	Εκπομπές NO _x (ppm _v)	L _{co} (%)	Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)										
	30	80	150	250	450	1250					
ΠΞ	849	848	833	792	780	400	422.7	-	196	0.46	99.54
ΛΛ	787	786	784	775	775	440	1188.1	290	143.4	1.27	98.73

Στο Διάγραμμα 4.2.1 απεικονίζεται το προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$. Όπως παρατηρείται, τα καύσιμα συμπεριφέρονται διαφορετικά. Το πυρηνόξυλο επιτυγχάνει την μέγιστη θερμοκρασία 30mm πάνω από τον διασκορπιστή αέρα. Αυτό υποδηλώνει ότι μια μεγάλη ποσότητα πτητικών ελευθερώνονται και καίγονται μόλις το υλικό εισέλθει στον αντιδραστήρα, των οποίων η καύση συνεχίζεται και στο ελεύθερο όριο του καυστήρα, καθώς η θερμοκρασία σε αυτό το σημείο παρέμεινε σχετικά υψηλή ($780\text{ }^{\circ}\text{C}$). Στη συνέχεια η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά μέχρι και το κωνικό τμήμα του καυστήρα, στο οποίο η τιμή της ανέρχεται στους $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Πίνακας 4.2.1). Όσο αφορά την λυματολάσπη, δείχνει να έχει ένα σχεδόν ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασίας κατά μήκος του καυστήρα, με την μέγιστη θερμοκρασία να επιτυγχάνεται και αυτή κοντά στον διασκορπιστή αέρα και στην συνέχεια να πραγματοποιείται μια μικρή μείωση στο ελεύθερο όριο. Η θερμοκρασία που καταγράφεται στο κωνικό τμήμα είναι $440\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το σχεδόν ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασίας της λυματολάσπης, καθώς και οι χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας σε σχέση με του πυρηνόξυλου, αποδίδονται στο ότι η λυματολάσπη περιέχει περισσότερη τέφρα από το πυρηνόξυλο αντίστοιχα και τα πτητικά εκλύθηκαν με χαμηλότερο ρυθμό από ότι το πυρηνόξυλο και συνέχισαν την αντίδρασή τους με το οξυγόνο και στην αέρια φάση.



Διάγραμμα 4.2.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12\text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$

Ο μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x από την καύση των βιομαζικών υλικών σε ρευστοποιημένη κλίνη για τροφοδοσία καυσίμου F=12g/min και περίσσειας αέρα λ=1,4 συγκρίνεται στο Διάγραμμα 4.2.2. Σύμφωνα με το διάγραμμα, παρατηρείται ότι οι εκπομπές του CO είναι αρκετά χαμηλότερες κατά την καύση του πυρηνόξυλου, καθώς η θερμοκρασία στον αντιδραστήρα ήταν υψηλότερη, το οποίο οδηγεί σε λιγότερο άκαυστο CO. Οι υψηλές συγκεντρώσεις CO που παρήχθησαν από την λυματολάσπη μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς είναι, η χαμηλότερη θερμοκρασία στον αντιδραστήρα σε σύγκριση με το πυρηνόξυλο, ο μη επαρκής χρόνος παραμονής του αερίου στο άνω μέρος του αντιδραστήρα ώστε να οξειδωθεί, καθώς και το υψηλότερο ποσοστό τέφρας, το οποίο μπορεί να είναι εμπόδιο για την διάχυση του οξυγόνου στα μόρια του καυσίμου. Οι εκπομπές CO και των δύο καυσίμων είναι εντός των επιτρεπτών ορίων, σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [28].

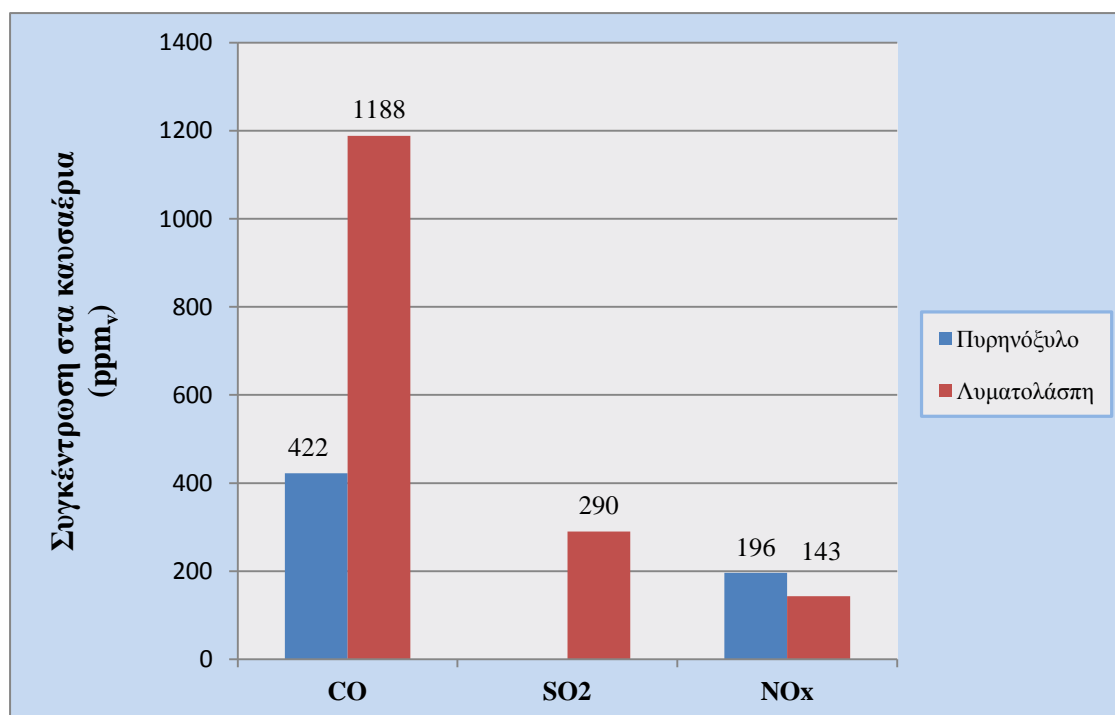
Το πυρηνόξυλο λόγω πολύ χαμηλής περιεκτικότητας S δεν εμφανίζει εκπομπές SO₂, σε αντίθεση με την λυματολάσπη, της οποίας οι εκπομπές SO₂ ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια (300 mg/Nm³), σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [29]. Για την μείωση και τον έλεγχο των εκπομπών του θείου πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα, όπως εισαγωγή προσροφητικών υλικών στην κλίνη για την απορρόφηση του θείου και καθαρισμός των καυσαερίων κατά την έξοδό τους από τον καυστήρα.

Οι εκπομπές NO_x είναι ελαφρώς υψηλότερες για το πυρηνόξυλο σε σχέση με την λυματολάσπη, παρόλο που η περιεκτικότητα της λυματολάσπης σε N είναι μεγαλύτερη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον σχηματισμό διαφορετικών ενώσεων αζώτου, όπως NH₃ και HCN κατά τη θερμική διάσπαση της λυματολάσπης, οι οποίες αντιδρούν με τα οξείδια του αζώτου, ανάγοντάς τα σε στοιχειακό άζωτο [28].

Οι τιμές NO_x για την λυματολάσπη είναι εντός των επιτρεπτών ορίων από τα Ελληνικά πρότυπα για μικρές μονάδες (200 – 350 mg/Nm³), ενώ για το πυρηνόξυλο είναι ελαφρώς υψηλότερες (392 mg/Nm³) [28]. Για την μείωση των εκπομπών του αζώτου πρέπει να παρθούν κάποια μέτρα, όπως εισαγωγή αέρα σταδιακά στο σύστημα καύσης, ανακυκλοφορία των καυσαερίων ή επεξεργασία των απαερίων.

Η απόδοση και τα για τα δύο καύσιμα είναι υψηλή, με αυτή του πυρηνόξυλου να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, λόγω καύσης μεγαλύτερης ποσότητας CO σε σύγκριση με

την λυματολάσπη. Οι υψηλές τιμές της απόδοσης προέκυψαν, διότι έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι απώλειες λόγω CO.



Διάγραμμα 4.2.2 : Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x για τροφοδοσία καυσίμου $F=12$ g/min και λόγο περισσειας αέρα $\lambda=1.4$

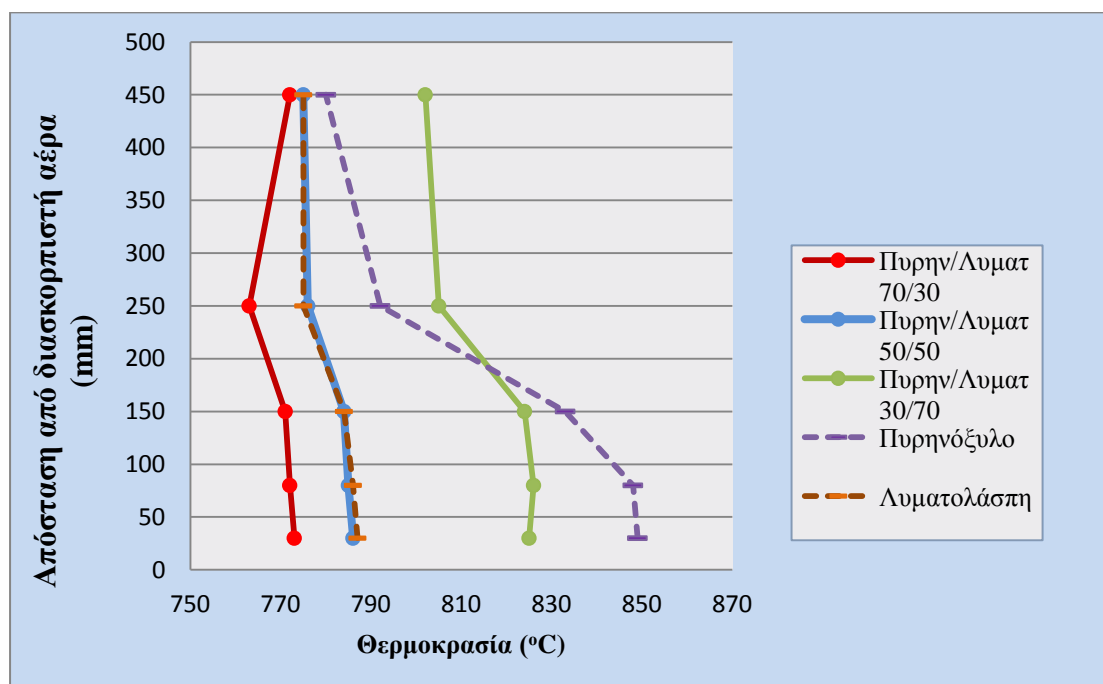
4.2.2 Μίγματα

Το προφίλ θερμοκρασίας, οι εκπομπές ρύπων, οι απώλειες θερμότητας και η απόδοση από μίγματα πυρηνόξυλου/λυματολάσπης σε αναλογίες 30/70, 50/50 και 70/30 αντίστοιχα, σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για τροφοδοσία καυσίμου $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$ καταγράφονται στον Πίνακα 4.2.2.

Πίνακας 4.2.2 : Προφίλ θερμοκρασίας, εκπομπές ρύπων, απώλειες θερμότητας και απόδοση από μίγματα πυρηνόξυλου/λυματολάσπης σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για τροφοδοσία καυσίμου $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$

Είδος καυσίμου	Θερμοκρασίες (°C)						Εκπομπές CO (ppm _v)	Εκπομπές SO ₂ (ppm _v)	Εκπομπές NO _x (ppm _v)	L _{co} (%)	Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)										
Πυρ/Λυμ	30	80	150	250	450	1250					
70/30	773	772	771	763	772	481	1146.8	77.2	166.2	1.23	98.77
50/50	786	785	784	776	775	465	1156.4	148.9	171.3	1.24	98.76
30/70	825	826	824	805	802	484	1231	192.2	152.2	1.32	98.68

Στο Διάγραμμα 4.2.3 παρατηρείται ότι το προφίλ θερμοκρασιών των μιγμάτων διαφέρει αρκετά από το αρχικό του πυρηνόξυλο και πλησιάζει αυτό της λυματολάσπης. Το μίγμα Πυρην/Λυματ 70/30 εμφανίζει μια σχεδόν συνεχή καμπύλη, με το μέγιστο της θερμοκρασίας να καταγράφεται στα 30mm πάνω από το διασκορπιστή αέρα, αλλά και στο ελεύθερο όριο, 450mm από τον διασκορπιστή αέρα. Γεγονός που σημαίνει ότι η καύση συνεχίζεται και μέχρι αυτό το σημείο, πιθανόν εξαιτίας της πτητικής ύλης η οποία συνέχισε να αντιδράει με το οξυγόνο, αλλά και από πιθανό συμπαρασυρμό υλικού στο ελεύθερο όριο. Το μίγμα Πυρην/Λυματ 50/50 συμπεριφέρεται παρόμοια με το προηγούμενο, με την διαφορά ότι η μέγιστη θερμοκρασία επιτυγχάνεται 30mm πάνω από τον διασκορπιστή αέρα και στην συνέχεια μειώνεται ελάχιστα. Το τρίτο μίγμα Πυρην/Λυματ 30/70, έχει μια μεγαλύτερη διαφορά στις θερμοκρασίες, κατά μήκος του αντιδραστήρα, από τα προηγούμενα μίγματα, αλλά και σε αυτό φαίνεται να συνεχίζεται η καύση στο άνω μέρος του αντιδραστήρα για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι υψηλότερες τιμές πιθανόν να οφείλονται σε καλύτερη ομογενοποίηση του καυσίμου κατά την διάρκεια του πειράματος. Γενικά, οι θερμοκρασίες των μιγμάτων κατά μήκος του αντιδραστήρα κυμάνθηκαν ανάμεσα στις τιμές που προέκυψαν από την καύση των μεμονωμένων καυσίμων (Πίνακας 4.2.1 και 4.2.2)

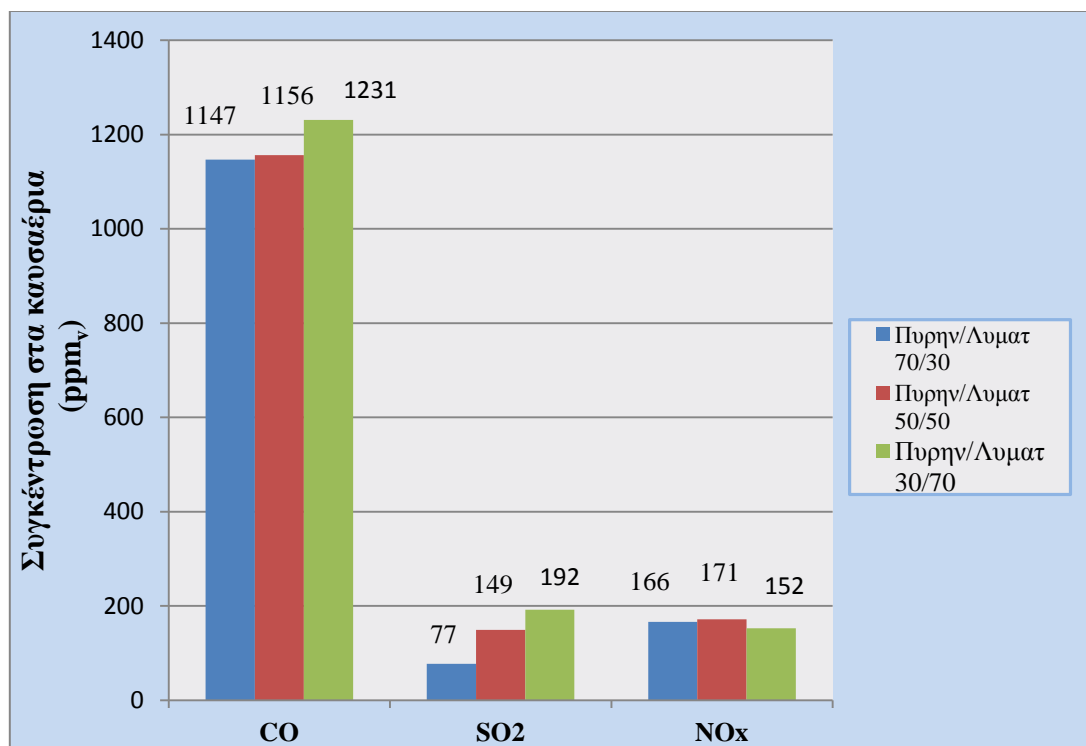


Διάγραμμα 4.2.3: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1.4$

Από το Διάγραμμα 4.2.4 διακρίνεται ο μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x των μιγμάτων που μελετήθηκαν. Παρατηρείται η αυξητική τάση του CO, όσο αυξάνεται το ποσοστό λυματολάσπης στο μίγμα, κυρίως λόγο του μεγαλύτερου ποσοστού τέφρας σε σχέση με το πυρηνόξυλο. Επίσης εμφανίζονται εκπομπές SO₂ σε όλα τα μίγματα, εξαιτίας της συμμετοχής της λυματολάσπης σε αυτά, η οποία περιέχει αρκετή ποσότητα θείου. Οι εκπομπές NO_x κυμάνθηκαν ανάμεσα στις τιμές που προέκυψαν από την καύση των μεμονωμένων δειγμάτων και για το μίγμα με το υψηλότερο ποσοστό λυματολάσπης (70%) ήταν χαμηλότερες, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.1.

Οι εκπομπές CO και NO_x παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [28], ενώ οι εκπομπές SO₂ για τα μίγματα (50/50) και (30/70) βρίσκονται εκτός ορίων [29].

Η απόδοση των μιγμάτων ήταν υψηλή, ενώ μειώθηκε ελάχιστα με την αύξηση της ποσότητας του άκαυστου CO, κατά την αύξηση της ποσότητας συμμετοχής της λυματολάσπης στα μίγματα.



Διάγραμμα 4.2.4 : Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x για τροφοδοσία καυσίμου F=12 g/min και λόγο περισσειας αέρα λ=1.4

4.3 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης συναρτήσει της Περίσσειας του Αέρα

4.3.1 Αρχικά δείγματα

Στον Πίνακα 4.3.1 καταγράφονται οι διάφορες θερμοκρασίες, ο μέσος όρος εκπομπών αέριων ρύπων και η απόδοση, για τροφοδοσία καυσίμου πυρηνόξυλου και λυματολάσπης, $F=12 \text{ g/min}$ και για διάφορες τιμές του λόγου περίσσειας αέρα.

Πίνακας 4.3.1 : Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αέριων ρύπων και απόδοση για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

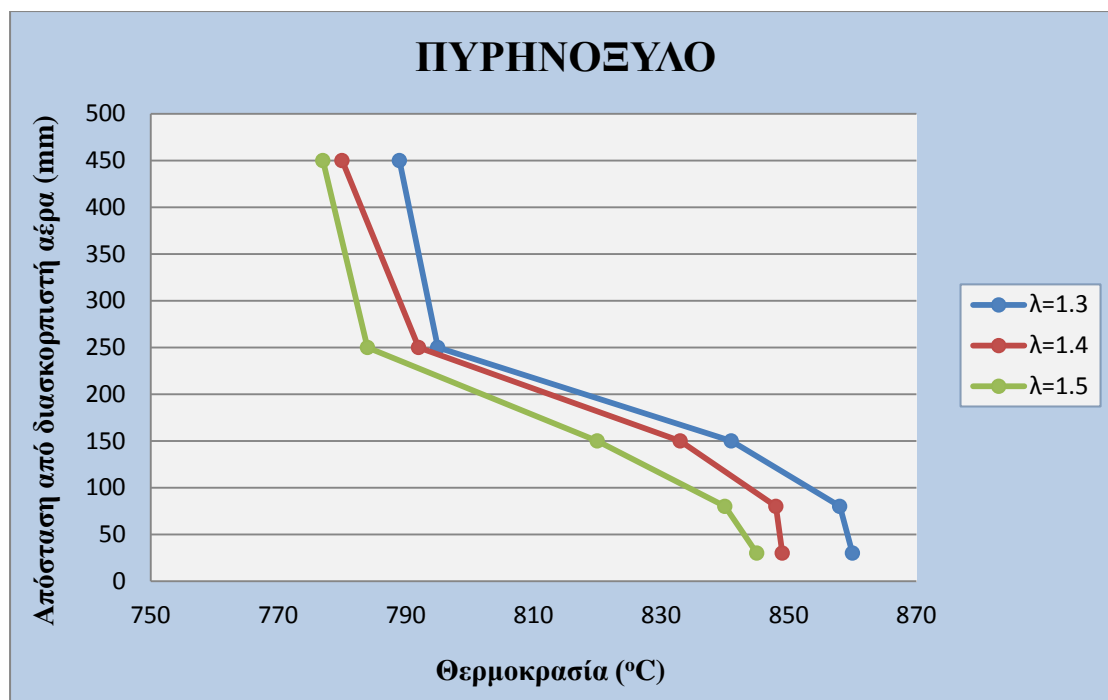
Είδος καυσίμου	Θερμοκρασίες (°C)						Εκπομπές CO (ppm _v)	Εκπομπές SO ₂ (ppm _v)	Εκπομπές NO _x (ppm _v)	L _{co} (%)	Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)										
ΠΞ	30	80	150	250	450	1250					
λ=1.3	860	858	841	795	789	458	346.5	-	157	0.37	99.63
λ=1.4	849	848	833	792	780	400	422.7	-	196	0.46	99.54
λ=1.5	845	840	820	784	777	434	433.3	-	197.4	0.47	99.53
ΛΛ											
λ=1.3	843	840	838	825	822	491	991.9	381	264.2	1.07	98.93
λ=1.4	787	786	784	775	775	440	1188.1	290	143.4	1.27	98.73
λ=1.5	785	786	788	781	778	386	1287	97	65.7	1.38	98.62

Από το Διάγραμμα 4.3.1 παρατηρείται ότι η αύξηση της ροής του αέρα από 30% σε 50% προκάλεσε κάποια ψύξη των καυσαερίων, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία καύσης του πυρηνόξυλου να μειώνεται κατά μήκος του καυστήρα. Η μέγιστη μείωση ήταν 21°C

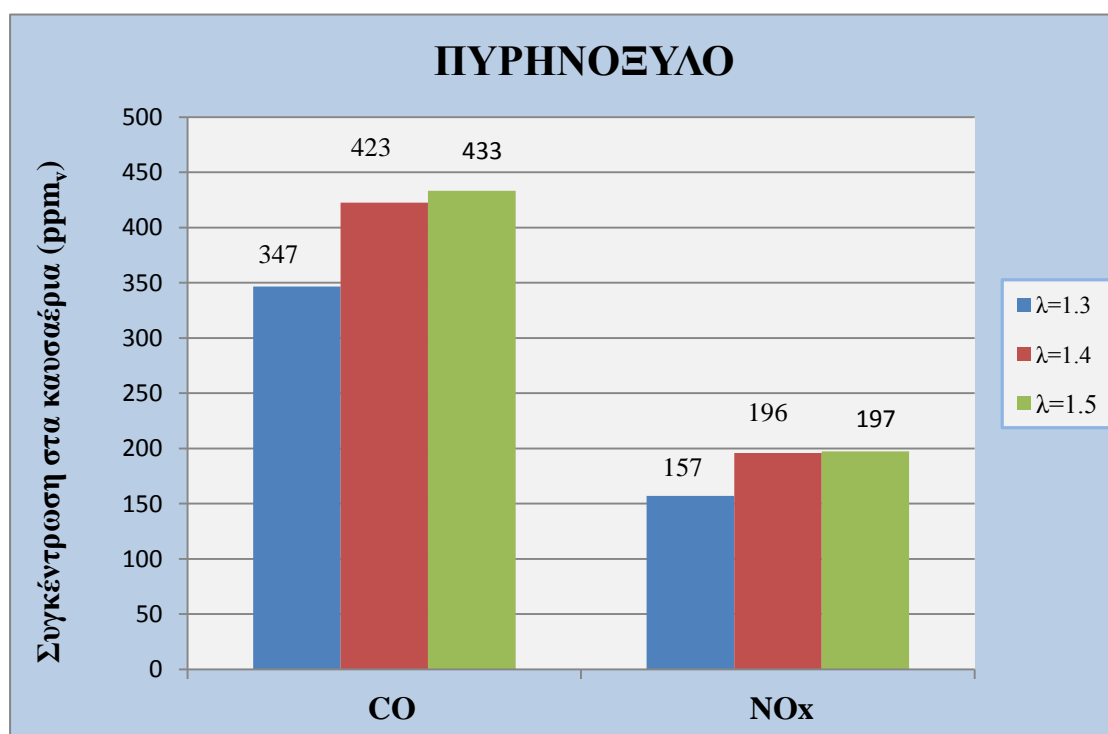
Όσο αφορά την εκπομπή αέριων ρύπων για το πυρηνόξυλο σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.3.2, καταγράφεται μια αυξητική πορεία για το CO με την αύξηση του στοιχειομετρικού αέρα, το οποίο συμβαίνει επειδή μειώνεται η θερμοκρασία με αποτέλεσμα να καίγεται μικρότερη ποσότητα CO. Αύξηση παρουσιάζουν και οι εκπομπές NO_x συναρτήσει της περίσσειας αέρα, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας αντίδρασης του οξυγόνου με το άζωτο του καυσίμου.

Για τα όρια των εκπομπών, το CO είναι εντός των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [28]. Οι εκπομπές NO_x για λ=1.3 είναι εντός των επιτρεπτών ορίων. Ενώ για λ=1.4 και λ=1.5 οι τιμές είναι λίγο υψηλότερες από τα επιτρεπτά όρια [28]. Κατάλληλα μέτρα πρέπει να παρθούν για την μείωση των εκπομπών NO_x όπως αυτά που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.1.

Η απόδοση διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα. Ελάχιστη μείωση παρατηρήθηκε με την αύξηση της περίσσειας του αέρα, η οποία συνέβαλε στην αύξηση των εκπομπών CO λόγω μείωσης της θερμοκρασίας στον καυστήρα και επομένως στην μείωση της απόδοσης.



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



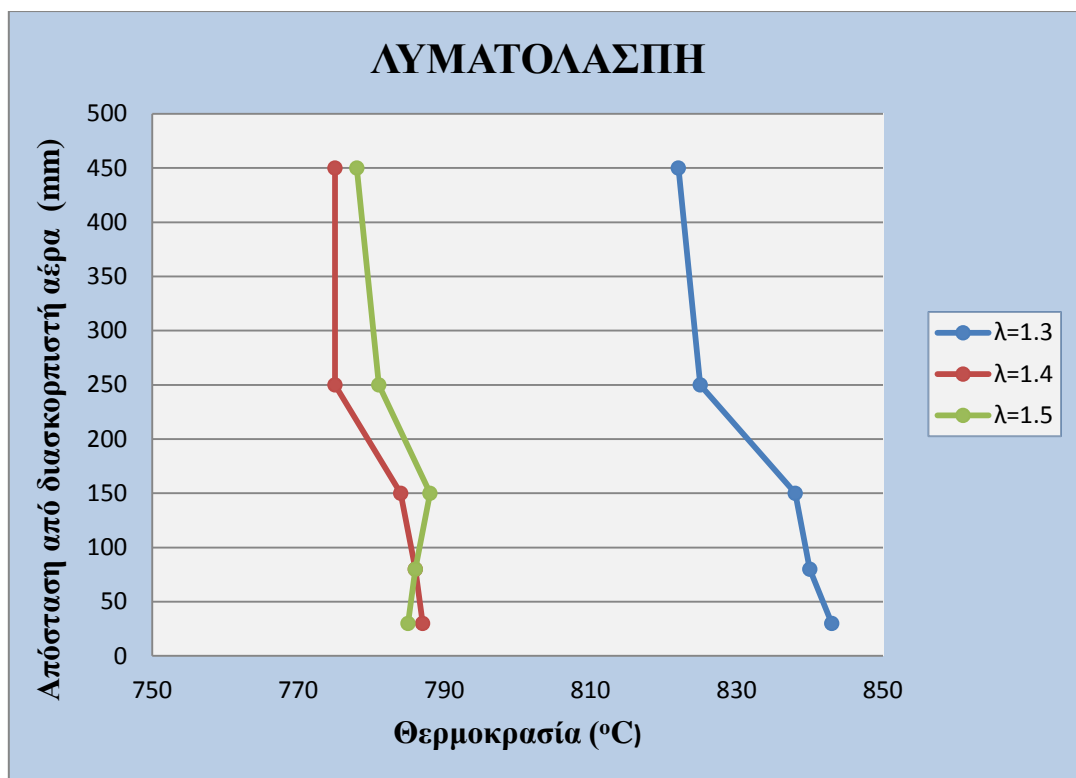
Διάγραμμα 4.3.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NO_x **Πυρηνόξυλου** για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

Από το Διάγραμμα 4.3.3, για την λυματολάσπη, παρατηρείται ότι με την αύξηση του στοιχειακού αέρα από 30% σε 40% η θερμοκρασία στην κλίνη μειώνεται αρκετά. Για περίσσεια αέρα 40% και 50% το προφίλ θερμοκρασίας είναι παρόμοιο. Η μέγιστη μείωση θερμοκρασίας μεταξύ $\lambda=1,3$ και $\lambda=1,5$ ήταν 58°C .

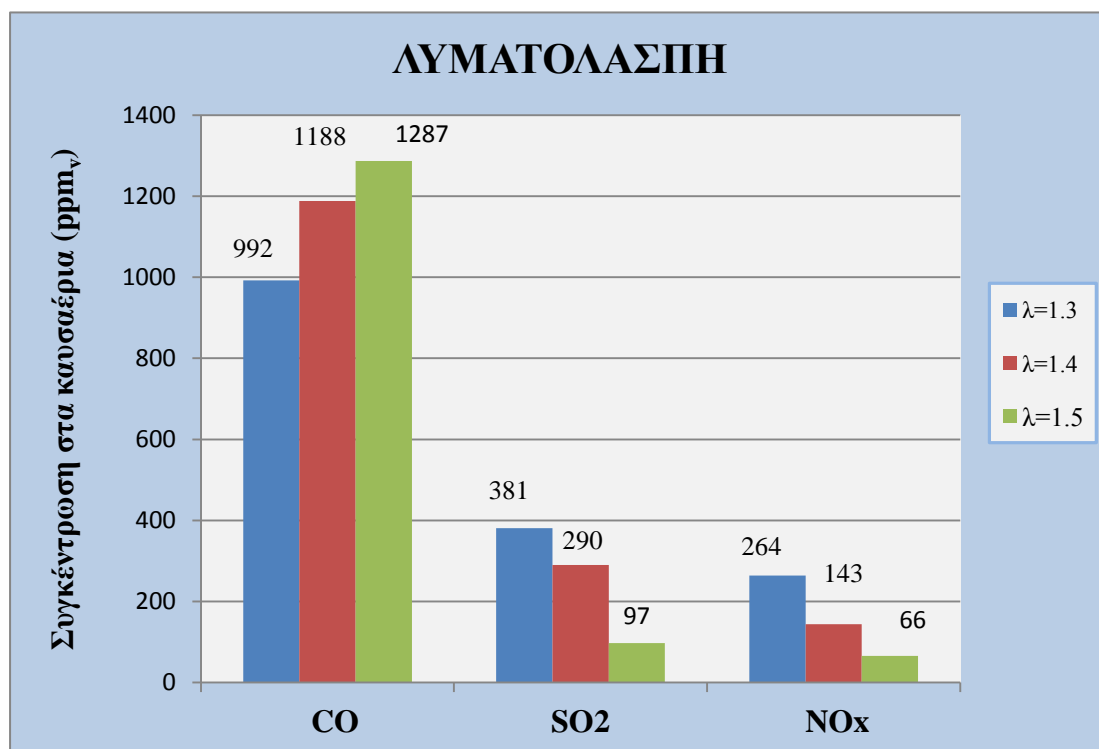
Στο Διάγραμμα 4.3.4 καταγράφονται οι διακυμάνσεις των εκπομπών αέριων ρύπων συναρτήσει της της περίσσειας αέρα. Διακρίνεται ότι με την αύξηση της περίσσειας αέρα, αυξάνεται και οι εκπομπές CO, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία της καύσης με επακόλουθο μεγαλύτερες ποσότητες άκαυστου CO. Μείωση παρατηρείται στις εκπομπές SO₂ και NO_x καθώς αυξάνεται ο στοιχειομετρικός αέρας. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην μείωση της θερμοκρασίας μέσα στον καυστήρα.

Οι εκπομπές CO είναι εντός επιτρεπτών ορίων κατά τα Ελληνικά πρότυπα [28]. Οι εκπομπές NO_x για $\lambda=1,4$ και $\lambda=1,5$ είναι εντός των επιτρεπτών ορίων, ενώ για $\lambda=1,3$ είναι αρκετά εκτός των ορίων [28]. Οι εκπομπές SO₂ είναι εκτός ορίων και για $\lambda=1,3$ και $\lambda=1,4$, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας στην κλίνη, σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [29]. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα, όπως προαναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.1.

Η απόδοση για την λυματολάσπη ήταν υψηλή, χαμηλότερη όμως σε σύγκριση με αυτή του πυρηνόξυλου, καθώς η λυματολάσπη περιείχε υψηλό ποσοστό τέφρας. Μείωση της απόδοσης παρατηρείται με την αύξηση του στοιχειομετρικού αέρα, καθώς αυξάνονται οι τιμές CO, λόγω της ψύξης του καυστήρα.



Διάγραμμα 4.3.3: Προφίλ θερμοκρασιών *Λυματολόασης* κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα



Διάγραμμα 4.3.4: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x *Λυματολόασης* για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

4.3.2 Μίγματα

Στον Πίνακα 4.3.2 καταγράφονται οι διάφορες θερμοκρασίες, ο μέσος όρος εκπομπών αέριων ρύπων και η απόδοση, για τροφοδοσία καυσίμου μιγμάτων πυρηνόξυλου και λυματολάσπης, $F=12 \text{ g/min}$ και για διάφορες τιμές του λόγου περίσσειας αέρα.

Πίνακας 4.3.2 : Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αέριων ρύπων και απόδοση για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

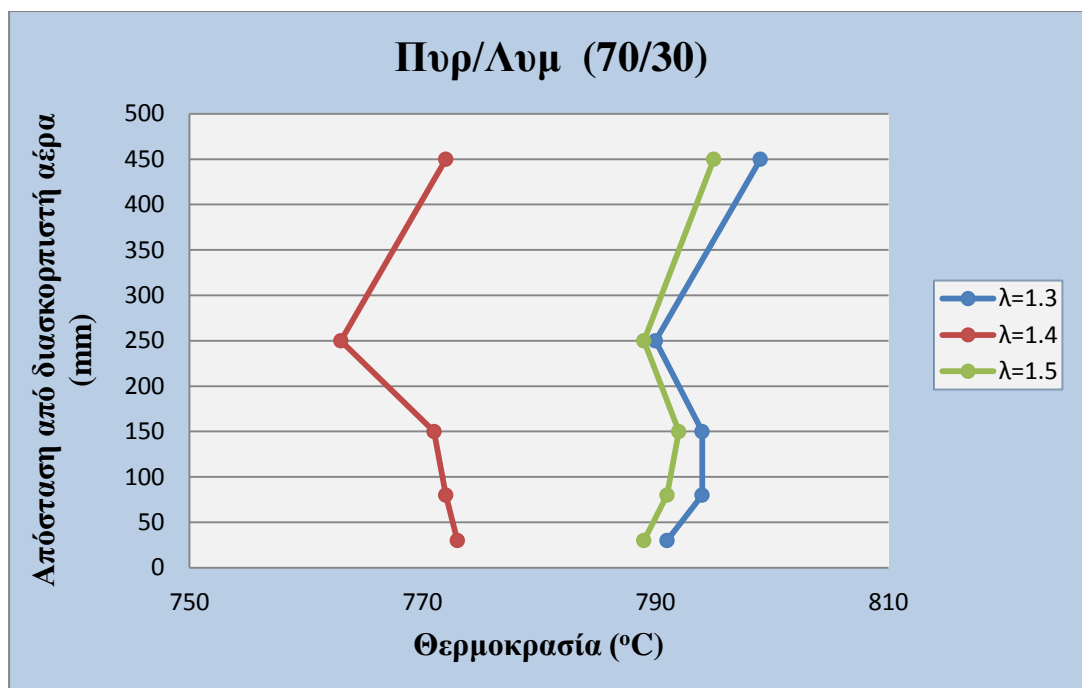
Είδος καυσίμου	Θερμοκρασίες (°C)						Εκπομπές CO (ppm _v)	Εκπομπές SO ₂ (ppm _v)	Εκπομπές NO _x (ppm _v)	L _{co} (%)	Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)										
	30	80	150	250	450	1250					
Πυρ/Λυμ 70/30											
λ=1.3	791	794	794	790	799	513	925.2	88	180.1	0.99	99.01
λ=1.4	773	772	771	763	772	481	1146.8	77.2	166.2	1.23	98.77
λ=1.5	789	791	792	789	795	568	1213.8	55	141.8	1.3	98.7
Πυρ/Λυμ 50/50											
λ=1.3	820	817	816	805	806	494	953.8	197.3	197	1.02	98.98
λ=1.4	786	785	784	776	775	465	1156.4	148.9	171.3	1.24	98.76
λ=1.5	764	764	764	755	750	415	1286.1	41	103.6	1.38	98.62
Πυρ/Λυμ 30/70											
λ=1.3	871	870	860	831	808	501	1033.6	207.5	236.3	1.11	98.89
λ=1.4	825	826	824	805	802	484	1231	192.2	152.2	1.32	98.68
λ=1.5	742	742	741	736	742	455	1346.3	70.1	86	1.44	98.56

Για διάφορες τιμές του λόγου περίσσειας αέρα, για το δείγμα πυρηνόξυλο-λυματολάσπη (70/30), παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασιών στο Διάγραμμα 4.3.5.

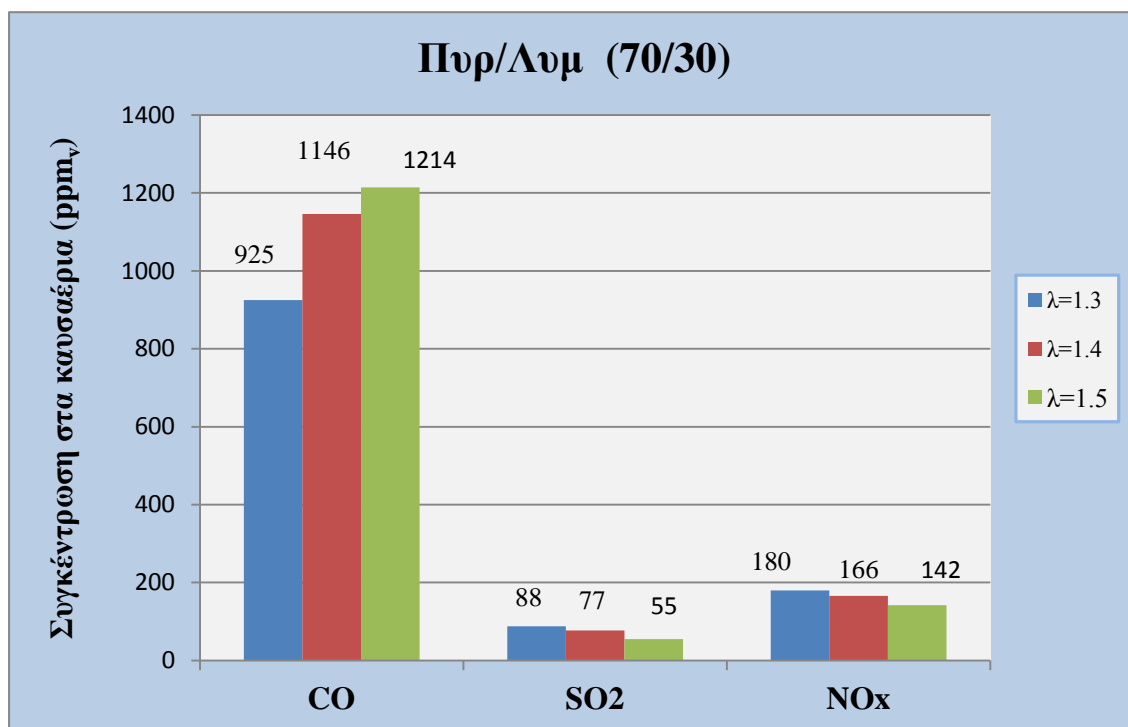
Με την αύξηση της περίσσειας του αέρα από 30% σε 40%, η θερμοκρασία μειώνεται αρκετά (έως 27 °C). Με την αύξηση της περίσσειας σε 50%, η θερμοκρασία πλησιάζει την θερμοκρασία που υπήρχε στο μίγμα με 30% περίσσεια αέρα. Και για τις τρεις τιμές του στοιχειομετρικού αέρα η θερμοκρασία είναι σχεδόν ομοιόμορφη μέχρι τα 150mm πάνω από το διασκορπιστή αέρα (εντός της κλίνης), στη συνέχεια μειώνεται λίγο μέχρι τα 250mm και έπειτα αυξάνεται και πάλι, το οποίο σημαίνει ότι η καύση συνεχίζεται και στο ελεύθερο όριο.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.3.6, με την αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα, οι εκπομπές CO αυξάνονται, καθώς δεν καίγεται η ίδια ποσότητα με πριν, λόγω της ψύξης της κλίνης. Η μείωση της θερμοκρασίας συμβάλει επίσης και στην μείωση του SO₂ και των NO_x.

Εντός των ορίων είναι οι τιμές των εκπομπών CO και SO₂, σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [28, 29]. Ελαφρώς εκτός ορίων είναι οι εκπομπές NO_x για περίσσεια αέρα 30%, ενώ για 40% και 50% περίσσεια αέρα, βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [28].



Διάγραμμα 4.3.5: Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου- Λυματολάσπης (70/30)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

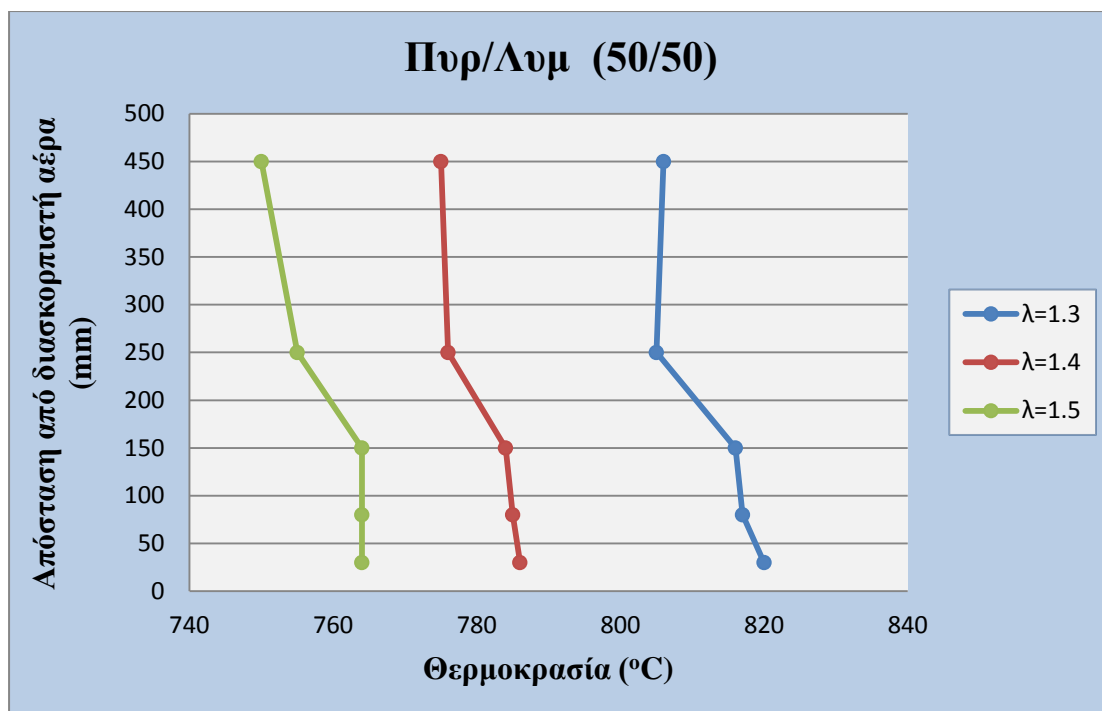


Διάγραμμα 4.3.6: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x **Πυρηνόξυλου – Λυματολάσπης (70/30)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

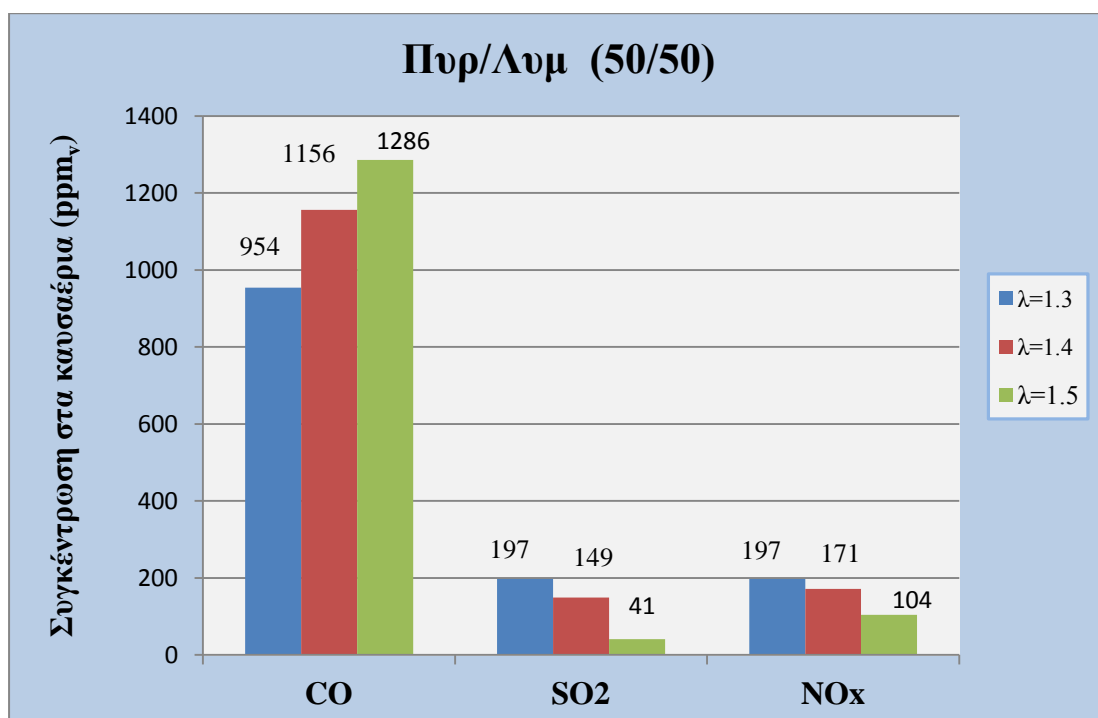
Από το Διάγραμμα 4.3.7 παρατηρείται ότι με την αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα, η θερμοκρασία στην κλίνη μειώνεται για μίγμα πυρηνόξυλου-λυματολάσπης (50/50) (μέγιστη μείωση 56°C). Το προφίλ θερμοκρασιών για κάθε τιμή λ παρουσιάζει μια σχεδόν ομοιόμορφη ροή. Αυτό συμβαίνει επειδή αυξήθηκε το ποσοστό λυματολάσπης στο μίγμα, σε σχέση με το προηγούμενο μίγμα (70/30) και η καύση πραγματοποιείται σε όλο το μήκος του καυστήρα.

Για τις εκπομπές αερίων, από το Διάγραμμα 4.3.8, όπως και στο προηγούμενο μίγμα(70/30), με την αύξηση του στοιχειομετρικού αέρα, διακρίνουμε αύξηση του CO και μείωση του SO₂ και των NO_x.

Εντός των ορίων είναι οι τιμές των εκπομπών CO, σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [28]. Οι εκπομπές SO₂ για $\lambda=1,3$ και $\lambda=1,4$ είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων, ενώ για $\lambda=1,5$ είναι εντός ορίων, σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [29]. Εκτός ορίων είναι οι εκπομπές NO_x για περίσσεια αέρα 30%, ενώ για 40% και 50% περίσσεια αέρα, βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [28].



Διάγραμμα 4.3.7: Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου- Λυματολάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

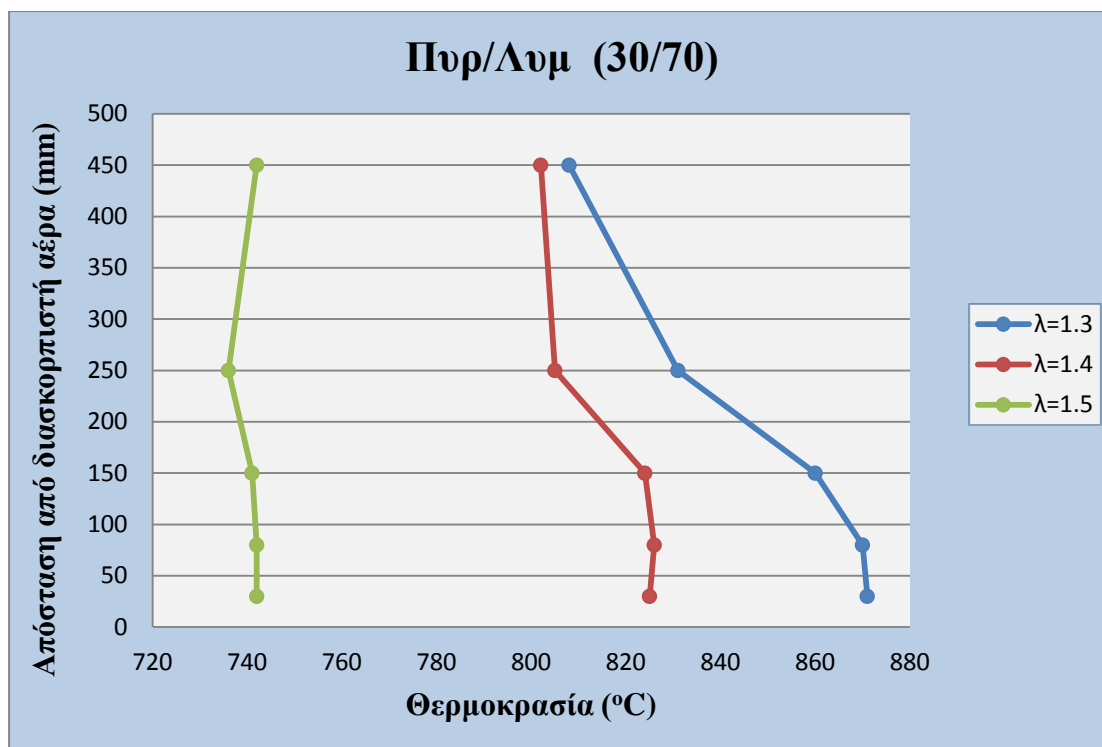


Διάγραμμα 4.3.8: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x **Πυρηνόξυλου – Λυματολάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

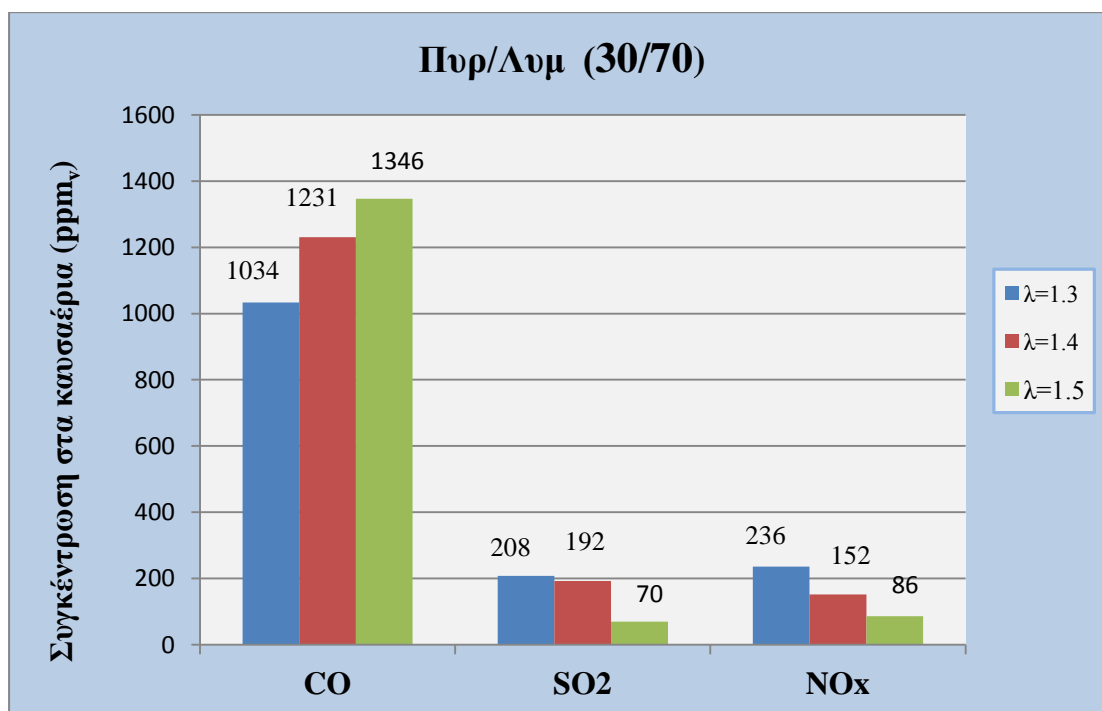
Για το μίγμα πυρηνόξυλου-λυματολάσπης (30/70) παρατηρείται από το Διάγραμμα 4.3.9, ότι με την αύξηση του λόγου περίσσειας αέρα, το προφίλ θερμοκρασιών τείνει να αποκτήσει μια συνεχή μορφή. Το οποίο σημαίνει ότι η καύση πραγματοποιείται σε όλο το μήκος του καυστήρα. Γενικά, με εξαίρεση το μίγμα Πυρ/Λυμ (30/70), οι θερμοκρασίες καύσης των μιγμάτων ήταν κάπως χαμηλότερες από τις αναμενόμενες με βάση τις τιμές των μεμονωμένων καυσίμων, πιθανό λόγω μη βέλτιστης ομογενοποίησης.

Από το Διάγραμμα 4.3.10 παρατηρείται, όπως και προηγουμένως, ότι με την αύξηση του αέρα, υπάρχει αύξηση του CO και μείωση του SO₂ και των NO_x.

Σύμφωνα την Ελληνική νομοθεσία για τα όρια των αέριων εκπομπών εντός των ορίων είναι οι τιμές του CO [28]. Οι εκπομπές SO₂ για λ=1,3 και λ=1,4 είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων, ενώ για λ=1,5 είναι εντός ορίων [29]. Εκτός ορίων είναι οι εκπομπές NO_x για περίσσεια αέρα 30%, ενώ για 40% και 50% περίσσεια αέρα, βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων [28].



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



Διάγραμμα 4.3.10: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x Πυρηνόξυλου - Λυματολάσπης (30/70) κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου $F=12 \text{ g/min}$ συναρτήσει της περίσσειας αέρα.

Η απόδοση διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα για όλα τα μίγματα με την τιμή της να είναι από 98.56% και άνω. Με την αύξηση της περίσσειας αέρα, αλλά και του ποσοστού συμμετοχής λυματολάσπης στα μίγματα, υπήρχαν μικρές μειώσεις στην απόδοση για κάθε περίπτωση, αντίστοιχα.

4.4 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης συναρτήσει του Ρυθμού Τροφοδοσίας του Καυσίμου

4.4.1 Αρχικά δείγματα

Στον Πίνακα 4.4.1 παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασίας, οι εκπομπές ρύπων, οι απώλειες θερμότητας και η απόδοση, από καύση πυρηνόξυλου και λυματολάσπης σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας του καυσίμου.

Πίνακας 4.4.1 : Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

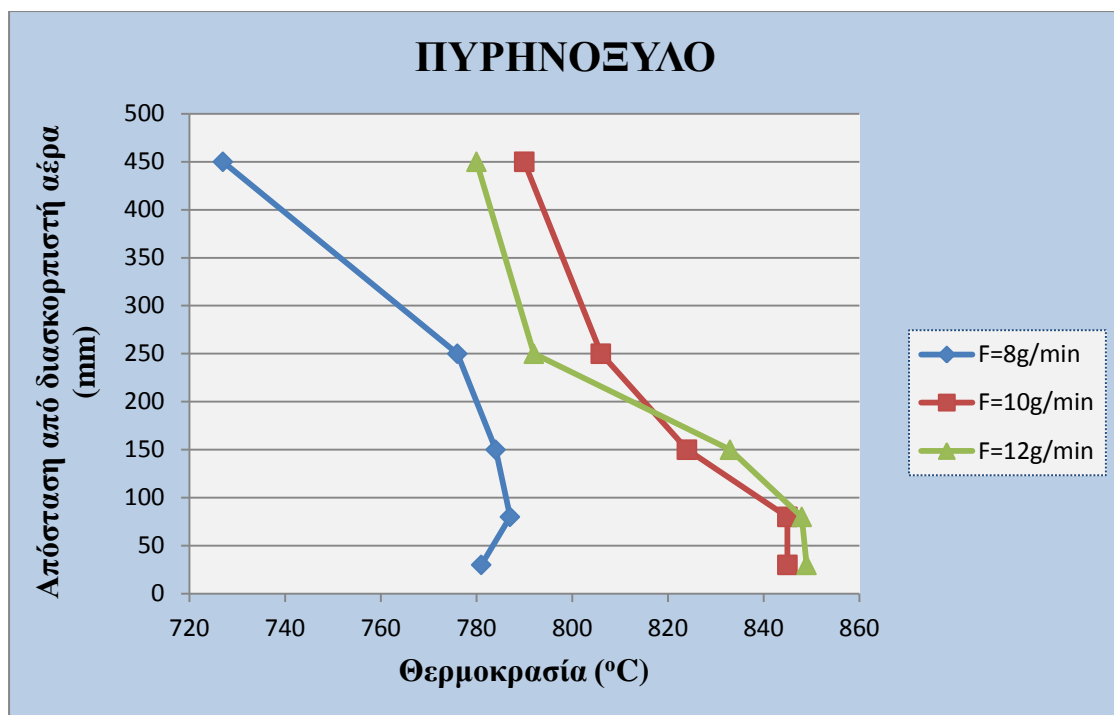
Είδος καυσίμου	Θερμοκρασίες (°C)						Εκπομπές CO (ppm _v)	Εκπομπές SO ₂ (ppm _v)	Εκπομπές NO _x (ppm _v)	L _{co} (%)	Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)										
	30	80	150	250	450	1250					
ΠΞ	30	80	150	250	450	1250					
F=8g/min	781	787	784	776	727	386	820.5	0.2	115	0.88	99.12
F=10g/min	845	845	824	806	790	400	410	-	288.7	0.44	99.56
F=12g/min	849	848	833	792	780	400	422.7	-	196	0.46	99.54
ΛΛ											
F=8g/min	794	793	793	795	794	347	1151	221.5	139	1.23	98.77
F=10g/min	790	791	791	786	785	398	1228.7	147.5	150.7	1.32	98.68
F=12g/min	787	786	784	775	775	440	1188.1	290	143.4	1.27	98.73

Από το Διάγραμμα 4.4.1 παρατηρείται ότι για τροφοδοσία καυσίμου $F=8\text{g/min}$, οι θερμοκρασίες κατά μήκος του καυστήρα είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις άλλες δύο τροφοδοσίες, λόγω της μικρότερης ποσότητας υλικού κατά την καύση. Για τροφοδοσίες καυσίμου $F=10\text{g/min}$ και $F=12\text{g/min}$ διακρίνονται κοντινές εναλλαγές των θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα.

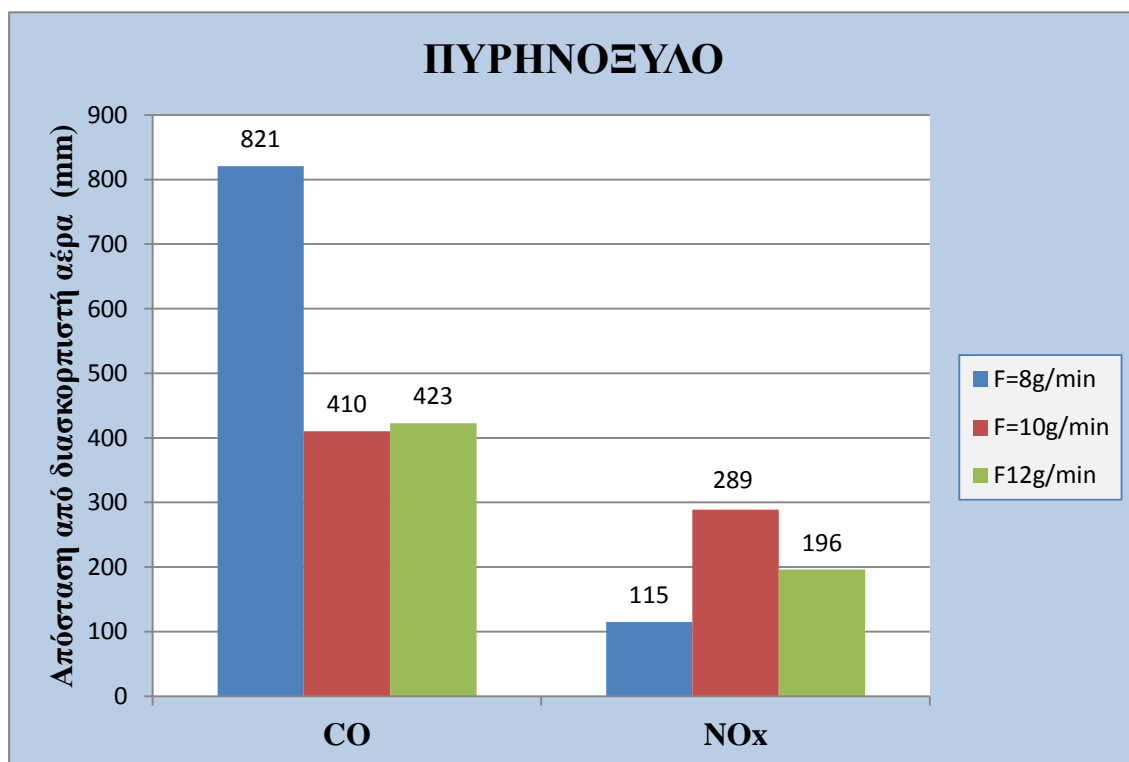
Στο Διάγραμμα 4.4.2 παρατηρείται ότι για τροφοδοσία καυσίμου $F=8\text{g/min}$ καταγράφεται αρκετά υψηλότερη τιμή (διπλάσια) CO σε σχέση με τις άλλες δύο τροφοδοσίες, οι οποίες έχουν παραπλήσιες τιμές, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας στον καυστήρα. Οι τιμές CO και για τις τρεις τροφοδοσίες είναι εντός επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [28].

Οι εκπομπές NO_x αυξήθηκαν για τροφοδοσία καυσίμου μεγαλύτερη από $F=8\text{g/min}$, λόγω αύξησης του αζώτου στο καύσιμο, αλλά και της παροχής αέρα. Η μείωση των εκπομπών NO_x για την υψηλότερη τροφοδοσία καυσίμου $F=12\text{g/min}$, πιθανόν να οφείλεται στην μεγαλύτερη ποσότητα έκλυσης πτητικής ύλης σε αυτή την περίπτωση, που μειώνει την μετατροπή του αζώτου του καυσίμου σε οξείδια αζώτου. Οι τιμές NO_x για τροφοδοσία καυσίμου $F=10\text{g/min}$ και $F=12\text{g/min}$ υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια εκπομπών σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [28].

Η απόδοση ήταν σε υψηλά επίπεδα και για τις τρεις τροφοδοσίες, καθώς έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι απώλειες λόγω CO.



Διάγραμμα 4.4.1: Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου** κατά μήκος του καυστήρα για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.



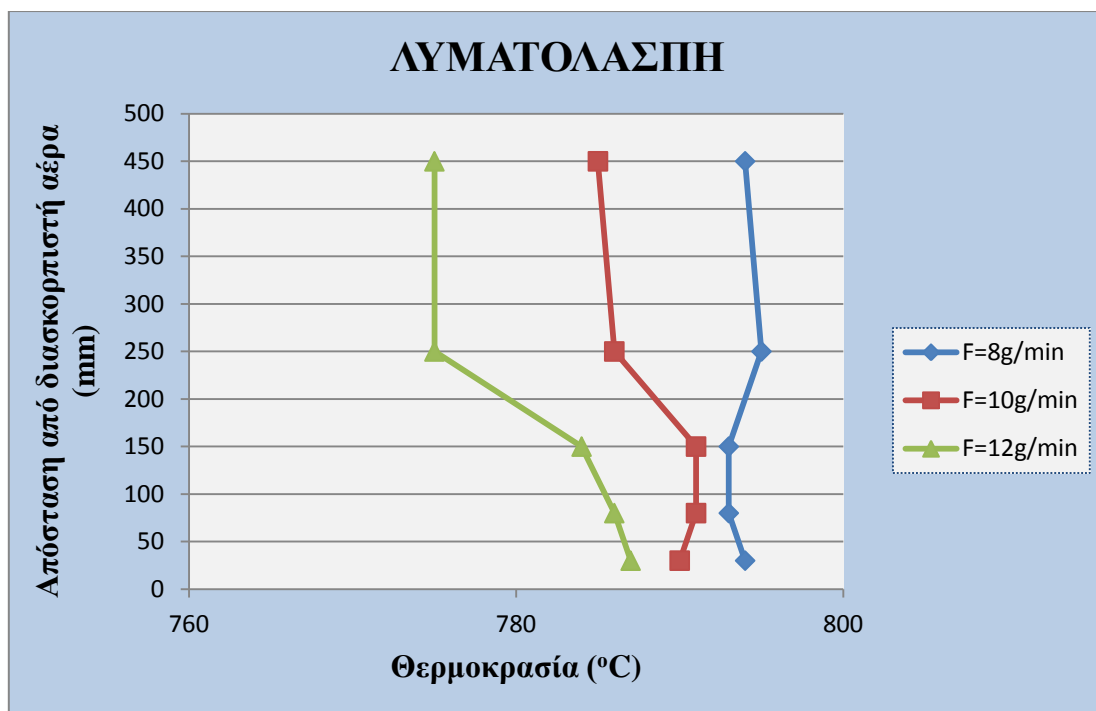
Διάγραμμα 4.4.2: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x **Πυρηνόξυλου** κατά μήκος του καυστήρα για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Από το Διάγραμμα 4.4.3 παρατηρείται ότι με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας μειώνεται η θερμοκρασία στην κλίνη, λόγω της αύξησης του ποσοστού της τέφρας στην λυματολάσπη τροφοδοσίας. Επίσης, για μικρότερη τροφοδοσία καυσίμου ($F=8\text{g/min}$) είχαμε ένα σχεδόν ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασίας κατά μήκος του καυστήρα. Με την αύξηση της τροφοδοσίας το υλικό καιγόταν σε μεγαλύτερο ποσοστό εντός της κλίνης και η θερμοκρασία μειωνόταν περισσότερο κατά μήκος του καυστήρα, στο ελεύθερο όριο.

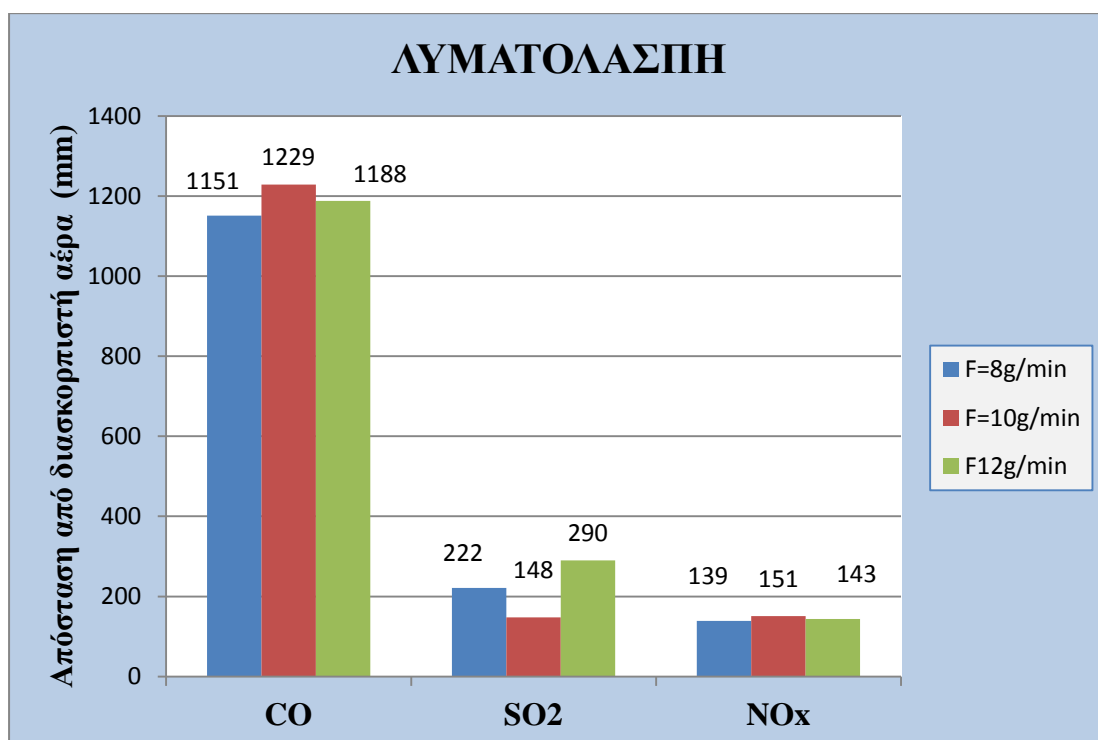
Από το Διάγραμμα 4.4.4 για τις αέριες εκπομπές ρύπων, διακρίνονται παραπλήσιες τιμές για τις εκπομπές CO και NO_x και για τις τρεις τροφοδοσίες. Η μείωση των εκπομπών NO_x στην μεγαλύτερη τροφοδοσία καυσίμου ($F=12\text{g/min}$) πιθανόν να οφείλεται, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση με το πυρηνόξυλο, στην μεγαλύτερη ποσότητα έκλυσης πτητικής ύλης, η οποία συνέβαλε στην δημιουργία κάποιας αναγωγικής ατμόσφαιρας στον καυστήρα. Οι εκπομπές SO_2 παρουσιάζουν διάφορες διακυμάνσεις ανά τροφοδοσία (πιθανόν λόγω διαφορετικού αριθμού δεδομένων κατά τις μετρήσεις), με αυτή της $F=12\text{g/min}$ να παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή.

Οι εκπομπές CO και NO_x βρίσκονται εντός ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [28], ενώ οι εκπομπές SO_2 ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια [29].

Η απόδοση διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα και για τις τρεις τροφοδοσίες, ελαφρώς χαμηλότερα όμως από τα επίπεδα του πυρηνόξυλου. Αυτό οφείλεται, στο μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας, στις χαμηλότερες θερμοκρασίες και στις υψηλότερες τιμές CO , που παρουσιάζει η λυματολάσπη εν συγκρίσει με το πυρηνόξυλο.



Διάγραμμα 4.4.3: Προφίλ θερμοκρασιών **Λυματολάσπης** κατά μήκος του καυστήρα για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.



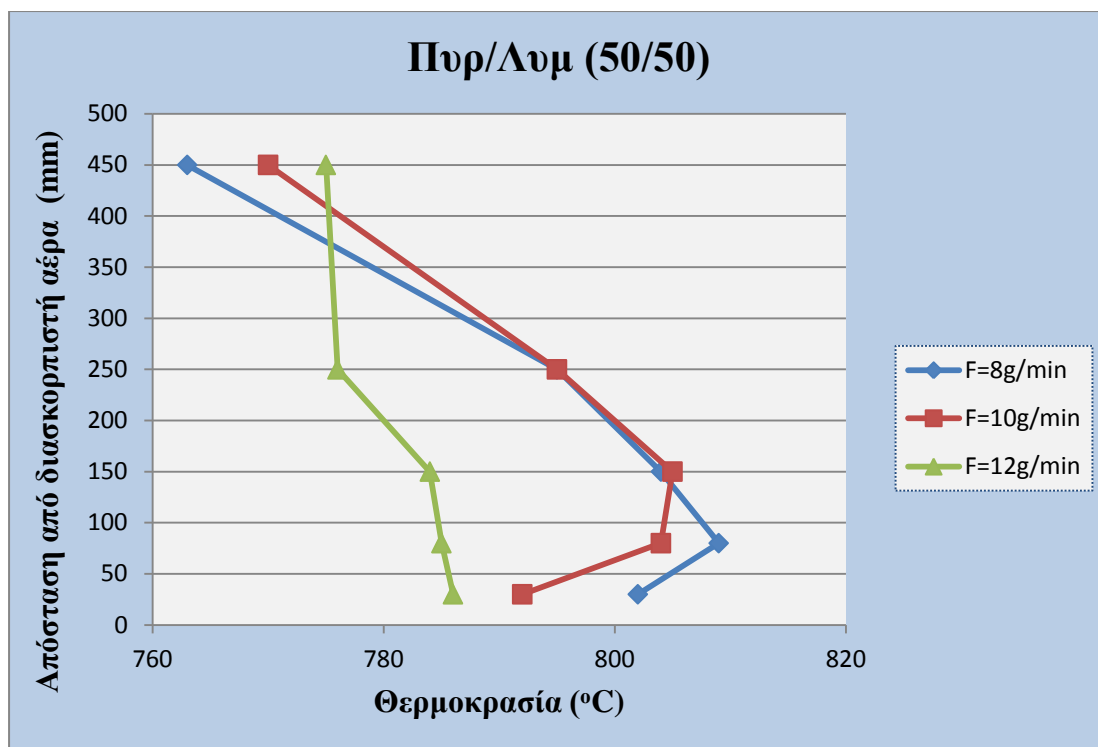
Διάγραμμα 4.4.4: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x **Λυματολάσπης** κατά μήκος του καυστήρα για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

4.4.2 Μίγματα

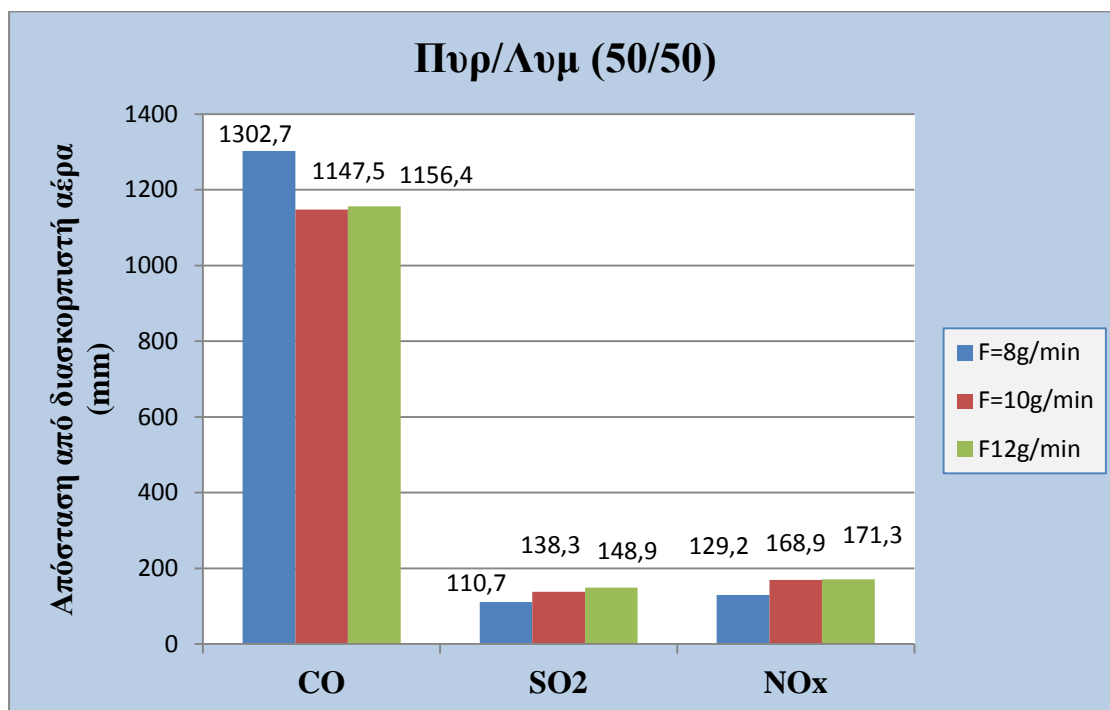
Στον Πίνακα 4.4.2 καταγράφονται οι διάφορες θερμοκρασίες, ο μέσος όρος εκπομπών αέριων ρύπων και η απόδοση, από μίγμα (50/50) πυρηνόξυλου και λυματολάσπης, σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης για λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Πίνακας 4.4.2 : Προφίλ θερμοκρασιών, εκπομπές αερίων ρύπων και απόδοση για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Είδος καυσίμου	Θερμοκρασίες (°C)						Εκπομπές CO (ppm _v)	Εκπομπές SO ₂ (ppm _v)	Εκπομπές NO _x (ppm _v)	L _{co} (%)	Απόδοση (%)
	Απόσταση από διασκορπιστή αέρα (mm)										
Πυρ/Λυμ 50/50	30	80	150	250	450	1250					
F=8g/min	802	809	804	795	763	376	1302,7	110,7	129,2	1.39	98.61
F=10g/min	792	804	805	795	770	436	1147,5	138,3	168,9	1.23	98.77
F=12g/min	786	785	784	776	775	465	1156,4	148,9	171,3	1.24	98.76



Διάγραμμα 4.4.5: Προφίλ θερμοκρασιών **Πυρηνόξυλου – Λυματολάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.



Διάγραμμα 4.4.6: Μέσος όρος εκπομπών CO, SO₂ και NO_x **Πυρηνόξυλου – Λυματολάσπης (50/50)** κατά μήκος του καυστήρα για περίσσεια αέρα $\lambda=1,4$ συναρτήσει της τροφοδοσίας καυσίμου.

Στο Διάγραμμα 4.4.5 παρατηρείται ότι για τις τροφοδοσίες $F=8\text{g/min}$ και $F=10\text{g/min}$ καταγράφονται παραπλήσιες τιμές στις θερμοκρασίες κατά μήκος του καυστήρα. Το προφίλ των θερμοκρασιών τους αρχικά παρουσιάζει μια αύξηση και στην συνέχεια μειώνεται σημαντικά. (από τα 150mm έως τα 450mm). Το προφίλ θερμοκρασιών για το μίγμα με τροφοδοσία $F=12\text{g/min}$ κλίνει προς το προφίλ της καύσης της σκέτης λυματολάσπης. Οι θερμοκρασίες μειώνονται ελαφρά με την αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου, λόγω του υψηλότερου ποσοστού τέφρας της λυματολάσπης εντός της κλίνης.

Από το Διάγραμμα 4.4.6 για τις εκπομπές ρύπων, παρατηρείται ότι οι τιμές CO ήταν παραπλήσιες και εντός των ορίων, σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία, σε όλες τις περιπτώσεις [28]. Οι εκπομπές SO_2 και NO_x έχουν αυξητική πορεία με την αύξηση της τροφοδοσίας, δεδομένου ότι αυξάνεται το N και το S του καυσίμου.

Οι εκπομπές NO_x βρίσκονται εντός ορίων σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [28], σε αντίθεση με τις εκπομπές SO_2 οι οποίες είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων, σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία [29].

Η απόδοση διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα, με παραπλήσιες τιμές για τις τρεις τροφοδοσίες.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων καύσης οδηγούμαστε στα εξής συμπεράσματα :

- Το πυρηνόξυλο και η λυματολάσπη είναι δύο καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά. Το πυρηνόξυλο έχει σχετικά χαμηλό ποσοστό τέφρας, ενώ η λυματολάσπη υψηλό. Γενικά υψηλή είναι η θερμογόνος δύναμη των δύο καυσίμων και συγκρίσιμη με αυτή των γαιανθράκων χαμηλής τάξης. Η λυματολάσπη έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άζωτο και θείο.
- Στην τέφρα του πυρηνόξυλου κυριαρχούν τα στοιχεία Ca, K, P και λιγότερο το Mg, κυρίως υπό μορφή φαιρχιλντίτη, ασβεστίτη, δολομίτη και αρκανίτη. Στην τέφρα της λυματολάσπης κυριαρχούν τα στοιχεία Si, Fe, Ca και ιδιαίτερα ο P, υπό μορφή χαλαζία, αιματίτη, ασβεστίτη και μαγνησιούχου γουιτλοκίτη, αντίστοιχα.
- Το πυρηνόξυλο, για τροφοδοσία $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$, παρουσίασε την μέγιστη θερμοκρασία 30mm πάνω από τον διασκορπιστή του αέρα (849°C). Η λυματολάσπη παρουσίασε ένα σχεδόν ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασίας κατά μήκος του καυστήρα, καθώς και χαμηλότερες τιμές, εξαιτίας της έκλυσης πτητικών με χαμηλότερο ρυθμό και του υψηλότερου ποσοστού τέφρας σε αυτή. Οι εκπομπές CO ήταν αρκετά χαμηλότερες για το πυρηνόξυλο, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας στον αντιδραστήρα. Οι εκπομπές NO_x εμφανίστηκαν ελαφρώς υψηλότερες στο πυρηνόξυλο, ενώ οι εκπομπές SO_2 ήταν αμελητέες λόγω της πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, σε αντίθεση με την λυματολάσπη, όπου οι εκπομπές SO_2 ήταν εκτός των επιτρεπόμενων ορίων.
- Οι θερμοκρασίες των μιγμάτων κατά μήκος του αντιδραστήρα, για τροφοδοσία $F=12\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας αέρα $\lambda=1,4$, κυμάνθηκαν ανάμεσα στις τιμές που προέκυψαν από την καύση των μεμονωμένων καυσίμων. Αύξηση του CO πραγματοποιήθηκε, όσο αυξανόταν το ποσοστό συμμετοχής της λυματολάσπης στο μίγμα, εξαιτίας του μεγαλύτερου ποσοστού τέφρας που εμπεριέχεται σε αυτή. Εμφανίστηκαν εκπομπές SO_2 σε όλα τα μίγματα, λόγω της συμμετοχής της λυματολάσπης σε αυτά. Τέλος, τα

NO_x κυμάνθηκαν ανάμεσα στις τιμές που προέκυψαν από την καύση των μεμονωμένων δειγμάτων.

- Με την αύξηση της ροής του αέρα για σταθερή τροφοδοσία $F=12\text{g/min}$ πραγματοποιήθηκε ψύξη των καυσαερίων και έτσι μείωση της θερμοκρασίας στην κλίνη. Για αύξηση του λόγου περίσσειας του αέρα από $\lambda=1,3$ σε $\lambda=1,5$, η μέγιστη μείωση για το πυρηνόξυλο ήταν 21°C και για την λυματολάσπη 58°C . Όσο αφορά τις εκπομπές αέριων ρύπων, γενικά παρατηρήθηκε αύξηση του CO και των NO_x με την αύξηση του στοιχειομετρικού αέρα. Στην περίπτωση της λυματολάσπης οι εκπομπές ρύπων μειώθηκαν με αύξηση της περίσσειας του αέρα, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας.
- Όσο αφορά τα μίγματα, με την αύξηση του λόγου περίσσειας του αέρα, πραγματοποιήθηκε μείωση της θερμοκρασίας εντός της κλίνης, καθώς και μείωση των εκπομπών του SO₂ και των NO_x.
- Για τροφοδοσία πυρηνόξυλου $F=8\text{g/min}$ και λόγο περίσσειας του αέρα $\lambda=1,4$, καταγράφηκαν οι χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά μήκος του καυστήρα. Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας, παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του καυστήρα για το πυρηνόξυλο, σε αντίθεση με την λυματολάσπη, λόγω αυξημένου ποσοστού τέφρας σε αυτή. Οι εκπομπές CO ήταν αποτέλεσμα της θερμοκρασίας στον καυστήρα, ενώ οι εκπομπές SO₂ και NO_x γενικά αυξήθηκαν με αύξηση της ποσότητας του καυσίμου.
- Οι βέλτιστες συνθήκες καύσης και με εκπομπές αέριων ρύπων εντός των ορίων, επετεύχθησαν για συνδυασμό μιγμάτων πυρηνόξυλου/λυματολάσπης σε όλες τις αναλογίες (70/30, 50/50, 30/70), για λόγο περίσσειας του αέρα $\lambda=1,5$ και για ρυθμό τροφοδοσίας καυσίμου $F=12\text{g/min}$. Οι εκπομπές ρύπων βελτιώνονται όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας μειώνεται.

Προτάσεις :

- Χρειάζεται ανάλυση των ιπτάμενων τεφρών του κυκλώνα και των τεφρών του πυθμένα, για να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την απόθεσή τους ή πιθανές χρήσεις αυτών.
- Εφαρμογή περισσότερων τιμών του λόγου περίσσειας του αέρα για την δημιουργία καλύτερης εικόνας τόσο της απόδοσης, όσο και των εκπομπών

αέριων ρύπων, καθώς και πραγματοποίηση πειραμάτων καύσης για περισσότερους συνδυασμούς μιγμάτων και για διαφορετικά είδη βιομάζας.

- Ακόμη περισσότερα πειράματα καύσης για πιο αποτελεσματικές μετρήσεις, όσο αφορά την στατιστική ανάλυση.

Βιβλιογραφία

- [1] Χριστοφής .Ι. Κορωναίος, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα Μάρτιος 2012.
- [2] Ανδρώνης Βασίλειος, «Ενεργειακή αξιοποίηση κτηνοτροφικών αποβλήτων με την αναερόβια χώνευση τους σε κτηνοτροφική μονάδα του Δήμου Δεσκάτης Γρεβενών», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Νοέμβριος 2013.
- [3] Χρήστος Μπρουσκέλης, Μιχαήλ Μπουλάκης, «Μελέτη εγκατάστασης οικιακής και εμπορικής μονάδας βιομάζας», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [4] Γιαγκλής Κωνσταντίνος, «Η βιομάζα και η χρήση της στην γεωργία ως πηγή ενέργειας», Πτυχιακή Εργασία, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καλαμάτας.
- [5] Μυρτώ Ε. Κυπριώτη, «Το ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας και ο ρόλος των ενεργειακών καλλιεργειών», Πτυχιακής Διατριβή, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Οκτώβριος 2009.
- [6] Βάμβουκα, Δ., (2009). “Βιομάζα: Βιοενέργεια και Περιβάλλον”, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα.
- [8] Στυλιανός Σπυριδάκης, «Εκτίμηση της ποιότητας των εξανθρακωμάτων από Δημοτικά και ζωικά απόβλητα για ενεργειακές ή περιβαλλοντικές εφαρμογές», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Οκτώβριος 2015.
- [9] Javier Mateo – Sagasta, Liqa Raschid – Sally and Anne Thebo, «Global wastewater and sludge production, treatment and use» Chapter 2.
- [14] Παναγιώτης Χ. Γραμμέλης, «Ενεργειακής αξιοποίηση βιομάζας σε εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003.
- [15] Kardasz P., Sitnik L., Bentkowska M., Dworaczynski M., Dziubecki M., Gorniak A., «Municipal waste as biomass-renewable energy source», Archives of Waste Management an Environmental Protection, vol 15, issue 4, p.57-62, 2013.
- [17] Λογγίνου Δήμητρα, «Μέθοδοι επεξεργασίας λυματολάσπης», Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ιόνιων Νησιών, Ιανουάριος 2010.

- [19] Jian – guo Zhu, Yao Yao, Qing – gang Lu, Ming Gao, Zi – qu Ouyang, «Experimental investigation of gasification and incineration characteristics of dried sewage sludge in a circulation fluidized bed», Fuel 150 (2015) 441–447.
- [20] J. Werther, T. Ogada, «Sewage sludge combustion», Progress in Energy and Combustion Science 25 (1999) 55–116.
- [21] S.C. Saxena, C.K. Jotshi, «Fluidized bed incineration of waste materials», The University of Illinois at Chicago, June 1994.
- [22] Τρικουβέρτης Μάριος-Γεώργιος, « Χαρακτηρισμός τεφρών από καύση υπολειμμάτων εσπεριδοειδών σε ρευστοποιημένη κλίνη», Διπλωματική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Φεβρουάριος 2013.
- [23] Handbook on Scaling up Solid and Liquid Waste Management in Rural Areas, WSP – water and sanitation program.
- [28] ΥΑ οικ. 189533/2011, ΦΕΚ 2654Β/9/11/2011
- [29] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας (τεύχος δεύτερο), Αρ. φύλλου 992, 14 Ιουλίου 2005.

Διαδικτυακές Πηγές

- [10] http://www.chemeng.ntua.gr/BIOENERGY_2013_presentations
- [12] <http://www.atlas.d-waste.com/>
- [13] <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/>
- [16] <http://www.alternative-energy-news.info/waste-renewable-energy-source/>
- [18] <http://www.altenergymag.com/>
- [24] <https://www.agroenergy.gr>
- [25] <https://www.photoenergy.gr>
- [26] <http://bisyplan.bioenarea.eu>
- [27] <http://www.hellenic-college.gr>