ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΕΣΠΕΡΙΔΟΕΙΔΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΚΟΤΡΩΝΑΚΗΣ ΜΑΝΩΛΗΣ

Εξεταστική επιτροπή:

κ. Βάμβουκα Δ. (επιβλέπουσα)

κ. Κομνίτσας Κ.

κ. Κατσαούνης Α.

Χανιά

Ιανουάριος 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια καθηγήτρια του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Δ. Βάμβουκα-Καλουμένου για την ανάθεση του θέματος της μεταπτυχιακής διατριβής μου και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον εργαστηριακό βοηθό του Εργαστηρίου ¨Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων¨ του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Στέλιο Σφακιωτάκη που με βοήθησε σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες αποδίδω ακόμα στους καθηγητές κ. Σταμπολιάδη, κ. Πασαδάκη και κ. Γιδαράκο για τη διάθεση συσκευών και μηχανημάτων των εργαστηρίων τους, καθώς και το προσωπικό των παραπάνω εργαστηρίων για τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μάριο Τρικουβέρτη για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη συλλογή των υλικών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από πειράματα καύσης υπολειμμάτων εσπεριδοειδών σε μια μονάδα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων (Bubbling Fluidized Bed Combustion, BFBC) και μελετήθηκε η απόδοση της καύσης και οι εκπομπές αέριων ρύπων (CO, SO_2 και NOx). Τα καύσιμα που επιλέχθηκαν ήταν τα κλαδευτικά υπολείμματα πορτοκαλιών και τα υπολείμματα επεξεργασίας φρουτοποτού. Η κοκκομετρία όλων των δειγμάτων ήταν +850 -2000 μm.

Πριν την πραγματοποίηση των πειραμάτων καύσης, πραγματοποιήθηκε χημικός χαρακτηρισμός των καυσίμων όπου προσδιορίστηκε το ποσοστό υγρασίας, καύσιμης ύλης και τέφρας, η θερμογόνος δύναμη καθώς και τα ποσοστά C, H, N, O, S. Κατόπιν, προετοιμάστηκε το υλικό της κλίνης (Na-ούχος άστριος σε κλάσμα 425 μm - 600 μm) και στη συνέχεια υπολογίστηκε η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης και η απαιτούμενη ογκομετρική παροχή του αέρα για την καύση. Για κάθε είδος καυσίμου, επιλέχθηκαν δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: η παροχή καυσίμου τροφοδοσίας και ο λόγος περίσσειας αέρα. Η παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν σε 0,72 ή 0,84 kg/h, ενώ ο λόγος λ της περίσσειας αέρα κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 1,3 και 1,7. Για τον υπολογισμό της απόδοσης της καύσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απώλειας θερμότητας (heat-loss method).

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας δείχνουν ότι τα κλαδευτικά υπολείμματα (ξύλα και φύλλα) καθώς και τα απόβλητα προϊόντα επεξεργασίας του καρπού της πορτοκαλιάς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς ως εναλλακτικά καύσιμα για την παραγωγή θερμότητας σε μια μονάδα BFBC. Τα καύσιμα αυτά εμφανίζουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά και μπορούν να τροφοδοτηθούν στην κλίνη αυτοτελής ή παράλληλα, σε διάφορες αναλογίες. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες καύσης επετεύχθησαν στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε το ξύλο της πορτοκαλιάς ως καύσιμο υλικό, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε πτητικά και του χαμηλού ποσοστού τέφρας που έχει. Η υψηλότερη απόδοση καύσης παρατηρήθηκε κατά την καύση της ξυλώδους βιομάζας για τροφοδοσία καυσίμου F=0,72 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, ενώ την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση παρουσίασε η καύση τριμμάτων φλούδας πορτοκαλιού για F=0,72 kg/h και λ=1,7. Επίσης, για τροφοδοσία μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, παρατηρήθηκε ότι καθώς αυξάνεται το % ποσοστό του ξύλου και της φλούδας στο μίγμα του καυσίμου, αυξάνεται η απόδοση της καύσης και μειώνονται οι εκπομπές CO και NOx. Προτείνεται, λοιπόν, η χρήση του ξύλου και της φλούδας του καρπού της πορτοκαλιάς ως καύσιμα υλικά που θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν έναν αντιδραστήρα BFBC, ενώ η καύση των φύλλων υστερεί κυρίως λόγω των αυξημένων εκπομπών NOx στα απαέρια.

ABSTRACT

In this MSc thesis, a series of combustion experiments of citrus residues was conducted in a Bubbling Fluidized Bed Combustor (BFBC) and combustion efficiency and emissions of gaseous pollutants (CO, SO_2 and NOx) were investigated. The selected fuels were wood and leave residues from orange trees and orange peels. The particle size distribution of all samples were +850 -2000 micrometers.

Before the start-up of the experiments, moisture content, fuel matter and ash, calorific value and the percentages of C, H, N, O, S were determined. Then the bed material (Na-feldspar, fraction of 425 μm - 600 μm) was prepared and after that the minimum fluidization velocity and the volume of air for combustion were calculated. For each fuel type, two independent variables were selected: the rate of fuel supply and the excess air ratio, λ. The rate of fuel supply was regulated to 0.72 or 0,84 kg / h, whereas the ratio λ of excess air ranged between 1.3 and 1.7. The efficiency of combustion was calculated using the heat-loss method.

The results of this work showed that wood, leaves and peels from oranges' plantations and processing can be successfully used as alternative fuels for the production of heat at a unit of BFBC. The highest combustion temperatures were recorded in the experiments when wood was used as a combustible material, due to the high volatile and low ash content. The higher combustion efficiency was observed during combustion of woody biomass for fuel supply of F = 0,72 kg / h, and excess air ratio λ = 1.7, while the best environmental performance was achieved by the combustion of peels for F = 0,72 kg / h and λ = 1.7.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

1. Εισαγωγή 1

2. Θεωρητικό Μέρος 3

2.1 Το Παγκόσμιο Ενεργειακό Πρόβλημα και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας 3

2.2 Η Βιομάζα ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας 6

2.2.1 Τύποι και Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά Βιομάζας 9

2.2.2 Κύριες Εφαρμογές Βιομάζας 11

2.3 Υπολειμματικές Μορφές Βιομάζας 12

2.3.1 Γεωργικά Υπολείμματα 12

2.3.2 Ενεργειακή αξιοποίηση υποπροϊόντων εσπεριδοειδών στην Κρήτη 14

2.4 Η Τεχνολογία της Καύσης σε Ρευστοποιημένη Κλίνη 16

2.4.1 Περιγραφή τεχνολογίας καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη (fluidised bed combustion, FBC) 16

2.4.2 Ρευστοποιημένη Κλίνη ¨Φυσαλίδων¨ (Bubbling Fluidized Bed Combustion, BFBC) 18

2.4.3 Ρευστοποιημένη Κλίνη με Ανακυκλοφορία (Circulating Fluidized Bed Combustion, CFBC) 20

2.5 Εκπομπές CO και NOx από την Καύση Βιομάζας σε Μονάδες FBC 22

2.6 Νομοθεσία για τις Εκπομπές Αέριων Ρύπων από Εγκαταστάσεις Καύσης Στερεής Βιομάζας 23

3. Πειραματικό Μέρος 26

3.1 Πειραματική Διάταξη 26

3.1.1 Σύστημα Τροφοδοσίας 27

3.1.2 Αντιδραστήρας 28

3.1.3 Σύστημα Συλλογής Ιπτάμενης Τέφρας 29

3.1.4 Σύστημα Δειγματοληψίας και Ανάλυσης Καυσαερίων 29

3.1.5 Σύστημα Καταγραφής Παραμέτρων 30

3.2 Τα Καύσιμα 30

3.2.1 Επιλογή και Προέλευση Καυσίμων 30

3.2.2 Προετοιμασία Δειγμάτων 31

3.2.3 Ποιοτικός Χαρακτηρισμός Καυσίμων 32

3.3 Το Αδρανές Υλικό 35

3.4 Καθορισμός Υδροδυναμικών Χαρακτηριστικών Ρευστοποίησης 36

3.4.1 Θερμοκρασία λειτουργίας 36

3.4.2 Είδος, ποσότητα και κοκκομετρία αδρανούς 36

3.4.3 Είδος, ποσότητα και κοκκομετρία καυσίμου 36

3.4.4 Ελάχιστο πορώδες της κλίνης του αδρανούς 37

3.4.5 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης 38

3.4.6 Υπολογισμός του στοιχειομετρικού για την καύση αέρα 39

3.5 Πειραματικες Διαδικασίες 41

3.5.1 Προετοιμασία Πειραμάτων 41

3.5.2 Μεθοδολογία Διεξαγωγής Πειραμάτων 41

3.5.3 Καθορισμός Απωλειών Θερμότητας και Απόδοσης Καύσης 42

4. Αποτελέσματα και Συζήτηση 44

4.1 Χημικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων 44

4.2 Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα 45
4.3 Εκπομπές ρύπων 48
4.4 Απόδοση καύσης 52
4.5 Επίδραση περίσσειας αέρα 55
4.6 Επίδραση βαθμού τροφοδοσίας καυσίμου 57
4.7 Μίγματα καυσίμων 60
5. Συμπεράσματα 63
Βιβλιογραφία 65

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1.1: (α) Σενάρια αύξησης πληθυσμού χωρών μέλη ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) και μη μέλη ΟΟΣΑ, (β) Σενάρια αύξησης πρωτογενούς ενέργειας χωρών μέλη ΟΟΣΑ και μη μέλη ΟΟΣΑ, και (γ) Σενάρια αύξησης ακαθάριστου εγχώριου προϊόν χωρών μέλη ΟΟΣΑ και μη μέλη ΟΟΣΑ [δικτυακή πηγή 1]. 3
Διάγραμμα 2.1.2: Σενάρια παραγωγής υδρογονανθράκων (Θεωρία Peak Oil) [δικτυακή πηγή 2] 4
Διάγραμμα 2.1.3: Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ στην Ελλάδα [πηγή 8] 6
Διάγραμμα 2.2.1: Ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα. Οι μονάδες είναι γιγατόνοι άνθρακα (NASA). [δικτυακή πηγή 3].....8
Διάγραμμα 2.3.1: Αγροτικά υπολείμματα από την πρωτογενή παραγωγή (γεωργία) στην Ελλάδα (dt/y) [10].....13
Διάγραμμα 2.3.2: Δενδροκομική παραγωγή καλλιεργειών πορτοκαλιάς κατά νομό για την περιφέρεια της Κρήτης: έτος 2006 [πηγή δεδομένων: Γεωργική Στατιστική Υπηρεσία – δικτυακή πηγή 7].....14
Διάγγραμα 2.4.2: Ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία [15] 21
Διάγραμμα 3.1.1: Πειραματική διάταξη ατμοσφαιρικής ρευστοποιημένης κλίνης του εργαστηρίου Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων 26
Διάγραμμα 3.4.2: Προσδιορισμός της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης, ως συνάρτηση της πτώσης πίεσης διαμέσου στρώματος στερεών σωματιδίων 39
Διάγραμμα 4.2.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4. 46
Διάγραμμα 4.2.2: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 47
Διάγραμμα 4.2.3: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,72 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 47
Διάγραμμα 4.3.1: Συσχέτιση των αερίων ρευμάτων NOx και CO στην έξοδο του καυστήρα, κατά την καύση ξύλου πορτοκαλιάς σε FBC σε διάφορους λόγους περίσσειας αέρα (λ=1,3-1,7).....50
Διάγραμμα 4.3.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4. 50
Διάγραμμα 4.3.3: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 51
Διάγραμμα 4.3.4: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου F=0,72 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 52
Διάγραμμα 4.4.1: Απόδοση καύσης για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και περίσσεια αέρα λ=1,4.....54
Διάγραμμα 4.5.1: Θερμοκρασία κλίνης (20 mm από το διασκορπιστή) από την καύση ξύλου πορτοκαλιάς για τροφοδοσία F=0,84 kg/h συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα λ. 55
Διάγραμμα 4.5.2: Διακύμανση εκπομπών CO και NOx από την καύση ξύλου πορτοκαλιάς συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα λ, για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h.....56
Διάγραμμα 4.5.3: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx κατά την καύση 2 εναλλακτικών καυσίμων (φύλλα και φλούδες πορτοκαλιάς) σε 2 λόγους περίσσειας αέρα (λ=1,4 και λ=1,7) και για τροφοδοσία F=0,84 kg/h. 56
Διάγραμμα 4.5.4: Απόδοση καύσης ξύλου πορτοκαλιάς συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα λ, για τροφοδοσία F=0,84 kg/h. 57
Διάγραμμα 4.6.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, σε δύο τροφοδοσίες καυσίμου ξύλου πορτοκαλιάς (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h).....58
Διάγραμμα 4.6.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση τριμμάτων ξύλου πορτοκαλιάς για 2 τροφοδοσίες (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h) και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 58
Διάγραμμα 4.6.3: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση τριμμάτων φλούδας πορτοκαλιών για 2 τροφοδοσίες (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h) και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 59
Διάγραμμα 4.6.4: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση τριμμάτων φύλλου πορτοκαλιάς για 2 τροφοδοσίες (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h) και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 59
Διάγραμμα 4.6.5: Απόδοση καύσης βιομάζας (ξύλα, φύλλα και φλούδες πορτοκαλιάς) για 2 ταχύτητες τροφοδοσίας καυσίμου και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4.....60

Διάγραμμα 4.7.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα κατά τη συν-καύση ξύλου, φύλλου και φλούδας πορτοκαλιάς την καύση διαφόρων μιγμάτων καυσίμου για τροφοδοσία F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 61
Διάγραμμα 4.7.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από τη συν-καύση ξύλου, φύλλου και φλούδας πορτοκαλιάς για τροφοδοσία μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 62
Διάγραμμα 4.7.3: Απόδοση καύσης για τροφοδοσία διαφόρων μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7. 62

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3.1: *Παραγωγή υπολειμμάτων επεξεργασίας εσπεριδοειδών στο ν. Χανίων (πηγή: ΒΙΟΧΥΜ) 15*
Πίνακας 2.3.2: *Ενεργειακό δυναμικό κλαδευτικών υπολειμμάτων εσπεριδοειδών στην Κρήτη [12] 16*
Πίνακας 2.4.1: *Παράμετροι λειτουργίας BFBC και CFBC [πηγή: 1] 18*
Πίνακας 2.6.1: *Οριακές τιμές εκπομπών ρύπων CO και NOX για τις νέες εγκαταστάσεις θέρμανσης που χρησιμοποιούν στερεά βιοκαύσιμα (ΥΑ οικ. 189533/2011 - ΦΕΚ 2654/Β/9-11-2011) 24*
Πίνακας 3.4.1 *Υπολογισμός δεικτών $\mu_{(LoT)i}$ και $V_{(LoT)i}$. 40*
Πίνακας 4.1.1 *Προσεγγιστική ανάλυση (επί ξηρού) δειγμάτων βιομάζας 44*
Πίνακας 4.1.2 *Στοιχειακή ανάλυση (επί ξηρού) δειγμάτων βιομάζας 44*
Πίνακας 4.2.1 *Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης της καύσης τριών τύπων βιομάζας (ξύλο, φύλλο και φλούδα πορτοκαλιάς) σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης 45*
Πίνακας 4.3.1 *Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων καύσης βιομάζας και γαιάνθρακα σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης 49*
Πίνακας 4.4.1 *Αποδόσεις και απώλειες θερμότητας από την τριών τύπων βιομάζας (ξύλο, φύλλο και φλούδα πορτοκαλιάς) σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (FBC) 54*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα, γεγονός που καθιστά το μέλλον της ενεργειακής επάρκειας πολύ δυσοίωνο. Επιπλέον, εμφανίζονται δραστικές αλλαγές στη σύνθεση και στη συμπεριφορά της ατμόσφαιρας λόγω της ταχείας απελευθέρωσης των ρυπογόνων προϊόντων καύσης από τα ορυκτά καύσιμα. Ένα σημαντικό μέρος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τον τομέα της ενέργειας σχετίζεται με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων από τον τομέα αυτό αναμένεται να αυξηθούν, εκτός κι αν προωθηθούν άλλες εναλλακτικές λύσεις. Επιπρόσθετα, η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης της χώρας μας και η δημιουργίας μιας ακολουθίας περιβαλλοντικών προβλημάτων μας υποχρεώνουν να εστιάσουμε έντονα την προσοχή μας στην ανάγκη για καθαρές ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Μεταξύ των πηγών ενέργειας που μπορούν να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα, η βιομάζα εμφανίζεται ως η επιλογή με το υψηλότερο γενικό παγκόσμιο δυναμικό. Σε αμφότερες τις αναπτυγμένες και τις αναπτυσσόμενες χώρες, το ενδιαφέρον για την απόκτηση ενέργειας από βιομάζα σημειώνει τεράστια ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια [1].

Το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό υπολειμμάτων, που σχετίζονται με τη γεωργική παραγωγή και τις βιομηχανίες επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων είναι πολύ μεγάλο. Τα υποπροϊόντα αυτά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, με την προϋπόθεση ότι πληρούν τα περιβαλλοντικά κριτήρια καύσης στερεών καυσίμων που έχουν θεσπιστεί στη νομοθεσία.

Η τεχνολογία της καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη (Fluidised Bed Combustion, FBC) φαίνεται να είναι η κατάλληλη τεχνολογία για να μετατρέψει ένα ευρύ φάσμα γεωργικών υπολειμμάτων σε ενέργεια, λόγω των εγγενών πλεονεκτημάτων της ευελιξίας των καυσίμων και της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Έτσι, είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται μίγματα διαφόρων ειδών βιομάζας ή να συν-καίονται μαζί με άλλα καύσιμα. Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει δύο εφαρμογές: την καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη ΄Φυσαλίδων΄ (Bubbling Fluidized Bed Combustion, BFBC) και την καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία (Circulating Fluidized Bed Combustion, CFBC). Η πρώτη εφαρμογή ήταν η πρώτη έκδοση της FBC τεχνολογίας. Οι κλίβανοι αυτοί έχουν ενδιαφέρον για μονάδες με ονομαστική δυναμικότητα του λέβητα άνω των 20MW. Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία BFBC αντιμετωπίζει αυξανόμενο ανταγωνισμό από την καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία (CFBC), έχει διατηρήσει μια σημαντική θέση στην αγορά [2].

Σε μονάδες FBC, η ικανότητα των σωματιδίων της κλίνης να απορροφούν τη θερμότητα υπερτερεί της ταχύτητας απελευθέρωσής της από την καύση και από ενεργειακή σκοπιά μπορούμε να θεωρήσουμε το αδρανές υλικό σαν μια μονάδα που έχει σταθερή θερμοκρασία [3], διατηρώντας με αυτό τον τρόπο χαμηλές της θερμοκρασίες της κλίνης. Ως αποτέλεσμα, η βιομάζα καίγεται ικανοποιητικά σε σχετικά χαμηλές

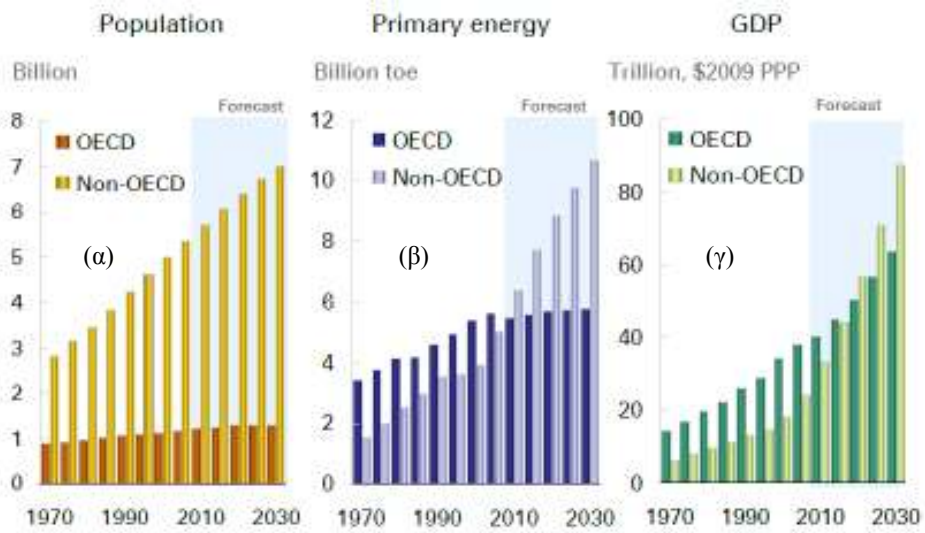
θερμοκρασίες (800-900 ^{o}C), ενώ οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) εμφανίζονται σημαντικά μειωμένες λόγω του σημαντικού περιορισμού σχηματισμού ¨θερμικών¨ NOx. Επιπρόσθετα, είναι δυνατό να επιτευχθούν χαμηλά επίπεδα εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx) λόγω σταδιακής παροχής αέρα, καλής ανάμιξης και χαμηλές απαιτήσεις για περίσσεια αέρα. Τέλος, από πειραματικές μελέτες καύσης βιομάζας σε FBC έχουν αναφερθεί χαμηλές τιμές συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στα απαέρια, που οφείλονται κυρίως στην καλή ανάμιξη του καυσίμου, του αέρα και του υλικού κλίνης, με αποτέλεσμα την τέλεια καύση του καυσίμου και την επίτευξη υψηλών ενεργειακών αποδόσεων.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η αξιολόγηση των υπολειμμάτων της καλλιέργειας εσπεριδοειδών για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, φιλικής ως προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από πειράματα καύσης κλαδευτικών υπολειμμάτων πορτοκαλιών (ξύλο και φύλλο πορτοκαλιάς) και υπολειμμάτων επεξεργασίας φρουτοποτού (φλούδα καρπού πορτοκαλιάς) σε μια εργαστηριακής κλίμακας μονάδα ρευστοποιημένης κλίνης, Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε χημικός χαρακτηρισμός των στερεών καυσίμων της βιομάζας και καθορίστηκαν τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων καύσης για κάθε είδος καυσίμου, αλλά και για μίγμα καυσίμων, όπου εφαρμόστηκαν δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: η παροχή καυσίμου τροφοδοσίας και ο λόγος περίσσειας αέρα ¨λ¨. Η θερμοκρασία λειτουργίας της κλίνης διατηρήθηκε τις περισσότερες φορές μεταξύ 800 και 900 ^{o}C. Σε κάθε πείραμα υπολογίστηκε η απόδοση της καύσης σύμφωνα με τη μέθοδο της απώλειας θερμότητας και καταγράφηκαν οι εκπομπές αέριων ρύπων (CO, SO_2 και NOx) σε έναν on-line αναλυτή καυσαερίων.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

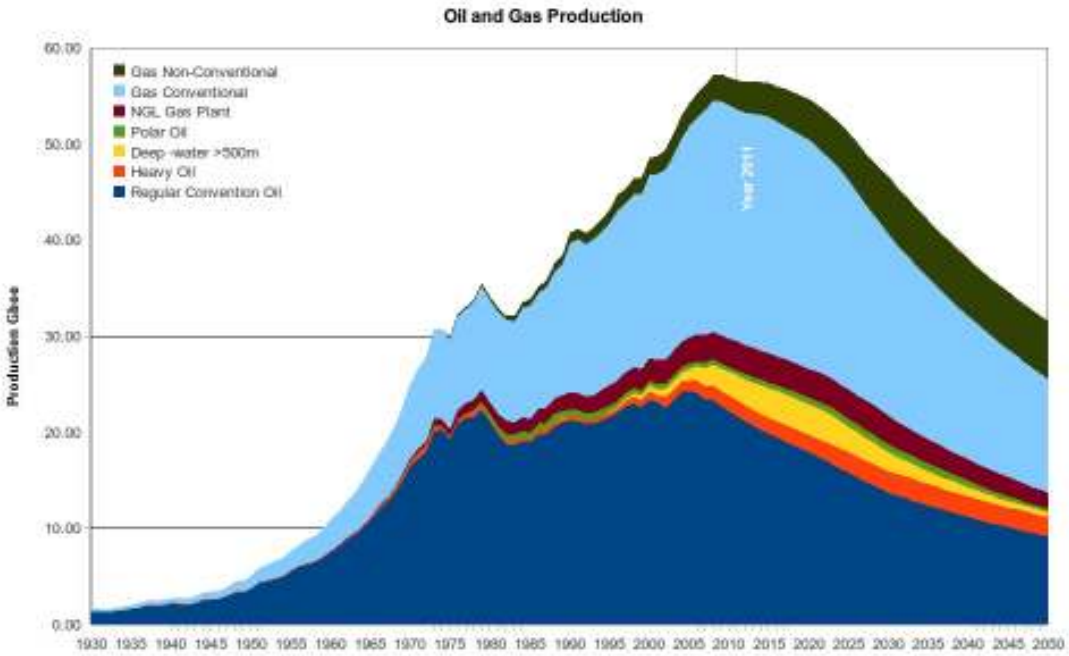
Ο πληθυσμός και η αύξηση του εισοδήματος είναι οι δύο πιο σημαντικές κινητήριες δυνάμεις της ζήτησης για ενέργεια. Από το 1900 ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει υπερτετραπλασιαστεί, το πραγματικό εισόδημα έχει αυξηθεί κατά έναν παράγοντα 25, ενώ η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κατά 22,5. Συγκεκριμένα, κατά τα τελευταία 20 χρόνια ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξήθηκε κατά 1,6 δισεκατομμύρια ανθρώπους και προβλέπεται να αυξηθεί κατά 1,4 δισ. ευρώ κατά τα επόμενα 20 χρόνια. Το πραγματικό εισόδημα του κόσμου έχει αυξηθεί κατά 87% τα τελευταία 20 χρόνια και είναι πιθανό να αυξηθεί κατά 100% τα επόμενα 20 χρόνια (Διάγραμμα 2.1.1).



Διάγραμμα 2.1.1: (α) Σενάρια αύξησης πληθυσμού χωρών μέλη ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) και μη μέλη ΟΟΣΑ, (β) Σενάρια αύξησης πρωτογενούς ενέργειας χωρών μέλη ΟΟΣΑ και μη μέλη ΟΟΣΑ, και (γ) Σενάρια αύξησης ακαθάριστου εγχώριου προϊόν χωρών μέλη ΟΟΣΑ και μη μέλη ΟΟΣΑ [δικτυακή πηγή 1].

Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στηρίχτηκε κυρίως τον προηγούμενο αιώνα στην εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Τα παγκόσμια γνωστά αποθέματα αργού πετρελαίου, σύμφωνα με την τελευταία ετήσια έκθεση της BP [δικτυακή πηγή 1], φτάνουν θεωρητικά για τα επόμενα 43 χρόνια, με την παραδοχή ότι η παγκόσμια κατανάλωση δεν θα μεταβληθεί στο μέλλον. Ομοίως, τα αποθέματα του αερίου και του άνθρακα επαρκούν για τα επόμενα 59 και 242 χρόνια αντίστοιχα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω περισσότεροι άνθρωποι με περισσότερο εισόδημα σημαίνει ότι η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας θα αυξηθεί, με αποτέλεσμα τα πραγματικά αποθέματα ορυκτών ενεργειακών πόρων να είναι μικρότερα των προαναφερθέντων. Εξάλλου, σύμφωνα με τη θεωρία Peak Oil

[δικτυακή πηγή 2], η παραγωγή υδρογονανθράκων φτάνει σύντομα στο μέγιστό της ή το έχει πρόσφατα ξεπεράσει, επιτάσσοντας την άμεση υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων με εναλλακτικές πηγές ενέργειας (Διάγραμμα 2.1.2).



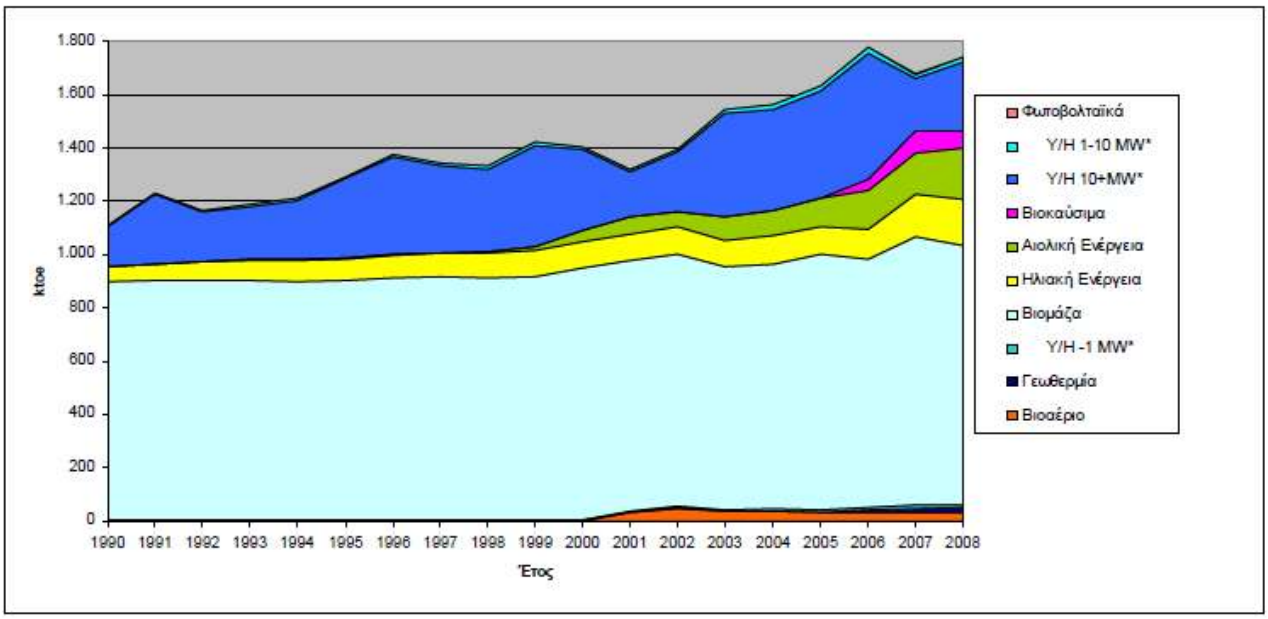
Διάγραμμα 2.1.2: Σενάρια παραγωγής υδρογονανθράκων (Θεωρία Peak Oil) [δικτυακή πηγή 2]

Όσον αφορά στην παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα, αυτή βασίζεται κυρίως στο λιγνίτη. Τα εναπομείναντα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη στις περιοχές όπου η ΔΕΗ αναπτύσσει λιγνιτική δραστηριότητα, με βάση τους σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης, επαρκούν για περίπου 40 ακόμη χρόνια στην περιοχή Δυτικής Μακεδονίας και 20 χρόνια στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Το σημερινό μοντέλο προσπαθεί να καλύψει όλες τις ανάγκες, μικρές και μεγάλες, βασιζόμενο σε μια υπερσυγκέντρωση των μονάδων παραγωγής και αποδεχόμενο ως "αναπόφευκτες" τις τεράστιες απώλειες των δικτύων (οι οποίες, σύμφωνα με τη ΔΕΗ, τη ΡΑΕ και το ΥΠΑΝ, ανέρχονται κατά μέσο όρο στο 10,6% στη χώρα μας). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια αρχίζει να χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο μια νέα γενιά μικροσυστημάτων ισχύος (στα μέτρα των μικρών οικιακών και εμπορικών καταναλωτών, όπως είναι οι τεχνολογίες ΑΠΕ και η μικρή συμπαραγωγή), ανοίγοντας ένα καινούργιο ενεργειακό μονοπάτι, αυτό της αποκεντρωμένης παραγωγής [4].

Η χρήση των ΑΠΕ παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σχέση με τη χρησιμοποίηση των συμβατικών καυσίμων ή της πυρηνικής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού ή μηχανικής ενέργειας. Τα οφέλη που προκύπτουν από τη λειτουργία μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν αφορούν μόνο το κοινωνικοοικονομικό γίγνεσθαι σε επίπεδο χώρας, αλλά και σε επίπεδο τοπικής

κοινωνίας. Οι ΑΠΕ ευνοούν την αποκέντρωση του συστήματος παραγωγής ισχύος και επιτρέπουν την εφαρμογή τοπικών λύσεων οι οποίες είναι ανεξάρτητες από το εθνικό δίκτυο, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την ευελιξία του συστήματος και την παροχή ενέργειας με ευνοϊκούς οικονομικούς όρους σε μικρές απομακρυσμένες εγκαταστάσεις. Επιπλέον, δεν μπορούν να εξαντληθούν, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα και το ουράνιο. Αν χρησιμοποιηθούν έξυπνα, σε κατάλληλες και αποδοτικές εφαρμογές, μπορούν να παρέχουν μία αξιόπιστη και βιώσιμη παροχή ενέργειας σχεδόν έπ' αόριστον. Επίσης, με την υιοθέτηση αυτής της ενεργειακής πολιτικής μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική μείωση της χρήσης εξαντλήσιμων φυσικών πόρων όπως είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Ταυτόχρονα μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα, και έχουν πολύ μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας [5,6,7].

Παρά το τεράστιο δυναμικό τους, σήμερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνεισφέρουν σε μικρό βαθμό στην παγκόσμια παροχή ενέργειας. Εκτιμάται ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχουν το 17% της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας, κυρίως όμως από μεγάλες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις και τη χρήση παραδοσιακών τύπων βιομάζας και αγροτικών υπολειμμάτων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Τα τελευταία 30 χρόνια, η μέση αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι περίπου 2% ετησίως. Η βιομάζα αντιπροσωπεύει συνολικά το 14% της συνολικής προσφερόμενης ενέργειας. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το 87% των πηγών βιομάζας χρησιμοποιούνται στις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ το 86% των σύγχρονων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική ενέργεια και ενέργεια από παλίρροιες) χρησιμοποιούνται στις χώρες του ΟΟΣΑ. Στο Διάγραμμα 2.1.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα, απ' όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ το 2008 ήταν περίπου 1,8 Mtoe, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του 90 ήταν 1,2 Mtoe. Εξ αυτών 600 ktoe περίπου οφείλονται στη χρήση βιομάζας στα νοικοκυριά και 264 ktoe στην χρήση βιομάζας στη βιομηχανία για ίδιες ανάγκες (συνολικό ποσοστό της βιομάζας 53,6%) [8].



Διάγραμμα 2.1.3: Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ στην Ελλάδα [πηγή 8]

Το πέρασμα σε μια αποκεντρωμένη, διασπαρμένη παραγωγή βασιζόμενη στις ΑΠΕ και ο σχεδιασμός πιο έξυπνων δικτύων, θα μας βοηθήσει να πετύχουμε μια πιο ορθολογική, πιο φιλική στο περιβάλλον και εν τέλει πιο επωφελή λύση στα σημερινά ενεργειακά και περιβαλλοντικά αδιέξοδα. Είναι ανάγκη, λοιπόν, να απορρίψουμε αυτό το συγκεντρωτικό, αντιπεριβαλλοντικό ενεργειακό μοντέλο, και να γίνουν γενναίες δημόσιες επενδύσεις στην αποκεντρωμένη παραγωγή και στα μικρά και ευέλικτα συστήματα ΑΠΕ.

2.2 Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η πηγή των περισσοτέρων ανανεώσιμων μορφών ενέργειας είναι ο ήλιος. Η φωτοσύνθεση είναι η διεργασία με την οποία τα φυτά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Η βιομάζα αποτελεί τη μετασχηματισμένη από τα φυτά, μέσω φωτοσύνθεσης, ηλιακή ενέργεια. Οι βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται κατά τη μετατροπή της φωτεινής σε χημική ενέργεια είναι το νερό και ο άνθρακας που είναι άφθονα στη φύση. Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα με την φωτοσύνθεση μας παρέχει τροφές, ίνες και χημικά, αλλά και καύσιμα, τόσο από διεργασίες οι οποίες εξελίχθηκαν στο παρελθόν και οδήγησαν στην αποθήκευση ορυκτών καυσίμων, όσο και από την σύγχρονη παραγωγή ξύλου, φυτικών υπολειμμάτων, κλπ. Στη νομοθεσία (ΦΕΚ Α'129/27.06.2006) η βιομάζα ορίζεται ως το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων που προέρχονται από τις γεωργικές, (συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών), τις δασοκομικές και τις συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών αποβλήτων και αστικών λυμάτων και απορριμμάτων. Σήμερα, με τον όρο «βιομάζα» χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε προϊόν ή υποπροϊόν ή υπόλειμμα προέρχεται από οργανική ύλη.

Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι μπορεί να αποδώσει την αποθηκευμένη χημική ενέργεια και επειδή παράγεται διαρκώς αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Μια άλλη σημαντική ιδιομορφία της βιομάζας είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί παραπροϊόν ή απόβλητο, της εν γένει δραστηριότητας του ανθρώπου και η αντιμετώπισή της ως ενεργειακού πόρου εντάσσεται σε ένα ευρύτερο και από πολλές πλευρές σημαντικότερο πεδίο, αυτό της προστασίας του περιβάλλοντος. Άλλα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

1. Η αποτροπή της αύξησης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η καύση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), δεν συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου - επειδή οι ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που απελευθερώνονται κατά την καύση της βιομάζας δεσμεύονται πάλι από τα φυτά για τη δημιουργία της βιομάζας. Ταυτόχρονα, θα υπάρξει περιβαλλοντική βελτίωση, με το σκεπτικό ότι δεν θα αποδεσμεύεται CO_2 που δεσμεύτηκε πριν αιώνες από την ατμόσφαιρα, αλλά θα αποδεσμεύεται το CO_2 που δεσμεύτηκε από τα φυτά την προηγούμενη περίοδο και το οποίο θα δεσμευτεί εκ νέου. Θα αποκατασταθεί δηλαδή ο κύκλος διοξειδίου του άνθρακα της φύσης (Σχήμα 1).

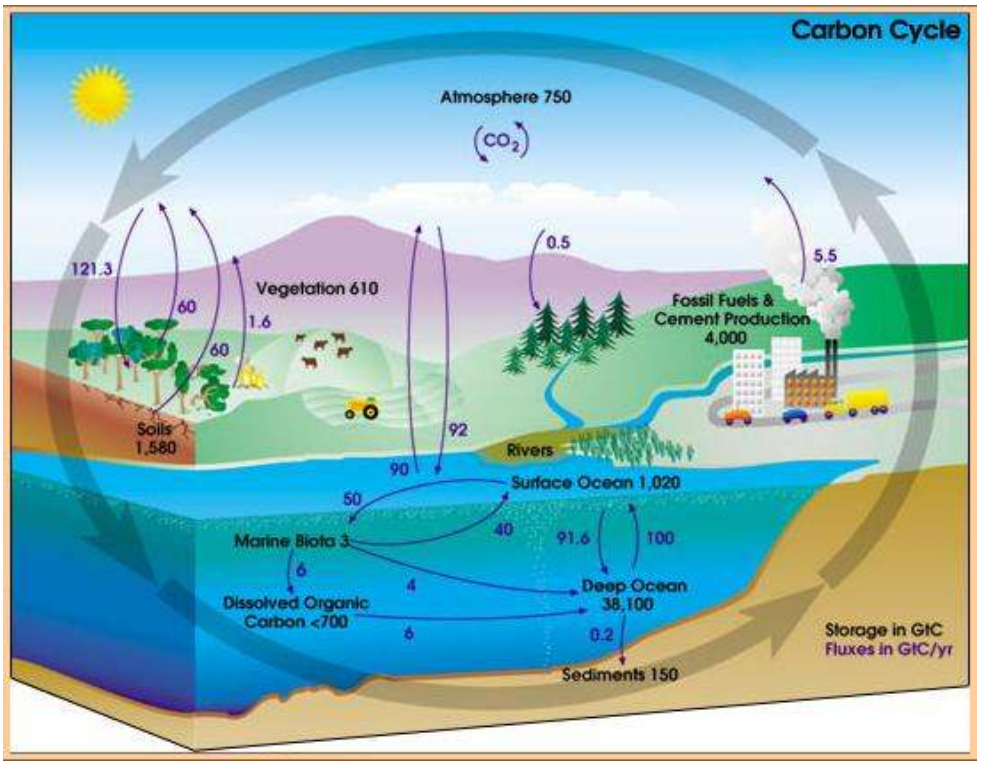
2. Η αποφυγή της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας με το διοξείδιο του θείου (SO_2) που παράγεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων και συντελεί στο φαινόμενο της "όξινης βροχής". Η περιεκτικότητα της βιομάζας σε θείο είναι πρακτικά αμελητέα.

3. Η μείωση των μετακινήσεων για τη μεταφορά των καυσίμων από το χώρο παραγωγής τους προς το χώρο διανομής τους. Η μείωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών ρύπων και την ελάττωση του κόστους μεταφοράς.

4. Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης. Εφόσον η βιομάζα είναι εγχώρια πηγή ενέργειας, η αξιοποίησή της σε ενέργεια συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου, στην εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και στην εξοικονόμηση του συναλλάγματος.

5. Η εξασφάλιση εργασίας και η συγκράτηση των αγροτικών πληθυσμών στις παραμεθόριες και τις άλλες γεωργικές περιοχές.

6. Η απεξάρτηση των περιοχών από τα «παιγνίδια πολέμου και πλούτου».



Διάγραμμα 2.2.1: Ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα. Οι μονάδες είναι γιγατόνοι άνθρακα (NASA). [δικτυακή πηγή 3]

Τα μειονεκτήματα που συνδέονται με τη χρησιμοποίηση της βιομάζας και αφορούν, ως επί το πλείστον, δυσκολίες στην εκμετάλλευσή της, είναι τα εξής:

1. Ο μεγάλος όγκος της και η μεγάλη περιεκτικότητά της σε υγρασία, ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.
2. Η δυσκολία στη συλλογή, μεταποίηση, μεταφορά και αποθήκευσή της, έναντι των ορυκτών καυσίμων.
3. Οι δαπανηρότερες εγκαταστάσεις και εξοπλισμός που απαιτούνται για την αξιοποίηση της βιομάζας, σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
4. Η μεγάλη διασπορά και η εποχιακή παραγωγή της. [9]

Εξ αιτίας των παραπάνω μειονεκτημάτων και για την πλειοψηφία των εφαρμογών της, το κόστος της βιομάζας παρέμενε υψηλό την τελευταία δεκαετία, σε σύγκριση με το πετρέλαιο. Ήδη, όμως, η αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου σε παγκόσμια κλίμακα και η εκθετική αύξηση του ειδικού συντελεστή φορολογίας του πετρελαίου θέρμανσης στην Ελλάδα, η αξιοποίηση της βιομάζας παρουσιάζει οικονομικά οφέλη. Πρέπει, επίσης, κάθε φορά να συνυπολογίζεται το περιβαλλοντικό όφελος, το οποίο, αν και συχνά

δεν μπορεί να αποτιμηθεί με οικονομικά μεγέθη, εντούτοις είναι ουσιαστικής σημασίας για την ποιότητα της ζωής και το μέλλον της ανθρωπότητας.

Στην Ελλάδα, οι στόχοι για την εγκατεστημένη ισχύς από τους σταθμούς βιομάζας για τα έτη 2014 και 2020, βάσει του «Εθνικού Σχεδίου Δράσης για τις ΑΠΕ» (Κοινοτική Οδηγία 2009/28/EC), είναι 200 MW και 350 MW αντίστοιχα. Τα συνολικά αιτήματα για άδεια παραγωγής αθροίζουν στα μέσα του 2011 τα 1.518 MW, ενώ στην ίδια περίοδο οι άδειες παραγωγής αυξήθηκαν στα 362 MW και βρίσκονται πλέον ήδη σε λειτουργία 44 MW (πηγή: ΥΠΕΚΑ).

2.2.1 Τύποι και Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά Βιομάζας

Στην πράξη υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας. Πρώτον, η βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες και δεύτερον, οι υπολειμματικές μορφές (τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, ζωικά περιττώματα και τα αστικά οργανικά απόβλητα).

Πολλές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας ή αερίων, υγρών και στερεών καυσίμων από παρθένα και από υπολειμματική βιομάζα. Επιπρόσθετα, μπορούν να παραχθούν χημικά από βιομάζα από ένα μεγάλο εύρος διεργασιών. Το είδος βιοκαυσίμου, τα φυσικά του χαρακτηριστικά και η χημική του σύνθεση επηρεάζουν την συνολική διεργασία χρησιμοποίησης της βιομάζας (παροχή καυσίμου, σύστημα μετατροπής, στερεά απόβλητα και αέριες εκπομπές).

- **Στοιχειακή Ανάλυση**

Στη στοιχειακή ανάλυση προσδιορίζεται η κατά βάρος σύσταση της βιομάζας σε άνθρακα (C), υδρογόνο (H), οξυγόνο (O), άζωτο (N) και θείο (S). Με βάση τη στοιχειακή ανάλυση, μπορεί να γίνει λεπτομερής και επακριβής περιγραφή της διεργασίας της θερμοχημικής μετατροπής.

Γενικά, στα καύσιμα βιομάζας εμφανίζονται οι εξής τυπικές τιμές στοιχειακής ανάλυσης (% κ.β. ξηρής βάσης): ο άνθρακας κυμαίνεται μεταξύ 40-50%, το υδρογόνο από 4-6%, το οξυγόνο από 35-45%, το άζωτο ανιχνεύεται σε ποσοστό μικρότερο του 1%, ενώ το θείο είναι αμελητέο <0,1%. Σε σύγκριση με τον γαιάνθρακα, η βιομάζα έχει σημαντικά περισσότερο οξυγόνο και λιγότερο άνθρακα. Επίσης, το άζωτο το οποίο δεσμεύεται στο καύσιμο είναι πολύ λιγότερο για την βιομάζα από ότι για τον γαιάνθρακα, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μείωση των εκπομπών NOx.

Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, οφειλόμενη στη λιγνοκυτταρινική δομή των φυτικών ιστών, είναι η αιτία, για τη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη της βιομάζας, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των καυσίμων βιομάζας, σε σύγκριση με τους γαιάνθρακες, είναι ότι η βιομάζα περιέχει ελάχιστες ποσότητες θείου. Κατ' αυτόν τον τρόπο η χρήση βιομάζας οδηγεί σε μείωση των

εκπομπών SO_2, οι οποίες ευθύνονται για την όξινη βροχή. Επίσης, η περιεκτικότητα σε χλώριο ορισμένων καυσίμων βιομάζας όπως το άχυρο, δύναται να υπερβεί τα επίπεδα περιεκτικότητάς του σε γαιάνθρακες.

- **Προσεγγιστική Ανάλυση**

Στην προσεγγιστική ανάλυση, προσδιορίζεται η κατά βάρος σύσταση της βιομάζας σε πτητικά, τέφρα και μόνιμο άνθρακα. Ως μόνιμος άνθρακας χαρακτηρίζεται το ποσοστό του άνθρακα, που δεν αντιδρά, για την παραγωγή πτητικών προϊόντων (πτητικός άνθρακας), αλλά παραμένει και δημιουργεί το εξανθράκωμα.

Γενικά, η βιομάζα παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά (>70%), σε αντίθεση με τους γαιάνθρακες (<40%). Από την άλλη πλευρά, η περιεκτικότητα της βιομάζας σε τέφρα είναι χαμηλότερη από αυτήν στους γαιάνθρακες – εν γένει η βιομάζα έχει το ένα τρίτο της περιεκτικότητας του γαιάνθρακα σε τέφρα. Όμως, η τέφρα της βιομάζας περιέχει περισσότερο πυρίτιο και κάλιο και λιγότερο αλουμίνιο και σίδηρο από τον γαιάνθρακα.

- **Θερμογόνος Δύναμη**

Η θερμογόνος δύναμη εκφράζει την ενέργεια που απελευθερώνεται, κατά την καύση της μονάδας μάζας του καυσίμου. Αποτελεί τη βάση προσδιορισμού της απόδοσης του ενεργειακού συστήματος. Στους προσδιορισμούς των θερμοχημικών διεργασιών, είναι απαραίτητο να διαχωρίζεται η ανώτερη από την κατώτερη θερμογόνο δύναμη. Στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη συμπεριλαμβάνεται η λανθάνουσα θερμότητα του νερού, πράγμα που δεν ισχύει για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη όπου έχει αφαιρεθεί η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του περιεχομένου νερού. Συνήθως, η λανθάνουσα θερμότητα του νερού δεν επανακτάται και επομένως είναι πιο σωστό να χρησιμοποιείται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη, η οποία υπολογίζεται από την ανώτερη, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$HHV = LHV + h_v \, x \, (n_{H2O,out}/n_{fuel,in})$$ [δικτυακή πηγή 4] (2.1)

όπου HHV = ανώτερη θερμογόνος δύναμη σε KJ/kg (ξηρή βάση)

LHV = κατώτερη θερμογόνος δύναμη σε KJ/kg (ξηρή βάση)

h_v = λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του περιεχομένου νερού

$n_{H2O,out}$ = μόρια ατμού

$n_{fuel,in}$ = ο αριθμός των μορίων του καυσίμου

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη προσεγγίζεται υπολογιστικά από την εξίσωση των Dulong και Petit ως εξής:

$$HHV = 33{,}823C + 144{,}249(H - O/8) + 9418S \text{ kJ/kg}$$ [14] (2.2)

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των καυσίμων βιομάζας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 18 και 21MJ ανά κιλό καυσίμου, σε ξηρά βάση. Οι χαμηλότερες τιμές αναφέρονται στα αγροστώδη καύσιμα και οι ψηλότερες σε

νωπά καύσιμα ξύλα και σε φλοιούς. Συνήθως, οι τιμές HHV των φύλλων είναι υψηλότερες από αυτές των κλαδιών, λόγω της συγκέντρωσης σε αυτά ελαίων και πτητικών ουσιών οι οποίες έχουν υψηλότερη θερμογόνο δύναμη.

- **Υγρασία**

Η υγρασία θεωρείται ανεπιθύμητη πρόσμιξη, για τις θερμοχημικές διεργασίες, η οποία πρέπει να αφαιρεθεί στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό, με ξήρανση (φυσική ή θερμική). Η υγρασία στην περίπτωση της καύσης της βιομάζας μειώνει την τελική ωφέλιμη ενέργεια και συνεπώς την απόδοση του ενεργειακού συστήματος, συμβάλλοντας, ταυτόχρονα, στην αυξημένη εκπομπή ρύπων.

- **Διαστάσεις Σωματιδίων, Πυκνότητα Υλικού Χύδην**

Ανάλογα με την διεργασία προετοιμασίας του καυσίμου, τα καύσιμα βιομάζας είναι διαθέσιμα είτε σαν υλικό χύδην (π.χ. θρύμματα ξύλου, πριονίδι), είτε σαν υλικό σε τεμάχια (π.χ. δεμάτια αχύρου, καυσόξυλα). Το μέγεθος του σωματιδίου και η κατανομή μεγεθών των σωματιδίων προσδιορίζει το κατάλληλο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και την τεχνολογία καύσης.

Η πυκνότητα του υλικού χύδην κυμαίνεται μεταξύ 150-200 kg/m^3 για το άχυρο και το στάρι, μέχρι και 600-900 kg/m^3 για το ξηρό ξύλο. [6,7]

2.2.2 Κύριες Εφαρμογές Βιομάζας

Οι κύριες εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη χώρα μας η βιομάζα ως καύσιμο είναι οι εξής [δικτυακή πηγή 5]:

1. Θέρμανση θερμοκηπίων: σε περιοχές της χώρας όπου υπάρχουν μεγάλες ποσότητες διαθέσιμης βιομάζας, χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε κατάλληλους λέβητες.
2. Θέρμανση κτιρίων με καύση βιομάζας σε ατομικούς/κεντρικούς λέβητες: ήδη σε μερικές περιοχές της Ελλάδας χρησιμοποιούνται λέβητες πυρηνόξυλου. Ένας κεντρικός λέβητας/σταθμός παραγωγής ενέργειας μπορεί να τροφοδοτεί ένα σύνολο κτιρίων, έναν οικισμό, ένα χωριό ή μια πόλη με θερμό νερό χρήσης και για θέρμανση χώρων (τηλεθέρμανση).
3. Παραγωγή ενέργειας σε γεωργικές βιομηχανίες: εκκοκκιστήρια, πυρηνελαιουργεία, βιομηχανίες ρυζιού καθώς και βιοτεχνίες κονσερβοποίησης καίνε τα υπολείμματά τους (υπολείμματα εκκοκκισμού, πυρηνόξυλο, φλοιούς και κουκούτσια αντίστοιχα) για την κάλυψη των θερμικών τους αναγκών ή/και μέρος των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

4. Παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανίες ξύλου: τα υπολείμματα βιομηχανιών επεξεργασίας ξύλου (πριονίδι, πούδρα, ξακρίδια κτλ) χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της διεργασίας καθώς και για τη θέρμανση των κτιρίων.
5. Παραγωγή ενέργειας σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού και Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ): το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση των υγρών αποβλήτων σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού και των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ, καίγεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3 ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Οι υπολειμματικές μορφές βιομάζας είναι υλικά που προέρχονται κυρίως από παρθένα βιομάζα, περιέχουν ενέργεια και εν τέλει απορρίπτονται. Η υπολειμματική μορφή βιομάζας παράγεται από ανθρώπινες δραστηριότητες και ορισμένα φυσικά γεγονότα. Περιλαμβάνει: α) αγροτικά υπολείμματα, όπως κοπριά ζώων και υπολείμματα από συγκομιδή σοδειών σε αγροτικές και συναφείς διεργασίες, (β) υπολειμματικές μορφές ξύλου και σχετικά υπολείμματα στα δάση από δασοκομικές δραστηριότητες και από παραγωγή κούτσουρων, (γ) τα απόβλητα της αγροτικής και της σχετικής με δάση βιομηχανίας όπως η βιομηχανία πολτού και χάρτου και η βιομηχανία παραγωγής τροφών και (δ) τα στερεά αστικά απόβλητα.

Για τον προσδιορισμό της χρήσης των υπολειμμάτων για παραγωγή ενέργειας θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν διάφοροι παράγοντες. Πρώτον, υπάρχουν άλλες εναλλακτικές χρήσεις των υπολειμμάτων, όπως ζωοτροφή, έλεγχος από διαβρώσεις, στρώμα για τα ζώα, λιπάσματα κ.λ.π. Δεύτερον, υπάρχει πρόβλημα συμφωνίας σε μια κοινή μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του τι είναι και τι δεν είναι ανακτήσιμο υπόλειμμα. Αυτό οφείλεται, μεταξύ άλλων, στις διακυμάνσεις του εκτιμώμενου ποσού των υπολειμμάτων: που είναι απαραίτητο να παραμείνει στο έδαφος ως οργανικό υλικό, για τον έλεγχο των διαβρώσεων, για τη διευκόλυνση της συγκομιδής, στις μη-ενεργειακές χρήσεις, στις απώλειες, στη διαφωνία σχετικά με τη παραγωγή ζωικών αποβλήτων κ.λ.π. Παρ' όλα αυτά, πολλά από αυτά τα υπολείμματα είναι διαθέσιμα και αποτελούν μια καλή ευκαιρία σε χαμηλή τιμή.

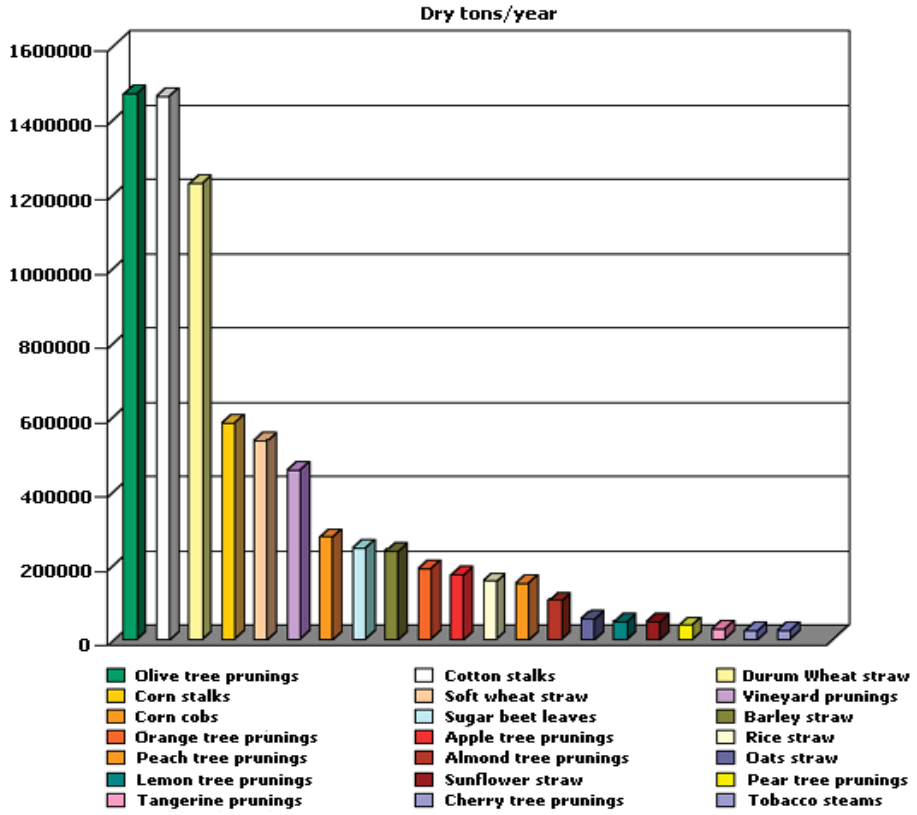
2.3.1 Γεωργικά Υπολείμματα

Τα γεωργικά υπολείμματα παράγονται στον αγρό μετά την ετήσια συγκομιδή της σοδειάς, όπως φύλλα, στελέχη, καρποί. Τα υπολείμματα της καλλιέργειας είναι όλα τα μη βρώσιμα τμήματα των φυτών τα οποία εγκαταλείπονται στους αγρούς μετά την συγκομιδή και τα υπολείμματα τα οποία δημιουργούνται στις μονάδες συσκευασίας ή απορρίπτονται κατά την επεξεργασία της σοδειάς. Τα υπολείμματα της σοδειάς 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 μόνο διαθέσιμα για ένα

περιορισμένο διάστημα του έτους. Για να είναι διαθέσιμα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους απαιτούνται εγκαταστάσεις αποθήκευσης μεγάλων διαστάσεων. Δεν είναι δυνατόν να συλλεχθούν όλα τα υπολείμματα, ενώ ορισμένα πρέπει να παραμείνουν στην γη για την αποφυγή διάβρωσης των εδαφών και κατ' αυτόν τον τρόπο να εξασφαλίσουν την μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα. Το παγκόσμιο δυναμικό των αγροτικών υπολειμμάτων έχει εκτιμηθεί 3-4 δις τόνους ετησίως.

Η συνολική ποσότητα των υπολειμμάτων της αγροτικής παραγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι περίπου 153 εκ. τόνοι ξηρής ύλης. Οι περισσότερες μελέτες υποθέτουν ότι είναι δυνατόν να συλλεχθεί 25% περίπου των παγκοσμίως διαθέσιμων αγροτικών υπολειμμάτων. Στην Ευρώπη υπάρχουν μεγάλες ανεκμετάλλευτες ποσότητες προσφερόμενης βιομάζας, λαμβάνοντας υπόψη τις ποσότητες υπολειμμάτων αχύρου από τον σίτο, το κριθάρι, την σίκαλη και την βρώμη, καθώς και τον αραβόσιτο. Τα υπολείμματα αυτά εκτιμώνται στο επίπεδο των 470-670 PJ ετησίως στα 15 παλαιά κράτη μέλη της Ε.Ε. και 150-260 PJ ετησίως στα 10 νέα μέλη της Ε.Ε. [6].

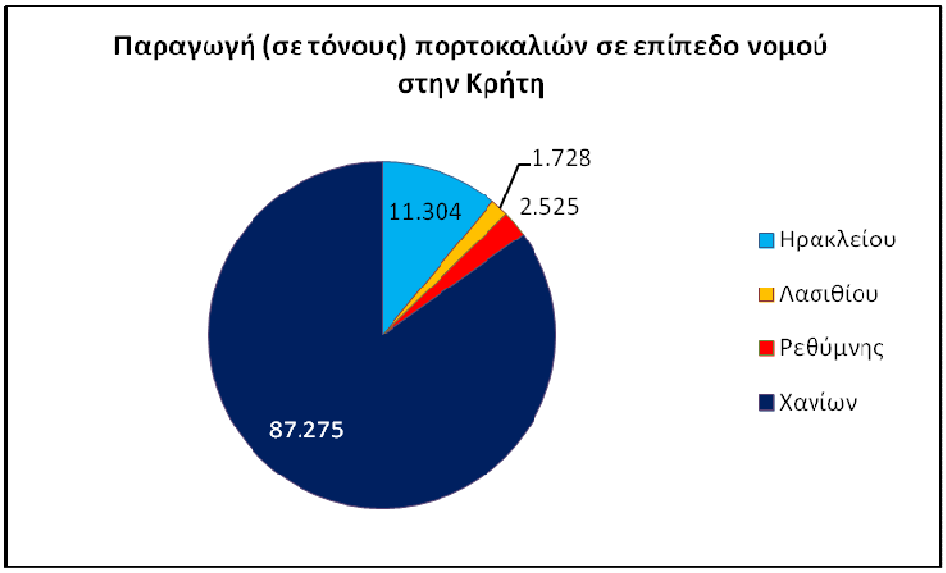
Τα υπολείμματα από ετήσιες καλλιέργειες (π.χ. καλαμπόκι, βαμβάκι, δημητριακά), από τα ελαιόδεντρα, τα εσπεριδοειδή και τα αμπέλια αποτελούν τις βασικές κατηγορίες αγροτικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα. Ένα τμήμα από αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας.



Διάγραμμα 2.3.1: Αγροτικά υπολείμματα από την πρωτογενή παραγωγή (γεωργία) στην Ελλάδα (dt/y) [10]

Στην Ελλάδα, η συνολική έκταση της γης, η οποία χρησιμοποιείται για αγροτική παραγωγή, είναι περίπου 3,8 εκ. εκτάρια, από τα οποία το 60% αποτελείται από αρόσιμη γη, το 25% αποτελείται από καλλιέργειες αμπελιών και δέντρων, το 3% αποτελείται από κήπους και το 12% βρίσκεται σε αγρανάπαυση. Οι ποσότητες υπολειμμάτων από τις ετήσιες και τις πολυετείς καλλιέργειες στην Ελλάδα, μετρούμενες σε τόνους ξηρής ύλης, καθώς και η διαθεσιμότητά τους παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.3.1. Εκτιμάται ότι περίπου 3,8 εκ. τόνοι υπολειμμάτων από την συγκομιδή των αγρών και από υπολείμματα δασοκομίας είναι διαθέσιμα θεωρητικά για παραγωγή ενέργειας [6].

Όσον αφορά στα εσπεριδοειδή, η Ελλάδα παρήγαγε κατά έτος (μέσος όρος 2009-10): πορτοκάλια (960.000 τόννους), λεμόνια (40.000), μανταρίνια (105.000) και βοτρυόκαρπο (6.000). Από αυτά καταναλώνονται το 30% των παραγόμενων πορτοκαλιών και λεμονιών και το 75% των μανταρινιών, ενώ καταστρέφονται από φυσικές αιτίες και απόσυρση άλλα 30% των παραγόμενων. Προς επεξεργασία διοχετεύεται το 15% από τα πορτοκάλια και λεμόνια [δικτυακή πηγή 6]. Στην Κρήτη ο συνολικός αριθμός δέντρων πορτοκαλιάς που καταγράφηκαν το 2006 ήταν 2.450.562 δέντρα, όπου το 80 % από αυτά καταγράφηκαν στα γεωγραφικά όρια του νομού Χανίων (δικτυακή πηγή 7). Ομοίως, το 85% της παραγωγής πορτοκαλιών στην Κρήτη ανήκει στο νομό Χανίων (Διάγραμμα 2.3.2).



Διάγραμμα 2.3.2: Δενδροκομική παραγωγή καλλιεργειών πορτοκαλιάς κατά νομό για την περιφέρεια της Κρήτης: έτος 2006 [πηγή δεδομένων: Γεωργική Στατιστική Υπηρεσία – δικτυακή πηγή 7]

2.3.2 Ενεργειακή αξιοποίηση υποπροϊόντων εσπεριδοειδών στην Κρήτη

Τα στερεά απόβλητα των βιομηχανιών χυμών εσπεριδοειδών αποτελούνται από τους φλοιούς και την πούλπα μέρος της οποίας πηγαίνει στους χυμούς, για την παρασκευή προϊόντων κατά το δυνατό πλησιέστερα προς τα φυσικά. Από τα απορίμματα των βιομηχανικών χυμών παράγονται διάφορα

υποπροϊόντα για παραγωγή ζωοτροφών μετά από ξήρανση και για παραγωγή πηκτίνης (χρησιμοποιείται στις μαρμελάδες, μαγιονέζες, παγωτά, για την κατασκευή φωτογραφικού φιλμ, στη φαρμακευτική, κ.α.) και εσπερηδίνης [11].

Το κόστος ξήρανσης των φλοιών είναι πολύ υψηλό και στην Ελλάδα μόνο μία μονάδα ξηραίνει τους φλοιούς. Ως εκ τούτου, τα εργοστάσια θέλουν να δίνουν αυτούσια τα στερεά απόβλητα στους κτηνοτρόφους για ζωοτροφή σχεδόν δωρεάν, διότι τους δημιουργούν προβλήματα διάθεσης και ρύπανσης του περιβάλλοντος [11].

Σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας το σύνολο της παραγωγής των εσπεριδοειδών στην Ελλάδα κάθε χρόνο, είναι περί τους 1.000.000 τόνους, από τους οποίους περίπου μόνο το 1/3 επεξεργάζονται προς χυμοποίηση. Από αυτές τις ποσότητες το 80% αφορούν πορτοκάλια, το 12,4% λεμόνια, το 6,2% μανταρίνια και περίπου 1% grape fruit (στοιχεία 1999).

Στην Κρήτη, υπάρχει εν ενεργεία ένα μόνο εργοστάσιο επεξεργασίας εσπεριδοειδών (ΒΙΟΧΥΜ Α.Ε.), το οποίο βρίσκεται στα Χανιά και επεξεργάζεται ετησίως 7.400 τόνους εσπεριδοειδών. Από αυτές τις ποσότητες, το 40% πηγαίνει στη χυμοποίηση και το 60% (υπολείμματα) διοχετεύεται χωρίς αντίτιμο στους κτηνοτρόφους. Η μέση ετήσια παραγωγή υπολειμμάτων επεξεργασίας πορτοκαλιού την τριετία 2009-2011 ήταν 7.120 τόνοι (Πίνακας 2.3.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3.1: *ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΣΠΕΡΙΔΟΕΙΔΩΝ ΣΤΟ Ν. ΧΑΝΙΩΝ (ΠΗΓΗ: ΒΙΟΧΥΜ)*

Έτος	*Μονάδα*	*Πορτοκάλια*	*Μανταρίνια*	*Λεμόνια*	*Βοτρυόκαρπο*
2011	τόνοι	2.136	53	17	174
2010	τόνοι	3.180	11	64	0
2009	τόνοι	7.500	8	0	186
Μ.Ο.	τόνοι	4.272	24	27	120

Όσον αφορά τη μέση ετήσια παραγωγή κλαδοδεμάτων δέντρων εσπεριδοειδών (πορτοκάλια, μανταρίνια και λεμόνια) στην Κρήτη, αυτή αγγίζει περίπου τους 30000 τόνους [12], ενώ το ετήσιο ενεργειακό δυναμικό τους υπολογίζεται περίπου σε 120 * 109 Mcal (Πίνακας 2.3.2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3.2: *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΛΑΔΕΥΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΕΣΠΕΡΙΔΟΕΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ [12]*

Χρόνος	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Ενεργειακό Δυναμικό (10^6 Mcal)	126822	126822	127067	121792	122612	125015	118156	123246

2.4 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ

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

Μία διάταξη ρευστοποιημένης κλίνης αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο με μία διάτρητη πλάκα στη βάση του, πληρωμένο με μία κλίνη θερμού, αδρανούς και κοκκώδους υλικού το οποίο βρίσκεται σε αιώρηση. Τα συνηθισμένα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κλίνη είναι η πυριτική άμμος και ο δολομίτης. Το υλικό της κλίνης αποτελεί το 90-98% του μίγματος καυσίμου και υλικού κλίνης. Ο πρωτεύων αέρας καύσης εισέρχεται στον κλίβανο από κάτω, μέσω της πλάκας κατανομής αέρα και ρευστοποιεί την κλίνη. Το υλικό εμφανίζει πλέον μια μορφή που μοιάζει με υγρό που βράζει έντονα και τα σωματίδια δεν διακρίνονται καθαρά σαν ανεξάρτητα σώματα. Λόγω αυτής της εμφάνισης του υλικού και ορισμένων ιδιοτήτων του ανάλογων με βράζοντος υγρού, χρησιμοποιήθηκε ο όρος "ρευστοποιημένη κλίνη" (fluidised bed). Το ρεύμα του αέρα πρέπει να έχει μία ελάχιστη ταχύτητα, ώστε να επιτυγχάνεται η αιώρηση των σωματιδίων. Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης είναι συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων, της πυκνότητας και της πτώσης πίεσης στην κλίνη. Η ανάμιξη με στροβιλισμό του αέρα με το καύσιμο σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο ανάφλεξής του, προκαλεί την καύση. Από το υλικό της κλίνης πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας του αντιδραστήρα και στο νεοεισελθέν καύσιμο και αέρα. Η έντονη μεταφορά θερμότητας και η πολύ καλή ανάμιξη του καυσίμου, του αέρα και του υλικού κλίνης, σε συνδυασμό με τον υψηλό χρόνο παραμονής του καυσίμου στο θάλαμο καύσης, παρέχει καλές συνθήκες για πλήρη καύση με χαμηλές ανάγκες για περίσσεια αέρα. Η θερμοκρασία της καύσης έχει ομοιόμορφη κατανομή και πρέπει να παραμένει χαμηλή (συνήθως μεταξύ 800-900 ^oC), ώστε να αποφεύγεται η τήξη της τέφρας στην κλίνη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με εσωτερικές επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, με ανακυκλοφορία του απαερίου ή με έγχυση ύδατος (στις μονάδες σταθερής κλίνης οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες από αυτές στις μονάδες ρευστοποιημένης κλίνης κατά 100-200 ^oC).

Λόγω της καλής ανάμιξης η οποία επιτυγχάνεται, οι μονάδες καύσης ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να αντιμετωπίσουν με ευελιξία τη χρησιμοποίηση διαφόρων μειγμάτων καυσίμων, αλλά έχουν περιορισμούς όσον αφορά στο μέγεθος των σωματιδίων του καυσίμου. Οι απαιτήσεις για το μέγεθος των σωματιδίων του καυσίμου εξαρτώνται από το σύστημα τροφοδοσίας και το σχεδιασμό της κλίνης, ενώ λαμβάνεται πάντα υπόψη ότι λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών καύσης απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος παραμονής προκειμένου να καούν πλήρως τα σωματίδια του καυσίμου. Χρήση καυσίμου μεγαλύτερου μεγέθους προκαλεί προβλήματα στη ρευστοποίηση, ενώ με χρήση σωματιδίων μικρότερου μεγέθους αυξάνεται το ποσοστό των στερεών σωματιδίων που απομακρύνονται από το θάλαμο χωρίς να προλάβουν να καούν, συμπαρασυρόμενα από το ανοδικό ρεύμα. Ακόμα περισσότερο, πολύ μικρά σωματίδια μπορεί και να μην κατακρατηθούν στον κυκλώνα, οπότε να μην επανέλθουν στο θάλαμο, με άμεση συνέπεια την ατελή καύση. Κατά συνέπεια, για την ασφαλή λειτουργία της μονάδας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός κατάλληλου συστήματος προ-επεξεργασίας του καυσίμου το οποίο να εξασφαλίζει τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Επιπλέον, τα μεγάλα φορτία σκόνης τα οποία συμπαρασύρονται με το απαέριο, καθιστούν αναγκαία τη χρησιμοποίηση αποδοτικών συσκευών καθίζησης σκόνης και καθαρισμού του λέβητα. Το υλικό της κλίνης χάνεται επίσης με την τέφρα, καθιστώντας αναγκαία την περιοδική προσθήκη νέου υλικού στην μονάδα.

Οι απαιτήσεις στην περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου είναι συνάρτηση του σχεδιασμού της κλίνης. Στις εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες, η σχετική απαίτηση για τη μέγιστη περιεχόμενη υγρασία ανέρχεται στο 60%. Καύσιμα με υγρασία 60 - 70%, παρουσιάζονται γενικά αντιοικονομικά, ενώ για καύσιμο με 50% υγρασία, ο βαθμός απόδοσης του λέβητα εμφανίζεται περίπου 15% μικρότερος από αυτόν για ξηρό καύσιμο. Καύσιμα με μεγαλύτερη υγρασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνήθως μόνο με την ταυτόχρονη χρήση άλλου συμβατικού καυσίμου. Αυξημένη υγρασία στο καύσιμο πάνω από τα επιτρεπτά όρια μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στο σύστημα τροφοδοσίας, διακοπή της συνεχούς τροφοδοσίας ("μπούκωμα"), καθώς και μείωση του βαθμού απόδοσης της μονάδας [6,7,13].

Τα συστήματα καύσης σε ρευστοποιημένη κλίνη βρίσκονται σε εφαρμογή από το 1960 για την καύση οικιακών και βιομηχανικών αποβλήτων. Από τότε, έχουν αναπτυχθεί σε παγκόσμια κλίμακα περισσότερες από 300 εγκαταστάσεις. Οι καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι τεχνικά πολυπλοκότεροι από τους καυστήρες σταθερής κλίνης με αντίστοιχα μεγαλύτερα κόστη σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας. Γενικά υπάρχει ένα όριο στην περιοχή των 8 MWth επάνω από το οποίο αρχίζουν να πλεονεκτούν οικονομικά έναντι των καυστήρων σταθερής κλίνης, ενώ οι μονάδες αυτές είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (με συνήθη δυναμικότητα του λέβητα άνω των 30 MW). Όσον αφορά στο τεχνολογικό υπόβαθρο των εγκαταστάσεων αυτών, διακρίνονται σε εφαρμογές ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων (Bubbling Fluidized Bed Combustion, BFBC) και σε εφαρμογές ρευστοποιημένης κλίνης με

ανακυκλοφορία (Circulating Fluidized Bed Combustion, CFBC). Οι δύο τύποι είναι κατάλληλοι είτε για λειτουργία σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (atmospheric FBC), είτε για λειτουργία σε συνθήκες πίεσης (pressurized FBC). Στο εμπόριο διατίθενται μονάδες BFB μέχρι 500 MWe και CFB μέχρι 400-600 MWe [6,14].

Οι τεχνολογίες BFBC και CFBC εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες αλλά και διαφορές τόσο στο σχεδιασμό, όσο και στα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Στο επόμενο υποκεφάλαιο δίνεται μια βασική τεχνική περιγραφή για κάθε μία από αυτές. Οι κύριες διαφορές στις παραμέτρους λειτουργίας των CFBC και BFBC συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4.1.

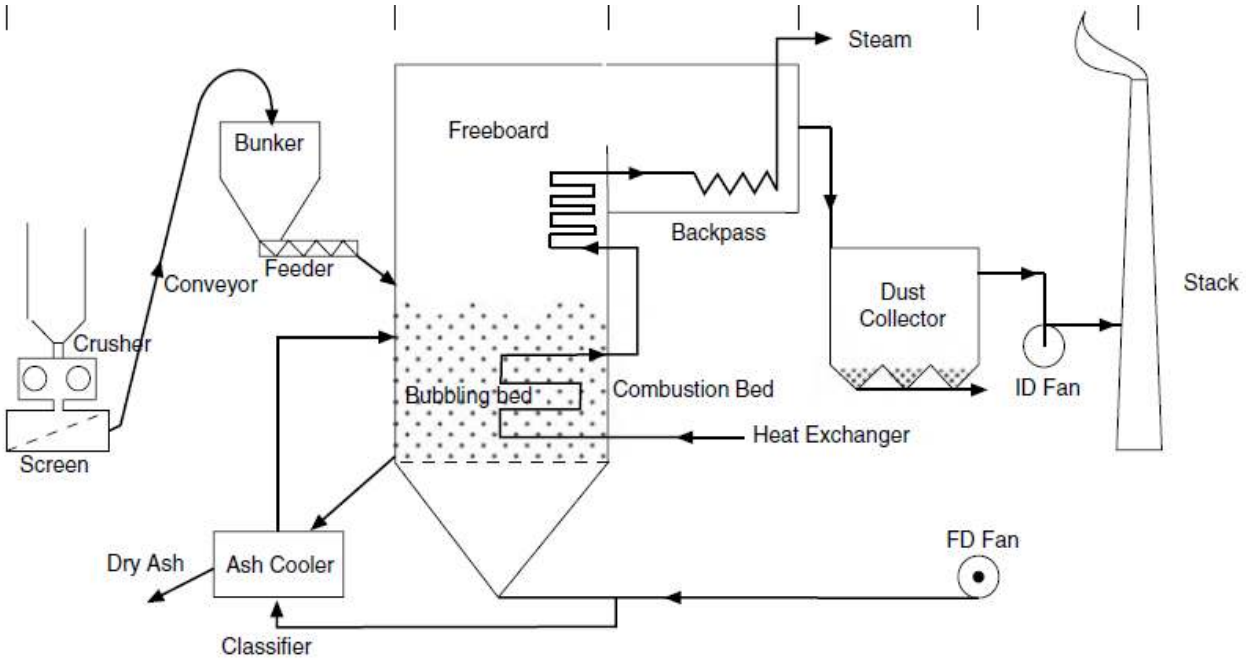
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4.1: *ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ BFBC ΚΑΙ CFBC [ΠΗΓΗ: 1]*

Παράμετροι λειτουργίας	BFBC	CFBC
Θερμοκρασία καύσης ^{o}C	760-870	800-900
Μεγέθη σωματιδίων καυσίμου mm	0-50	0-25
Ταχύτητες ρευστοποίησης m/s	1-3	3-10
Ανακύκλοφορία στερεών	Όχι	Ναι
Συγκέντρωση σωματιδίων	Υψηλή στον πυθμένα, χαμηλή στο άνω τμήμα του κλιβάνου	Σταδιακώς μειούμενη κατά μήκος του κλιβάνου
Ροή ατμού (kg/s) (διακύμανση)	36 (13-139)	60 (12-360)
Θερμοκρασία ατμού ^{o}C (διακύμανση)	466 (150-543)	506 (180-580)
Πίεση ατμού (bar) (διακύμανση)	72 (10-160)	103 (10-275)

2.4.2 Ρευστοποιημένη Κλίνη ¨Φυσαλίδων¨ (Bubbling Fluidized Bed Combustion, BFBC)

Οι κλίβανοι ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων έχουν ενδιαφέρον για μονάδες με ονομαστική δυναμικότητα του λέβητα άνω των 20MW. Στους κλιβάνους ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων (Διάγραμμα 2.4.1), το υλικό της κλίνης βρίσκεται στο κάτω μέρος του κλιβάνου. Ο πρωτεύων αέρας καύσης παρέχεται μέσω μίας πλάκας με ακροφύσια διανομής και συντελεί στην ρευστοποίηση της κλίνης. Η ταχύτητα ρευστοποίησης του αέρα κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3 m/s. Το υλικό της κλίνης είναι συνήθως πυριτική άμμος με διάμετρο περί το ένα χιλιοστό. Ο δευτερεύων αέρας καύσης παρέχεται μέσω πολλαπλών σημείων εισαγωγής, υπό μορφή ομάδων οριζοντίως διατεταγμένων ακροφυσίων, στην αρχή του άνω τμήματος του κλιβάνου (freeboard), ώστε να εξασφαλίζεται η σταδιακή προσαγωγή του αέρα για την μείωση των εκπομπών NOx. Σε αντίθεση με τους κλιβάνους ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων για καύση γαιανθράκων, η βιομάζα δεν πρέπει να τροφοδοτείται πάνω από την κλίνη, αλλά μέσα σε αυτήν, με κεκλιμένους αγωγούς κύλισης από χοάνες τροφοδοσίας του καυσίμου, λόγω της μεγαλύτερης αντιδραστικότητάς της σε σύγκριση με τους γαιάνθρακες. Για την αποφυγή διαχωρισμού, είναι αναγκαίος

ένας συγκεκριμένος συνδυασμός αναλογιών στερεών και ρευστών. Το καύσιμο αντιπροσωπεύει μόνο 1 με 2% του υλικού της κλίνης και η κλίνη πρέπει να θερμανθεί πριν την εισαγωγή του καυσίμου [6].



Διάγραμμα 2.4.1: Ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδων [15]

Τα πλεονεκτήματα όλων των κλιβάνων ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων είναι η δυνατότητά τους να ανταποκρίνονται σε ευρύ φάσμα συνθηκών, όσον αφορά στο μέγεθος των σωματιδίων και στην περιεκτικότητα σε υγρασία της βιομάζας. Επιπρόσθετα, είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιούνται μίγματα διαφόρων ειδών βιομάζας ή να συν-καίονται μαζί με άλλα καύσιμα. Ένα μεγάλο μειονέκτημα των κλιβάνων ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων είναι η δυσκολία τους να λειτουργήσουν με μερικό φορτίο, πράγμα το οποίο επιλύεται σε σύγχρονους κλιβάνους με διαίρεση της κλίνης, ή λειτουργία της σε στάδια.

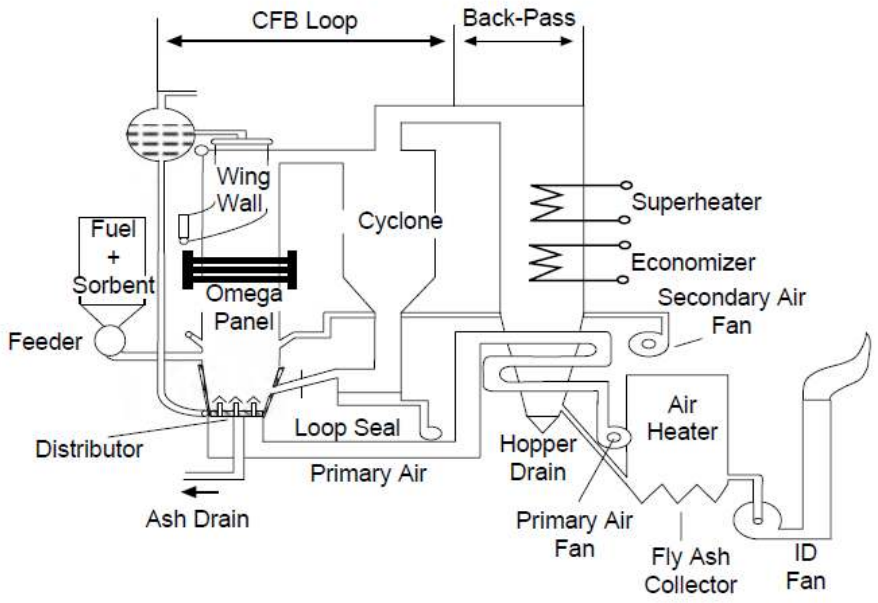
Οι βιομηχανικής κλίμακας αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιούνται για την καύση διαφόρων τύπων βιομάζας σε πολλές χώρες. Για παράδειγμα, στην Φινλανδία, έχουν εγκατασταθεί περισσότερα από 30 συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων και ο μεγαλύτερος λέβητας σε αυτά έχει δυναμικότητα 500MW [6].

2.4.3 Ρευστοποιημένη Κλίνη με Ανακυκλοφορία (Circulating Fluidized Bed Combustion, CFBC)

Αυξάνοντας την ταχύτητα ρευστοποίησης σε 5-10 m/s και χρησιμοποιώντας μικρότερα σωματίδια άμμου (0.2 με 0.4 mm σε διάμετρο), επιτυγχάνεται μία ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία. Τα σωματίδια της άμμου μεταφέρονται με το απαέριο, διαχωρίζονται σε ένα θερμό κυκλώνα ή ένα διαχωριστή τύπου U-δέσμης και ανατροφοδοτούνται στον θάλαμο καύσης (Διάγγραμα 2.4.2). Η θερμοκρασία της κλίνης (800 – 900°C) ελέγχεται με εξωτερικούς εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι ψύχουν την ανακυκλούμενη άμμο ή με υδρόψυκτα τοιχώματα. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων στο θάλαμο δεν διαμορφώνεται κλίνη με σαφής καθορισμένη μορφή και ορισμένο βάθος, όπως στην τεχνολογία BFBC. Επίσης, προκαλείται έντονος στροβιλισμός λόγω του οποίου το καύσιμο αναμιγνύεται με το υλικό της κλίνης γρήγορα και ομοιόμορφα. Το υψηλότερο τυρβώδες σε κλιβάνους ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η κλίνη εκτείνεται σε ολόκληρο το μήκος του θαλάμου (δηλ. δεν υπάρχει freeboard), έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας και την πολύ ομοιογενή κατανομή θερμοκρασίας στην κλίνη. Αυτό αποτελεί ένα πλεονέκτημα για σταθερές συνθήκες καύσης, για τον έλεγχο της σταδιακής παροχής αέρα, για την αποφυγή ανάπτυξης θερμών σημείων και τον επακόλουθο κίνδυνο σχηματισμού υαλοποιημένης τέφρας και NOx.

Επιπρόσθετα, τα παραπάνω απλοποιούν σημαντικά την τροφοδοσία του καυσίμου και την απαιτούμενη προεργασία / προετοιμασία του, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή ευέλικτη όσον αφορά στην επιλογή την ταυτόχρονη καύση πολλών καυσίμων.

Το καύσιμο και το υλικό της κλίνης τροφοδοτούνται στο χαμηλότερο τμήμα του θαλάμου και ο πρωτεύων αέρας εισέρχεται συνήθως μέσω ενός δίσκου κατανομής με οπές στο βυθό του θαλάμου. Η πυκνότητα της κλίνης μεταβάλλεται μέσα στο θάλαμο. Συγκεκριμένα, είναι μεγαλύτερη κοντά στο βυθό του θαλάμου, όπου το καύσιμο και το υλικό της κλίνης εισέρχονται. Η καύση του καυσίμου λαμβάνει χώρα καθώς αυτό ανέρχεται μέσα στο θάλαμο.



Διάγγραμα 2.4.2: Ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία [15]

Τα μειονεκτήματα των κλιβάνων ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία είναι το μεγάλο τους μέγεθος και συνεπακόλουθα η υψηλότερη τιμή τους, το ακόμα μεγαλύτερο φορτίο σκόνης στο απαέριο το οποίο εκλύεται από τον διαχωριστή σωματιδίων άμμου σε σύγκριση με αυτό από τα συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων, η υψηλότερη απώλεια υλικού από την κλίνη στην παραγόμενη τέφρα και το μικρό μέγεθος καυσίμου το οποίο απαιτείται (διαμέτρου μεταξύ 0.1 και 4 χιλιοστών) το οποίο απαιτεί υψηλότερες επενδύσεις σε προ-επεξεργασία του καυσίμου. Επιπρόσθετα, η λειτουργία τους σε μερικό φορτίο είναι προβληματική [6,7,13].

Ένα παράδειγμα της τεχνολογίας CFBC αποτελεί η μονάδα Alholmens Kraft στο Pietarsaari της Φινλανδίας, η οποία έχει δυναμικότητα παραγωγής ισχύος 240MW. Η μονάδα παράγει ατμό για παρακείμενη μονάδα παραγωγής χάρτου και για μία μονάδα η οποία παράγει ισχύ και θερμότητα. Η γειτονική μονάδα παραγωγής χάρτου και χαρτοπολτού της UPM-Kymmene προμηθεύει την μονάδα Alholmens Kraft με υπολείμματα ξύλου και φλοιών. Δεδομένου ότι η μονάδα είναι εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην οργάνωση και την λειτουργία προμήθειας καυσίμου [6].

Η ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ για την καύση ελαστικών αυτοκινήτων, τα οποία απορρίπτονται ή ανακυκλώνονται για επαναχρησιμοποίηση ή αναγόμωση. Οι εκπομπές οξειδίων μετάλλων, πτητικών οργανικών ενώσεων και οξειδίων του θείου από τα ελαστικά έχουν αποκλείσει τη δυνατότητα ανάμιξής τους σε μεγάλο ποσοστό στην τροφοδοσία συμβατικών καυστήρων. Ένα σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία μπορεί να καύσει τα ελαστικά με μετατροπή του

άνθρακα σε επίπεδα της τάξης του 100% και καλά χαρακτηριστικά εκπομπών. Με την περίσσεια αέρα, η περιεκτικότητα σε μονοξείδιο του άνθρακα διατηρείται σε επίπεδα της τάξης των 25 ppm.

2.5 ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ΚΑΙ NOX ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ FBC

Το περισσότερο σημαντικό τελικό ενδιάμεσο προϊόν της καύσης βιομάζας σε FBC είναι το CO. Ο ρύπος αυτός προέρχεται κύρια από ατελή καύση, η οποία είναι το αποτέλεσμα χαμηλής θερμοκρασίας καύσης, μη αρκετής ανάμειξης του καυσίμου με αέρα καύσης και πολύ βραχέων χρόνων παραμονής των καυσίμων αερίων στη ζώνη καύσης. Οι μεγάλης κλίμακας εφαρμογές καύσης βιομάζας προσφέρουν συνήθως καλύτερες ευκαιρίες για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας της καύσης, από ότι οι μικρής κλίμακας. Έτσι, τα επίπεδα εκπομπών CO, είναι συνήθως χαμηλότερα σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές καύσης βιομάζας [16].

Κατά τη διάρκεια της καύσης τα σχηματιζόμενα NOx (95% NO, 5% NO_2) δημιουργούνται μέσω τριών διαφορετικών διεργασιών και αντίστοιχα ονομάζονται ως ¨θερμικά¨, ¨άμεσα¨ και ¨καυσίμου¨ NOx. Τα ¨θερμικά¨ NOx σχηματίζονται όταν το άζωτο αντιδρά με το οξυγόνο στην αέρια φάση σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 1300 ^{o}C. Ο σχηματισμός των θερμικών NOx είναι ανάλογος με τη θερμοκρασία. Τα ¨άμεσα¨ NOx σχηματίζονται σε φλόγες πλούσιες σε υδρογονάνθρακες από διάσπαση ελευθέρων ριζών που περιέχουν άζωτο στο μόριό τους και πρακτικά δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία καύσης. Παράλληλα, τα ¨καυσίμου¨ NOx σχηματίζονται μέσω φυσικοχημικών μετασχηματισμών του αζώτου κατά τη διάρκεια της καύσης. Η παραγωγή τους είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας σε κανονικές συνθήκες καύσης [17,18,19].

Σε μονάδες FBC, η ικανότητα των σωματιδίων της κλίνης να απορροφούν τη θερμότητα υπερτερεί της ταχύτητας απελευθέρωσής της από την καύση και από ενεργειακή σκοπιά μπορούμε να θεωρήσουμε το αδρανές υλικό σαν μια μονάδα που έχει σταθερή θερμοκρασία [20], διατηρώντας με αυτό τον τρόπο χαμηλές της θερμοκρασίες της κλίνης. Καθώς, λοιπόν, η βιομάζα καίγεται ικανοποιητικά στις παραπάνω χαμηλές θερμοκρασίες, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) εμφανίζονται σημαντικά μειωμένες λόγω του σημαντικού περιορισμού σχηματισμού θερμικών NOx. Ο σχηματισμός NO από την οξείδωση του αζώτου του καυσίμου είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός στις μονάδες αυτές. Επιπρόσθετα, είναι δυνατό να επιτευχθούν χαμηλά επίπεδα εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx) λόγω σταδιακής παροχής αέρα, καλής ανάμιξης και χαμηλές απαιτήσεις για περίσσεια αέρα. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση πρόσθετων υλικών (όπως π.χ. ουρίας για μείωση των NOx) λειτουργεί επιτυχώς, λόγω των καλών χαρακτηριστικών ανάμιξης. Οι χαμηλές ποσότητες περίσσειας αέρα οι οποίες είναι αναγκαίες, αυξάνουν την αποδοτικότητα της καύσης και μειώνουν τον όγκο ροής του απαερίου [13,21].

Σε έναν καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης, η αποδόμηση (οξείδωση) του CO επιτυγχάνεται συνήθως διαμέσου των ομογενών αντιδράσεων με τις ρίζες O, OH και HO_2, ενώ οι συγκεντρώσεις NO ελαττώνονται

μέσω της αναγωγής τους από CO και πτητικούς H/C, πάνω στις επιφάνειες των σωματιδίων εξανθρακώματος και με τη καταλυτική συμμετοχή πολλές φορές διαφόρων οξειδίων που υπάρχουν στις παραγόμενες τέφρες [16, 22-24].

Η αντίδραση του NO με το CO αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αντιδράσεις επιτυγχάνοντας ταυτόχρονη μείωση δύο ρυπογόνων αερίων:

$NO + CO \rightarrow CO_2 + ½ N_2$

Ωστόσο, σε μεγάλες ποσότητες αέρα, το CO συμμετέχει κυρίως στην αντίδραση οξείδωσής του προς CO_2, παρά στην αντίδραση αναγωγής των NOx και έτσι με την αύξηση της περίσσειας αέρα κατά τη διεργασία της καύσης οι τελικές συγκεντρώσεις NO δεν επηρεάζονται από την παρουσία του CO.

Η αντίδραση αναγωγής NOx από τους υδρογονάνθρακες είναι η εξής:

$NOx + H/C + O_2 \rightarrow N_2 + CO_2 + H_2O$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, η παρουσία O_2 ευνοεί εν γένει την αντίδραση, ευνοώντας όμως παράλληλα και την αντίδραση οξείδωσης των υδρογονανθράκων:

$HC + O_2 \rightarrow CO_X + H_2O$

Η παράλληλη αντίδραση της καύσης του υδρογονάνθρακα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει ένα είδος ανταγωνισμού μεταξύ του NO και του O_2 για την αντίδρασή τους με το αναγωγικό μέσο. Με αύξηση της θερμοκρασίας ο ρυθμός των δύο αντιδράσεων αυξάνεται μέχρι τη θερμοκρασία στην οποία ο υδρογονάνθρακας καίγεται πλήρως. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί την καύση του υδρογονάνθρακα και έτσι το ποσοστό αναγωγής των NOx μειώνεται [24].

2.6 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΕΡΕΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η υπάρχουσα νομοθεσία, Ευρωπαϊκή και Ελληνική, όσον αφορά τις εκπομπές των αέριων ρύπων βασίζεται στις γενικές αρχές μιας κοινής στρατηγικής για την εκτίμηση και την διαχείριση της ποιότητας του αέρα και έχει σκοπό:

- τον προσδιορισμό και καθορισμό των στόχων για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος, ώστε να αποφεύγονται, να προλαμβάνονται ή να μειώνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο σύνολο του περιβάλλοντος.
- την, βάσει κοινών μεθόδων και κριτηρίων, εκτίμηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος.

- τη συγκέντρωση κατάλληλων πληροφοριών για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος και την ενημέρωση του κοινού, κυρίως μέσω της ενημέρωσης για τα όρια συναγερμού.
- τη διατήρηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος, όταν αυτή είναι καλή και τη βελτίωση της στις άλλες περιπτώσεις [25].

Τον Νοέμβριο του 2011 δόθηκε σε δημόσια διαβούλευση από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ) το σχέδιο Κοινής Υπουργικής Απόφασης για την άρση των περιορισμών στη χρήση συσσωματωμάτων βιομάζας, των γνωστών pellets, για τις εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης στις περιοχές Αθήνας και Θεσσαλονίκης. Η σχετική απαγόρευση επεβλήθη πριν 18 χρόνια (ΥΑ 10315/93), εξαιτίας του ιδιαίτερα επιβαρυμένου ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος των δύο μεγάλων αστικών κέντρων. Το ΥΠΕΚΑ, προχώρησε στην αναθεώρηση του υφιστάμενου θεσμικού πλαισίου, αναγνωρίζοντας ότι εξαιτίας της προόδου των τεχνολογιών καύσης βιομάζας οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί έχουν αρθεί. Συνεκτίμησε, επίσης, το γεγονός ότι η βιομάζα συνεισφέρει στην εξοικονόμηση ενέργειας και στον περιορισμό του κόστους για τη θέρμανση με χρήση συμβατικών καυσίμων, καθώς και ότι υπάρχει η αντίστοιχη ευρωπαϊκή εμπειρία.

Σύμφωνα με την ΥΑ οικ. 189533/2011 (ΦΕΚ 2654/Β/9-11-2011 - Ρύθμιση θεμάτων σχετικών με τη λειτουργία των σταθερών εστιών καύσης), στις νέες εγκαταστάσεις θέρμανσης, οι οποίες χρησιμοποιούν στερεά βιοκαύσιμα θα πρέπει να πληρούνται κατ΄ ελάχιστο τα ανώτατα όρια εκπομπών ρύπων CO και NOx του προτύπου ΕΛΟΤ ΕΝ 303.05/1999, σύμφωνα με την κλάση 3 (Πίνακας 2.6.1). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων CO και NOx του ηλεκτρονικού αναλυτή θα πρέπει να εκφράζονται σε περιεκτικότητα του καυσαερίου σε οξυγόνο αναφοράς 3% (ή 10% για τη βιομάζα).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6.1: *ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ CO ΚΑΙ NOX ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΣΤΕΡΕΑ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ (ΥΑ ΟΙΚ. 189533/2011 - ΦΕΚ 2654/Β/9-11-2011)*

Μέθοδος τροφοδοσίας	Ονομαστική Ισχύς	**Οριακές τιμές εκπομπών ρύπων (εκφρασμένες σε mg/m^3 και ανηγμένες σε 10% O_2) [τιμές εκφρασμένες σε ppm και ανηγμένες σε 10% O_2]**		
	(kW)	**CO**	**NOx (εκφρασμένα ως NO_2)**	
Χειροκίνητη	< 50	**5000 [4000]**	**340 [166]**	**ΥΑ οικ. 189533 07.11.2011 (ΦΕΚ 2654 Β/9-11-2011)**
	50 – 150	**2500 [2000]**		
	150 - 300	**1200 [960]**		
Αυτόματη	< 50	**3000 [2400]**		
	50 – 150	**2500 [2000]**		
	150 - 300	**1200 [960]**		

Σύμφωνα με την ίδια ΥΑ, για τις εγκαταστάσεις θέρμανσης τα μόνα επιτρεπόμενα καύσιμα είναι το πετρέλαιο θέρμανσης σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά προδιαγραφές, τα αέρια καύσιμα των εκάστοτε νόμιμων τύπων προδιαγραφών, καθώς και τα τυποποιημένα στερεά βιοκαύσιμα όπως ορίζονται στο Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 14961-1. Ειδικά για την περιοχή του Ιστορικού Κέντρου της Αθήνας η χρήση καυσίμου για τη θέρμανση νερού και χώρων των κτιρίων της ως άνω περιοχής καθορίζεται σύμφωνα με όσα προβλέπονται στις διατάξεις της Κοινής Υπουργικής Απόφασης υπ αριθμ. 4241/796 (ΦΕΚ 239/Β/2000). Επίσης, η χρήση βαρέως πετρελαίου (μαζούτ) στις εγκαταστάσεις θέρμανσης, θα καταργηθεί σε ολόκληρη τη χώρα εντός χρονικού διαστήματος ενός έτους μετά την έναρξη ισχύος της απόφασης της ΥΑ οικ. 189533/2011. Επιπλέον, στα κτίρια με εγκαταστάσεις θέρμανσης απαγορεύτηκε η εγκατάσταση και η χρήση καπνοσυλλεκτών.

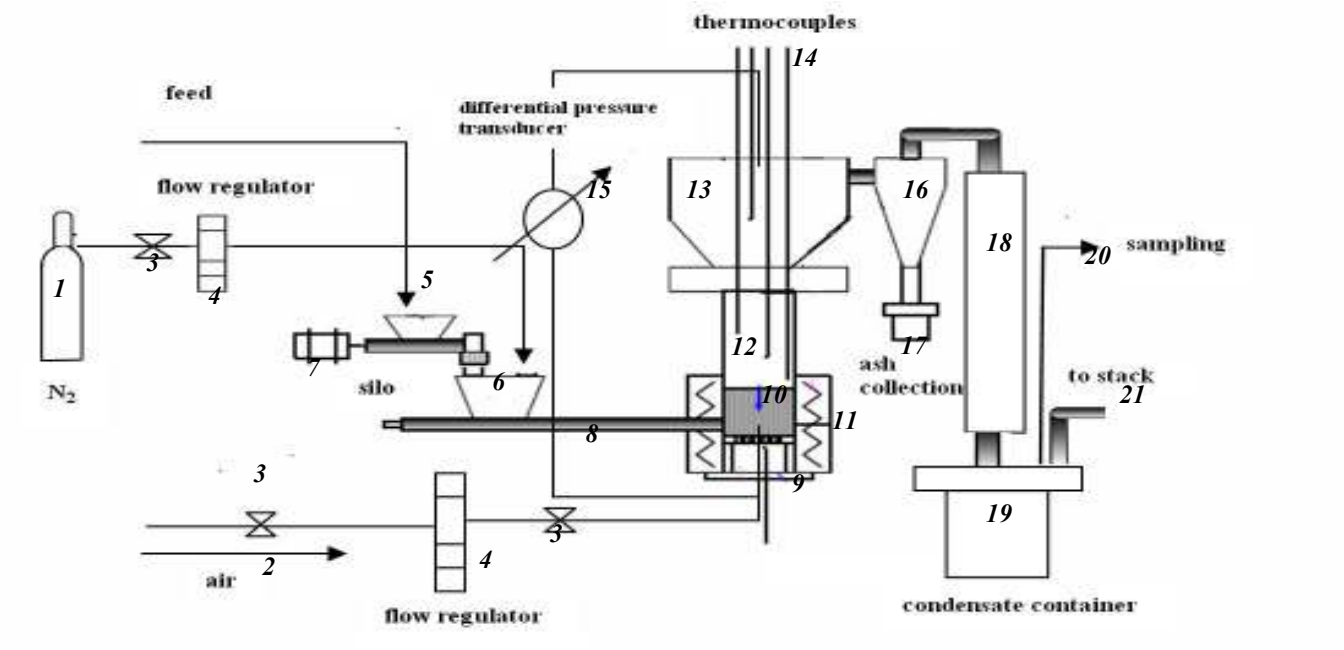
Τέλος, σύμφωνα με την ίδια διάταξη, για τις νέες εγκαταστάσεις θέρμανσης που κάνουν χρήση στερεών βιοκαυσίμων, ο εγκαταστάτης υποχρεούται να χορηγεί στον υπεύθυνο της εγκατάστασης επίσημες και επικυρωμένες από τον κατασκευαστή του λέβητα οδηγίες χρήσης και συντήρησης του συστήματος, όπου θα περιγράφονται αναλυτικά τα ενδεδειγμένα για το λέβητα στερεά βιοκαύσιμα, οι συνθήκες αποθήκευσής τους, τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία πρέπει να εκτελείται καθαρισμός της καμινάδας, καθώς και κάθε άλλη απαραίτητη λεπτομέρεια, ώστε να επιτυγχάνονται κατά την λειτουργία τους οι οριακές τιμές εκπομπών του Πινάκα 2.6.1.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μια εργαστηριακής κλίμακας συσκευή ρευστοποιημένης κλίνης, στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από 5 μέρη (Διάγραμμα 3.1.1). Το σύστημα τροφοδοσίας, τον αντιδραστήρα, το σύστημα συλλογής της ιπτάμενης τέφρας, το σύστημα καταγραφής διαφόρων αερίων εξόδου και τέλος το σύστημα καταγραφής παραμέτρων.



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

Διάγραμμα 3.1.1: Πειραματική διάταξη ατμοσφαιρικής ρευστοποιημένης κλίνης του εργαστηρίου Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων

Εικόνα 3.1. Εποπτική φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης

3.1.1 Σύστημα Τροφοδοσίας

Το σύστημα τροφοδοσίας των στερεών καυσίμων αποτελείται από δύο σιλό, τα οποία διαθέτουν κοχλίες που περιστρέφονται με ηλεκτρικό κινητήρα και μειωτήρα έκαστο. Το πρώτο σιλό χρησιμεύει για την αποθήκευση του καυσίμου. Στην άκρη του σιλό αυτού βρίσκεται ο πρώτος ατέρμονας κοχλίας, ο οποίος καλείται δοσιμετρικός. Ο δοσιμετρικός κοχλίας τροφοδοτεί το δεύτερο σιλό με μικρά «πακέτα» καυσίμου μέσω κατακόρυφα τοποθετημένου σωλήνα διαμέτρου 2 in. Το ένα σιλό είναι δοσιμετρικό, ενώ το δεύτερο προωθεί το καύσιμο μίγμα προς τον αντιδραστήρα. Στη βάση του δεύτερου σιλό διέρχεται ο τροφοδοτικός κοχλίας που τροφοδοτεί το καύσιμο στο εσωτερικό της κλίνης, σε σημείο που βρίσκεται περίπου 20 mm πάνω από τον διασκορπιστή του αέρα ρευστοποίησης. Ο τροφοδοτικός κοχλίας περιστρέφεται πιο γρήγορα από τον δοσιμετρικό, οπότε αποφεύγεται η συγκέντρωση καυσίμου στο δεύτερο σιλό και εξομαλύνεται η παροχή καυσίμου στην κλίνη. Η παροχή του καυσίμου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα που δίνει κίνηση στον τροφοδοτικό κοχλία. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ρυθμίζεται μέσω κατάλληλου αντιστροφέα συχνότητας (inverter). Στο δεύτερο σιλό διοχετεύεται μια μικρή ροή αζώτου προκειμένου να αποφευχθεί αναστροφή της ροής των καυσαερίων.

Ένα υδρόψυκτο στεφάνι τοποθετήθηκε γύρω από το σωλήνα που καλύπτει τον κοχλία τροφοδοσίας, για να αποτρέψει την καύση των καυσίμων στο εσωτερικό του σωλήνα, πριν από την είσοδο τους στον καυστήρα. Σαν κοχλίες τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκαν ανοξείδωτα τρυπάνια για τσιμέντο. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν πολύ χονδρό πυρήνα ο οποίος ερχόμενος σε επαφή με το εσωτερικό του αντιδραστήρα πυρώνει με αποτέλεσμα το καύσιμο στη γραμμή τροφοδοσίας να θερμαίνεται και να πυρολύεται. Αυτός βέβαια είναι άλλος ένας λόγος για τον οποίο πάντα υπάρχει μέριμνα για υπερπίεση αζώτου στο σιλό, η οποία κρατά τα παραγόμενα αέρια όσο το δυνατό πιο κοντά στην είσοδο του αντιδραστήρα, και σε συνδυασμό με την άριστη στεγανοποίηση των σιλό, αποφεύγεται η διαρροή αερίων πυρόλυσης στον περιβάλλοντα χώρο.

Εικόνα 3.1.2. Σύστημα τροφοδοσίας

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

3.1.2 Αντιδραστήρας

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

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

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

3.1.3 Σύστημα Συλλογής Ιπτάμενης Τέφρας

Το καυσαέριο από την κλίνη σωματιδίων οδηγείται μέσω σωληνώσεων σε έναν κυκλώνα, προκειμένου να απομακρυνθεί η ιπτάμενη τέφρα από την καύση, καθώς και άλλα σωματίδια (άκαυστα ή αδρανές). Η τέφρα που δεσμεύεται συλλέγεται σε δοχείο που έχει προσαρμοστεί στο κάτω μέρος του κυκλώνα.

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

3.1.4 Σύστημα Δειγματοληψίας και Ανάλυσης Καυσαερίων

Μετά τον κυκλώνα και το δοχείο συλλογής της ιπτάμενης τέφρας τοποθετείται η γραμμή δειγματοληψίας καυσαερίου. Το δείγμα του καυσαερίου οδηγείται σε ψύκτη για την απομάκρυνση των υδρατμών. Το ξηρό πλέον δείγμα καυσαερίου διοχετεύεται σε on-line αναλυτή καυσαερίων τύπου Madur Ga-40plus της Sick-Maihak, που είναι εξοπλισμένος με ενσωματωμένο φίλτρο και ξηραντήρα.

Ο αναλυτής καταγράφει την περιεκτικότητα του καυσαερίου σε οξυγόνο (O_2), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του θείου (SO_2) και οξείδια του αζώτου (NOx). Καταγράφει, επίσης, την απώλεια θερμότητας, τη θερμοκρασία καυσαερίων και το συντελεστή περίσσειας αέρα λ. Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

α) Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας	β) Καταγραφικός αναλυτής Madur

Εικόνα 3.1.3. Σύστημα συλλογής ιπτάμενης τέφρας (α), και Καταγραφικός αναλυτής Madur (β)

3.1.5 Σύστημα Καταγραφής Παραμέτρων

Θερμοστοιχεία τύπου Κ έχουν εγκατασταθεί σε διάφορα σημεία της εγκατάστασης ρευστοποιημένης κλίνης. Αυτά παρέχουν συνεχώς ενδείξεις θερμοκρασίας με ακρίβεια ±5 ^{o}C. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η δυνατότητα ηλεκτρονικής καταγραφής των ενδείξεων τους μέσω κατάλληλου συστήματος καταγραφής δεδομένων.

Επίσης, χρησιμοποιείται διαφορικό μανόμετρο, για τον προσδιορισμό της πτώσης πίεσης στην κλίνη κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

3.2 ΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

3.2.1 Επιλογή και Προέλευση Καυσίμων

Τα καύσιμα που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα κλαδευτικά υπολείμματα πορτοκαλιών και τα υπολείμματα επεξεργασίας πορτοκαλιών. Τα κλαδευτικά υπολείμματα χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο είδη: α) τη ξυλώδη βιομάζα και β) την πράσινη βιομάζα αποτελούμενη από φύλλα πορτοκαλιάς. Τα υπολείμματα από την επεξεργασία των φρούτων συνίστανται στις φλούδες των πορτοκαλιών. Συνοπτικά, εξετάστηκε η καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη των παρακάτω καυσίμων:

1. Ξύλο πορτοκαλιάς
2. Φύλλα πορτοκαλιάς

3. Φλούδα πορτοκαλιάς
4. Μείγμα των παραπάνω καυσίμων

Η επιλογή του καυσίμου είχε ως στόχο την πλήρη αξιοποίηση των υπολειμμάτων κατεργασίας φρούτων για την παραγωγή φρουτοποτού, σε όλο το κύκλο ζωής του προϊόντος, από το δέσιμο των καρπών, έως το κόψιμο των φρούτων και την τελική επεξεργασία τους. Το είδος της καλλιέργειας που επιλέχθηκε, η πορτοκαλιά, ανήκει στην κατηγορία των εσπεροειδών και αποτελεί χαρακτηριστικό αγροτικό προϊόν των Μεσογειακών χωρών και κατ' επέκταση της Κρήτης.

Η συλλογή της ξυλώδους και πράσινης βιομάζας πραγματοποιήθηκε σε έναν πορτοκαλαιώνα στο Δήμο Σούδας του ν. Χανίων. Κατόπιν, τα δείγματα μεταφέρθηκαν και αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων για να προετοιμαστούν για καύση. Η φυτική βιομάζα των καρπών συλέχθηκε από το εργοστάσιο της ΒΙΟΧΥΜ Α.Ε. και μεταφέρθηκε στο εργαστήριο, όπου και προξηράνθηκε.

3.2.2 Προετοιμασία Δειγμάτων

Τα δείγματα αεροξηράνθηκαν εντός του εργαστηρίου, ακολούθησε άλεση στον μαχαιρόμυλο (Pulverisette 15 της εταιρίας FRITSCH) και κατόπιν κοσκίνηση σε μια συσκευή δονούμενων κόσκινων (μοντέλο Analysette 3 PRO της εταιρείας FRITSCH) προκειμένου να αποκτήσουν κοκκομετρία +850 -2000 μm. Για το αρχικό άλεσμα της ξύλινης βιομάζας, που συνίσταται από κλαδιά, χρησιμοποιήθηκε ένας κλαδοτεμαχιστής και στη συνέχεια το δείγμα κοσκινίστηκε για να αφαιρεθούν τα χονδρόκοκκά υλικά, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα στη μετέπειτα λειτουργία του μαχαιρόμυλου. Η κοκκομετρία όλων των δειγμάτων προσδιορίστηκε πειραματικά με γνώμονα την ορθότερη συμπεριφορά τους κατά τη διεργασία της καύσης στη ρευστοποιημένη κλίνη.

α) Μαχαιρόμυλος

β) Δονούμενο σύστημα κοσκίνων

γ) Αρχική κοκκομετρία φλούδας πορτοκάλι

δ) Τελική κοκκομετρία και ομογενοποίηση υλικού φλούδας πορτοκαλιού

Εικόνα 3.2.1. Εξοπλισμός άλεσης και κοσκίνησης και κοκκομετρίες δειγμάτων πορτοκαλιού

3.2.3 Ποιοτικός Χαρακτηρισμός Καυσίμων

Για το χαρακτηρισμό των καυσίμων βιομάζας που μελετήθηκαν απαιτήθηκε η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από όλα τα υλικά, κοκκομετρίας –425μm. Κατά τον χημικό χαρακτηρισμό που ακολούθησε έγινε προσεγγιστική ανάλυση σε προγραμματιζόμενους κλιβάνους υψηλών θερμοκρασιών (προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας, καύσιμης ύλης και τέφρας), στοιχειακή ανάλυση με τον 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.

3.2.3.1 Προσεγγιστική Ανάλυση

- Προσδιορισμός υγρασίας.

Σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM E871, αντιπροσωπευτικό δείγμα 2 g. ζυγίζεται σε αναλυτικό ζυγό με ακρίβεια 0,1 mg και θερμαίνεται για 2 ώρες στους 110 ^{o}C. Κατόπιν, φυλάσσεται για 30 λεπτά σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας και στη συνέχεια ξαναζυγίζεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρι 2 διαδοχικές τιμές να έχουν διαφορά βάρους 0,1 mg. Η υγρασία υπολογίζεται από τη σχέση (3.1).

$$\text{Υγρασία \%} = \left[\frac{(W-B)}{W}\right]x100 \qquad (3.1)$$

Όπου, W = το αρχικό βάρος του δείγματος σε g.

B = το τελικό βάρος του δείγματος μετά ξήρανση σε g.

- Προσδιορισμός τέφρας.

Ο προσδιορισμός της τέφρας πραγματοποιήθηκε κατά τα πρότυπα ASTM D 1102-84, σύμφωνα με τα οποία τα δείγματα καίγονται σε θερμοκρασία 600 ^{o}C. Μετά την καύση, τα δείγματα μεταφέρονται σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας, έως ότου να φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατόπιν ζυγίζονται στον αναλυτικό ζυγό και ο προσδιορισμός της τέφρας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Τέφρα \%} = \left[\frac{(F-G)}{W}\right]x100 \qquad (3.2)$$

Όπου F = βάρος χωνευτηρίου και τέφρας σε g.
G = βάρος χωνευτηρίου σε g.
W = αρχικό βάρος δείγματος σε g.

3.2.3.2 Στοιχειακή ανάλυση

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του άνθρακα, του υδρογόνου, του αζώτου και του θείου έγινε με τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O του εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος (βλ. Εικόνα 3.2.2). Ποσότητα δείγματος (της τάξης των mg) τοποθετείται σε μια κάψα κασσίτερου και στη συνέχεια πέφτει σε μια στήλη χαλαζία στους 1020 ^{o}C με σταθερή ροή ηλίου (He), που αποτελεί το αέριο μεταφοράς. Μερικά δευτερόλεπτα πριν την πτώση των δειγμάτων στη στήλη καύσης, το ρεύμα αέρα εμπλουτίζεται με οξυγόνο υψηλής περιεκτικότητας, ώστε να επικρατήσει ένα ισχυρό οξειδωτικό περιβάλλον που εγγυάται την πλήρη καύση ακόμα και των θερμικά ανθεκτικών ουσιών. Στη συνέχεια, το αέριο καύσης περνάει μέσα από μια

καταλυτική στήλη με σκοπό την αναγωγή των NOx και των θειικών ενώσεων σε N_2 και SO_2 αντίστοιχα. Τα προκύπτοντα τέσσερα συστατικά της καύσης ανιχνεύονται από ένα ανιχνευτή Θερμικής Αγωγιμότητας κατά σειρά N_2, CO_2, H_2O και SO_2. Το σύνολο C, H, N, S υπολογίζεται με ακρίβεια 0,1 mg. Ο λόγος μεταξύ των στοιχείων είναι περισσότερο σημαντικός, δεδομένου ότι ελαχιστοποιεί το σφάλμα του οργάνου. Το μέγεθος των δειγμάτων περιορίζεται από τη συνολική περιεκτικότητα σε άνθρακα. Ο στοιχειακός αναλυτής βελτιστοποιείται με τη χρήση 1-2mg δείγματος, σε μια συνολική περιεκτικότητα σε άνθρακα 80-200mg. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι διαδικασίες, γίνονται διορθώσεις ως προς τη βαρυτομετρική πίεση και άλλες παρεμβολές που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της καύσης και λαμβάνονται καταγεγραμμένα τα συνολικά ποσοστά C, H, N, S συμπεριλαμβανομένων του άνθρακα των ανθρακικών ενώσεων, του υδρογόνου της υγρασίας και της ενυδάτωσης των πυριτικών ενώσεων. Αν το ποσοστό της υγρασίας είναι γνωστό, τα αποτελέσματα υπολογίζονται επί ξηρού.

Το ποσοστό οξυγόνου (επί ξηρού δείγματος) προσδιορίζεται από τη διαφορά των C, H, N, S συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού τέφρας (επί ξηρού δείγματος) από το 100, όπως φαίνεται από τη σχέση:

$$O\% = 100 - [C\% - H\% - N\% - S\% - \text{Τέφρα}\%] \quad (3.3)$$

Η σχέση αυτή ισχύει με την παραδοχή ότι στο δείγμα είτε δεν περιέχονται ποσότητες άλλων στοιχείων, είτε οι ποσότητες αυτές είναι αμελητέες.

Εικόνα 3.2.2. Αυτόματος στοιχειακός αναλυτής EuroVector, Elemental Analysis CHNS-O

3.2.3.3 Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης

Ο προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης των τριών δειγμάτων έγινε με τη βοήθεια του Αυτόματου Θερμιδόμετρου AC-350 της Leco, του εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων του

τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Αφού πρώτα γίνει βαθμονόμηση του θερμιδόμετρου, η υπό εξέταση ουσία (περίπου 0,5 gr) τοποθετείται σε ειδικό υποδοχέα μέσα από τον οποίο περνά λεπτό σύρμα που χρησιμεύει για την ανάφλεξη του δείγματος. Στη συνέχεια, ο υποδοχέας τοποθετείται μέσα σε δοχείο που περιβάλλεται από νερό και ονομάζεται 'βόμβα', το οποίο με τη σειρά του τοποθετείται σε μια μάζα νερού στο εσωτερικό του θερμιδόμετρου. Το δείγμα καίγεται σε περιβάλλον καθαρού οξυγόνου και υψηλής πίεσης (περίπου 440 psi), ενώ πριν καεί μετράται η θερμοκρασία του νερού που περιβάλλει τη 'βόμβα'. Η θερμοκρασία του νερού μετριέται με ένα ηλεκτρικό θερμόμετρο κάθε 6 λεπτά. Η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπολογίζεται και τα αποτελέσματα διορθώνονται σύμφωνα με αυτή. Ακόμα, γίνεται διόρθωση βάσει της περιεκτικότητας σε N_2, S και υγρασία του δείγματος. Έτσι, η θερμογόνος δύναμη προσδιορίζεται από την αλλαγή της θερμοκρασίας του νερού και τα αποτελέσματα εκτυπώνονται. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, έγινε μέτρηση της θερμογόνου δύναμης κάθε δείγματος δύο φορές.

Η μέτρηση του θερμιδόμετρου αναφέρεται στην Α.Θ.Δ. 'επί ξηρού'. Γνωρίζοντας την Α.Θ.Δ. επί ξηρού, το ποσοστό υγρασίας επί του φυσικού δείγματος Wφ και το ποσοστό τέφρας επί του φυσικού δείγματος Αφ, μπορεί να υπολογιστεί η ανώτερη και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη επί φυσικού βάσει των τύπων:

$$Α.Θ.Δ._{φυσ} = Α.Θ.Δ_{ξηρ} * (1-W_φ) \quad (3.4)$$

$$Κ.Θ.Δ._{φυσ} = Α.Θ.Δ._{φυσ} – Α' \quad (3.5)$$

Όπου Α'= [9Υ + WΦ]*2509 (kJ/kg)

Υ= % κ.β. περιεκτικότητα του δείγματος σε υδρογόνο (στοιχ. ανάλυση)

2509: η θερμότητα εξαέρωσης του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση

3.3 ΤΟ ΑΔΡΑΝΕΣ ΥΛΙΚΟ

Χρησιμοποιήθηκε Na-ούχος άστριος, πυκνότητας ρ_s= 2670 kg/m^3 και μέσης διαμέτρου κόκκων d_s=505 μm (κλάσμα 425 μm - 600 μm), στον οποίο πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτινών Χ (XRD) και η σύσταση των ορυκτών από τα οποία αποτελείται είναι: SiO_2=67.7%, Al_2O_3=20.3%, Fe_2O_3=0.05%, CaO=0.5%, MgO=0.05%, TiO_2=0.05%, Na_2O=11.2% και K_2O=0.15%. Για την επίτευξη της κατάλληλης κοκκομετρίας χρησιμοποίηθηκε ένας σφαιρόμυλος για τη λειοτρίβηση του υλικού και κατόπιν μια συσκευή δονούμενων κόσκινων.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι το αδρανές υλικό αποτελείται κατά κύριο λόγο από πυριτικά και αργιλικά άλατα, ενώ η περιεκτικότητά του σε ασβέστιο είναι αμελητέα, που σημαίνει ότι ο άστριος δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση φυσικής αποθείωσης των καυσαερίων. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αναλλοίωτη διατήρησή του κατά τη διάρκεια της καύσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιούνται περίπου 800 g άστριου για την πλήρωση της κλίνης.

3.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι παράμετροι λειτουργίας της ρευστοποιημένης κλίνης αναφέρονται στις συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα και στα χαρακτηριστικά του αδρανούς και του καυσίμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

Οι παράμετροι που αφορούν στη λειτουργία του αντιδραστήρα είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του, η ελάχιστη ταχύτητα του εισαγόμενου αέρα, ώστε να επιτυγχάνεται ρευστοποίηση του αδρανούς, καθώς και ο ρυθμός και η ποσότητα του εισαγόμενου αέρα.

Επίσης, θα πρέπει να καθοριστούν το είδος, η κοκκομετρία και η ποσότητα τόσο του αδρανούς υλικού της κλίνης, όσο και του καυσίμου. Τέλος, για το αδρανές που έχει επιλεγεί, θα πρέπει να υπολογιστεί το ελάχιστο πορώδες του στη κλίνη.

3.4.1 Θερμοκρασία λειτουργίας

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

3.4.2 Είδος, ποσότητα και κοκκομετρία αδρανούς

Οι τρεις αυτές παράμετροι του αδρανούς υλικού της κλίνης προσδιορίστηκαν πειραματικά. Η ποσότητα και η κοκκομετρία του νατριούχου άστριου, που επιλέχθηκε σαν αδρανές υλικό, προσδιορίστηκε παραμετρικά, με στόχο να μπορεί να επιτευχθεί ρευστοποίηση, χωρίς το αδρανές υλικό να παρασύρεται εκτός αντιδραστήρα και να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αυτού και της παραγόμενης από τη καύση τέφρας. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 800 g άστριου κοκκομετρίας 425 μm – 600 μm.

3.4.3 Είδος, ποσότητα και κοκκομετρία καυσίμου

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, τα καύσιμα που θα μελετηθούν στο πείραμα είναι ξύλο, φύλλο και φλούδα πορτοκαλιάς. Η ποσότητα εισαγωγής περιλάμβανε 1 kg καυσίμου. Τέλος, η κοκκομετρία προσδιορίστηκε παραμετρικά, με σκοπό να αποφεύγονται φαινόμενα άκαυστων σωματιδίων και να είναι σαφής ο διαχωρισμός της παραγόμενης από το καύσιμο τέφρας και του αδρανούς υλικού της κλίνης. Έτσι, με βάση τις απαιτήσεις αυτές, η κοκκομετρία που προέκυψε είναι 850 μm – 2000 μm.

3.4.4 Ελάχιστο πορώδες της κλίνης του αδρανούς

Το πορώδες μιας ρευστοποιημένης κλίνης αυξάνεται με την αύξηση της φαινόμενης ταχύτητας. Το ελάχιστο πορώδες ρευστοποίησης είναι το πορώδες ε* του στρώματος, όταν αρχίζει η πραγματική ρευστοποίηση. Το πορώδες ε* της κλίνης εξαρτάται από το είδος του υλικού και γενικώς αυξάνεται με την ελάττωση του μεγέθους των σωματιδίων. Σημειώνεται ότι στις τεχνικές εφαρμογές, ως ελάχιστο πορώδες λαμβάνεται το πορώδες της σταθερής κλίνης.

Ως γνωστόν το πορώδες, ε, εκφράζεται με το πηλίκο του όγκου των κενών, προς τον ολικό όγκο, οπότε:

$$\varepsilon = \frac{V_{\kappa\varepsilon\nu\acute{\omega}\nu}}{V_{o\lambda\iota\kappa\acute{o}}} = \frac{V_{o\lambda\iota\kappa\acute{o}} - V_{\sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon\acute{\omega}\nu}}{V_{o\lambda\iota\kappa\acute{o}}} = 1 - \frac{V_{\sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon\acute{\omega}\nu}}{V_{o\lambda\iota\kappa\acute{o}}} \tag{3.5}$$

Η πυκνότητα του άστριου, ρ_s, που χρησιμοποιήθηκε, ισούται με ρs= 2670 kg/m^3, ενώ η μάζα του αστρίου που τοποθετείται στον αντιδραστήρα είναι 800 g, οπότε:

$$V_{\sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon\acute{\omega}\nu} = \frac{m_{\sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon\acute{\omega}\nu}}{\rho_{\sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon\acute{\omega}\nu}} = \frac{0.8\ kg}{2670\ kg/m^3} = 2.99*10^{-4}\ m^3 \tag{3.6}$$

Το εργαστήριο Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων διαθέτει εκτός του αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης και μία προσομοίωση αυτού, από plexiglas, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.4.1 και αναφέρεται ως κρύο μοντέλο. Με τη βοήθεια του κρύου μοντέλου είναι δυνατή η οπτική παρατήρηση του ύψους, h, που καταλαμβάνει το αδρανές στον πυρήνα του αντιδραστήρα, το οποίο είναι 14.5 εκατοστά του μέτρου. Εφόσον, η διάμετρος βάσης του κυλίνδρου του αντιδραστήρα είναι 7 cm, ο όγκος, τον οποίο καταλαμβάνει στον αντιδραστήρα το αδρανές υλικό υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{o\lambda\iota\kappa\acute{o}} = \pi * \frac{d^2}{4} * h = 3{,}14 * \frac{0{,}07^2 m^2}{4} * 0{,}145\ m = 5.58*10^{-4}\ m^3 \tag{3.7}$$

Εικόνα 3.4.1: Προσομοίωση αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης

Με τη βοήθεια των σχέσεων (3.6) και (3.7), η σχέση (3.5) προσδιορίζει το πορώδες του αδρανούς υλικού της κλίνης ε=0.46 ή 46%.

3.4.5 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης

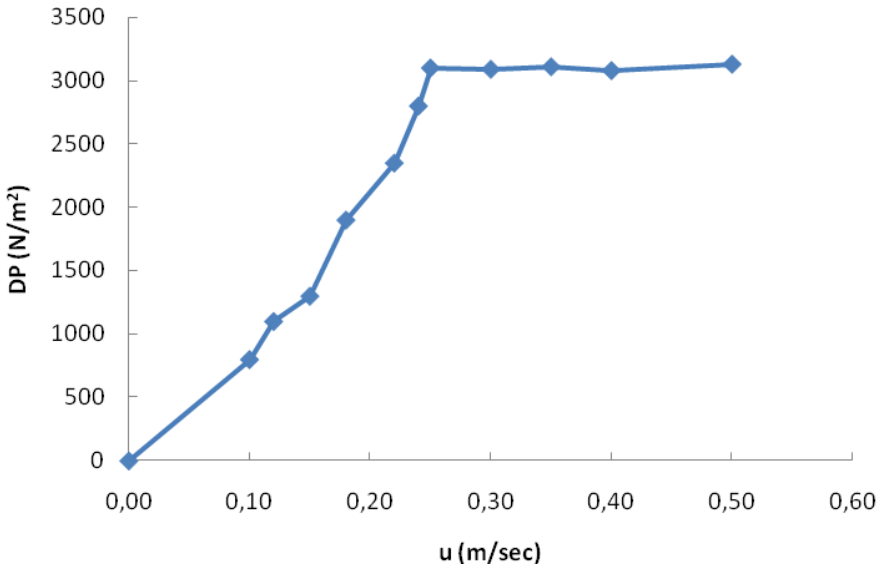
Ως ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης ορίζεται η ταχύτητα, υπό την οποία ο αέρας, που εισάγεται στη κλίνη, είναι ικανός να προκαλέσει το φαινόμενο της ρευστοποίησης στο αδρανές υλικό αυτής. Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης υπολογίστηκε πειραματικά, με τη βοήθεια της συσκευής του κρύου μοντέλου.

Στην κλίνη στερεών σωματιδίων διοχετεύτηκε αέρας από τον πυθμένα με χαμηλή ροή και ταυτόχρονα υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης της πίεσης πριν και μετά το στρώμα των στερεών σωματιδίων. Τα φαινόμενα που συμβαίνουν αυξάνοντας σταδιακά τη ροή του αέρα είναι τα εξής: Αρχικά, ο αέρας που διοχετεύεται στη κλίνη περνάει διαμέσου των πόρων που σχηματίζουν τα στερεά σωματίδια, χωρίς να παρατηρείται κάποιο ιδιαίτερο φαινόμενο. Αυξάνοντας τη ροή, μέρος του αέρα θα συνεχίσει να περνά διαμέσου των σωματιδίων και θα παρατηρείται μια διαφορά πίεσης πριν και μετά το στρώμα αυτών, η οποία θα αυξάνεται, όσο αυξάνεται η ροή. Για κάποια τιμή της ροής του αέρα, η δύναμη που ασκείται στα στερεά σωματίδια είναι ικανή να υπερνικήσει το βάρος των σωματιδίων αυτών. Στο σημείο αυτό, παρατηρείται εξίσωση των τιμών της πίεσης πριν και μετά το στρώμα των σωματιδίων και η ταχύτητα του αέρα που αντιστοιχεί στη ροή αυτή, αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης του συγκεκριμένου στρώματος των στερεών σωματιδίων. Σε διάγραμμα πτώσης πίεσης (N/m^2), συναρτήσει ταχύτητας αέρα

(m/s), η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης προσδιορίζεται ως η ταχύτητα στην οποία συμβαίνει αλλαγή κλίσης της ευθείας του διαγράμματος.

Σημειώνεται ότι από τις τιμές της πτώσης πίεσης έχει αφαιρεθεί η πτώση πίεσης που οφείλεται στο πορώδες δίσκο που συγκρατεί το αδρανές και επιτρέπει στον αέρα να περνά διαμέσου αυτού. Αυτό επετεύχθη εκτελώντας πείραμα με κενό αντιδραστήρα.

Στο Διάγραμμα 2 απεικονίζεται η πτώση πίεσης (N/m^2), συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα (m/s).



Διάγραμμα 3.4.2: Προσδιορισμός της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης, ως συνάρτηση της πτώσης πίεσης διαμέσου στρώματος στερεών σωματιδίων

Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης που προκύπτει πειραματικά, όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχεί σε $\mathbf{u_{min}}$**= 0.245 m/s**.

3.4.6 Υπολογισμός του στοιχειομετρικού για την καύση αέρα

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου αέρα για τη καύση γίνεται με τη βοήθεια της στοιχειακής ανάλυσης του καυσίμου, θεωρώντας ότι οι αντιδράσεις που γίνονται στον αντιδραστήρα, όταν υπάρχει τέλεια καύση είναι οι ακόλουθες.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$

$$S \ + O_2 \rightarrow SO_2$$

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη, που αναφέρονται στην πραγματική καύση 1 kg καυσίμου (μίγμα από στοιχεία και χημικές ενώσεις), στο οποίο η i χημική ένωση περιέχεται σε αναλογία μάζας γ_i = kg $_{\text{i συστατικού}}$ / kg $_{\text{καυσίμου}}$, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις (Παπαγεωργίου, 1991):

Απαιτούμενη ποσότητα, μ, και όγκος, V, αέρα.

$$\mu_{LoT} = \sum_{(i)} \left(\mu_{(LoT)_i} * \gamma_i \right) \text{, σε kg / kg}_{\text{καυσίμου}} \tag{3.8}$$

$$V_{LoT} = \sum_{(i)} \left(V_{(LoT)_i} * \gamma_i \right) \text{, σε m}_n^3 \text{ / kg}_{\text{καυσίμου}} \tag{3.9}$$

όπου τα $\mu_{(LoT)i}$ και $V_{(LoT)i}$ υπολογίζονται από τον Πίνακα 3.4.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4.1 *ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ $\mu_{(LOT)I}$ και $V_{(LOT)I}$.*

Στοιχείο ή Ενωση	Απαιτούμενο Οξυγόνο		Απαιτούμενος Αέρας	
	$\mu_{O_{2o}}(kg/kg)$	$V_{O_{2o}}(m_n^3/kg)$	μ_{LoT} (kg/kg)	V_{LoT} (m_n^3/kg)
C	2.6642*γ_c	1.864*γ_c	11.4807*γ_c	8.8766*γ_c
H_2	7.9365*γ_{H2}	5.5531*γ_{H2}	34.2002*γ_{H2}	26.4433*γ_{H2}
O_2	-γ_{O2}	-0.6997*γ_{O2}	-4.3092*γ_{O2}	-3.3319*γ_{O2}
N	1.1422* γ_N	0.7991* γ_N	4.920* γ_N	3.8052* γ_N
S	0.9979*γ_S	0.6982*γ_S	4.3002*γ_S	3.3248*γ_S

Σημείωση: Ο δείκτης ΄L΄ υποδηλώνει τον αέρα, ο δείκτης ΄ο΄ στοιχειομετρική καύση και ο δείκτης ΄Τ΄ τον αέρας χωρίς υγρασία.

Σύμφωνα λοιπόν με τη στοιχειακή ανάλυση, η οποία δίνεται στο υποκεφάλαιο 3.2.3.2, και χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 3.4.1, καθώς και τις σχέσεις (3.8), (3.9), προκύπτει ότι, όσον αφορά στο ξύλο πορτοκαλιάς, η απαιτούμενη ογκομετρική παροχή του αέρα (χωρίς υγρασία) για την καύση ενός κιλού καυσίμου είναι 4,13 m^3/h, για τα φύλλα είναι 3,62 m^3/h, ενώ για τις φλούδες είναι 3,73 m^3/h.

3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

3.5.1 Προετοιμασία Πειραμάτων

Για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη διεξαγωγή και η ακρίβεια των πειραμάτων, έπρεπε να γίνουν ορισμένες ενέργειες πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Η προετοιμασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- ✓ **Αντιδραστήρας:** Άδειασμα του αντιδραστήρα και των σιλό, αφαίρεση και καθαρισμός του δίσκου (διασκορπιστή).
- ✓ **Ιπτάμενη τέφρα:** Καθαρισμός δοχείου τέφρας, προκειμένου να διασφαλιστεί η καθαρότητα των παραγόμενων τεφρών.
- ✓ **Υλικό κλίνης:** Αρχικά, αφαιρείται ολόκληρη η ποσότητα του αδρανούς υλικού της κλίνης από το προηγούμενο πείραμα. Στη συνέχεια, το υλικό κοσκινίζεται για να αφαιρεθούν τα άκαυστα υλικά και να ανακτηθεί η ποσότητα που βρίσκεται στην επιθυμητή κοκκομετρία. Κατόπιν, προστίθεται ποσότητα αδρανούς υλικού της ίδιας κοκκομετρίας, μέχρις ότου συμπληρωθεί η ποσότητα των 800 g.
- ✓ **Αντιδραστήρας:** Προσεκτικός καθαρισμός του αντιδραστήρα με αέρα, που διοχετεύεται από δύο σημεία εισαγωγής: από το πανω μέρος του κωνικού τμήματος και από τη μέση του κυλινδρικού τμήματος του αντιδραστήρα. Κατόπιν, ακολουθεί κλείσιμο του αντιδραστήρα και συναρμολόγηση.
- ✓ **Θερμοστοιχεία:** Προτού κλείσει ο αντιδραστήρας ελέγχεται εάν έχουν μετακινηθεί τα θερμοστοιχεία από τις προκαθορισμένες θέσεις τους.
- ✓ **Καύσιμο:** Ξήρανση του δείγματος προτού εισέλθει στον καυστήρα, στους 80 ^{o}C για 24 ώρες.
- ✓ **Παροχή τροφοδοσίας:** Βαθμονόμηση παροχής υλικού τροφοδοσίας στο πρώτο σιλό. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται μία φορά για κάθε υλικό.
- ✓ **Μονώσεις:** Επικάλυψη σωληνώσεων με υαλοβάμβακα, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας.

3.5.2 Μεθοδολογία Διεξαγωγής Πειραμάτων

Για κάθε είδος καυσίμου, επιλέχθηκαν δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: η παροχή καυσίμου τροφοδοσίας και ο λόγος περίσσειας αέρα. Η παροχή καυσίμου ρυθμιζόταν σε 0,72 ή 0,84 kg/h, ενώ ο λόγος λ της περίσσειας αέρα κυμαινόταν μεταξύ των τιμών 1,3 και 1,7.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων ρευστοποίησης ακολουθείται η εξής διαδικασία: Αρχικά, πραγματοποιείται η προθέρμανση της κλίνης με κατάλληλη ρύθμιση των ηλεκτρικών αντιστάσεων και κατόπιν ξεκινά η τροφοδοσία του καυσίμου. Η παροχή του καυσίμου στην κλίνη ρυθμίζεται μέσω inverter που ελέγχει τον κινητήρα του τροφοδοτικού κοχλία. Παράλληλα με την τροφοδοσία του καυσίμου, τροφοδοτούμε το σύστημα με αέριο άζωτο. Στην αρχή και για λίγο χρονικό διάστημα, η παροχή του αζώτου ρυθμίζεται σε υψηλά επίπεδα, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σωστή τροφοδοσία της βιομάζας. Στο επόμενο διάστημα, η παροχή του αζώτου έχει μειωθεί στα επιθυμητά επίπεδα και η θερμοκρασία της κλίνης αυξάνεται λόγω της καύσης.

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

Αφού συμπληρωθεί η προβλεπόμενη διάρκεια πειράματος, τότε διακόπτεται η παροχή καυσίμου και αρχίζει η ψύξη της κλίνης, μέσω της παροχής αέρα που συντηρεί τη ρευστοποίηση. Μόλις η κλίνη αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου, περίπου 18 ώρες αργότερα, αφαιρείται η βάση του αντιδραστήρα, αποσπώντας τον εσωτερικό κύλινδρο του πυρήνα και το αδρανές συλλέγεται σε σακούλα. Ακολουθεί ζύγιση του αδρανούς, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλη η ποσότητά του παρέμενε στον αντιδραστήρα και λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος για αναλύσεις. Τέλος, αφαιρείται η τέφρα από το δοχείο συλλογής του κυκλώνα, ζυγίζεται και τοποθετείται σε σακουλάκια για περαιτέρω εργαστηριακή ανάλυση.

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

3.5.3 Καθορισμός Απωλειών Θερμότητας και Απόδοσης Καύσης

Για τον υπολογισμό της απόδοσης της καύσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απώλειας θερμότητας (heat-loss method). Οι απώλειες θερμότητας λόγω άκαυστου άνθρακα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την περιεκτικότητα σε άκαυστο άνθρακα της ιπτάμενης τέφρας, L_{FA} (%), και της τέφρας πυθμένα, L_{BA} (%), αντίστοιχα, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$L_{FA} = \left(\frac{B_{FA}}{C} \right) \times 100 \tag{3.10}$$

$$L_{BA} = \left(\frac{B_{BA}}{C} \right) \times 100 \tag{3.11}$$

όπου B_{FA} και B_{BA} είναι η ποσότητα της οργανικής ύλης που κάηκε και C η αρχική ποσότητα της οργανικής ύλης στο καύσιμο.

Η απώλεια θερμότητας λόγω ατελούς καύση, L_{CO} (%), υπολογίζεται από τις εκπομπές CO και λαμβάνοντας υπ' όψιν το ρυθμό καύσης του καυσίμου, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$L_{CO} = 100 - \frac{\%CO_2 \; \sigma\tau\alpha \; \kappa\alpha\upsilon\sigma\alpha\varepsilon\rho\iota\alpha \times 100\%}{(\%CO_2 + \%\mathrm{CO}) \; \sigma\tau\alpha \; \kappa\alpha\upsilon\sigma\alpha\varepsilon\rho\iota\alpha} \tag{3.12}$$

Η συνολική απόδοση της καύσης υπολογίζεται από τη διαφορά των απωλειών θερμότητας από το 100:

$$H = 100 - L_{CO} - L_{BA} - L_{FA} \tag{3.13}$$

Σύμφωνα με πειραματικές τιμές απόδοσης καύσης από πειράματα που διεξήχθησαν υπό ιδανικές συνθήκες, η απόδοση καύσης θα πρέπει να κυμαίνεται περίπου 97,00-99,50%.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΧΗΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Οι ιδιότητες των υλικών παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 4.1.1 και 4.1.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.1 *ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΕΠΙ ΞΗΡΟΥ) ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ*

Δείγμα	Πτητικά	Μόνιμος Άνθρακα	Τέφρα
	% σε ξηρή βάση	% σε ξηρή βάση	% σε ξηρή βάση
Ξύλο	79,9	19,6	0,5
Φύλλο	72,9	19,2	7,9
Φλούδα	77,1	20,6	2,3

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.2 *ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΕΠΙ ΞΗΡΟΥ) ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ*

Δείγμα	C	H	N	O[1]	S	Τέφρα	Α.Θ.Δ
	%	%	%	%	%	%	(MJ/kg)
Ξύλο	44,3	6	3,8	45,4	0	0,5	18,3
Φύλλο	41,6	5,6	2,7	42,2	0	7,9	17,1
Φλούδα	41,9	6,3	0,9	48,9	0	2,3	16,7

[1]%O = 100 – [%C + %H + %N + %S + %Τέφρα]

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του ξύλου, του φύλλου και της φλούδας είναι 18,3, 17,1 και 16,7 αντίστοιχα. Οι τιμές της περιεκτικότητας σε άνθρακα στο ξύλο, καθώς και της ποσοστιαίας σύστασης σε πτητικά (σε ξηρή βάση) του ίδιου υλικού, εμφανίζονται ελαφρώς πιο υψηλές από τα υπόλοιπα καύσιμα. Και τα τρία υλικά έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά το οποίο σημαίνει ότι έχουν ως καύσιμα υψηλή αντιδραστικότητα. Οι μικρές διαφορές στις παραπάνω ιδιότητες μεταξύ του ξύλου και των υπόλοιπων καυσίμων καθιστούν τα φύλλα και τις φλούδες ως εναλλακτικά καύσιμα βιομάζας που περιέχουν μικρότερο ποσοστό αζώτου στη σύστασή τους, άρα και δυνητικά λιγότερες εκπεμπόμενες ποσότητες οξειδίων του αζώτου.

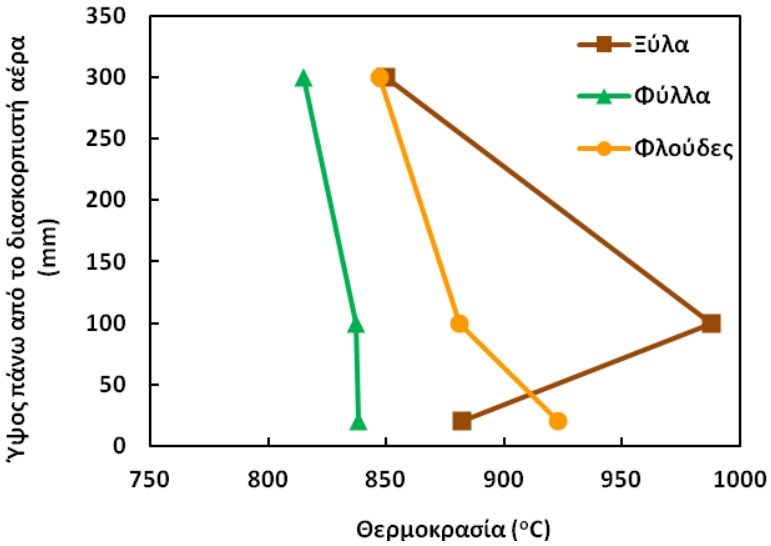
4.2 ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΤΗΡΑ

Το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας των FBC καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου. Η ελάχιστη θερμοκρασία καθορίζεται από την ανάγκη να διατηρηθεί σε σταθερή κατάσταση η θερμική διεργασία, ενώ η λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από την επιτρεπόμενη προκαλεί μείωση του βαθμού απόδοσης.

Σε όλα τα πειράματα καύσης τριμμάτων ξύλου, φλούδας και φύλλου πορτοκαλιάς, οι θερμοκρασίες της κλίνης κυμάνθηκαν μεταξύ 805 και 995 ^{o}C, οι θερμοκρασίες στο ελεύθερο όριο ήταν μεταξύ 770 και 880 ^{o}C, ενώ οι θερμοκρασίες των καυσαερίων στο κωνικό τμήμα του καυστήρα βρισκόταν μεταξύ 331-550 ^{o}C (Πίνακας 4.2.1). Σε όλα τα διαγράμματα θερμοκρασιακού προφίλ παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες επετεύχθησαν στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε το ξύλο της πορτοκαλιάς ως καύσιμο λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε πτητικά και του χαμηλού ποσοστού τέφρας που έχει.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2.1 *ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (ΞΥΛΟ, ΦΥΛΛΟ ΚΑΙ ΦΛΟΥΔΑ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΑΣ) ΣΕ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ*

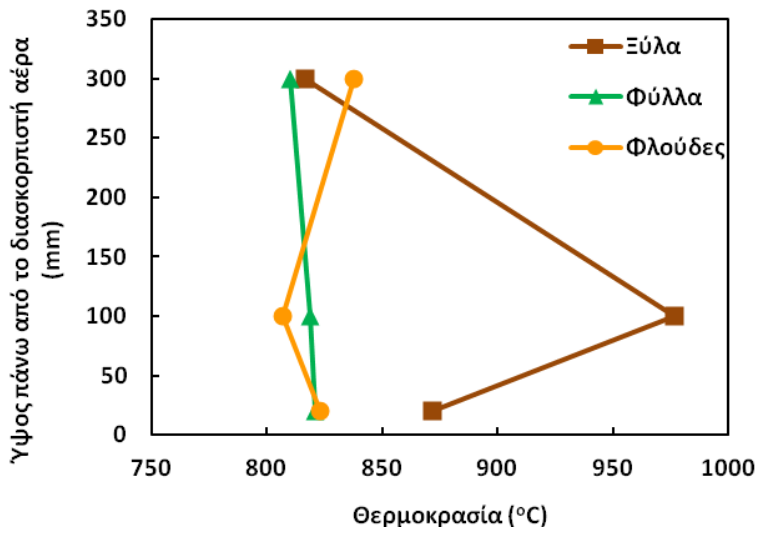
Δείγμα	**Τροφοδ.**	**Λόγος**	**Θερμοκρασία**			**O_2**	**CO_2**	**CO**	**SO_2**	**NO_x**
	(kg/h)	***λ***	**Κλίνη**	**Ελευθ. Ορ.**	**Κων. Τμ.**	**(%)**	**(%)**	**(ppm)**	**(ppm)**	**(ppm)**
Ξύλο	0,84	1,3	897-988	880	467	4,6	15,2	1563	44	325
Ξύλο	0,84	1,4	882-988	850	450	5,6	14,2	869	1	400
Ξύλο	0,84	1,5	878-995	828	400	6,8	13,1	825	0	417
Ξύλο	0,84	1,6	871-975	819	389	7,8	12,1	795	0	430
Ξύλο	0,84	1,7	872-977	817	372	8,7	11,4	657	0	422
Ξύλο	0,72	1,4	865-867	828	331	5,9	13,9	1337	81	362
Ξύλο	0,72	1,7	826-827	811	492	8,6	11,4	1388	0	327
Φύλλο	0,84	1,4	837-838	815	351	6,2	13,7	891	5	905
Φύλλο	0,84	1,7	819-821	810	492	8,3	11,7	700	4	774
Φύλλο	0,72	1,7	815	802	406	8,4	11,6	712	1	988
Φλούδα	0,84	1,4	881-923	847	381	6,3	13,6	1560	2	468
Φλούδα	0,84	1,7	807-823	838	454	8,7	11,4	1630	3	431
Φλούδα	0,72	1,7	805-817	770	355	8,8	11,2	591	3	348
Ξύλο/Φύλλο/Φλούδα: 50/25/25	0,84	1,7	834-837	818	510	8,6	11,5	1433	64	535
Ξύλο/Φύλλο/Φλούδα: 50/10/40	0,84	1,7	839-842	822	499	8,6	11,5	1239	51	463
Ξύλο/Φύλλο/Φλούδα: 70/10/20	0,84	1,7	845	823	508	8,6	11,5	1163	59	409



Διάγραμμα 4.2.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4.

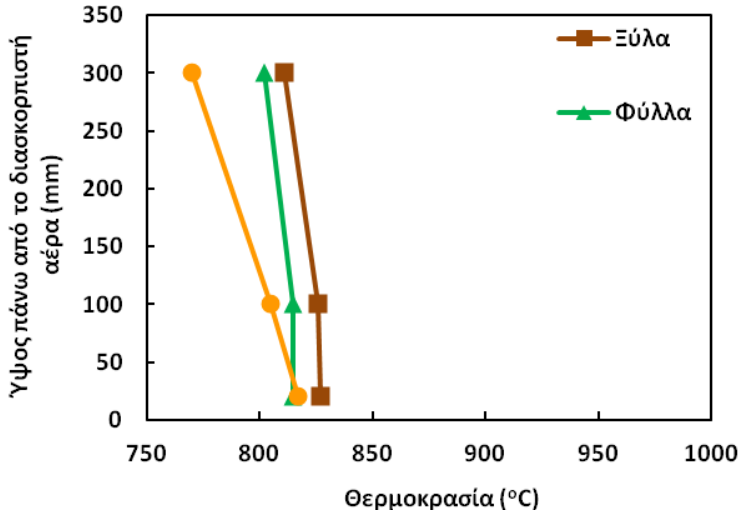
Στο Διάγραμμα 4.2.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4. Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι το ξυλώδες καύσιμο καίγεται κυρίως κοντά στη ζώνη ανάμιξης, όπου η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας επιτεύχθηκε στα 10 cm πάνω από την πλάκα κατανομής του αέρα. Όσον αφορά στις φλούδες και στα φύλλα οι μέγιστες θερμοκρασίες πετυχαίνονται στα πρώτα εκατοστά πάνω από το διασκορπιστή του αέρα. Στις φλούδες, η θερμοκρασία των καυσαερίων έχει πιάσει τη μέγιστη τιμής της (923°C) στα πρώτα 2 εκατοστά και στη συνέχεια βαίνει διαρκώς μειούμενη μέχρι το κωνικό τμήμα του καυστήρα. Τα φύλλα ως καύσιμα αναμιγνύονται καλά με το αδρανές υλικό και η καύση τους είναι σταθερή κατά μήκος της κλίνης. Η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται κατά μήκος της κλίνης και μειώνεται κοντά στην έξοδο του ελεύθερου ορίου.

Για όλα τα καύσιμα, λόγω της ύπαρξης μεγάλου ποσοστού πτητικών σε αυτά, οι θερμοκρασίες των απαερίων στο ελεύθερο όριο παραμένουν υψηλές (>800°C) εξαιτίας της καύσης των πτητικών που συνεχίζεται σε όλο το μήκος της ζώνης αυτής. Οι θερμοκρασίες στο ελεύθερο όριο για το ξύλο και τις φλούδες είναι παρόμοιες και μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες για τα φύλλα. Σε όλες τις περιπτώσεις, μετά το ελεύθερο όριο η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος της στήλης του καυστήρα (Πίνακας 4.2.1).



Διάγραμμα 4.2.2: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

Στο Διάγραμμα 4.2.2 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και περίσσεια αέρα λ=1,7, απ' όπου παρατηρούμε ότι με την αύξηση της περίσσειας αέρα προκαλείται πτώση της θερμοκρασίας λειτουργίας της κλίνης για όλα τα εξεταζόμενα καύσιμα. Επίσης, η καύση του ξύλου και η καύση των φύλλων είχαν την ίδια ακριβώς συμπεριφορά με το προηγούμενο πείραμα. Για τις φλούδες, η μέγιστη θερμοκρασία παράγεται στο ελεύθερο όριο και οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η χαμηλή πυκνότητά της σε συνδυασμό με τις αυξημένες ποσότητες αέρα που εισάγονται εκτοπίζουν τα καιγόμενα σωματίδια του καυσίμου προς το ελεύθερο όριο.



Διάγραμμα 4.2.3: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για τροφοδοσία καυσίμου F=0,72 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

Στο Διάγραμμα 4.2.3 φαίνονται τα θερμοκρασιακά προφίλ των τριών καυσίμων που καίγονται με 70% περίσσεια αέρα, ενώ τα καύσιμα τροφοδοτούνται με ταχύτητα F=0,72 kg/h. Σε αυτό το σετ πειραμάτων αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εμφανίζονται οι μεγάλες θερμοκρασίες καύσης που είχαν παραχθεί κοντά στη ζώνη ανάμιξης στα προηγούμενα πειράματα, όπου χρησιμοποιήθηκε το ξύλο πορτοκαλιάς ως καύσιμο. Η συμπεριφορά του ξύλου ήταν πανομοιότυπη με αυτή των φύλλων, ενώ οι θερμοκρασίες καύσης για τις φλούδες ξεκινούσαν με μέγιστο ακριβώς πάνω από την πλάκα κατανομής του αέρα και κατόπιν μειωνόντουσαν γραμμικά με το ύψος του κυλίνδρου.

4.3 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

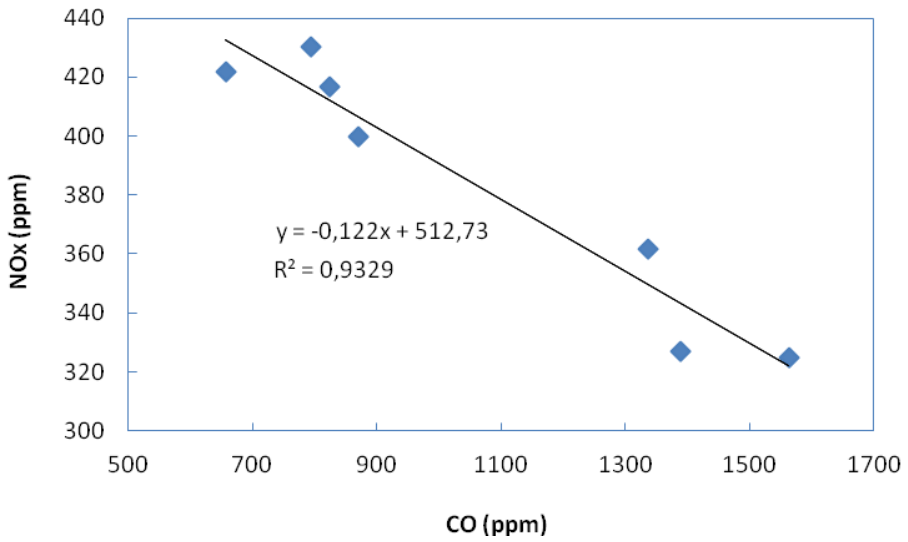
Στα πειραματικά αποτελέσματα, οι τιμές CO κυμάνθηκαν μεταξύ 591 και 1630 ppm, ενώ αντίστοιχα οι τιμές NOx ήταν μεταξύ 327 και 988 ppm. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκρίσιμα με αντίστοιχα πειράματα καύσης βιομάζας σε καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Πίνακας 4.3.1). Στα πειράματα με το ξύλο, οι συγκεντρώσεις CO κυμάνθηκαν μεταξύ 657-1563 ppm, ενώ το εύρος τιμών εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου ήταν μικρό (325-430 ppm), που δείχνει ότι ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου (κυρίως NO) από την καύση του ξύλου πορτοκαλιάς σε FBC, δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις υπό εξέταση παραμέτρους λειτουργίας του καυστήρα. Σε όλα τα πειράματα, οι συγκεντρώσεις του CO ήταν κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια που θέτει η ελληνική νομοθεσία (ΥΑ οικ. 189533/2011, ΦΕΚ 2654Β/9/11/2011). Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις NOx στα καυσαέρια ήταν σχετικά υψηλές και πάνω από το όριο (Πϊνακας 2.6.1.

Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2) ήταν μικρές για όλα τα πειράματα καύσης, που οφείλεται στην αμελητέα ή και καθόλου περιεκτικότητα σε θείο (S) στα υπό εξέταση καύσιμα βιομάζας.

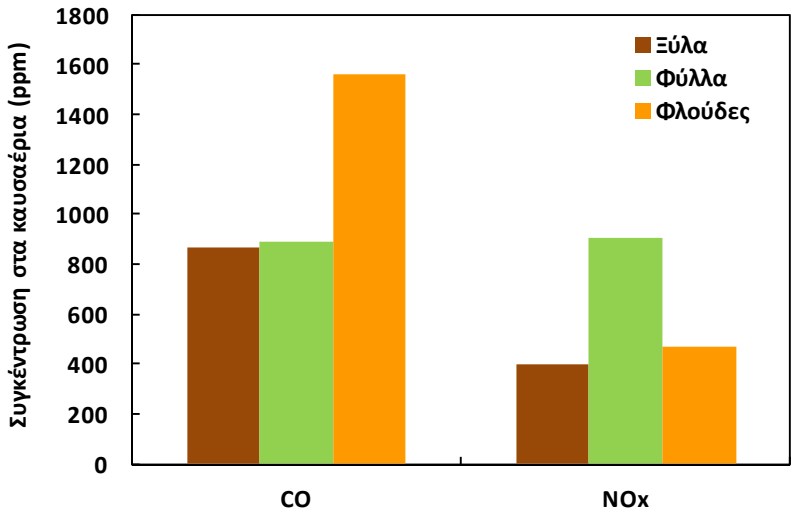
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.1 *ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ*

Είδος καυσίμου	**Λόγος περίσσειας αέρα,**	**Τροφοδοσία καυσίμου (kg/h)**	**Ταχύτητα ρευστοποίησης (m/s)**	**Εκπομπές NOx (ppm)**	**Εκπομπές CO (ppm)**	**Απόδοση (%)**	**Αναφορές**
Ελαιουργικό απόβλητο + γαιάνθρακας	1,50-1,90	35	1-2		100-350	85-93	K. Cliffe and S. Patumsawad, 2001
Στελέχη βαμβακιού	1,14-1,50	36	1,69-2,53	120-183	190-496	99,5-99,9[1]	Z. Sun et al., 2008
Στελέχη βαμβακιού	0,83-3,80	33-73	0,5-1,4	230-350	50-550	95,6-99,8	T. Madhiyanon et al., 2010
Πριονίδι	1,7-10	81,5		80-125	350-9400	96,48-99,82	W. Permchart and V.I. Kouprianov, 2004
Φλοιός ρυζιού	1,6-10	82,4		127-172	650-13190	81,31-86,32	W. Permchart and V.I. Kouprianov, 2004
Κατάλοιπο αποχύμωσης	1,7-10	70,0		77-121	830-10001	96,26-99,41	W. Permchart and V.I. Kouprianov, 2004
Μίγμα φλοιού ρυζιού και γαιάνθρακα	1,76		0,4-0,8	290-310	15-130	95,6-98,3	P. Sathitruangsak et al., 2009
Μίγμα απορριμμάτων από κοτόπουλα και γαιάνθρακα	1,3	0,228-0,330		360-420	410-1050		L. Songgeng et al., 2008
Ξύλο ελιάς	1,10-1,40	0,48	0,25	313-389	670-750	99,5-99,7[1]	D. Vamvuka et al., 2010
Ξύλο πορτοκαλιάς	1,3-1,7	0,72 και 0,84	0,245	325-430	657-1563	98,48-99,08	Παρούσα εργασία
Φύλλο πορτοκαλιάς	1,4 και 1,7	0,72 και 0,84	0,245	774-988	700-891	96,95-98,69	Παρούσα εργασία
Φλούδα πορτοκαλιάς	1,4 και 1,7	0,72 και 0,84	0,245	348-468	591-1630	97,60-98,58	Παρούσα εργασία
[1]κατά τον υπολογισμό της απόδοσης της καύσης λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο οι απώλειες θερμότητας λόγω εκπμπών CO							

Μελετώντας τα αποτελέσματα της πειραματικής καύσης των ξύλων πορτοκαλιάς στον καυστήρα ρευστοποιημένης κλίνης, παρατηρούμε ότι οι τελικές συγκεντρώσεις των NOx συσχετίζονται με τις συγκεντρώσεις CO στα απαέρια και η συσχέτιση αυτή αποτυπώνεται γραφικά στο Διάγραμμα 4.3.1. Η γραμμή παρεμβολής που δημιουργήθηκε έχει αρνητική κλίση και μας δείχνει ότι πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις CO ανάγουν μέρος του NO πάνω στις καταλυτικές επιφάνειες των οξειδίων που υπάρχουν στις παραγόμενες τέφρες, με αποτέλεσμα την ελάττωση των συγκεντρώσεων του στην έξοδο του καυστήρα. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί σε πολλές δημοσιευμένες εργασίες [21-23].



Διάγραμμα 4.3.1: Συσχέτιση των αερίων ρευμάτων NOx και CO στην έξοδο του καυστήρα, κατά την καύση ξύλου πορτοκαλιάς σε FBC σε διάφορους λόγους περίσσειας αέρα (λ=1,3-1,7).



Διάγραμμα 4.3.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4.

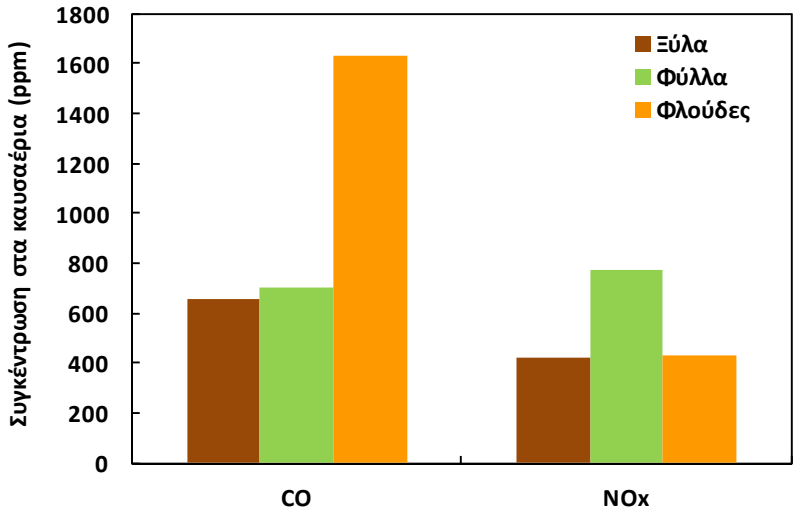
Στο Διάγραμμα 4.3.2 παρουσιάζεται ο μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση των τριών υλικών βιομάζας σε FBC για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4. Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές CO εμφανίζονται από την καύση των τριμμάτων της φλούδας της πορτοκαλιάς, ενώ οι μεγαλύτερες εκπομπές NOx προέρχονται από την καύση των κόκκων της πράσινης βιομάζας.

Οι αυξημένες εκπομπές CO που εμφανίζονται κατά την καύση των σωματιδίων της φλούδας του καρπού της πορτοκαλιάς οφείλονται κατά ένα μέρος στις μεγάλες ποσότητες πτητικών που απελευθερώνονται από την καύση των τριμμάτων της φλούδας. Οι αυξημένες ποσότητες πτητικών ενισχύουν τη συγκέντρωση των

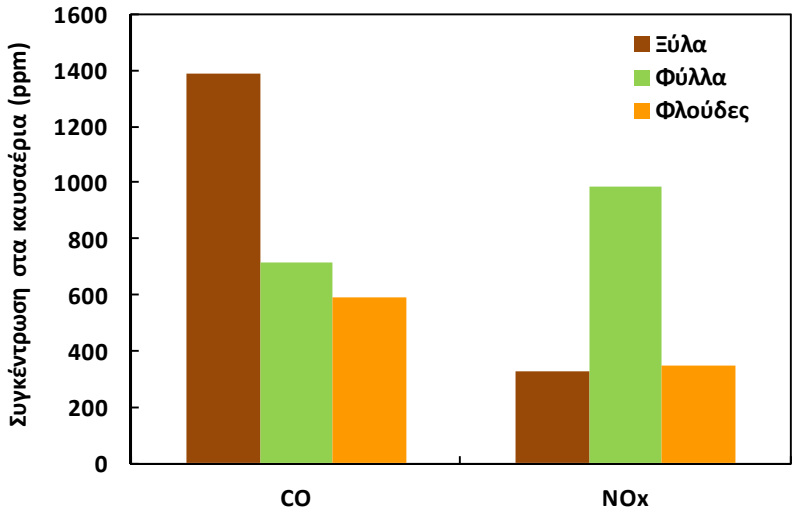
υδρογονανθράκων στη ζώνη καύσης, παρεμποδίζοντας εμμέσως την περαιτέρω οξείδωση του CO. Παρόμοια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί σε πειράματα καύσης βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη [26]. Ο παραπάνω μηχανισμός παρεμπόδισης της οξείδωσης του CO λειτουργεί με τη μη επίτευξη καλής ανάμιξης του καυσίμου, του αέρα και του υλικού κλίνης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καλή επαφή του καυσίμου με το απαραίτητο για την καύση οξυγόνο. Επίσης, οι παραπάνω αυξημένες εκπομπές CO οφείλονται, επίσης, στο μικρό χρόνο παραμονής των σωματιδίων της φλούδας μέσα στην κλίνη.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, οι μεγαλύτερες εκπομπές NOx από την πραγματοποίηση του πρώτου σετ πειραμάτων προέρχονται από την καύση των κόκκων των φύλλων της πορτοκαλιάς. Ο πιο πιθανός λόγος που εξηγεί την παραπάνω παρατήρηση είναι ότι η πράσινη βιομάζα περιέχει λιγότερα πτητικά στη σύστασή της, με αποτέλεσμα η ταχύτητα αναγωγής του οξειδίου του αζώτου από πτητικούς υδρογονάνθρακες να υπολείπεται των αντίστοιχων ταχυτήτων αναγωγής των NO όταν χρησιμοποιούνται τα ξύλα και οι φλούδες ως καύσιμα βιομάζας.

Κατά το δεύτερο σετ πειραμάτων όπου αυξήθηκε η παροχή αέρα και κρατήθηκε η τροφοδοσία σταθερή (Διάγραμμα 4.3.3), παρατηρούμε ότι για την καύση των φύλλων, οι εκπομπές NOx παρέμειναν στα ίδια επίπεδα, ενώ οι εκπομπές CO μειώθηκαν. Παράλληλα, η θερμοκρασία των καυσαερίων στο κωνικό τμήμα του καυστήρα εμφανίζεται αυξημένη (Πίνακας 4.2.1), που σημαίνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων κοντά στην έξοδο της στήλης ευνόησε την οξείδωση του CO και όχι την αναγωγή του NO. Τα αποτελέσματα των τιμών των εκπομπών από την καύση των υπολοίπων καυσίμων (ξύλο, φλούδα) εμφανίζουν την ίδια τάση, με εξαίρεση τις μειωμένες εκπομπές CO λόγω περαιτέρω οξείδωσης του CO σε CO_2.



Διάγραμμα 4.3.3: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.



Διάγραμμα 4.3.4: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx για τροφοδοσία καυσίμου F=0,72 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

Στο τρίτο σετ πειραμάτων, όπου μειώθηκε η ταχύτητα εισαγωγής όλων των καυσίμων στον κλίβανο από 0,84 σε 0,72 kg/h και η περίσσεια αέρα παρέμεινε σταθερή, διαπιστώθηκαν σημαντικές μεταβολές στις συγκεντρώσεις του CO στα καυσαέρια, τόσο για το πείραμα της καύσης του ξύλου, όσο και για το αντίστοιχο πείραμα καύσης της φλούδας. Οι μεταβολές αυτές ήταν διαφορετικές για κάθε καύσιμο, δηλαδή ενώ οι συγκεντρώσεις του CO αυξήθηκαν δραστικά για τη ξυλώδη βιομάζα, μειώθηκαν σε μεγάλο βαθμό για τη φλούδα (Διάγραμμα 4.3.4). Για το ξύλο, η αύξηση των εκπομπών CO οφείλεται στην κακή ανάμιξη του καυσίμου με το υλικό της κλίνης και τον αέρα, με αποτέλεσμα η καύση να μην είναι σταθερή και να δημιουργούνται παροδικά ζώνες ατελούς καύσης και σχηματισμός μεγάλων ποσοτήτων CO. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται ο μέσος όρος των εκπομπών CO. Αντίθετα, με τη μείωση της ταχύτητας τροφοδοσίας των κόκκων της φλούδας επιτυγχάνεται καλύτερη ρευστοποίηση και ως επακόλουθο καλύτερες συνθήκες καύσης. Σε αυτό συνέβαλαν, επίσης, οι χαμηλές θερμοκρασίας στη ζώνη ανάμιξης και στο ελεύθερο όριο (Διάγραμμα 4.2.3) με αποτέλεσμα την αποφυγή της τήξης της τέφρας.

Όσον αφορά στις εκπομπές NOx παρατηρούμε ότι η καύση λιγότερης μάζας φύλλων από τα προηγούμενα πειράματα προκαλεί ακόμα περισσότερες εκπομπές NOx, με αποτέλεσμα οι τιμές των συγκεντρώσεων NOx να είναι υπερδιπλάσιες από τις αντίστοιχες τιμές NOx όταν χρησιμοποιούνται το ξύλο και οι φλούδες ως καύσιμα βιομάζας.

4.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΥΣΗΣ

Η απόδοση της καύσης των τριμμάτων ξύλου, φύλλου και φλούδας ήταν πολύ μεγάλη (Πίνακας 4.4.1) και κυμάνθηκε περίπου μεταξύ 97 και 99,1 για όλα τα καύσιμα και ανάμεσα στο μικρό εύρος τιμών 98,5 και 99,1 για την καύση του ξύλου, λαμβάνοντας πάντα υπ' όψιν τις απώλειες θερμότητας λόγω ατελούς καύσης

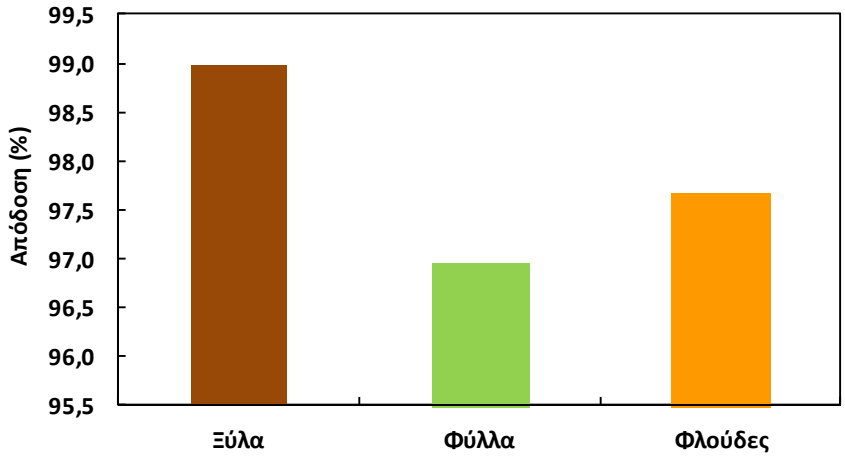
(L_{CO}), τέφρας πυθμένα (L_{BA}) και ιπτάμενης τέφρας (L_{FA}), σύμφωνα με την εξίσωση 3.13. Οι τιμές αυτές είναι συγκρίσιμες με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραμάτων καύσης διαφόρων τύπων βιομάζας σε FBC [27-34]. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες κλίνης, συγκρινόμενες με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε συμβατικούς καυστήρες, δεν είχαν κάποια σημαντική επίδραση στις αποδόσεις της καύσης των καυσίμων βιομάζας επειδή ο έντονος στροβιλισμός που δημιουργήθηκε στην κλίνη λόγω της υψηλής ταχύτητας της ροής του αέρα ήταν πιο σημαντικός από τη μειωμένη θερμοκρασία κλίνης. Με τον έντονο στροβιλισμό προκαλείται πολύ καλή ανάμιξη του καυσίμου, του αέρα και του υλικού κλίνης, και έτσι πολύ καλή μεταφορά θερμότητας από το αδρανές υλικό στο καύσιμο (μεταξύ των στερεών με αγωγή) και καλή επαφή του καυσίμου με το απαραίτητο για την καύση οξυγόνο. Έτσι, σε συνδυασμό με τον υψηλό χρόνο παραμονής του καυσίμου στο θάλαμο καύσης και την ευκολία της βιομάζας να καίγεται, ο βαθμός απόδοσης καύσης πλησιάζει το 100%. ενώ, η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σημειώθηκε κατά την καύση του ξύλου σε λόγο περίσσεια αέρα λ=1,7.

Μελετώντας τον πίνακα 4.4.1 αντλούμε την πληροφορία ότι ο κύριος παράγοντας που συνεισφέρει στις απώλειες καύσης του ξύλου είναι οι εκπομπές CO, που προκαλούν την αύξηση του όρου L_{CO} στην εξίσωση 3.13, με άμεση συνέπεια τη μείωση της συνολικής απόδοσης της καύσης. Από την άλλη μεριά, στον υπολογισμό της συνολικής απόδοσης της καύσης των τριμμάτων φύλλου και φλούδας παίρνουν μέρος όλοι οι παράγοντες της εξίσωσης 3.13, δηλαδή λαμβάνονται υπ' όψιν και οι απώλειες θερμότητας λόγω άκαυστου C, σε βαθμό που εξαρτάται από τις ιδιαίτερες εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα. Οι απώλειες καύσης που οφείλονται στον άκαυστο άνθρακα (L_{BA} και L_{FA}) είναι αυξημένες στα φύλλα, σε μικρότερο βαθμό στις φλούδες και σε αμελητέο ποσοστό στα ξύλα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4.1 *ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (ΞΥΛΟ, ΦΥΛΛΟ ΚΑΙ ΦΛΟΥΔΑ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΑΣ) ΣΕ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ (FBC)*

Δείγμα	**Τροφοδοσία (kg/h)**	**Λόγος *λ***	**L_{CO} (%)**	**L_{BA} (%)**	**L_{FA} *(%)***	**η (%)**
Ξύλο	0,84	1,3	1,02	0,02	0,22	98,74
Ξύλο	0,84	1,4	0,61	0,02	0,38	98,99
Ξύλο	0,84	1,5	0,63	0,02	0,29	99,06
Ξύλο	0,84	1,6	0,65	0,02	0,33	99,00
Ξύλο	0,84	1,7	0,57	0,02	0,33	99,08
Ξύλο	0,72	1,4	0,96	0,04	0,24	98,76
Ξύλο	0,72	1,7	1,20	0,12	0,20	98,48
Φύλλο	0,84	1,4	0,65	1,41	0,99	96,95
Φύλλο	0,84	1,7	0,60	0,38	0,33	98,69
Φύλλο	0,72	1,7	0,62	0,73	0,87	97,78
Φλούδα	0,84	1,4	1,13	0,50	0,70	97,67
Φλούδα	0,84	1,7	1,40	0,36	0,64	97,60
Φλούδα	0,72	1,7	0,53	0,29	0,60	98,58
Ξύλο/Φύλλο/Φλούδα: 50/25/25	0,84	1,7	1,24	0,45	0,45	97,86
Ξύλο/Φύλλο/Φλούδα: 50/10/40	0,84	1,7	1,07	0,33	0,27	98,33
Ξύλο/Φύλλο/Φλούδα: 70/10/20	0,84	1,7	1,00	0,30	0,30	98,40

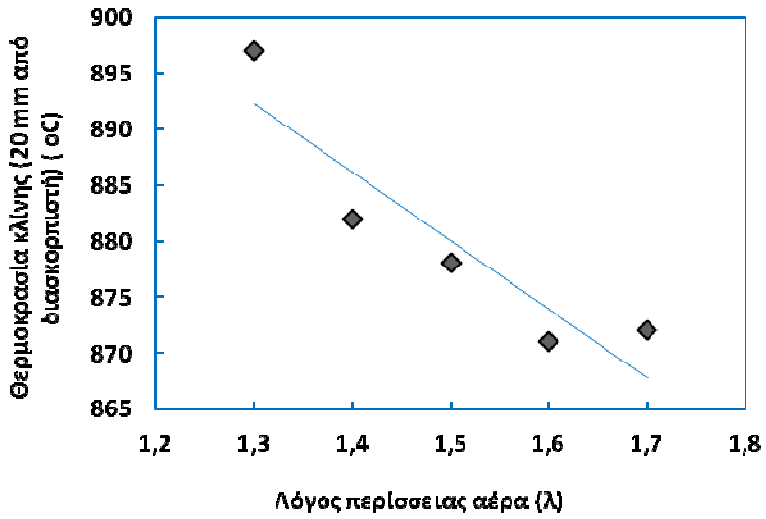
Συγκρίνοντας τις αποδόσεις της καύσης όλων των υπό μελέτη εναλλακτικών καυσίμων για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και περίσσεια αέρα λ=1,4 σε αντιδραστήρα FBC (Διάγραμμα 4.4.1), παρατηρούμε ότι η καύση των ξύλων εμφανίζει την καλύτερη απόδοση και ακολουθούν οι φλούδες και τα φύλλα με φθίνουσα σειρά, με μικρές όμως διαφορές μεταξύ τους.



Διάγραμμα 4.4.1: Απόδοση καύσης για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και περίσσεια αέρα λ=1,4.

4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΑΕΡΑ

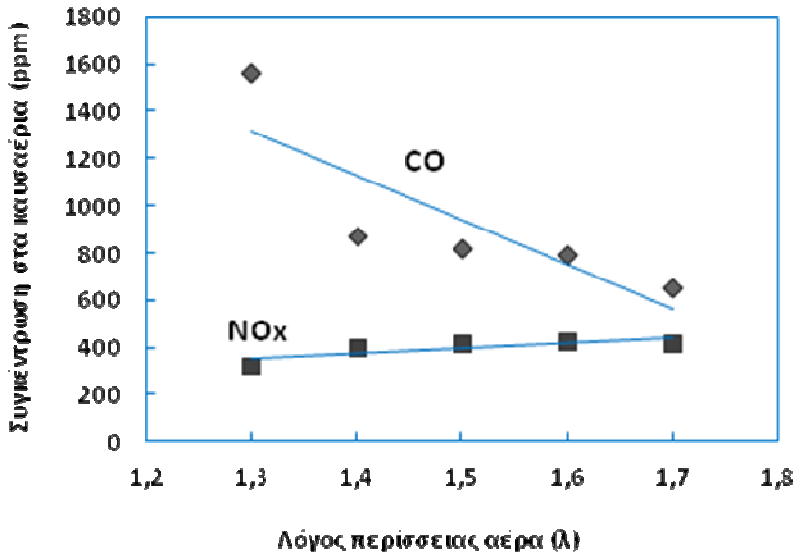
Η αναλογία αέρα προς βιομάζα είναι μία σημαντική παράμετρος, καθότι επηρεάζει το ρυθμό της καύσης και την τελική θερμοκρασία των αερίων της καύσης. Καθώς αυξάνεται η παροχή του αέρα μειώνεται ελαφρώς η θερμοκρασία της κλίνης όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.5.1, σαν αποτέλεσμα της ψύξης της κλίνης. Την ίδια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι θερμοκρασίες στο ελεύθερο όριο και στο κωνικό τμήμα (Πίνακας 4.2.1).



Διάγραμμα 4.5.1: Θερμοκρασία κλίνης (20 mm από το διασκορπιστή) από την καύση ξύλου πορτοκαλιάς για τροφοδοσία F=0,84 kg/h συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα λ.

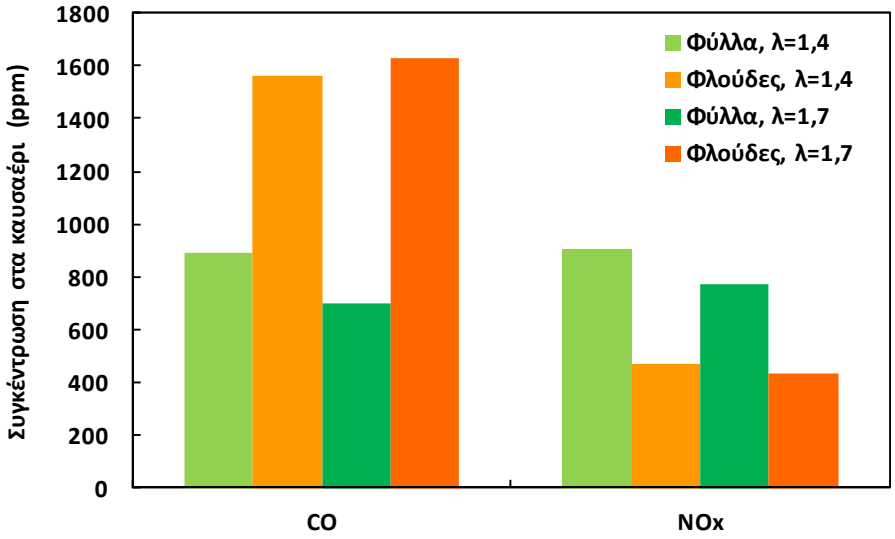
Με αύξηση της περίσσειας αέρα κατά την καύση του ξύλου και με τροφοδοσία καυσίμου 0,84 kg/h παρατηρήθηκε μείωση στις συγκεντρώσεις εκπεμπόμενου CO (Διάγραμμα 4.5.2). Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερες ποσότητες οξυγόνου προκαλούν την περαιτέρω οξείδωση του CO σε CO_2.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου (κυρίως NO), από την καύση του ξύλου πορτοκαλιάς, δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την περίσσεια αέρα. Ωστόσο, διαπιστώνεται μια μικρή αύξηση των εκπομπών NOx συναρτήσει της περίσσεια αέρα. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στη ζώνη καύσης, με άμεσο αποτέλεσμα την οξείδωση μεγαλύτερου μέρους του αζώτου του καυσίμου (Διάγραμμα 4.5.2).



Διάγραμμα 4.5.2: Διακύμανση εκπομπών CO και NOx από την καύση ξύλου πορτοκαλιάς συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα *λ*, για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h.

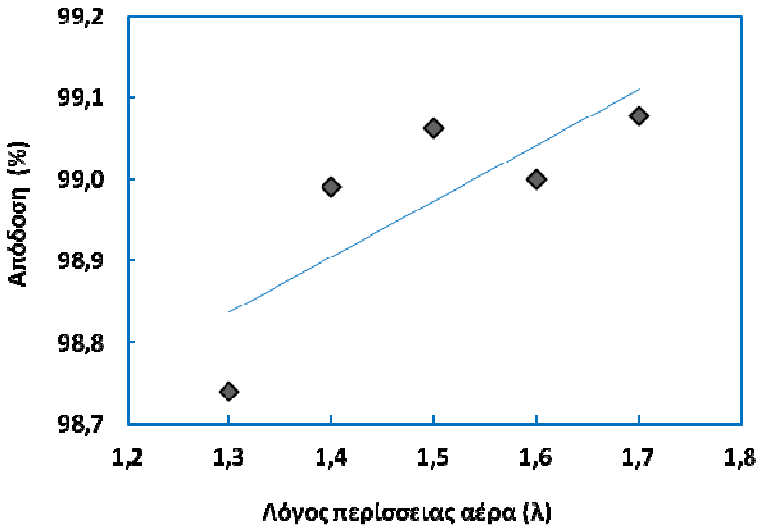
Η αύξηση της περίσσειας αέρα βελτίωσε σε μικρό βαθμό τις εκπομπές CO και NOx από την καύση των τριμμάτων φύλλου πορτοκαλιάς, ενώ δεν επηρέασε τις αντίστοιχες εκπομπές αερίων που παρήχθησαν από την καύση τριμμάτων φλούδας πορτοκαλιών (Διάγραμμα 4.5.3).



Διάγραμμα 4.5.3: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx κατά την καύση 2 εναλλακτικών καυσίμων (φύλλα και φλούδες πορτοκαλιάς) σε 2 λόγους περίσσειας αέρα (λ=1,4 και λ=1,7) και για τροφοδοσία F=0,84 kg/h.

Οι αποδόσεις της καύσης του ξύλου για τροφοδοσία καυσίμου ίση με 0,84 kg/h σχεδιάστηκαν γραφικά συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα στο Διάγραμμα 4.5.4.

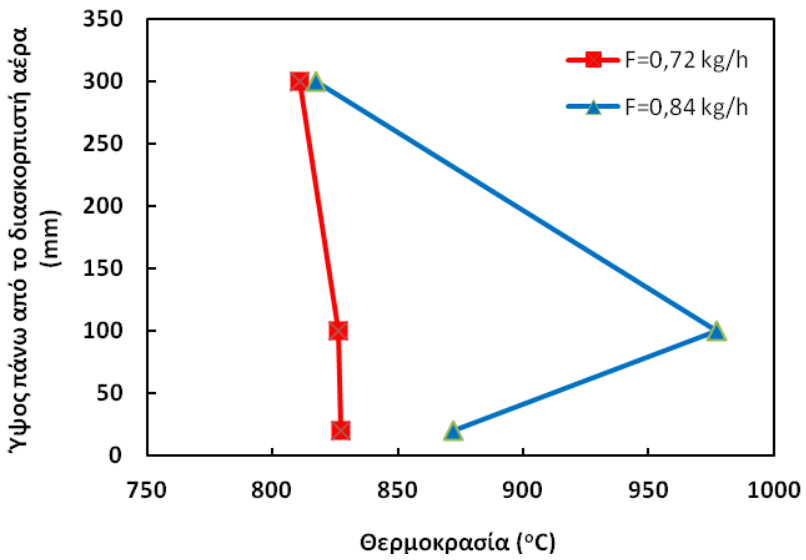
Για όλα τα παραπάνω πειράματα, οι αποδόσεις της καύσης κυμάνθηκαν σε πολύ υψηλά επίπεδα (≈ 99-99,1%), ενώ η χαμηλότερη τιμή παρατηρήθηκε όταν ο λόγος της περίσσειας αέρα ήταν 1,3, όπου οι απώλειες καύσης του συγκεκριμένου πειράματος οφείλονται στο σχηματισμό CO με μέση συγκέντρωση περίπου 1560 ppm. Στις κλασικές μονάδες καύσης στερεών ορυκτών καυσίμων, η αύξηση της παροχής του αέρα θα είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη ψύξη του κλιβάνου και μείωση του βαθμού απόδοσης, λόγω της αύξησης των απωλειών από τα καυσαέρια. Στα συγκεκριμένα πειράματα καύσης βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη ισχύει το αντίθετο: η κλίση της γραμμικής παρεμβολής της απόδοσης της καύσης συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα είναι θετική (Διάγραμμα 4.5.4), που σημαίνει ότι η απόδοση της καύσης του ξύλου αυξάνεται συναρτήσει της περίσσειας αέρα (για λ= 1,3 έως 1,7). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αδρανές υλικό της κλίνης απορροφάει τη θερμότητα που εκπέμπεται κατά την καύση και η θερμοκρασία της κλίνης δεν επηρεάζεται από την αύξηση της παροχής του αέρα. Απεναντίας, μεγαλύτερες ποσότητες οξυγόνου προκαλούν την περαιτέρω οξείδωση του CO σε CO_2, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών λόγω εκπομπών CO (L_{CO} - Πίνακας 4.4.1).



Διάγραμμα 4.5.4: Απόδοση καύσης ξύλου πορτοκαλιάς συναρτήσει του λόγου περίσσειας αέρα *λ*, για τροφοδοσία F=0,84 kg/h.

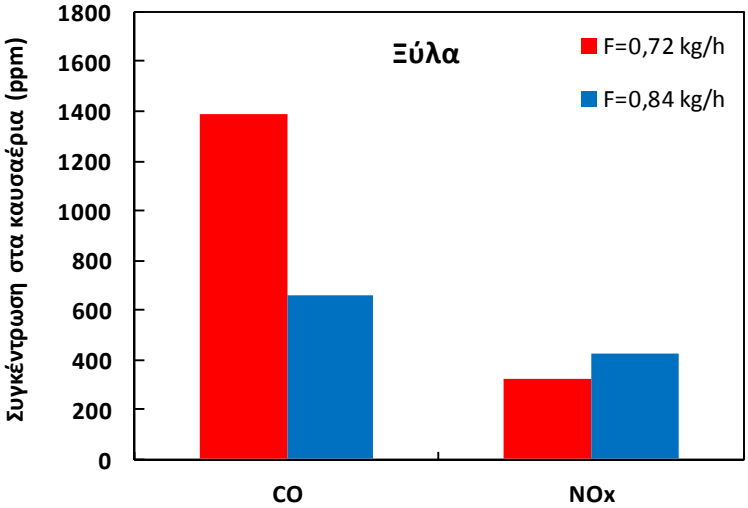
4.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Σε ταχύτητα τροφοδοσίας της ξυλώδη βιομάζας ίση με 0,84 kg/h παρατηρούνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες στην κλίνη από ότι με τροφοδοσία καυσίμου 0,72 kg/h (Διάγραμμα 4.6.1).



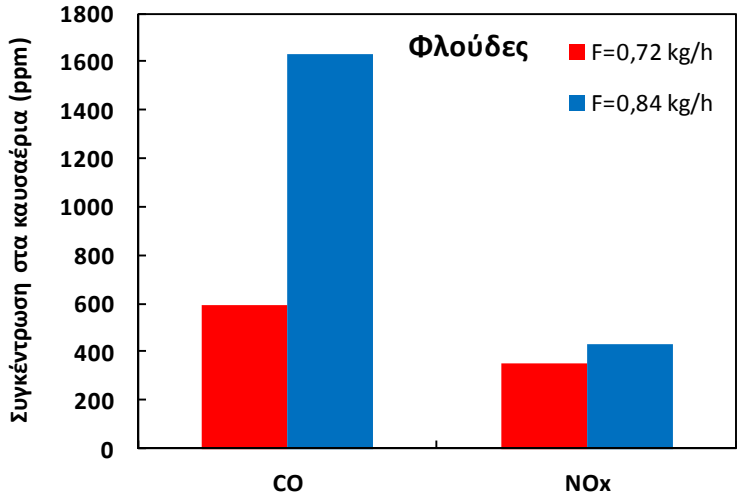
Διάγραμμα 4.6.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα για λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, σε δύο τροφοδοσίες καυσίμου ξύλου πορτοκαλιάς (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h).

Η μεταβολή στη τροφοδοσία του καυσίμου παίζει σημαντικό ρόλο στις εκπεμπόμενες ποσότητες CO (εκτός από την περίπτωση της καύσης των τριμμάτων φύλλου - Διάγραμμα 4.6.4), ενώ δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις εκπομπές NOx (Διαγράμματα 4.6.2, 4.6.3 και 4.6.4). Στο Διάγραμμα 4.6.2 παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος εκπομπών CO από την καύση τριμμάτων ξύλου πορτοκαλιάς σε περίσσεια αέρα λ=1,7 είναι κατά πολύ αυξημένος όταν η ταχύτητα τροφοδοσίας του καυσίμου ισούται με F=0,72 kg/h.

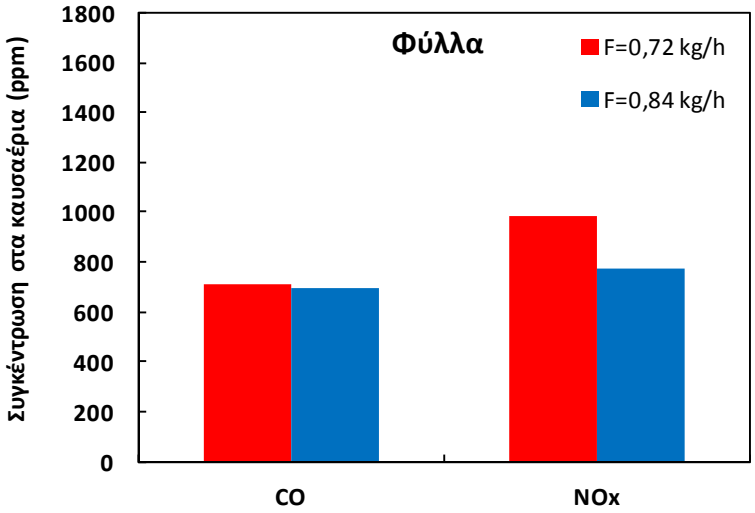


Διάγραμμα 4.6.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση τριμμάτων ξύλου πορτοκαλιάς για 2 τροφοδοσίες (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h) και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

Στο Διάγραμμα 4.6.3 παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις CO αυξήθηκαν με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας των τριμμάτων φλούδας για λόγο περίσσειας αέρα ίσο με 1,7. Έτσι, για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h, οι παραγόμενες ποσότητες πτητικών συστατικών (χαμηλής πυκνότητας) δεν πρόλαβαν να καούν πλήρως και συλλέχθηκαν στα απαέρια κυρίως ως CO.

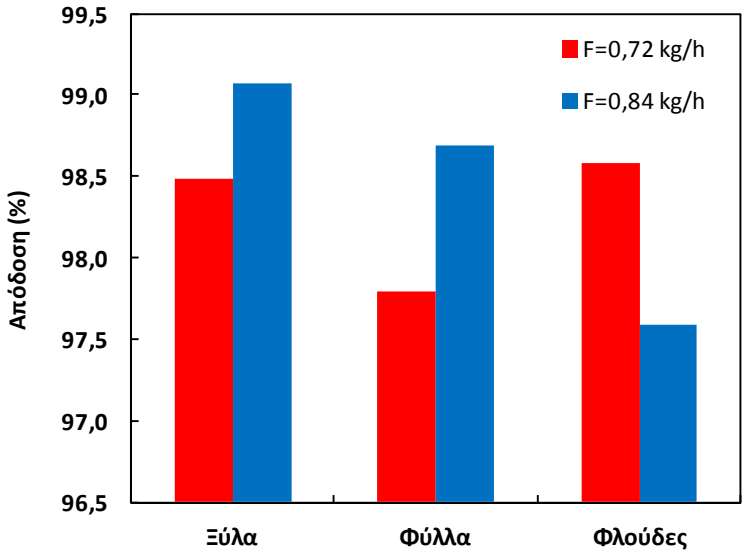


Διάγραμμα 4.6.3: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση τριμμάτων φλούδας πορτοκαλιών για 2 τροφοδοσίες (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h) και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.



Διάγραμμα 4.6.4: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από την καύση τριμμάτων φύλλου πορτοκαλιάς για 2 τροφοδοσίες (F=0,72 kg/h και F=0,84 kg/h) και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

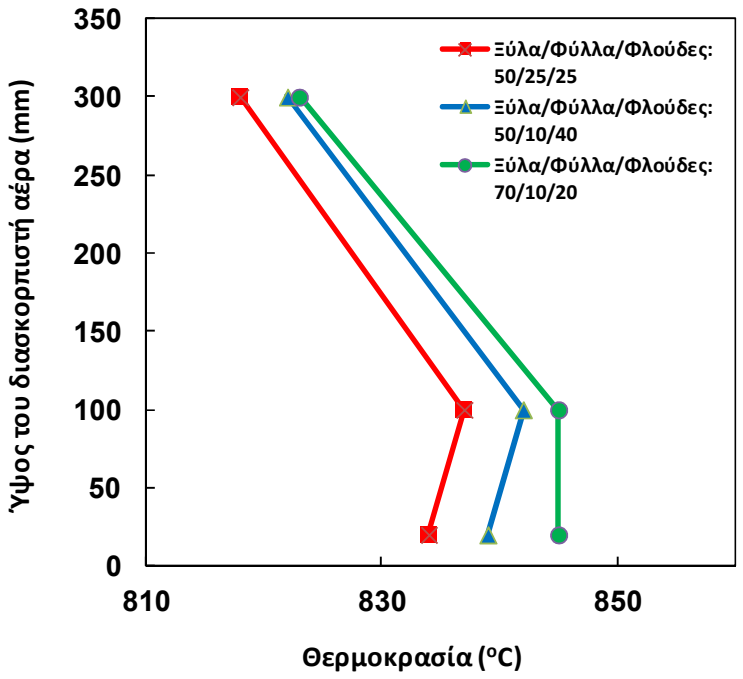
Στο Διάγραμμα 4.6.5 διαπιστώνουμε ότι για τα δύο από τα τρία καύσιμα, το ξύλο και τα φύλλα πορτοκαλιάς, η απόδοση της καύσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τροφοδοσία του καυσίμου. Το αντίθετο συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται οι φλούδες στην τροφοδοσία του καυστήρα.



Διάγραμμα 4.6.5: Απόδοση καύσης βιομάζας (ξύλα, φύλλα και φλούδες πορτοκαλιάς) για 2 ταχύτητες τροφοδοσίας καυσίμου και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,4.

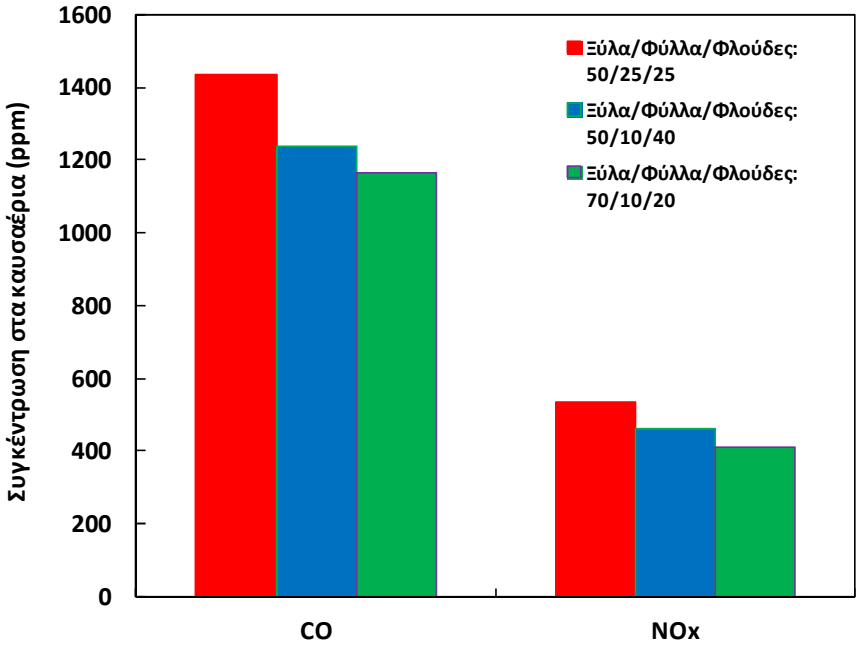
4.7 ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στο Διάγραμμα 4.7.1 παρουσιάζονται τα θερμοκρασιακά προφίλ των τριών μιγμάτων καυσίμων (Ξύλα/Φύλλα/Φλούδες: 50/25/25, 50/10/40 και 70/10/20) που καίγονται με 70% περίσσεια αέρα, ενώ τα καύσιμα τροφοδοτούνται στον αντιδραστήρα με ταχύτητα F=0,84 kg/h. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, τα ξύλα και οι φλούδες ως καύσιμα βοηθούν να επιτευχθούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από ότι τα φύλλα, τόσο στην κλίνη όσο και στο ελεύθερο όριο του κλιβάνου. Παρατηρούμε, επίσης, ότι και τα τρία μίγματα καυσίμων καίγονται με παρόμοιο τρόπο και εμφανίζουν πανομοιότυπα θερμοκρασιακά προφίλ.



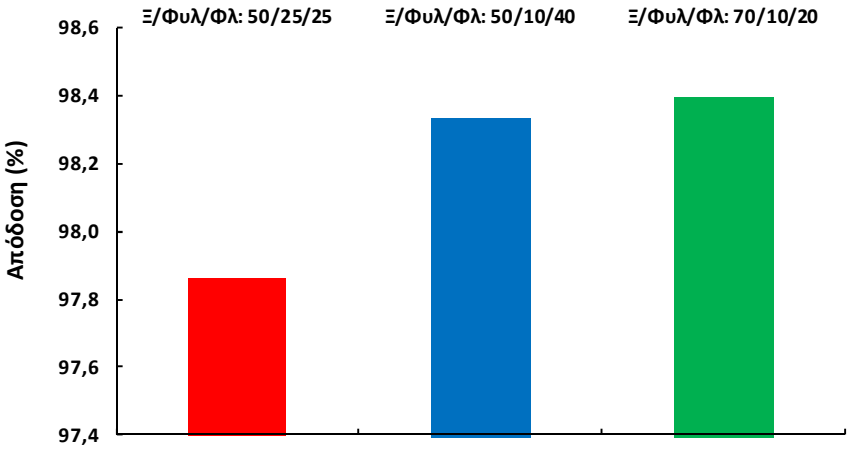
Διάγραμμα 4.7.1: Προφίλ θερμοκρασιών κατά μήκος του καυστήρα κατά τη συν-καύση ξύλου, φύλλου και φλούδας πορτοκαλιάς την καύση διαφόρων μιγμάτων καυσίμου για τροφοδοσία F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

Από τα αποτελέσματα της συν-καύσης ξύλου, φύλλου και φλούδας πορτοκαλιάς για τροφοδοσία μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, συμπεραίνουμε ότι το ξύλο ως καύσιμο μειώνει τις εκπομπές CO και NOx, λόγω του υψηλού ποσοστού πτητικών που εμφανίζει στη σύστασή του, σε αντίθεση με τα τρίμματα φύλλου πορτοκαλιάς που προωθούν το σχηματισμό των παραπάνω αέριων ρύπων (Διάγραμμα 4.7.2). Αντίστοιχα, η συμπεριφορά της φλούδας του πορτοκαλιού όσον αφορά στις εκπομπές CO και NOx είναι παρεμφερή με αυτή του ξύλου στις παραπάνω συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις CO που σχηματίζονται κατά την καύση των μιγμάτων οφείλονται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες της κλίνης και στα μεγάλα ποσοστά τέφρας που εμφανίζουν τα μίγματα καυσίμου.



Διάγραμμα 4.7.2: Μέσος όρος εκπομπών CO και NOx από τη συν-καύση ξύλου, φύλλου και φλούδας πορτοκαλιάς για τροφοδοσία μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

Τέλος, σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα, το ξύλο και η φλούδα της πορτοκαλιάς αυξάνουν την απόδοση της καύσης για τροφοδοσία καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7 (Διάγραμμα 4.7.3).



Διάγραμμα 4.7.3: Απόδοση καύσης για τροφοδοσία διαφόρων μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των πειραμάτων καύσης συμπεραίνουμε τα εξής:

- Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες καύσης επετεύχθησαν στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε το ξύλο της πορτοκαλιάς ως καύσιμο υλικό, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε πτητικά και του χαμηλού ποσοστού τέφρας που έχει. Στα περισσότερα πειράματα καύσης τριμμάτων ξύλου πορτοκαλιάς, η καύση πραγματοποιήθηκε κυρίως στο όριο της ζώνης ανάμιξης, 10 cm πάνω από την πλάκα κατανομής του αέρα. Όσον αφορά στις φλούδες και στα φύλλα, οι μέγιστες θερμοκρασίες επιτεύχθηκαν στα πρώτα εκατοστά πάνω από το διασκορπιστή του αέρα.

- Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2) ήταν μικρές για όλα τα πειράματα καύσης, που οφείλεται στην αμελητέα περιεκτικότητα σε θείο (S) στα υπό εξέταση καύσιμα βιομάζας.

- Η σχετικά μικρή περιεκτικότητα σε άζωτο στις φλούδες, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι σε καμιά περίπτωση δεν αναπτύχθηκαν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1000 ^{o}C, είχε ως αποτέλεσμα μειωμένες εκπομπές NO κατά την καύσης της φλούδας. Αντίθετα, κατά την καύση των φύλλων παρατηρήθηκαν αυξημένες εκπομπές NOx στα απαέρια.

- Ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου (κυρίως NO) από την καύση ξύλου πορτοκαλιάς σε FBC δεν επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από τις υπό εξέταση παραμέτρους λειτουργίας του καυστήρα. Αντίθετα, πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις CO στα απαέρια προκάλεσαν αναγωγή μέρους του NO, με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών NO στην έξοδο του καυστήρα.

- Η μεταβολή στην τροφοδοσία του καυσίμου συνέβαλε σε σημαντικό βαθμό στις εκπεμπόμενες ποσότητες CO (εκτός από την περίπτωση της καύσης των τριμμάτων φύλλου), ενώ δεν επηρέασε σε σημαντικό βαθμό τις εκπομπές NOx. Επίσης, για τα δύο από τα τρία καύσιμα, το ξύλο και τα φύλλα πορτοκαλιάς, η απόδοση της καύσης αυξήθηκε με την αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου. Το αντίθετο συνέβη όταν χρησιμοποιήθηκαν οι φλούδες στην τροφοδοσία του καυστήρα.

- Με αύξηση της περίσσειας αέρα κατά την καύση του ξύλου και με τροφοδοσία καυσίμου 0,84 kg/h παρατηρήθηκε μείωση στις συγκεντρώσεις εκπεμπόμενου CO. Η αύξηση της περίσσειας αέρα βελτίωσε σε μικρό βαθμό τις εκπομπές CO και NOx από την καύση των τριμμάτων φύλλου πορτοκαλιάς, ενώ δεν επηρέασε τις αντίστοιχες εκπομπές αερίων που παρήχθησαν από την καύση τριμμάτων φλούδας πορτοκαλιών.

- Η αύξηση της περίσσειας αέρα προκάλεσε την πτώση της θερμοκρασίας λειτουργίας της κλίνης σε όλα τα τμήματα του κυλινδρικού καυστήρα, ενώ η συνολική απόδοση της καύσης αυξήθηκε.

- Η υψηλότερη απόδοση καύσης παρατηρήθηκε κατά την καύση της ξυλώδους βιομάζας για τροφοδοσία καυσίμου F=0,72 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, ενώ την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση παρουσίασε η καύση τριμμάτων φλούδας πορτοκαλιού για F=0,72 kg/h και λ=1,7.

- Ο κύριος παράγοντας που επηρέασε τις απώλειες καύσης του ξύλου ήταν οι εκπομπές CO. Οι απώλειες καύσης που οφείλονται στον άκαυστο άνθρακα (L_{BA} και L_{FA}) ήταν αυξημένες στα φύλλα, σε μικρότερο βαθμό στις φλούδες και σε αμελητέο ποσοστό στα ξύλα.

- Κατά τη συν-καύση τριμμάτων ξύλου, φλούδας και φύλλου πορτοκαλιάς, τα δύο πρώτα υλικά βοήθησαν ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από ότι τα φύλλα, τόσο στην κλίνη όσο και στο ελεύθερο όριο του κλιβάνου. Επίσης, για τροφοδοσία μιγμάτων καυσίμου F=0,84 kg/h και λόγο περίσσειας αέρα λ=1,7, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται το % ποσοστό του ξύλου και της φλούδας στο μίγμα καυσίμου, τόσο μειώνονται οι εκπομπές CO και NOx, Επίσης, καθώς, αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε φύλλα στο μίγμα των καυσίμων, παρατηρήθηκε μείωση στην απόδοση της καύσης και αύξηση των εκπομπών σε μονοξείδιο του άνθρακα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]: Koornneef J, Junginger M, Faaij A, "Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost", Progress in Energy and Combustion Science, Vol 33, Issue 1, p.19-55, 2007.

[2]: Τσιλιγιάννης Χ, Γεωργιοπούλου Μ, Φωτεινοπούλου Ε, Τσεκούρα Ζ, "Μελέτη για τη δυνατότητα αξιοποίησης της βιομάζας που προκύπτει από το κλάδεμα των ελαιώνων", 2007.

[3]: Leckner B, "Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation", Prog. Energy Combust. Sci, Vol 74, pp. 31-61, 1998.

[4]: Greenpeace, "Μακροχρόνιος ενεργειακός σχεδιασμός - Οι προτάσεις της Greenpeace", Σεπτέμβριος 2007.

[5]: Βάμβουκα Δ, "Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας. Η περίπτωση της Κρήτης", 2007.

[6]: Vamvuka D, "Biomass, bioenergy and the environment", Salonica: Tziolas Publications, 2009.

[7]: Βάμβουκα Δ, "Καθαρή χρήση γαιανθράκων – Τεχνολογίες γαιανθράκων χαμηλής τάξης", Εκδόσεις Ιων, 2002.

[8]: ΚΑΠΕ, Ετήσια Έκθεση 2009.

[9]: Αποστολάκης Μ, Κυρίτσης Σ Σούτερ Χ, "Το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας γεωργικών και δασικών υποπροϊόντων", Ελληνικό κέντρο παραγωγικότητας (ΕΛ.ΚΕ.ΠΑ), Αθήνα, 1987.

[10]: Anon. European bioenergy networks. Eurobionet—biomass survey in Europe, Country report of Greece. Greece, 2003.

[11]: Ποντίκης Κ, "Ειδική Δενδροκομία, Εσπεριδοειδή", Αθ. Σταμούλης, Αθήνα, 1993.

[12]: Vamvouka D, Tsoutsos D, "Energy exploitation of agricultural residues in Crete", Energy Exploration & Exploitation, Vol 20, Issue 1, 2002.

[13]: Τσιλιγιάννης Χ, Γεωργιοπούλου Μ, Φωτεινοπούλου Ε, Τσεκούρα Ζ, "Μελέτη για τη δυνατότητα αξιοποίησης της βιομάζας που προκύπτει από το κλάδεμα των ελαιώνων", 2007.

[14]: Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, ΚΑΠΕ, 2001.

[15]: Basu P, "Combustion and Gasification in Fluidized Beds" by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

[16]: Φρύδα Λ, Διδακτορική Διατριβή: "Ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής με αξιοποίηση βιομάζας", ΕΜΠ, 2006.

[17]: Tran K, Kilpinen P, Kunar N, "In-situ catalytic abatement of NOx during fluidized bed combustion – A literature study", University of Kuopio, Green Chemistry Group. Applied Catalysis B: Environmental, Vol 78, pp. 129-138, 2008.

[18]: Bee´r J, "Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges", Progress in Energy and Combustion Science, Vol 26, pp. 301–327, 2000.

[19]: Kaynak B, Topal H, Atimtay A, "Peach and apricot stone combustion in a bubbling fluidized bed", Fuel Processing Technology, Vol 86, p. 1175, 2005.

[20]: Leckner B, "Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation", Prog. Energy Combust. Sci, Vol 74, pp. 31-61, 1998.

[21]: Tran K, Kilpinen P, Kumar N, "In-situ catalytic abatement of NOx during fluidized bed combustion - A literature study", Applied Catalysis B: Environmental, Vol 78, Issue 1-2, pp.129-138, 2008.

[22]: Tran K, Kilpinen P, Eränen K, Kumar N, Steenari B, Moreno N, Querol X, "Fly Ash Utilization for the Development of Low NOx Bed Materials", The Open Fuels & Energy Science Journal, Vol 2, pp.27-30, 2009.

[23]: Sirisomboon K, Kuprianov V, Arromdee P, "Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed-combustor", Chem. Eng. Proc.: Process Intensification, Vol 40, pp. 270-277, 2010.

[24]: Κατσαούνης Α, Έλεγχος αερίων εκπομπών από στατικές πηγές, Σημειώσεις μαθήματος: "Αερίων Ρύπων με Καταλυτικές Διεργασίες", Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.

[25]: Μιχαλοπούλου Χ, "Νομοθεσία για το Περιβάλλον", εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2004.

[26]: Vamvuka D, Sfakiotakis S, Alevizos G, Galetakis M, "Evaluating olive tree prunnings as a secondary fuel in fluidized bed combustion-emissions and ash effects" International Nordic Bioenergy Conference, p.227-234, 2009.

[27]: Cliffe K, Patumsawad S, "Co-combustion of waste from olive oil production with coal in a fluidised bed", Waste Management, Vol 21 (1), pp. 49-53, 2001.

[28]: Sun Z, Jin B, Zhang M, Liu R, Zhang Y, "Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed", Applied Energy, Vol 85 (11), pp. 1027-1040, 2008.

[29]: Madhiyanon T, Sathitruangsak P, Soponronnarit S, "Combustion characteristics of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC)", Appl. Therm. Eng., Vol. 30, p.347–53, 2010.

[30]: Armesto L, Bahillo A, Veijonen K, Cabanillas A, Otero J, "Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidized bed", Biomass Bioenergy, Vol 23, pp. 171–179, 2002.

[31]: Fang M, Yang L, Chen G, Shi Z, Luo Z, Cen K, "Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed", Fuel Process. Technol, Vol 85, pp.1273–1282, 2004.

[32]: Sathitruangsak P, Madhiyanon T, Soponronnarit S, "Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed-combustor (SFBC)", Fuel, Vol 88, pp.1394-1402, 2009.

[33]: Songgeng L, Andy W, Shuang D, Wei-ping P, "Effect of co-combustion of chicken litter and coal on emissions in a laboratory-scale fluidized bed combustor", Fuel Process. Technol., Vol 89, pp.7-12, 2008.

[34]: Permchart W, Kouprianov V, "Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels", Bioresource Technology, Vol 92, pp.83-91, 2004.

Δικτυακοί Τόποι

[1]: BP Statistical Review of World Energy 2011, http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481 (ημερομηνία πρόσβασης: 15/09/2011)

[2]: Η θεωρία του Peak Oil: http://peakoil.com/what-is-peak-oil/ (ημερομηνία πρόσβασης: 15/09/2011)

[3]: Ο κύκλος του άνθρακα: http://www.nasa.gov/centers/langley/news/researchernews/rn_carboncycle.html (ημερομηνία πρόσβασης: 20/09/2011)

[4]: Heat of Combustion (Wikipedia): http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_combustion#cite_ref-0 (ημερομηνία πρόσβασης: 20/09/2011)

[5]: ΚΑΠΕ: http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_biomass.htm (ημερομηνία πρόσβασης: 20/09/2011)

[6]: Νάνος Δ, "Διδακτικές σημειώσεις για το μάθημα Ειδική Δενδροκομία", Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Απρίλιος 2011: http://sites.google.com/site/syzitiseis/eidike-dendrokomia (ημερομηνία πρόσβασης: 13/01/2012)

[7]: Γεωργική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας Έτους 2006:
http://dlib.statistics.gr/Book/GRESYE_02_0903_00076.pdf (ημερομηνία πρόσβασης: 13/01/2012).