



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Παραγωγή Θερμότητας σε Πρότυπη Μονάδα Σταθερής Κλίνης μέσω
Πολυτροφοδοσίας Καυσίμων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λουκέρης Δημήτριος – Στάμου Ευάγγελος Θεόδωρος

Εξεταστική Επιτροπή

Δέσποινα Βάμβουκα, Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Δρ. Σφακιωτάκης Στυλιανός, ΕΔΙΠ

Δρ. Μαρινάκης Δημήτριος, ΕΔΙΠ

Χανιά, Ιούλιος 2018

Περίληψη

Η πειραματική αυτή μελέτη πραγματοποιήθηκε με σκοπό την διερεύνηση της απόδοσης της καύσης και τις εκπομπές αερίων ρύπων από την καύση αγροτικών υπολειμμάτων βιομάζας σε πρότυπη μονάδα καύσης. Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο πυρήνας ελιάς, ο πυρήνας ροδάκινου και ο φλοιός αμυγδάλου, καθώς και μίγματα των υλικών αυτών σε δύο αναλογίες. Στην πρότυπη μονάδα καύσης, για κάθε καύσιμο βιομάζας και μίγμα υλικών η μεταβλητή παράμετρος ήταν η τροφοδοσία του καυσίμου. Από την καύση των αγροτικών υπολειμμάτων και των μιγμάτων τους προσδιορίστηκαν ο βαθμός απόδοσης καύσης, ο θερμικός βαθμός απόδοσης και οι εκπομπές αερίων ρύπων, ώστε να γίνει έλεγχος αν βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για μικρά οικιακά συστήματα παραγωγής θερμότητας.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα αρχικά υλικά και τα μίγματα τους εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα: Όλα τα καύσιμα βιομάζας και τα μίγματα τους για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου παρουσίασαν υψηλές τιμές βαθμού απόδοσης καύσης και θερμικού βαθμού απόδοσης, ενώ οι εκπεμπόμενοι ρύποι ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας, παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης και των εκπομπών των αερίων ρύπων, αλλά χωρίς αυτοί να ξεπερνούν τα νομοθετικά όρια. Τέλος, ως βέλτιστο καύσιμο βιομάζας αποδείχθηκε ο πυρήνας ροδάκινου με τις χαμηλότερες εκπομπές αερίων ρύπων και τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης καύσης.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	2
2.1. Βιοενέργεια από Βιομάζα.....	2
2.1.1 Είδη και ενεργειακό δυναμικό.....	3
2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενεργειακής αξιοποίησης.....	12
2.2 Αγροτικά Υπολείμματα.....	13
2.2.1 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά.....	13
2.2.2 Διείσδυση στην αγορά.....	17
2.2.3 Χρήσεις.....	22
2.3 Καύση Αγροτικών Υπολειμμάτων.....	27
2.3.1 Βασικές αρχές καύσης.....	27
2.3.2 Οικιακά και Μικρά Εμπορικά Συστήματα.....	31
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	41
3.1. Προέλευση και Προετοιμασία Δειγμάτων.....	41
3.2 Τυπικές Αναλύσεις Καυσίμου των Δειγμάτων.....	45
3.2.1 Προσεγγιστική Ανάλυση.....	45
3.2.2 Στοιχειακή Ανάλυση.....	47
3.2.3 Χημική Ανάλυση Τέφρας.....	48
3.3 Περιγραφή Πρότυπης Μονάδας Καύσης.....	49
3.4 Τροποποιήσεις και Αναβαθμίσεις της Μονάδας Καύσης.....	51
3.5 Μεθοδολογία Εκτέλεσης των Πειραμάτων.....	51
3.6 Πειραματική Διαδικασία.....	52
3.7 Μετρήσεις Παραμέτρων Καύσης.....	54
3.8 Θερμικός Βαθμός Απόδοσης και Βαθμός Απόδοσης Καύσης.....	56
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ.....	58
4.1 Αναλύσεις Καυσίμου των Δειγμάτων και Χαρακτηρισμός Τεφρών Καύσης.....	58
4.1.1 Προσεγγιστική Ανάλυση.....	58
4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνο δύναμη.....	59
4.1.3 Χημική ανάλυση τέφρας.....	59
4.2 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης – Σύγκριση Καυσίμων για Σταθερή Τροφοδοσία.....	61
4.2.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων.....	62
4.2.2 Εκπομπές αερίων ρύπων.....	63
4.2.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης.....	67
4.3 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης των Μιγμάτων για Σταθερή Τροφοδοσία.....	68

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

4.3.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων.....	69
4.3.2 Εκπομπές αερίων ρύπων	72
4.3.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης.....	75
4.4 Επίδραση του Ρυθμού της Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παράμετρους Καύσης	76
4.4.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων.....	76
4.4.2 Εκπομπές αερίων ρύπων	79
4.4.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης.....	81
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

Ευρετήριο Σχημάτων και Πινάκων

Πίνακας 2.1: Στοιχειακή ανάλυση ξυλώδους βιομάζας	3
Σχήμα 2.1: Παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις	8
Σχήμα 2.2: Παγκόσμια χρήση βιοενέργειας ανά τομέα και χρήση βιομάζας	9
Σχήμα 2.3: Παγκόσμιες ενεργειακές ποσοτικές εκτιμήσεις βιομάζας για το 2020 (Mtoe- Ισοδυναμούν σε εκατομμύρια τόνους πετρελαίου)	9
Πίνακας 2.2: Εύρος τιμών προσεγγιστικής ανάλυσης ειδών βιομάζας (επί ξηρού)	15
Πίνακας 2.3 Εύρος τιμών στοιχειακής ανάλυσης και θερμογόνου δύναμης ειδών βιομάζας (επί ξηρού)	16
Σχήμα 2.5: Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για μπρικέτες ξύλου, γαιάνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο	34
Σχήμα 2.6: Οργανικός Άνθρακας σε χύδην καλαμπόκι και συσσωματώματα EF_{oc} (g/kg)	36
Σχήμα 2.7: Στοιχειακός Άνθρακας σε χύδην καλαμπόκι και συσσωματώματα EF_{Ec} (g/kg)	36
Σχήμα 2.8: Ιπτάμενα Σωματίδια σε χύδην καλαμπόκι και συσσωματώματα $EF_{PM2.5}$ (g/kg)	36
Σχήμα 3.1: Σιαγωνοτός Σπαστήρας (JawsCrusher)	42
Σχήμα 3.2: Μαχαιρόμυλος	42
Σχήμα 3.3: Κόσκινο 1mm.	43
Σχήμα 3.4: Κλίβανος Ξήρανσης	43
Πίνακας 3.1: Βαθμονόμηση	44
Πίνακας 3.2: Βαθμονόμηση Ανεμιστήρα Απαερίων	44
Σχήμα 3.5 : Αυτόματος Στοιχειακός Αναλυτής Flash 2000 Series, της εταιρείας Thermo Fisher Scientific	47
Σχήμα 3.6: Πρότυπη Μονάδα Καύσης	49
Σχήμα 3.7: Πολυαναλυτής GA-40 plus	53
Πίνακας 3.3: Στοιχειομετρικός Αέρας Καύσης	55
Πίνακας 4.1 : Αποτελέσματα προσεγγιστικής ανάλυσης των δειγμάτων επί ξηρού	58
Πίνακας 4.2 : Στοιχειακή ανάλυση επί ξηρού και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων	59
Πίνακας 4.3 : Χημική ανάλυση τέφρας (οξείδια %)	59
Σχήμα 4.1: Κύρια οξείδια στις τέφρες των αρχικών δειγμάτων από τη καύση στους 550 °C	60
Πίνακας 4.4: Δείκτες επικαθίσεων	60
Πίνακας 4.5 : Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσηςγια τις τροφοδοσίες 13.5, 18.0, 15.3 kg/h για πυρήνα ελιάς, πυρήνα ροδάκινου και φλοιό αμυγδάλου, αντίστοιχα	61
Σχήμα 4.2 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	62

Σχήμα 4.3 : Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	63
Σχήμα 4.4 : Συγκέντρωση CO συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	64
Σχήμα 4.5 : Συγκέντρωση SO ₂ συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	64
Σχήμα 4.6 : Συγκέντρωση NO _x συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	65
Σχήμα 4.7 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	66
Σχήμα 4.8 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα	66
Σχήμα 4.9 : Λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα, για τα τρία καύσιμα	67
Σχήμα 4.10 : Απώλειες θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα, για τα τρία καύσιμα	67
Σχήμα 4.11 : Απόδοση καύσης (μέση τιμή) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα, για τα τρία καύσιμα	68
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης μειγμάτων των καυσίμων για βέλτιστη τροφοδοσία	69
Σχήμα 4.12 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων	70
Σχήμα 4.13: Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων	71
Σχήμα 4.14 : Λόγος περίσσειας αέρα λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων	72
Σχήμα 4.15 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων	74
Σχήμα 4.16 : Απόδοση καύσης (μέση τιμή) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων	75
Πίνακας 4.7: Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης συναρτήσει της τροφοδοσίας των τριών καυσίμων	76
Σχήμα 4.17 : Θερμοκρασία νερού εξόδου συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) πυρήνα ροδάκινου και (γ) φλοιό αμυγδάλου	77
Σχήμα 4.18 : Θερμοκρασία καυσαερίων συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) πυρήνα ροδάκινου και (γ) φλοιό αμυγδάλου	78
Σχήμα 4.19 : Λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα	79

Σχήμα 4.20 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) πυρήνα ροδάκινου και (γ) φλοιό αμυγδάλου 81

Σχήμα 4.21 : Απόδοση καύσης (μέση τιμή) συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα 81

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η βιομάζα πρωταγωνιστεί στη παγκόσμια αγορά, όσον αφορά τη παραγωγή θερμότητας, με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς. Η βιομάζα, που περιλαμβάνει τις ενεργειακές καλλιέργειες, τα αγροτικά και δασικά υπολείμματα, καθώς και τα στερεά απορρίμματα και τα λύματα, παρέχει το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από το σύνολο των ανανεώσιμων πηγών. Από τις μορφές βιομάζας που προαναφέρθηκαν, η χρήση των αγροτικών υπολειμμάτων βιομάζας αυξάνεται με υψηλούς ρυθμούς στην Ευρώπη, αλλά και στην Ελλάδα. Αυτά αποτελούνται κυρίως από υπολείμματα καλλιεργειών τα οποία εγκαταλείπονται στους αγρούς μετά τη συγκομιδή, υπολείμματα που δημιουργούνται κατά την επεξεργασία της σοδειάς ή από μονάδες συσκευασίας. Στην Ελλάδα και κυρίως στη Κρήτη είναι αρκετά διαδεδομένη η χρήση τους για παραγωγή θερμότητας σε μικρά οικιακά συστήματα, εξαιτίας της αφθονίας τους. Για το λόγο αυτό και σε συνδυασμό με το χαμηλό τους κόστος διερευνώνται στην πειραματική αυτή μελέτη.

Τόσο στις Ευρωπαϊκές χώρες, όσο και στην Ελλάδα, παρατηρείται συνεχής ανάπτυξη των λεβήτων στερεών καυσίμων και πιο συγκεκριμένα των λεβήτων βιομάζας. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη για τη μελέτη μικρών οικιακών συστημάτων παραγωγής θερμότητας που απευθύνονται σε ένα ευρύ κοινό. Στόχος της μελέτης αυτής είναι η πειραματική διερεύνηση της απόδοσης καύσης ενός τέτοιου συστήματος για διάφορα βιοκάυσιμα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν πειραματικά σε πρότυπη μονάδα καύσης πυρήνες ελιάς, που αποτελεί την πιο διαδεδομένη υπολειμματική μορφή βιομάζας στην Ελλάδα, πυρήνες ροδάκινου και φλοιοί αμυγδάλου. Η πρότυπη μονάδα καύσης στην οποία διεκπεραιώθηκαν οι πειραματικές μελέτες αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα. Τα τμήματα του συστήματος είναι ένας λέβητας, ένας καυστήρας με σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου ατέρμονος κοχλία, ένας κυκλοφορητής νερού, διάφορα στοιχεία ασφαλείας (όπως δοχείο διαστολής, βαλβίδα πλήρωσης κτλ.) και ένα σιλό τροφοδοσίας (ιδιοκατασκευή). Για τα παραπάνω βιοκάυσιμα, μελετήθηκαν η απόδοση καύσης και ο θερμικός βαθμός απόδοσης του λέβητα, καθώς και οι εκπομπές αερίων ρύπων. Οι πιο σημαντικές αέριες εκπομπές είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και το διοξείδιο του θείου, για τις οποίες έγινε έλεγχος για το αν βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων, σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα. Ωστόσο, τα αγροτικά υπολείμματα είναι διαθέσιμα μόνο για ένα περιορισμένο διάστημα του έτους. Για να είναι διαθέσιμα καθόλη τη διάρκεια του χρόνου απαιτούνται μεγάλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης. Οπότε, για να επιτυγχάνεται η χρήση τους καθόλη τη διάρκεια του έτους, πρέπει να γίνει χρήση μιγμάτων βιοκαυσίμων. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε μελέτη της συμπεριφοράς μιγμάτων των αγροτικών υπολειμμάτων που μελετήθηκαν σε δύο αναλογίες, στη βέλτιστη τροφοδοσία καυσίμου.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Βιοενέργεια από Βιομάζα

Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική προέλευση. Περιλαμβάνεται σε αυτήν οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από ζωντανούς οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, υποπροϊόντα σφαγείων), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων, της αγροτικής βιομηχανίας και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων. Με άλλα λόγια, αποτελεί μια ανανεώσιμη αποθήκη ενέργειας, της οποίας κύρια πηγή είναι ο ήλιος. Ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό από την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη δεσμεύεται από την οργανική ύλη, η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στο οκταπλάσιο της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Η εγκλωβισμένη βιοενέργεια ανακυκλώνεται με τη βοήθεια φυσικοχημικών διεργασιών στα φυτά, στο έδαφος, το χώρο γύρω από τα φυτά και την υπόλοιπη έμβια ύλη.

Η μόνη φυσικά ευρισκόμενη πηγή ενέργειας με άνθρακα, που τα αποθέματά της είναι ικανά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων, είναι η βιομάζα.

Η σύσταση της βιομάζας περιλαμβάνει βασικά στοιχεία όπως ο άνθρακας το υδρογόνο και το οξυγόνο, ενώ σε μικρότερα ποσοστά βρίσκονται το άζωτο, το θείο και η τέφρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στοιχειακής ανάλυσης από ξυλώδη βιομάζα (πριονίδι) φαίνεται στο παρακάτω Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Στοιχειακή ανάλυση ξυλώδους βιομάζας [54].

Στοιχείο	Περιεκτικότητα (%)
Άνθρακας	50.7
Οξυγόνο	41.2
Υδρογόνο	6.4
Θείο	0.05
Άζωτο	1
Τέφρα	0.6 (K,Na,Ca,Mg,Si)

2.1.1 Είδη και ενεργειακό δυναμικό

Είδη βιομάζας

Πρακτικά υπάρχουν δύο κύριοι τύποι βιομάζας. Αρχικά, η βιομάζα η οποία παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες και δεύτερον, οι υπολειμματικές μορφές. Οι υπολειμματικές μορφές περιλαμβάνουν τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και τα απορρίμματα. Υπάρχουν και ορισμένα υδατικά είδη βιομάζας τα οποία θεωρούνται κατάλληλα για ενεργειακές καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένου του φυτοπλαγκτόν, των μονοκυτταρικών και πολυκυτταρικών φυτών, φυτών γλυκού νερού και θαλάσσιων ειδών, για τα οποία όμως δεν ευνοείται η παραγωγή τους υπό τις συνθήκες της Νοτίου Ευρώπης [1].

Ενεργειακές καλλιέργειες

Χρησιμοποιούνται για διάφορους ενεργειακούς σκοπούς, κατά κύριο λόγο την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας και υγρών βιοκαυσίμων, καθώς μπορούν να αποδώσουν μεγάλες ποσότητες βιομάζας. Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι καλλιεργούμενα ή αυτοφυή είδη, παραδοσιακά ή νέα, τα οποία έχουν ως κύριο σκοπό και προϊόν την παραγωγή βιομάζας. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν το κριθάρι, το σιτάρι, ο αραβόσιτος, τα ζαχαρότευτλα και ο ηλιάνθος, όταν χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαιθανόλης και βιοντίζελ. Οι νέες ενεργειακές καλλιέργειες είναι κυρίως είδη με υψηλή παραγωγικότητα σε βιομάζα ανά μονάδα γης και αναφέρονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, τις γεωργικές και τις δασικές. Οι γεωργικές ενεργειακές καλλιέργειες διακρίνονται περαιτέρω, ανάλογα με το χρόνο που χρειάζεται για παραγωγή, σε ετήσιες και πολυετείς. Παρακάτω θα περιγραφούν οι ενεργειακές καλλιέργειες οι οποίες θεωρούνται ως πλέον κατάλληλες για τις μεσογειακές εδαφοκλιματικές συνθήκες και έχουν μελλοντικές προοπτικές.

Αρχικά θα αναφερθούν οι ετήσιες ενεργειακές καλλιέργειες. Ένα τέτοιο ετήσιο φυτό είναι η **ελαιοκράμβη** και τα φύλλα της χρησιμοποιούνται για διάφορες χρήσεις όπως για ανθρώπινη κατανάλωση, ζωοτροφή και λίπανση. Έπειτα από την εξαγωγή του ελαίου, τα υπολείμματα της χρησιμοποιούνται στην κτηνοτροφία, καθώς έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη. Η ελαιοκράμβη σύμφωνα με τελευταίες έρευνες θεωρείται ως το τρίτο σημαντικότερο φυτό για την παραγωγή ελαίου, μετά την σόγια και το φοινικέλαιο σε όλο τον κόσμο [2].

Ένα ακόμα ετήσιο φυτό, το οποίο παράγεται σε γεωργικές καλλιέργειες είναι ο **ηλίανθος** ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση το 2005 αποτελούσε τον μεγαλύτερο παραγωγό βιοντίζελ παγκοσμίως, από το οποίο το 10% προέρχεται από ηλίανθο. Στον ελλαδικό χώρο η καλλιέργεια ηλίανθου έχει ως σκοπό την παραγωγή φυτικού ελαίου διατροφής, αντίθετα στην Ευρώπη είναι αρκετά διαδεδομένη η καλλιέργεια του.

Το **γλυκό και κυτταρινούχο σόργο** έχει υψηλές αποδόσεις σε βιομάζα καθώς είναι ένα C_4 μονοετές φυτό με μεγάλη φωτοσυνθετική ικανότητα, υψηλό ποσοστό σε διαλυτά σάκχαρα (30-45% επί του ξηρού βάρους) και κυτταρίνες και χρειάζεται σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε άρδευση και λίπανση. Επιπλέον προσαρμόζεται εύκολα σχετικά σε διάφορα είδη εδαφών και σε ποικίλες κλιματικές συνθήκες. Θεωρείται κατάλληλο για την παραγωγή βιοαιθανόλης, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ζυμώσιμα σάκχαρα.

Το **σιτάρι** και το **κριθάρι** είναι ομοίως ετήσια γεωργικά φυτά, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια των δημητριακών. Κυρίως τα τελευταία χρόνια, υπάρχει έντονη δραστηριότητα στην αξιοποίηση του σιταριού και κριθαριού ως πρώτη ύλη για παραγωγή βιοαιθανόλης. Ως αξιόλογο παράδειγμα στην Γαλλία, τα σιτηρά για παραγωγή βιοαιθανόλης αντιπροσωπεύουν το 20%, και την τελευταία δεκαετία η καλλιεργούμενη έκταση με σιτάρι για βιοαιθανόλη έχει σχεδόν τριπλασιαστεί [3].

Τα **ζαχαρότευτλα** αποτελούν την δεύτερη πιο σημαντική πηγή σακχάρων μετά από το ζαχαροκάλαμο, αφού οι ρίζες των τεύτλων περιέχουν μέχρι και 20% σάκχαρα (επί του χλωρού βάρους). Ομοίως με το κριθάρι και το σιτάρι, τα ζαχαρότευτλα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαιθανόλης.

Υπάρχουν ακόμη πολυετείς ενεργειακές καλλιέργειες όπως το **καλάμι**, το οποίο συναντάται κυρίως κοντά σε ποτάμια και λίμνες, γενικά σε αγρούς με υψηλά επίπεδα υγρασίας, αλλά μπορεί να καλλιεργηθεί και σε ευρεία κλίμακα εδαφοκλιματικών συνθηκών. Οι πιθανές χρήσεις του καλαμιού είναι για παραγωγή ενέργειας, θερμικής και ηλεκτρικής, χαρτοπολτού και δομικών υλικών.

Ένα ακόμη παράδειγμα πολυετούς αγροστώδους, ριζωματώδους φυτού είναι ο *μίσχανθος*, που προέρχεται από χώρες τις Νότιο- ανατολικής Ασίας, αλλά καλλιεργείται και στην Ευρώπη εδώ και αρκετά χρόνια ως διακοσμητικό φυτό. Τα τελευταία χρόνια μελετάται η καλλιέργεια του για παραγωγή βιοκαυσίμων ή χαρτοπολτού.

Σε κάποιες περιοχές της μεσογειακής ζώνης καλλιεργείται παραδοσιακά ένα πολυτελές είδος αγκαθιού, η *αγριοαγκινάρα*. Προσαρμόζεται πολύ καλά σε ξηρά κλίματα, όπως όλα τα είδη των αγκαθιών, ακόμη και χωρίς άρδευση και επειδή δεν αποτελεί χειμερινό φυτό δίνει το μέγιστο των αποδόσεων, εκμεταλλευόμενη τις βροχοπτώσεις του φθινοπώρου και του χειμώνα. Ως πιθανές χρήσεις είναι η παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και βιοελαίου [4].

Τέλος, ένα πολυετές C_4 αγροστώδες φυτό είναι το *switchgrass* ή αλλιώς γρασίδι ταχείας ανάπτυξης. Η καλλιέργεια του γρασιδιού ταχείας ανάπτυξης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, με κυριότερο την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων βιομάζας, ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών, όπως λίπανση και ζιζανιοκτόνα. Ως κυριότερες χρήσεις από την παραγωγή του είναι η παραγωγή υγρών και στερεών βιοκαυσίμων, αλλά και βιομηχανικές πρώτες ύλες [2].

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία των ενεργειακών καλλιεργειών είναι οι δασικές ενεργειακές καλλιέργειες. Σε αυτές ανήκει ο *ευκάλυπτος* που προέρχεται από την Αυστραλία, αλλά τους τελευταίους δύο αιώνες έχει εμφανιστεί και σε πολλά υποτροπικά και τροπικά κλίματα. Ο ευκάλυπτος χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο βρίσκει αξιόλογες εφαρμογές στην βιομηχανία του χαρτοπολτού [6].

Τέλος, όσον αφορά τις δασικές ενεργειακές καλλιέργειες, προτιμάται επίσης η *ψευδακακία*. Χαρακτηρίζεται από ταχύτατη ανάπτυξη του υπέργειου μέρους, σημαντική παραγωγή βιομάζας και εξαιρετική αναβλάστηση μετά την κοπή, ενώ χρησιμοποιεί τον C_3 φωτοσυνθετικό μηχανισμό. Η κύρια χρήση της ψευδακακίας είναι για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος, ωστόσο θεωρείται πολλά υποσχόμενη, αφού έχει μεγάλη παραγωγή βιομάζας, ταχύτατους ρυθμούς ανάπτυξης, υψηλής πυκνότητας και χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία ξύλο.

Υπολειμματικές μορφές βιομάζας

Προέρχονται κυρίως από παρθένα βιομάζα και είναι υλικά τα οποία περιέχουν ενέργεια και συνήθως απορρίπτονται. Η υπολειμματική μορφή βιομάζας μπορεί να προέρχεται είτε από ανθρώπινη δραστηριότητα, είτε από φυσικές διεργασίες. Περιλαμβάνει αγροτικά υπολείμματα, όπως κοπριά ζώων και υπολείμματα από συγκομιδή σοδειών σε αγροτικές και συναφείς διεργασίες, καθώς και από υπολειμματικές μορφές ξύλου και σχετικά υπολείμματα στα δάση από διάφορες δασοκομικές δραστηριότητες. Επιπλέον, στην υπολειμματική μορφή βιομάζας συγκαταλέγονται τα απόβλητα της αγροτικής και της σχετικής με τα δάση βιομηχανίας, όπως η βιομηχανία πολτού και χάρτου καθώς και η βιομηχανία παραγωγής τροφών και τα στερεά δημοτικά απόβλητα.

Αγροτικά υπολείμματα

Στην προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης να ενισχύσει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών, σημαντικό ρόλο κατέχουν τα αγροτικά υπολείμματα ως καύσιμα σε μικρά συστήματα παραγωγής θερμότητας. Βασικά πλεονεκτήματα είναι η τοπική προσβασιμότητα, τα οικονομικά οφέλη και η σημαντική μείωση των αερίων του θερμοκηπίου [54].

Τα αγροτικά υπολείμματα διαχωρίζονται μεταξύ τους, ανάλογα αν προέρχονται από ετήσιες ή πολυετείς συγκομιδές της σοδειάς. Οι πιο βασικές ετήσιες σοδειές είναι τα χειμερινά δημητριακά, το ρύζι, ο αραβόσιτος, το βαμβάκι, ο καπνός και τα ζαχαρότευτλα. Επίσης, υπολείμματα από πολυετή φυτά μετά το κλάδεμα των δέντρων και αμπελιών, όπως κλαδέματα ελιάς, πορτοκαλιάς, αμυγδαλιάς, ροδακινιάς και αμπέλου.

Ζωικά υπολείμματα

Μεγάλο είναι το διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας που έχει ζωική προέλευση και αποτελείται κυρίως από απόβλητα εντατικής κτηνοτροφίας από πτηνοτροφεία, χοιροστάσια, βουστάσια και σφαγεία. Τα πρόβατα, τα ερίφια, οι αγελάδες, οι χοίροι και τα κοτόπουλα πτηνοτροφείων είναι ζώα, τα οποία παράγουν μεγάλες και τοπικά συγκεντρωμένες ποσότητες περιττωμάτων. Στον Ελλαδικό χώρο υπάρχει έντονη εκτροφή προβάτων και εριφίων και η κοπριά βρίσκεται διασκορπισμένη σε όλη την έκταση των βοσκοτόπων [5].

Δασικά υπολείμματα

Τα καυσόξυλα, τα υπολείμματα υλοτομίας, υπό την μορφή φλοιών, κορυφών δέντρων, κλαδιών, φύλλων και βελονών κωνοφόρων τα οποία παραμένουν στο έδαφος, υπολείμματα από αραιώσεις δέντρων και από υλικό προερχόμενο από την απομάκρυνση δέντρων της υπό ορόφου βλάστησης λόγω προστασίας εναντίων των πυρκαγιών, αποτελούν τη βιομάζα δασικής προέλευσης. Ωστόσο, δεν απομειώνεται η δασική πρώτη ύλη όταν λαμβάνονται

υπολειμματικές μορφές ξύλου με την ορθή διαχείριση του δάσους. Με στόχο τη μελλοντική παραγωγικότητα, τη βελτίωση της υγείας και την αναγέννηση του δάσους χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές συντήρησης, όπως η δενδροφύτευση, ώστε να μείνει αναλλοίωτη η αρχική δασική πηγή [5].

Βιομηχανικά απόβλητα

Από βιομηχανίες πυρηνελαιουργείων και ελαιόλαδου, σπορελαιουργεία, βιομηχανίες επεξεργασίας φρούτων, οινοποιεία, εκκοκκιστήρια βάμβακος, βιομηχανίες ρυζιού και αραβόσιτου και αλευροβιομηχανίες προέρχονται τα βασικά αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα υπό την μορφή φλοιών, κελυφών και πυρήνων. Μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων ξύλου παράγονται από τις βιομηχανίες προϊόντων ξύλου, οι οποίες περιλαμβάνουν τις μονάδες παραγωγής χάρτου, τα πριονιστήρια και τις μονάδες κατασκευής επίπλων.

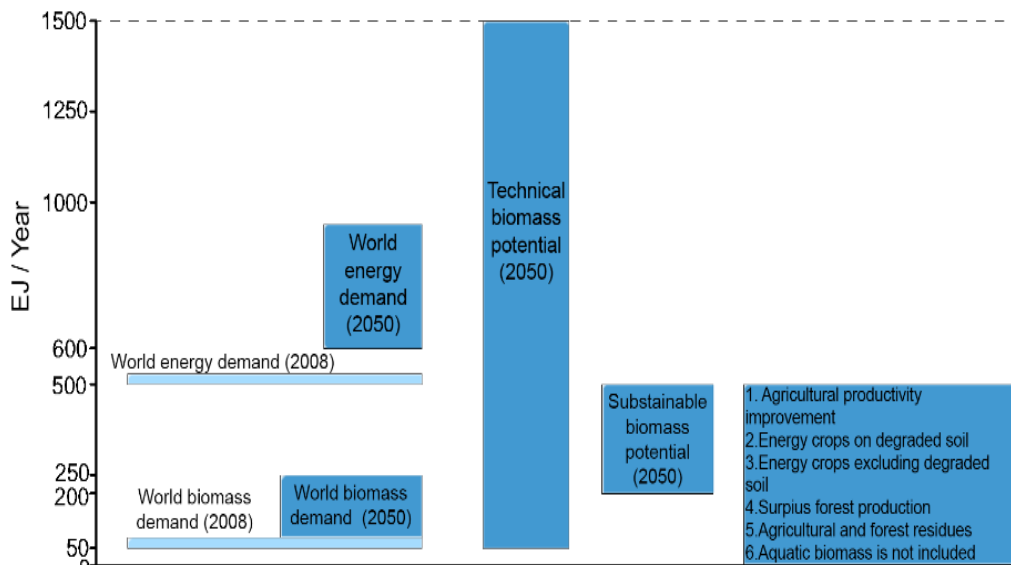
Δημοτικά απόβλητα

Τα δημοτικά στερεά απόβλητα, όπως αστικά απορρίμματα και σκουπίδια και τα βιο-στερεά (λύματα και λάσπη) αποτελούν τα δημοτικά απόβλητα, τα οποία προσφέρουν προοπτικές και ευκαιρίες για συνδυασμένη συγκομιδή και ανάκτηση ενέργειας. Το χαρτί, το χαρτόνι, τα πλαστικά, τα σκουπίδια από αυλές, το ξύλο και τα υπολείμματα του είναι τα δημοτικά απόβλητα τα οποία παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Τα απόβλητα ύδατα από οικιακές πηγές, την βιομηχανία, την διήθηση των επίγειων υδάτων και την απορροή των υδάτων των καταιγίδων περιέχουν τα κύρια βιο-στερεά (στερεά τα οποία είτε καθιζάνουν, είτε αιωρούνται

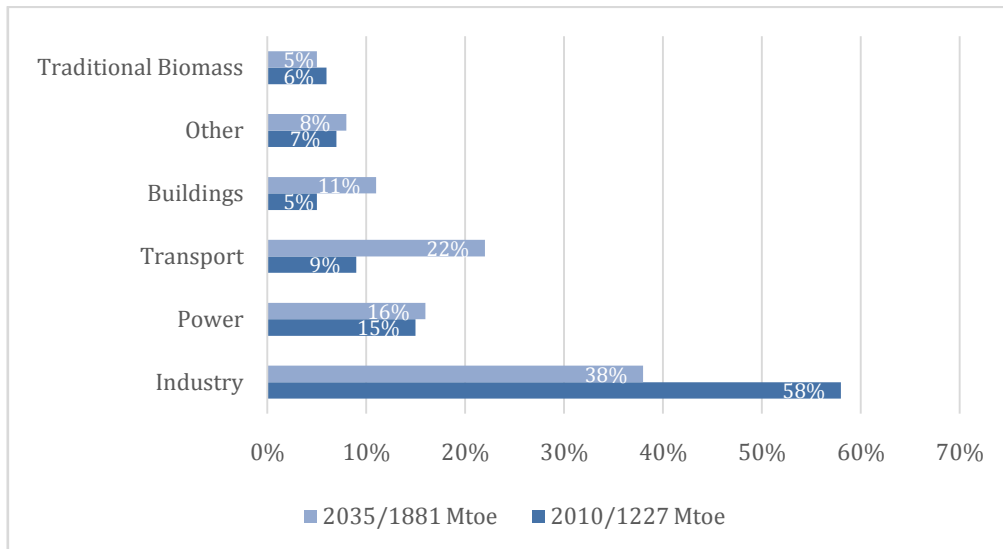
Ενεργειακό δυναμικό

Η ενέργεια είναι η πρωταρχική απαίτηση σε όλες σχεδόν τις πτυχές της ζωής και σε όλες τις χώρες είναι υπεύθυνη για την ύπαρξη οικοσυστημάτων, τους ανθρώπινους πολιτισμούς και την ίδια τη ζωή. Κοινωνίες και περιοχές του κόσμου έχουν προσαρμοστεί σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και καθορίζουν τους δικούς τους ενεργειακούς πόρους και ενεργειακή ζήτηση. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η βιώσιμη ανάπτυξη και η ζήτηση ενέργειας να συμβαδίζουν. Η βιωσιμότητα της ενέργειας αναγνωρίζεται ως αποφασιστικός παράγοντας για την επίτευξη μιας συνολικής αιεφόρους ανάπτυξης μιας χώρας [1-4]. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνητικά άφθονες και εξασφαλίζουν όλες τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες που προβλέπονται κατά τον επόμενο αιώνα [5-7]. Δασικά, γεωργικά και άλλα οργανικά απόβλητα (π.χ. δημοτικά στερεά απόβλητα) μπορούν να αποδώσουν ποσότητα ενέργειας παγκοσμίως μεταξύ 50 και 150 EJ / έτος. Ακόμα στην κάλυψη της ζήτησης θα μπορούσαν να συμβάλλουν οι ενεργειακές καλλιέργειες, η υπερβολική ανάπτυξη

των δασών και η βελτιωμένη γεωργία. Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, καθώς και οι προοπτικές εξασφάλισής της από βιομάζα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1:

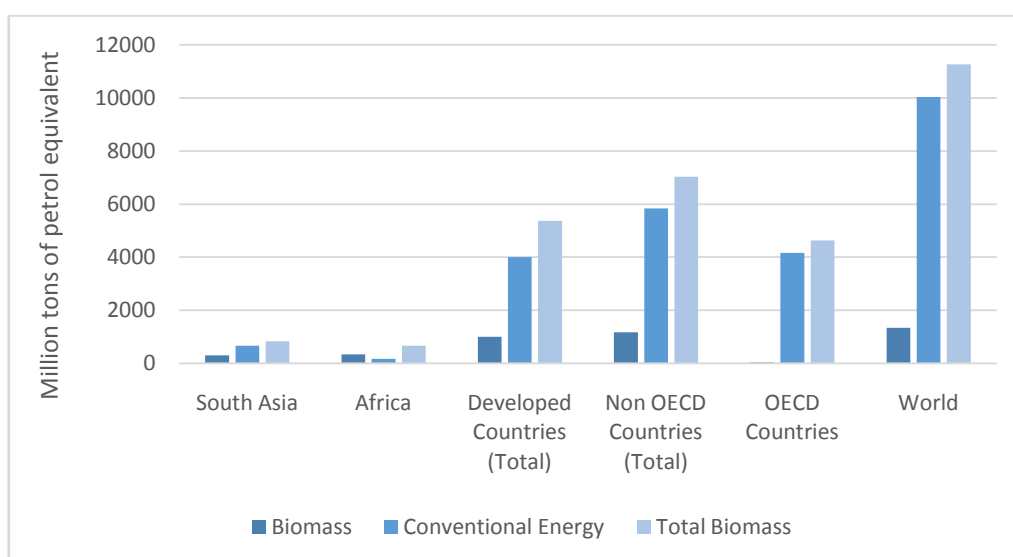


Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχει μια επείγουσα ζήτηση για βιοενέργεια, χωρίς να υπολογίζεται η χρήση της παραδοσιακής βιομάζας στο σενάριο των νέων πολιτικών μεταξύ του 2010 και του 2035. Το σενάριο αυτό θα αυξηθεί με μέσο ρυθμό 3.3% ετησίως. Θα αυξηθεί από 526 Mtoe (εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου) το 2010 σε περίπου 1200 Mtoe έως το 2035. Ο βιομηχανικός τομέας αναφέρεται ως ο πρωταρχικός καταναλωτής βιοενέργειας το 2010 με 196 Mtoe και αναμένεται ότι μέχρι το 2035 η κατανάλωση βιοενέργειας θα υπερβεί τα 300 Mtoe. Ωστόσο, η κατανάλωση βιοενέργειας θα αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο μερίδιο στο τομέα της παγκόσμιας ενέργειας έως το 2035 (Σχήμα 2.2) [9].



Σχήμα 2.2: Παγκόσμια χρήση βιοενέργειας ανά τομέα και χρήση βιομάζας [9].

Βιώσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως βιομάζα, ηλιακή ενέργεια (θερμικά και φωτοβολταϊκά), υδροηλεκτρικά, αιολικά, γεωθερμικά και θαλάσσια είναι οι πηγές ενέργειας που αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία μελλοντικού ενεργειακού εφοδιασμού [10]. Η βιομάζα, ως πηγή ενέργειας, έχει ένα πλεονέκτημα έναντι άλλων πηγών ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς μπορεί να αποθηκευτεί και είναι άμεσα διαθέσιμη όλο το χρόνο από διάφορες πηγές. Το 2010 συνολικά το 10% περίπου της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας προερχόταν αποκλειστικά από βιομάζα [11,12] και από τις περαιτέρω εξελίξεις αναμένεται αύξηση σε δύο έως έξι φορές μέχρι το 2050 [13,14]. Οι εκτιμήσεις της παγκόσμιας βιομάζας για το 2020 παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3 [14].



Σχήμα 2.3: Παγκόσμιες ενεργειακές ποσοτικές εκτιμήσεις βιομάζας για το 2020 (Mtoe-Ισοδυναμούν σε εκατομμύρια τόνους πετρελαίου) [14].

Η αξιοποίηση γεωργικών υπολειμμάτων για παραγωγή βιοενέργειας μεγάλης κλίμακας είναι πλέον μια κοινή πρακτική σε πολλές χώρες [1-3]. Αρκετές χώρες όπως η Δανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ισπανία, η Σουηδία, η Κίνα και η Ινδία έχουν αναπτύξει μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις για παραγωγή ενέργειας από υπολείμματα καλλιεργειών [2,4,5]. Βασικά υπολείμματα καλλιεργειών περιλαμβάνουν τον σπόρο του αραβοσίτου, το σιτάρι, το άχυρο, το άχυρο ρυζιού, φλοιούς και υπολείμματα ξηρού πολτού. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η χρήση του υπολείμματος ξηρού πολτού του ζαχαροκάλαμου για την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας είναι η πιο κοινή και ώριμη εφαρμογή ενέργειας των υπολειμμάτων καλλιεργειών, για τις χώρες με μεγάλες βιομηχανίες ζαχαροκάλαμου. Υπάρχει λιγότερη εμπειρία στην μετατροπή ενέργειας για άλλα υπολείμματα καλλιεργειών, αλλά υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στη θερμική διάσπαση αραβοσίτου για προηγμένα βιοκαύσιμα, ιδίως στις Ηνωμένες Πολιτείες [6,9,10]. Στην Ευρώπη, η Δανία πρωτοστάτησε σε μεγάλη κλίμακα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άχυρο και έχει εμπορευθεί την τεχνολογία από το 1989. Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των υπολειμμάτων της καλλιέργειας είναι ότι η χρήση τους οδηγεί σε ελάχιστες ή καθόλου επιπτώσεις στην αλλαγή χρήσης της γης (σε σύγκριση με τις ενεργειακές καλλιέργειες). Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Ομάδα για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) βιομάζας [6], τα γεωργικά κατάλοιπα είναι πιθανό να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα, συμβάλλοντας μεταξύ 15 και 70 EJ [7] στη μακροπρόθεσμη παγκόσμια ενεργειακή προμήθεια. Τα γεωργικά υπολείμματα θεωρούνται λιγότερο αμφισβητούμενα, λόγω του χαμηλού κόστους, φέρουν λίγους κινδύνους και συνεπώς αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ενεργειακό πόρο για χώρες με μεγάλη γεωργική παραγωγική βάση. Υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία, η οποία προσφέρει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση της συγκομιδής και της προσφοράς υπολειμμάτων καλλιεργειών, ενώ λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια αειφορίας το κλειδί είναι η συντήρηση της γονιμότητας του εδάφους, των θρεπτικών ουσιών και των επιπέδων άνθρακα.

Οι διαθέσιμες μελέτες για τα δυναμικά υπολείμματα των καλλιεργειών παρουσιάζουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην κακή κατανόηση των παραγόντων που καθορίζουν την πιθανή διαθεσιμότητα και τα αποτελέσματα σε απλές υποθέσεις χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση αυτών των παραγόντων. Οι περισσότερες μελέτες αξιολογούν μόνο μέρος της αλυσίδας εφοδιασμού ή αποκλείουν την οικονομική σκοπιμότητα, εφαρμόζοντας μια μεθοδολογία για οικονομικό δυναμικό βιοενέργειας των διαφόρων υπολειμμάτων των καλλιεργειών, λαμβάνοντας υπόψη τα κρίσιμα κριτήρια βιωσιμότητας και συμπεριλαμβάνοντας την οικονομία της αλυσίδας

εφοδιασμού, μέχρι την τελική διευκόλυνση μετατροπής. Τέτοιες αξιολογήσεις είναι χρήσιμες για τον εντοπισμό του τι μπορεί βιώσιμα να κινητοποιηθεί από το αγρόκτημα, αλλά και αυτό που είναι οικονομικά εφικτό για εφαρμογές βιοενέργειας. Για χώρες όπως η Νότια Αφρική, όπου η κατανόηση της παραγωγής και του δυναμικού εφοδιασμού σε υπολείμματα καλλιεργειών είναι περιορισμένη, είναι επιτακτική ανάγκη να διεξάγονται εκτιμήσεις για την αξιολόγηση των τεχνικών της οικονομικής και περιβαλλοντικής σκοπιμότητας της χρήσης τους. Η Νότια Αφρική επιλέχθηκε ως περίπτωση μελέτης, επειδή είναι μεγάλη χώρα με μεγάλη γεωργική παραγωγική βάση, όπου σημαντικές ποσότητες βιομάζας είναι δυνητικά διαθέσιμες για ενεργειακούς σκοπούς [20]. Επιπλέον, η χρήση υπολειμμάτων καλλιεργειών και ο έλεγχος διάβρωσης του εδάφους είναι κρίσιμα ζητήματα, που παρουσιάζουν ποικιλία στο ημισφαιρικό και γεωγραφικό κλίμα της Νότιας Αφρικής. Έχουν διεξαχθεί μόνο λίγες μελέτες σχετικά με τη βιοενέργεια των γεωργικών υπολειμμάτων για τη Νότιο Αφρική.

Σύμφωνα με γενικές εκτιμήσεις, σήμερα μόνο το 1/7 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τη βιομάζα και αφορά κυρίως τις παραδοσιακές χρήσεις της (καυσόξυλα κ.α.) [20]. Η βιομάζα στη χώρα μας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμότητας στον οικιακό τομέα (μαγειρική, θέρμανση), κατά τον παραδοσιακό τρόπο για τη θέρμανση θερμοκηπίων, σε ελαιουργεία, καθώς και για τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών στη βιομηχανία (εκκοκκιστήρια βαμβακιού, παραγωγή προϊόντων ξυλείας, ασβεστοκάμινο κ.α.). Ως πρώτη ύλη σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται παραπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου, ελαιοπυρηνόξυλα, κουκούτσια ροδάκινων και άλλων φρούτων, τσόφλια αμυγδάλων, βιομάζα δασικής προέλευσης, άχυρο σιτηρών, υπολείμματα εκκοκκισμού κ.α.

Παρ' όλα αυτά, οι προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας στη χώρα μας είναι εξαιρετικά ευοίωνες, καθώς υπάρχει σημαντικό δυναμικό, μεγάλο μέρος του οποίου είναι τεχνικά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμο. Μάλιστα, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι, συχνά, οικονομικά ανταγωνιστική της ενέργειας που παράγεται από τις συμβατικές πηγές (ορυκτά καύσιμα).

Με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα διάθεσης και χρήσης στερεής βιομάζας, καθώς και την υπάρχουσα βιομηχανική δραστηριότητα (βιομηχανία ξυλείας, ελαιόλαδου, βαμβακιού και άλλων αγροτοβιομηχανικών δραστηριοτήτων) το δυναμικό μπορεί να υποστηρίξει τη λειτουργία σταθμών παραγωγής 400-500 MWe ως τάξη μεγέθους (ΥΠΕΚΑ, 2012¹). Πέραν του ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της βιομάζας δυστυχώς παραμένει αναξιοποίητο, πολλές φορές αποτελεί αιτία πολλών δυσάρεστων και επικίνδυνων καταστάσεων (πυρκαγιές, δυσκολία στην εκτέλεση εργασιών, διάδοση ασθενειών κ.α.).

¹ http://opengov.gr/minenv/?p=4201_11/2012

2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενεργειακής αξιοποίησης

Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων, με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

1. Η καύση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και 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 [54]. Σύμφωνα, με μία πρόσφατη έρευνα καταγράφηκαν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τη καύση μπρικετών ξύλου, σε αντίθεση με τις υψηλές εκπομπές νιτρικών και μεθανίου. Παρόλα αυτά, αποδείχθηκε ότι η καύση βιομάζας είναι πιο φιλική από περιβαλλοντικής απόψεως καθώς, μετρήθηκε ότι η καύση μπρικετών ξύλου απέδωσε 12 φορές χαμηλότερους ρύπους σε σχέση με τη καύση άνθρακα.
2. Η μηδαμινή ύπαρξη του θείου στη βιομάζα συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του θείου (SO_2), που είναι υπεύθυνο για την όξινη βροχή.
3. Εφόσον η βιομάζα είναι εγχώρια πηγή ενέργειας, η αξιοποίησή της συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου, στην εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και στην εξοικονόμηση συναλλάγματος.
4. Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας σε μια περιοχή αυξάνει την απασχόληση στις αγροτικές περιοχές και τη συγκράτηση του πληθυσμού στις εστίες τους, συμβάλλοντας έτσι στη κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη της περιοχής. Μελέτες έχουν δείξει ότι η παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων έχει θετικά αποτελέσματα στον τομέα της απασχόλησης, τόσο στον αγροτικό όσο και στο βιομηχανικό χώρο.
5. Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη, καθώς απαιτείται μόνο μια σύντομη χρονική περίοδος για να αναπληρωθεί ό,τι χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας [15].

Ωστόσο, τα μειονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση της βιομάζας και αφορούν κυρίως τις δυσκολίες στην εκμετάλλευσή της, είναι τα εξής:

1. Ο αυξημένος όγκος και η μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα δυσχεραίνουν την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας.
2. Η μεγάλη διασπορά και η εποχιακή παραγωγή της βιομάζας δυσκολεύουν την συνεχή τροφοδοσία με πρώτη ύλη των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας.
3. Βάσει των παραπάνω παρουσιάζονται δυσκολίες κατά τη συλλογή, μεταφορά, και αποθήκευση της βιομάζας, που αυξάνουν το κόστος της ενεργειακής αξιοποίησης.
4. Οι σύγχρονες και βελτιωμένες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας απαιτούν υψηλό κόστος εξοπλισμού, συγκρινόμενες με αυτό των συμβατικών καυσίμων.

Λόγω των παραπάνω μειονεκτημάτων και για τη πλειοψηφία των εφαρμογών της το κόστος της βιομάζας παρέμενε υψηλό σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες η χρήση της βιομάζας παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά οφέλη. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα αυτό περιορίζεται σταδιακά, αφ' ενός λόγω της ανόδου των τιμών των ορυκτών καυσίμων (κυρίως πετρέλαιο), αφ' ετέρου λόγω της βελτίωσης και ανάπτυξης των τεχνολογιών αξιοποίησης της βιομάζας. Εν κατακλείδι, πρέπει να λαμβάνονται υπόψην κάθε φορά τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση της βιομάζας, τα οποία αν και συχνά δε μπορούν να αποτιμηθούν με οικονομικά μεγέθη, είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα της ζωής των ανθρώπων.

2.2 Αγροτικά Υπολείμματα

2.2.1 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά

Οι διεργασίες που έχουν ως πρώτη ύλη παρθένα και υπολειμματική βιομάζα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας ή για την παραγωγή αέριων, υγρών και στερεών καυσίμων. Επίσης, από ένα μεγάλο εύρος διεργασιών βιομάζας μπορούν να παραχθούν χημικά. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συνολική διεργασία της βιομάζας είναι το είδος του καυσίμου, τα φυσικά του χαρακτηριστικά και η χημική του σύνθεση. Ο τύπος της βιομάζας και η προ επεξεργασία που έχει υποστεί καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και την ποιότητα της βιομάζας ως καύσιμο. Όσον αφορά τις ενεργειακές καλλιέργειες κατά την φάση της παραγωγής επηρεάζεται μόνο η περιεκτικότητα σε τέφρα, ανόργανα υλικά και νερό. Επιπρόσθετα, οι τοπικές καιρικές συνθήκες και η διαχείριση της καλλιέργειας, όπως η λίπανση, ο χρόνος συγκομιδής της σοδειάς επηρεάζουν την ποιότητα της βιομάζας. Τέλος, κατά την φάση της προμήθειας προσδιορίζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του καυσίμου [16-18].

Παράμετροι προσεγγιστικής ανάλυσης

Από τις τυπικές προσεγγιστικές αναλύσεις ειδών βιομάζας εξάγονται η περιεκτικότητα σε υγρασία, πτητική ύλη, τέφρα και μόνιμο άνθρακα σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα CEN/TC335 [78].

Στο πίνακα που παρατίθεται παρακάτω αναφέρονται οι περιεκτικότητες σε υγρασία οι οποίες κυμαίνονται από 2-3% κατά βάρος για τα παράγωγα βιομάζας, έως και 98% κατά βάρος για πρωτογενή βιοστερεά. Όσον αφορά το νωπό ξύλο του αγρού η περιεκτικότητα σε υγρασία πριν την ξήρανση είναι συνήθως 50%, ενώ τα κύρια βιοστερεά περιέχουν μόνο ένα μικρό ποσοστό αιωρουμένων και διαλυμένων στερεών στο νερό [18].

Όταν η βιομάζα θερμαίνεται σε θερμοκρασίες άνω των 200 °C απελευθερώνει την πτητική ύλη. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας (76-86% κ.β.) σε πτητική ύλη η βιομάζα αναφλέγεται ευκολότερα, αν και η καύση αναμένεται ταχεία και δύσκολα ελεγχόμενη. Το μεγαλύτερο μέρος ενός καυσίμου βιομάζας εξαερώνεται, πριν ξεκινήσουν οι ομοιογενείς αντιδράσεις καύσης στην αέρια φάση και με αυτό το τρόπο επηρεάζεται η θερμική αποσύνθεση και η συμπεριφορά της καύσης των εξανθρακωμάτων [19-23].

Για τον υπολογισμό της συνολικής οργανικής ύλης αφαιρείται από το 100 το ποσοστό περιεκτικότητας σε ανόργανη ύλη, το οποίο είναι αποτέλεσμα της αποτέφρωσης δειγμάτων βιομάζας σε θερμοκρασία 550 °C. Η περιεκτικότητα σε τέφρα κυμαίνεται από 0.5% στο ξύλο, 5-10% σε ενεργειακές καλλιέργειες και 30-40% σε φλοιούς ρυζιού. Κατά κύριο λόγο, η περιεκτικότητα των καυσίμων βιομάζας σε τέφρα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, άλλα πάντα μέσα στα αποδεκτά όρια [22]. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την βιώσιμη χρήση της τέφρας κατέχουν σημαντικό ρόλο οι συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα που βρίσκονται στην τέφρα της βιομάζας. Σημαντικά μικρότερες ποσότητες βαρέων μετάλλων, σε σχέση με τη τέφρα που προέρχεται από ξύλο ή φλοιούς, περιέχει η τέφρα που προέρχεται από άχυρο, δημητριακά και χόρτα.

Ο μόνιμος άνθρακας αναφέρεται στο οργανικό κλάσμα του στερεού που παραμένει μετά την απομάκρυνση των πτητικών κατά την πυρόλυση και η περιεκτικότητά του προσδιορίζεται από την αφαίρεση του αθροίσματος των ποσοστών υγρασίας, πτητικών συστατικών και τέφρας από το 100.

Παραγωγή Θερμότητας σε Πρότυπη Μονάδα Σταθερής Κλίνης μέσω Πολυτροφοδοσίας Καυσίμων

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Πίνακας 2.2: Εύρος τιμών προσεγγιστικής ανάλυσης ειδών βιομάζας (επί ξηρού) [20-22].

<i>Κατηγορία</i>	<i>Υγρασία (%)</i>	<i>Πτητικά (%)</i>	<i>Τέφρα (%)</i>	<i>Μόνιμος Άνθρακας (%)</i>
Απόβλητα				
Υπολείμματα ελιάς	60-70	66-83	2-9	8-32
Δασικά υπολείμματα	50-60	72-75	0.2-3	22-28
Πριονίδι	15-60	70-87	0.4-3	10-30
Κοπριά βοοειδών	20-70		23-35	
Πρωτεύοντα βιοστερεά	90-98		25-30	
Λυματολάσπη	54-86	15-85	4-65	2-20
Δημοτικά στερεά απορρίμματα	15-60	25-65	10-60	3-10
Ξηρά ανακυκλώσιμα υλικά	15-30	65-70	14-22	8-21
Αγροστώδη				
Γλυκό σόργο	20-70	60-65	2-9	26-30
Σπόροι & φλούδα ηλιάνθου	4-5	69-76	2-7	17-29
Γρασίδι ταχείας ανάπτυξης	30-70	70-77	4-11	12-26
Μίσχανθος	8-60	78-87	0.4-9	10-22
Ελαιοκράμβη	4-5	80-85	5-6	9-15
Ξυλώδη				
Ξύλο βάμβακος	30-60	65-70	1-2	28-34
Ευκάλυπτος	30-60	65-82	1-3	15-25
Λεύκη	30-60	75-82	1-2	16-24
Πεύκο	30-60	73-82	0.1-11	15-27
Παραγόμενα				
Άχυρο ρυζιού	5-25	50-73	5-23	5-22
Βαγάσση	5-12	68-86	68-86	10-31
Υπολ. εκκοκκισμού βάμβακος	7-15	67-83	67-83	10-31
Χαρτί	3-13	73-90	73-90	6-26
Φλοιός πεύκου	5-30	70-75	70-75	22-28

Η βιομάζα σε σχέση με τον γαιάνθρακα παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά και υγρασία και ταυτοχρόνως χαμηλότερη πυκνότητα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος μεταφοράς, αποθήκευσης, επεξεργασίας και τροφοδοσίας των υλικών στις μονάδες μετατροπής. Αντιθέτως, οι τιμές τις τέφρας στην περιεκτικότητα της βιομάζας είναι χαμηλότερες από τους γαιάνθρακες.

Παράμετροι στοιχειακής ανάλυσης

Ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο χρησιμοποιούνται σαν παράμετροι ταξινόμησης της βιομάζας και οι σχετικές τους ποσότητες είναι αρκετά σημαντικές για την εκτίμηση διαφόρων ιδιοτήτων της βιομάζας όπως η αεριοποίηση, ενώ το θείο και το άζωτο αποτελούν πιθανές πηγές ρύπανσης από την χρήση της. Οι χαμηλότερες τιμές ανώτερης θερμογόνου δύναμης της βιομάζας οφείλονται στο γεγονός ότι ο άνθρακας στα καύσιμα βιομάζας βρίσκεται υπό μορφή μερικής οξειδωσης. Οι συγκεντρώσεις στα αγροστώδη καύσιμα βιομάζας είναι χαμηλότερες από αυτές στα καύσιμα ξύλα. Επίσης, τα καύσιμα βιομάζας έχουν 0.4-0.9 άτομα οξυγόνου και 1.3-1.6 άτομα υδρογόνου ανά άτομο άνθρακα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα υλικά αυτά να είναι περισσότερο οξυγονωμένα και αντιδραστικά και λιγότερο αρωματικά [25].

Παραγωγή Θερμότητας σε Πρότυπη Μονάδα Σταθερής Κλίνης μέσω Πολυτροφοδοσίας Καυσίμων

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Πίνακας 2.3: Εύρος τιμών στοιχειακής ανάλυσης και θερμογόνου δύναμης ειδών βιομάζας (επί ξηρού) [20-22].

<i>Κατηγορία</i>	<i>Στοιχειακή ανάλυση (%)</i>						<i>Τέφρα (%)</i>	<i>ΑΘΔ (MJ/kg)</i>
	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>		
Απόβλητα								
Υπολείμματα ελιάς	44-55	5-7	34-50	0.5-1.5	0.1-0.2	<0.1	2-7	19-21
Δασικά υπολείμματα	48-53	6-6.5	40-44	0.3-0.5	<0.05	<0.05	0.2-3	18-22
Πριονίδι	47-51	5-6.5	35-44	0.1-1.5	<0.1	0.01	0.4-3	18-21
Κοπριά βοειδών	35-40	5-5.5	30-35	2-3	0.3-0.5		20-25	10-15
Πρωτεύοντα βιοστερεά	40-45	6-6.5	19-20	2-3	0.9-1		25-30	19-20
Λυματολάσπη	23-53	3-8	15-30	1.5-7	0.5-2.5	0.05-1	20-45	10-23
Δημοτικά στερεά απορρίμματα	23-53	2.5-8.5	15-35	0.2-2	<0.1		15-25	14-19
Ξηρά ανακυκλώσιμα υλικά	40-42	5-6	30-39	0.5-1	0.1-0.2	0.4-0.5	14-22	13-14
Αγροστόδια								
Γλυκό σόργο	34-47	4.5-6.5	40-41	0.1-1.5	0.02-0.2	0.4-0.5	1.5-4	16-18
Σπόροι & φλούδα ηλιανθου	44-48	4-6	41-50	0.7-1.5	<0.1	<0.1	3-5	12-18
Γρασίδι ταχείας ανάπτυξης	46-48	5-6	35-40	0.5-1.5	0.01-0.2	0.5-1.5	4-11	17-18
Μίσχανθός	46-51	4-6	40-44	0.3-6	0.04-1.4	0.07-2	1.5-4	17-19
Ελαιοκράμβη	60-62	8-9	23-25	3-4			5-6	25-26
Ξυλώδη								
Ξύλο βάμβακος	45-47	5-6	38-40	1-1.8	0.1-0.2	<0.1	1-7	16-18
Ευκάλυπτος	44-53	5-6	40-50	0.2-0.4	<0.1	0.05-0.2	0.9-1	19-30
Λεύκη	46-48	5-6	40-48	0.2-0.4	<0.1	<0.1	1-2	19-20
Πεύκο	49-52	6-6.5	41-44	0.1-0.2	<0.1	<0.05	0.3-0.5	18-30
Παραγόμενα								
Άχυρο	43-48	5-6	36-50	0.3-5	0.1-1	0.6-4	8-9	15-18
Βαγάσση	45-56	5-8	28-40	0.2-1	<0.05	<0.05	1-2	17-19
Υπολ. εκκοκκισμού βάμβακος	39-43	5-6	35-37	1.4-2	0.4-0.5		14-15	15-17
Χαρτί	39-45	6-6.5	44-48	<0.1	<0.05	<0.05	3-9	17-20

Σύμφωνα με ερευνητικές μελέτες, έχει αποδειχθεί η εξάρτηση του σχηματισμού NO_x κατά τις διεργασίες καύσης από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε άζωτο [20]. Έχει επιπλέον αποδειχθεί ότι, το 40-90% της συνολικής ποσότητας θείου του βιοκαυσίμου καταλήγει στην τέφρα. Το υπόλοιπο εκπέμπεται με το απ-αέριο με την μορφή SO₂ και σε μικρότερο βαθμό υπό την μορφή SO₃. Σημαντικό ρόλο παίζει το θείο όχι μόνο όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του θείου, αλλά και στις διεργασίες διάβρωσης. Η σημασία του χλωρίου έγκειται στις εκπομπές υδροχλωρίου και στην επίδραση που έχουν αφενός μεν στο σχηματισμό PCDD/F, αφετέρου δε στις διαβρωτικές ιδιότητες του στοιχείου αυτού.

Θερμογόνος δύναμη

Μια πολύ σημαντική παράμετρος από την άποψη μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια και συνθετικά καύσιμα είναι η θερμογόνος δύναμη. Λόγω των διαφορετικών χημικών δομών και της διαφορετικής περιεκτικότητας σε άνθρακα, τα διάφορα συστατικά βιομάζας παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές θερμότητας καύσης. Οι τιμές της ανώτερης θερμογόνου δύναμης (ΑΘΔ) κυμαίνονται για την κυτταρίνη και ημικυτταρίνη στα 18.6 MJ/kg, ενώ της λιγνίνης σε 23-25 MJ/kg. Επιπλέον, η ενεργειακή περιεκτικότητα επηρεάζεται από τις υψηλές συγκεντρώσεις ανόργανων συστατικών σε δεδομένα είδη βιομάζας, καθώς τα ανόργανα

υλικά δεν συνεισφέρουν στην θερμότητα της καύσης. Όπως, αναφέρεται στο Πίνακα 2.3 η ΑΘΔ των καυσίμων βιομάζας κυμαίνεται μεταξύ και 18-21 MJ/kg σε ξηρή βάση. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται σε νωπά καύσιμα ξύλα και φλοιούς, ενώ οι χαμηλότερες τιμές σε αγροστώδη καύσιμα. Οι τιμές ΑΘΔ των φύλλων είναι υψηλότερες από αυτές των κλαδιών, λόγω της συγκέντρωσης σε αυτά ελαίων και πτητικών ουσιών, οι οποίες έχουν υψηλότερη θερμογόνο δύναμη. Η κατώτερη θερμογόνο δύναμη μπορεί να υπολογιστεί από την ανώτερη θερμογόνο δύναμη με βάση τον τύπο [21]:

$$NVC = GCV \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2.447 \cdot \frac{w}{100} - 2.447 \cdot \frac{h}{100} \cdot 9.01 \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right)$$

όπου,

w: περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου κατά βάρος

h: περιεκτικότητα σε υδρογόνο του καυσίμου κατά βάρος

Η θερμογόνο δύναμη της βιομάζας τείνει είναι μικρότερη από αυτή των ασφαλούχων γαιανθράκων. Για παράδειγμα, τα σκληρά ξύλα έχουν μια περιεκτικότητα σε ενέργεια 20 MJ/kg και τα αγροτικά υπολείμματα 18.6 MJ/kg, σε αντίθεση με τον ασφαλούχο γαιάνθρακα που έχει 30 MJ/kg [21].

2.2.2 Διείσδυση στην αγορά

Παγκόσμια Αγορά

Οι παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται από την χρήση ορυκτών καυσίμων, (το 80% της συνολικής ζήτησης, δηλαδή πάνω από 400 EJ ετησίως) [25]. Ωστόσο, το 10-15% της ενεργειακής ζήτησης καλύπτεται από βιομάζα, καθιστώντας την μια από την σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σύμφωνα με κάποιες εκτιμήσεις, στις βιομηχανοποιημένες χώρες η βιομάζα προσφέρει το 9-13% της συνολικής παροχής ενέργειας, αλλά στις αναπτυσσόμενες χώρες η αναλογία μπορεί να φτάσει από 20% έως και 33%. Σε αρκετές χώρες, η βιομάζα καλύπτει επίπεδα μέχρι και 50-90% της συνολικής ζήτησης για ενέργεια. Ένα αρκετά μεγάλο μέρος αυτής της ποσότητας βιομάζας δεν είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμο και χρησιμοποιείται για μαγείρεμα και θέρμανση χώρων, γενικά από το λιγότερο πλούσιο τμήμα του πληθυσμού. Οι σύγχρονες μορφές βιο-ενέργειας, δηλαδή η εμπορική παραγωγή για την βιομηχανία, για την παραγωγή ισχύος ή παραγωγή καυσίμων για μεταφορές έχουν μια μικρή, πλην όμως σημαντική συνεισφορά στην συνολική παροχή ενέργειας (περίπου 7EJ/χρόνο), με το μερίδιο αυτό να αυξάνεται συνεχώς. Σήμερα, οι αγορές με ταχεία ανάπτυξη εκτός από την Ευρώπη, είναι αυτές της Νοτιοανατολικής Ασίας (Ταϊλάνδη, Μαλαισία, Ινδονησία), ειδικά όσον αφορά στην αποτελεσματική παραγωγή

ενέργειας από υπολείμματα και απόβλητα βιομάζας [25]. Όσον αφορά την παραδοσιακή χρησιμοποίηση της βιομάζας, ιδιαίτερα σημαντική είναι η παροχή θερμότητας και θέρμανσης των χώρων. Δεν αναμένεται μείωση της παραδοσιακής χρήσης της βιομάζας στις επόμενες δεκαετίες, καθώς αυτή σχετίζεται με την υπανάπτυξη και την φτώχεια, προβλήματα δυσεπίλυτα. Πλην όμως, ο εκσυγχρονισμός της χρήσης βιομάζας για τα φτωχότερα τμήματα του πληθυσμού, αποτελεί μια ουσιαστική συνιστώσα της προσπάθειας για αειφόρο ανάπτυξη σε πολλές χώρες. Αυτό παρέχει ευκαιρίες και κυρίως στις αγορές, για βελτιωμένες σόμπες, την παραγωγή καυσίμων υψηλής ποιότητας για μαγείρεμα με σημαντική αποδοτικότητα και πλεονεκτήματα για την υγεία.

Πρόσφατο παράδειγμα αποτελεί η Ινδονησία, όπου σύμφωνα με μια πρόσφατη έρευνα, είναι μία από τις χώρες με την μεγαλύτερη προοπτική για την ανάπτυξη και χρήση ανανεώσιμης ενέργειας από βιομάζα. Υπάρχουν πολλές δυνητικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υπολογίζοντας ότι το 55% του συνολικού πληθυσμού ζει σε αγροτικές περιοχές και χρησιμοποιεί την βιομάζα για μαγείρεμα και θέρμανση, με αποτέλεσμα η βιομάζα να είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση για της ενεργειακές ανάγκες στις αγροτικές περιοχές. Στην Ινδονησία, μόνο το 2012 παράχθηκαν 23 εκατομμύρια τόνοι φοινικέλαιου. Με την συνεχή ανάπτυξη της βιομηχανίας του φοινικέλαιου, υπάρχει πρόβλημα στην αξιοποίηση των στερεών αποβλήτων που ανακτώνται από την βιομηχανία. Έτσι δημιουργούνται ευκαιρίες της εκμετάλλευσης των αποβλήτων του φοινικέλαιου, με σκοπό την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων σε οικιακό ή βιομηχανικό τομέα. Σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις, η ανανεώσιμη ενέργεια βιομάζας που παράγεται από τα στερεά απόβλητα του φοινικέλαιου (κέλυφος καρύδας) είναι περίπου 54.8 GJ ετησίως, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να αντικατασταθεί η χρήση ορυκτών καυσίμων σε οικιακό τομέα ή μπορούν να εξάγουν ενέργεια σε άλλες βιομηχανίες [15].

Διαθέτονται αξιόπιστες τεχνολογίες, όπως η αεριοποίηση, προηγμένες εστίες για διάφορες εφαρμογές, βιομηχανικές και θέρμανση οικιών. Με την υποστήριξη της διεθνών οργανισμών η τεχνολογία της αεριοποίησης έχει εξαχθεί σε διάφορες χώρες με κυριότερη την Ινδία. Κύριοι άξονες είναι η αγροτική ανάπτυξη και η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, η κερδοφορία των εφαρμογών παραγωγής ισχύος ή συμπαραγωγής (CHP) έχει μεγαλύτερες προοπτικές στις τωρινές αγορές. Η συμπαραγωγή ενέργειας και θερμότητας είναι ιδιαίτερα ελκυστική σε περιπτώσεις όπου η θερμότητα απαιτείται σε υψηλά επίπεδα. Για ορισμένες βιομηχανίες, η παραγωγή θερμότητας από βιομάζα αποτελεί πολύ ενδιαφέρον. Δύο βιομηχανικοί κλάδοι, κατάλληλοι για εφαρμογή των αναπτυγμένων τεχνολογιών καύσης και αεριοποίησης της βιομάζας για παραγωγή ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα, είναι η βιομηχανία ζάχαρης με πρώτη ύλη το ζαχαροκάλαμο και ο κλάδος του χαρτιού και του χαρτοπολτού. Η πραγματική παγκόσμια ανάπτυξη τα αγοράς είναι παραγωγή ισχύος από βιομάζα, μέσω

τεχνολογίας προηγμένης καύσης και διατάξεων συν-καύσης. Η μέση κλίμακα των εφαρμογών καύσης, σε διάφορες αγορές, αυξάνεται λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας των πηγών βιομάζας και των οικονομικών πλεονεκτημάτων, από την επίτευξη οικονομιών κλίμακας της τεχνολογίας μετατροπής. Λόγω του χαμηλού κόστους των υπολειμμάτων στο τομέα αυτό είναι δυνατή η επίτευξη ανταγωνιστικότητας με τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό ισχύει κυρίως στις τεχνολογίες συν-καύσης, όπου το κόστος της επένδυσης είναι χαμηλό [34].

Τα παραγόμενα από βιομάζα καύσιμα για μεταφορές αντιπροσωπεύουν ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής χρήσης βιο-ενέργειας παγκοσμίως της τάξεως των 0,5 EJ (ή λιγότερο από 1%) [32]. Ωστόσο, αυτός είναι τομέας όπου αυξάνεται συνεχώς το ενδιαφέρον στην Ευρώπη, την Βόρεια Αμερική και την Ασία (κυρίως Κίνα, Ιαπωνία και Ινδία). Υπάρχουν τέσσερις παράγοντες, οι οποίοι δικαιολογούν αυτό το ενδιαφέρον. Αρχικά, προκειμένου να επιδιωχθεί μείωση των εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου, ο τομέας μεταφορών αποτελεί από τους πιο δύσκολους τομείς για ανάπτυξη. Δεύτερον, υπάρχει στρατηγική σημασία μείωσης της εξάρτησης από το πετρέλαιο κυρίως, που εισάγεται από κάποιες χώρες στις οποίες υπάρχει πολιτική αστάθεια. Τρίτον, οι προηγμένες τεχνολογικές εξελίξεις προσφέρουν ξεκάθαρες προοπτικές ανταγωνιστικής και αποτελεσματικής παραγωγής βιοκαυσίμων από βιομάζα, με κυριότερες την αιθανόλη με τις τεχνικές υδρόλυσης και ζύμωσης, καύσιμα με την μέθοδο Fischer-Tropsch, μεθανόλη, DME και υδρογόνο μέσω αεριοποίησης. Τέλος, μακροπρόθεσμα η χρήση βιομάζας για καύσιμα μεταφορών και γενικά παραγωγή ενέργειας μπορεί να αποδειχθεί ως ένας από τους πιο αποδοτικούς τρόπους μείωσης των εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου.

Καθώς η αύξηση των εκπομπών CO₂ είναι ένας βασικός παράγοντας στην παγκόσμια υπερθέρμανση του πλανήτη, σύμφωνα με μία πρόσφατη έρευνα η Κίνα είναι ένας από τους βασικούς καταναλωτές ενέργειας και το ποσοστό του CO₂ που απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα το 2008 ήταν 7.03 δισεκατομμύρια τόνοι, βάζοντας την έτσι πρώτη στην παγκόσμια κατάταξη. Σκοπός της Κίνας είναι η μείωση των εκπομπών αέριων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και συγχρόνως απαίτηση για μέγιστη αξιοποίηση της καθαρής ενέργειας, αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Τα βιοκαύσιμα είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα και μια πηγή ενέργειας με ουδέτερη παραγωγή εκπομπών CO₂ που αναμένεται να συμβάλλουν σημαντικά σε αυτούς τους στόχους. Νέα και αναβαθμισμένα καύσιμα βιομάζας, όπως τα συσσωματώματα και οι μπρικέτες, έχουν γίνει πιο κοινά και παρέχουν αρκετά πλεονεκτήματα για την επίτευξη αποδοτικών και περιβαλλοντικά αποδεκτών συνθηκών καύσης. Η Κίνα είναι γνωστή ως μια μεγάλη αγροτική χώρα και πλούσια σε πηγές βιομάζας. Κατά μέσο όρο, η ετήσια παραγωγή των κατάλοιπων καλλιεργειών είναι 700 τόνοι. Η βιομάζα αντιπροσωπεύει το 23.5% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης της Κίνας, κυρίως

σε αγροτικές περιοχές. Στατιστικά έχουν δείξει ότι το 2007 η συνολική ενεργειακή κατανάλωση κατά κεφαλήν σε αγροτικές περιοχές ήταν 960 κιλά ισοδύναμα με άνθρακα, από τα οποία τα 560 κιλά ήταν απαραίτητα για την επιβίωση. Παρόλα αυτά, η καύση καυσίμων βιομάζας προκαλεί ρύπανση του αέρα, μονοξειδίο του άνθρακα και αιωρούμενα σωματίδια τα οποία προκαλούν σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία. Τα συσσωματώματα βιομάζας είναι συμπιεσμένα, ομογενοποιημένα και στεγνά καύσιμα βιομάζας, τα οποία κατέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα κατά την διάρκεια του χειρισμού, αποθήκευσης και καύσης, σε σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα καύσιμα βιομάζας. Περιβαλλοντικά το καύσιμο από συσσωματώματα βιομάζας παρέχει σημαντικά προτερήματα, όπως λιγότερη τέφρα, καπνό και άλλες ενώσεις κατά τις εκπομπές από την καύση συμπεριλαμβανομένων σωματιδίων άνθρακα CO, NO_x και SO_x. Επειδή η χρήση των συσσωματωμάτων βιομάζας παράγει πολύ λιγότερα αέρια που συμβάλλουν στα φαινόμενα του θερμοκηπίου, όταν η βιομάζα είναι βιώσιμη η συγκομιδή της, υπάρχει μια τεράστια ώθηση για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με καύσιμα βιομάζας. Οι απαιτήσεις για θέρμανση από συσσωματώματα βιομάζας έχουν αυξηθεί στην Ευρώπη και Νότιο Αμερική και εμφανίζεται μια σημαντική βιομηχανία. Το 2007 η παραγωγή συσσωματωμάτων βιομάζας έφτασε τους 4.2 εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως, μεταξύ των οποίων κατά προσέγγιση 1.1 και 3 τόννοι παράχθηκαν στην Αμερική και την Ευρώπη, αντίστοιχα. Στην Κίνα η κατανάλωση συσσωματωμάτων βιομάζας ως καύσιμο αυξήθηκε ραγδαία από 0.2 εκατομμύρια τόνους το 2008 σε 2 εκατομμύρια τόνους και αναμένεται να φτάσει το 20 εκατομμύρια τόνους το 2017. Με την αυξημένη χρήση των καυσίμων βιομάζας, κυρίως των συσσωματωμάτων βιομάζας, πρέπει να εκτιμηθούν με ιδιαίτερη προσοχή οι επιπτώσεις τους σε περιβαλλοντικά ζητήματα, καθώς και στην ανθρώπινη υγεία [43].

Ευρώπη

Η τρέχουσα ζήτηση στην Ευρώπη για ενέργεια καλύπτεται κατά 80% από ορυκτά καύσιμα, εκ των οποίων το 40% είναι από πετρέλαιο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν σήμερα ένα ποσοστό γύρω στο 17% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης [52]. Σύμφωνα με τελευταίες έρευνες, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο της αύξηση του μεριδίου της ανανεώσιμης ενέργειας στη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο 27% μέχρι το 2030. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος απαιτείται αύξηση της παραγωγής βιοκαυσίμων, το οποίο δημιουργεί απαιτήσεις για εναλλακτικές πηγές βιομάζας, αλλά και ανάγκη για ποιοτικότερα καύσιμα και τεχνολογίες έλεγχου των εκπομπών των αερίων. Αξιοποίηση των αγροτικών υπολειμμάτων σε μικρής κλίμακας κλιβάνους για παραγωγή θερμότητας είναι μια ενδιαφέρον επιλογή, συνυπολογίζοντας την τοπική προσβασιμότητα, τα οικονομικά οφέλη και ταυτοχρόνως την μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Η υπολειμματική

βιομάζα, η οποία λειτουργεί ως καύσιμο, είναι συνήθως διαθέσιμη είτε από ενεργειακές καλλιέργειες, είτε ως υπόλειμμα από ζωοτροφές και καλλιέργειες. Η συνολική κύρια κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ ανέρχεται σε επίπεδα περίπου 62 EJ/a, από τα οποία περίπου 48 EJ καλύπτονται από ορυκτά καύσιμα και 10 EJ από πυρηνική ενέργεια. Σε σύγκριση με τα παραπάνω μεγέθη, η συνεισφορά της βιομάζας στο ενεργειακό σύστημα είναι χαμηλή, καθώς προσφέρει μόνο 2.3 EJ δηλαδή σχεδόν 4% της συνολικής κατανάλωσης. Η κατανάλωση ξύλου αντιπροσωπεύει το 76% της συνολικής κατανάλωσης βιομάζας. Λαμβάνοντας υπόψη τις προμήθειες βιομάζας, σήμερα η βιο-ενέργεια παράγεται κατά κύριο λόγο από υπολείμματα και απόβλητα. Σε όλη την Ευρώπη και κυρίως στην Σκανδιναβία, οι αγορές βιομάζας αναπτύσσονται από καθαρά περιφερειακές σε διεθνείς αγορές, με το διεθνές εμπόριο βιομάζας και φορέων, οι οποίοι προέρχονται από βιομάζα, να αυξάνεται. Τα καύσιμα με χαμηλές διακυμάνσεις των ιδιοτήτων τους, όπως τα συσσωματώματα και οι μπριγκέτες, χρησιμοποιούνται σε συστήματα μικρής κλίμακας, καθώς και σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως μονάδες συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος και σε μονάδες ισχύος σε συν- καύση με γαιάνθρακα. Λόγω των πλεονεκτημάτων τους, το εμπόριο συσσωματωμάτων βιοκαυσίμων έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία. Η παραγωγή θερμότητας (μικρής κλίμακας για οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς και με συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος), με διάφορες τεχνικές καύσης παρέχει επί του παρόντος το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας, η οποία παράγεται από βιομάζα. Βασικές αγορές αποτελούν η Σουηδία, η Φιλανδία, η Δανία, η Αυστρία, η Γερμανία και η Γαλλία. Μια τεχνολογία που έχει αποσπάσει την προσοχή σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες είναι η αεριοποίηση για παραγωγή ηλεκτρισμού και ειδικότερα η τεχνολογία Ολοκληρωμένη Αεριοποίηση Συνδυασμένου Κύκλου βιομάζας (BIGCC). Τόσο η μικρής κλίμακας αεριοποίηση, όσο και η τεχνολογία βιομηχανικού κύκλου αεριοποίησης βιομάζας, έχουν αποδειχθεί δαπανηρές, ενώ αρκετά τεχνικά θέματα παραμένουν προς επίλυση. Στην παραγωγή βιοκαυσίμων παγκοσμίως η ΕΕ είναι τρίτη δύναμη μετά από την Βραζιλία και τις ΗΠΑ. Η Γερμανία και η Γαλλία είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί στην ΕΕ [44,50-52].

Ελλάδα

Όσον αφορά την Ελλάδα, η βιομάζα αντιπροσωπεύει ακόμα μικρό ποσοστό της συνολικής προσφοράς ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην Ελλάδα, η θερμική ενέργεια η οποία παράγεται από βιομάζα χωρίζεται σε διάφορους κλάδους. Το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμικής ενέργειας από βιομάζα παράγεται από τη καύση ξύλου κυρίως σε οικιακή χρήση. Ακολουθεί η καύση υπολειμμάτων πυρηνόξυλου και θρυμμάτων ξύλου. Τέλος, παρατηρείται μικτή παραγωγή ενέργειας από καύση βιοαερίου και υπολειμμάτων ρυζιού, άχυρου, εκκοκκισμού βάμβακος και μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Τα δεδομένα

αυτά δε συμπεριλαμβάνουν τη θερμική ενέργεια η οποία παράγεται από μονάδες συμπαραγωγής. Γενικά, η οικιακή χρήση του ξύλου (θέρμανση νερού και χώρων, μαγείρεμα) αντιστοιχεί στο 75% της συνολικής παραγωγής ενέργειας από βιομάζα. Το υπόλοιπο 25% έχει παραχθεί από τη καύση των παραπροϊόντων του ξύλου και αγροτικών υπολειμμάτων και τη χρήση του βιοαερίου, το οποίο παράγεται στις χωματερές, τη βιομηχανία αγροτικών διατροφικών προϊόντων και τις δημοτικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων υδάτων. Για τη παραγωγή ατμού που χρησιμοποιείται για θέρμανση και ξήρανση καίγονται τα υπολείμματα ξύλου από διάφορες βιομηχανίες. Πολλές εγκαταστάσεις εκκοκκισμού χρησιμοποιούν τα υπολείμματά τους για να παράγουν θερμότητα, η οποία απαιτείται για την ξήρανση του βαμβακιού και των εγκαταστάσεών τους. Ομοίως και το πυρηνόξυλο της ελιάς χρησιμοποιείται για θέρμανση θερμοκηπίων και διαφόρων εγκαταστάσεων. Από την άλλη, οι πυρήνες των φρούτων και τα κελύφη αμυγδάλων, καρυδιών και φουντουκιών, που αποτελούν παραπροϊόντα στις μονάδες αποφλοιώσης ξηρών καρπών και στα συσκευαστήρια φρούτων, χρησιμοποιούνται για θέρμανση θερμοκηπίων και οικιακή θέρμανση. Στη περιοχή της Αττικής παράγεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας, η οποία προέρχεται από βιοαέριο, λόγω της λειτουργίας της μονάδας κατεργασίας οικιακών αποβλήτων υδάτων στη Ψυτάλλεια και της χωματερής στα Άνω Λιόσια, οι οποίες κατεργάζονται, τα υγρά και τα στερεά απορρίμματα της Αθήνας. Τέλος, στο Αγρίνιο βρίσκεται η μοναδική βιομηχανία με μονάδα συμπαραγωγής η οποία καταναλώνει αγροτικά υπολείμματα για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [42].

2.2.3 Χρήσεις

Η βιοενέργεια θεωρείται ως μια από τις ιδανικότερες λύσεις στο άμεσο και μακροπρόθεσμο μέλλον ως αντικαταστάτης της ενέργειας από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, διότι συμβάλλει στο περιορισμό εκπομπών των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη το 10% της συνολικής παροχής ενέργειας βασίζεται στην βιομάζα. Ωστόσο, τίθενται συνεχώς νέοι στόχοι όπου η βιομάζα μπορεί να συνεισφέρει από 100 έως και περισσότερο από 400 EJ δηλαδή περίπου 25% του συνόλου των τωρινών παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών.

Η βιοενέργεια αποτελεί μια τυπική επιλογή για ενεργειακές παροχές, λόγω της ποικιλομορφίας της και του συσχετισμού της με πολλές άλλες τεχνολογικές πτυχές, όπως η επιλογή θερμικής μετατροπής, η βιοτεχνολογία, αγρονομικές τεχνολογίες και πολιτικές κατευθύνσεις (κλίμα, ενέργεια, γεωργία, πολιτική αποβλήτων) . Επιπλέον, η διαθεσιμότητα της και η χρησιμοποίηση της βιομάζας διαπλέκεται με πολλούς τομείς της οικονομίας όπως η γεωργία, η δασοκομία, η επεξεργασία τροφίμων, η βιομηχανία δομικών υλικών και κυρίως ο ενεργειακός τομέας όπου βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή. Ωστόσο, η παραγωγή

βιοενέργειας δεν είναι πάντα εύκολη, διότι υπάρχουν αρκετά εμπόδια και ανταγωνισμός με εταιρίες ορυκτών καυσίμων, πράγμα που καθιστά ακόμα πιο δυσχερή την περάτωση των έργων της. Ακόμα δυσκολίες αποτελούν η διαθεσιμότητα των καυσίμων, οι εναλλακτικές εφαρμογές, πολλές φορές και το υψηλότερο κόστος, με αποτέλεσμα παρά τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρει, να αυξάνεται με μέτριους ρυθμούς και η αγορά να αναπτύσσεται σχετικά αργά. Η βιομάζα αποτελεί μια σύγχρονη ενεργειακή εναλλακτική, καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πολλές πτυχές που συμπεριλαμβάνουν την παραγωγή θερμότητας για οικιακή και βιομηχανική χρήση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων για μεταφορές [27-28].

Παραγωγή Θερμότητας

Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της βιομάζας εδώ και πολλά χρόνια είναι η χρησιμοποίηση της σε διάφορα συστήματα για παραγωγή θερμότητας. Η θερμότητα που παράγεται από την βιομάζα με κύριο και πιο γνωστό είδος βιομάζας το ξύλο βρίσκει εφαρμογή στην θέρμανση χώρων, το μαγείρεμα και την παραγωγή ατμού για βιομηχανική χρήση. Η εφαρμογή της σε μικρής κλίμακας οικιακά και εμπορικά συστήματα συνήθως αποτελεί διεργασία χαμηλής παραγωγικότητας και συνοδεύεται από υψηλές εκπομπές αέριων ρύπων. Ωστόσο, με την συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν κατασκευαστεί ιδιαίτερα αναβαθμισμένα και βελτιωμένα συστήματα που λειτουργούν πλέον αυτόματα, τα οποία με την χρήση καταλυτών επιτυγχάνουν καθαρισμό των αερίων και έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν τυποποιημένα καύσιμα, όπως συσσωματώματα. Οι προηγμένες συσκευές οικιακής θέρμανσης μπορούν να επιτύχουν αποδοτικότητες της τάξης του 70-90%, με μειωμένες εκπομπές αέριων ρύπων. Η εφαρμογή συστημάτων θέρμανσης είναι πιο διαδεδομένη στην βόρεια Ευρώπη, όπως στις Σκανδιναβικές χώρες και την Γερμανία όπου έχουν αναπτυχθεί μεγαλύτερης κλίμακας κλίβανοι, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορα είδη βιομάζας, όπως δημοτικά απόβλητα, δασικά υπολείμματα για παραγωγή θερμότητας ή για παραγωγή ισχύος. Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες στην Πολωνία, η χρήση μπριγκετών ξύλου μπορεί να εξασφαλίσει θέρμανση της τάξεως άνω του 25% των συνολικών νοικοκυριών, οικονομικά και με μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αντικαθιστώντας τα συμβατικά καύσιμα με βιομάζα [28].

Μια ακόμα εφαρμογή της βιομάζας είναι η τηλεθέρμανση. Τηλεθέρμανση ονομάζεται η εξασφάλιση ζεστού νερού τόσο για τη θέρμανση των χώρων, όσο και για την απευθείας χρήση του σε ένα σύνολο κτιρίων, έναν οικισμό, ένα χωριό ή μία πόλη, από έναν κεντρικό σταθμό παραγωγής θερμότητας. Η παραγόμενη θερμότητα μεταφέρεται με δίκτυο αγωγών από το σταθμό προς τα θερμαινόμενα κτίρια. Η τηλεθέρμανση παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη σε πολλές χώρες, καθώς εμφανίζει σημαντικά προτερήματα, όπως η επίτευξη υψηλότερου βαθμού απόδοσης, ο περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος και η δυνατότητα

χρησιμοποίησης μη συμβατικών καυσίμων, οπότε προκύπτουν επιπλέον οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Στην Ελλάδα έχει ήδη εγκατασταθεί η πρώτη μονάδα τηλεθέρμανσης με χρήση βιομάζας. Η μονάδα αυτή, που βρίσκεται στην κοινότητα Νυμφασίας του Νομού Αρκαδίας, έχει ονομαστική ισχύ 1.200.000 kcal/h και καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης 80 κατοικιών και 600 τετραγωνικά μέτρα κοινοτικών χώρων. Ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιούνται τρίμματα ξύλου, τα οποία προέρχονται από τεμαχισμό σε ειδικό μηχάνημα υπολειμμάτων υλοτομίας από γειτονικό δάσος ελάτων. Το έργο αυτό αποτελεί πρότυπο για την ανάπτυξη παρόμοιων εφαρμογών σε κοινότητες και δήμους της χώρας, δεδομένου ότι εξασφαλίζει σημαντική εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων, αξιοποίηση των τοπικών ενεργειακών πόρων και συνεισφέρει στη βελτίωση του περιβάλλοντος.

Τέλος, η βιομάζα βρίσκει εφαρμογή στην θέρμανση θερμοκηπίων. Ενδιαφέρουσα και οικονομικά συμφέρουσα επιλογή αποτελεί η αξιοποίηση της βιομάζας σε μονάδες παραγωγής θερμότητας για τη θέρμανση θερμοκηπίων για τους ιδιοκτήτες τους. Ήδη, στο 10% περίπου της συνολικής έκτασης των θερμαινόμενων θερμοκηπίων της χώρας, αξιοποιούνται διάφορα είδη βιομάζας. Ένα παράδειγμα αυτού του είδους χρήσης της βιομάζας αποτελεί μία θερμοκηπιακή μονάδα έκτασης 2 στρεμμάτων, στο Νομό Σερρών, στην οποία καλλιεργούνται οπωροκηπευτικά. Σε αυτή τη μονάδα έχει εγκατασταθεί σύστημα παραγωγής θερμότητας, συνολικής θερμικής ισχύος 400.000 kcal/h, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο άχυρο σιτηρών. Η ετήσια εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων που επιτυγχάνεται φθάνει τους 40 τόνους πετρελαίου [73].

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκει εφαρμογή παγκοσμίως από την καύση της βιομάζας και εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε μεγάλης κλίμακα εγκαταστάσεις. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές μονάδες, οι οποίες εφαρμόζονται σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Η καύση μπορεί να γίνει σε σωρούς, με διαφορές μεθόδους καύσης, σε εσχάρα, σε αιώρηση και σε ρευστοποιημένη κλίνη. Η καύση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας βρίσκει εφαρμογή κυρίως στους τομείς της βιομηχανίας χαρτιού και χαρτοπολτού, τα υπολείμματα της οποίας χρησιμοποιούνται για καύση αποβλήτων. Κατεξοχήν οι μονάδες αυτές έχουν μεγάλη δυναμικότητα της τάξεως 1 Mt ανά μονάδα ετησίως και λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις ατμού, εφαρμόζοντας ταυτόχρονα καθαρισμό των απαερίων. Τα χαρακτηριστικά επίπεδα αποδοτικότητας παραγωγής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 15 και 20%, ενώ κατασκευάζονται τα τελευταία χρόνια μονάδες οι οποίες μπορούν να επιτύχουν έως και 30% αποδοτικότητα παραγωγής ισχύος. Στην Ευρώπη η μαζική καύση είναι η κύρια εφαρμογή, που χρησιμοποιείται για την μετατροπή των διάφορων απορριμμάτων σε ενέργεια, άλλα έχει

υψηλό κόστος. Τα χαρακτηριστικά επίπεδα δυναμικότητας κυμαίνονται από 25 έως 50 MWe για αντίστοιχες μονάδες καύσης βιομάζας, ενώ τα αντίστοιχα επίπεδα παραγωγής ισχύος κυμαίνονται από 25-30% [26,30-31].

Σε πολλές χώρες, κυρίως για μονάδες παραγωγής ισχύος, η συν- καύση της βιομάζας είναι η κλασσική λύση χρησιμοποιώντας γαιάνθρακα. Τα κύρια πλεονεκτήματα της συν- καύσης τα οποία είναι εμφανή είναι αρχικά ότι η συνολική αποδοτικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, συνήθως γύρω στο 40%. Αυτό οφείλεται στην οικονομία της κλίμακας των υφιστάμενων μονάδων, ενώ το κόστος είναι ελάχιστο έως αμελητέο, όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα υψηλής ποιότητας υπό την μορφή συσσωματωμάτων. Επιπροσθέτως, οι εκπομπές αερίων συμπεριλαμβανομένων των αερίων του θερμοκηπίου είναι εμφανώς μειωμένες, λόγω της άμεσης αντικατάστασης του γαιάνθρακα. Στην συν- καύση μπορούν να χρησιμοποιηθούν γαιάνθρακες όλων των τάξεων, ωστόσο εμπειρικά έχει αποδειχθεί ότι επιλέγοντας το σωστό τύπο βιομάζας και τεχνολογία συν-καύσης μπορούν να ελαχιστοποιηθούν οι τεχνολογικοί κίνδυνοι. Αποτελεί μία λύση μειωμένου κόστους κυρίως σε χώρες όπου κυριαρχεί η παρουσία παλαιών μονάδων γαιανθράκων. Επιπροσθέτως, το καύσιμο το οποίο παράγεται μέσω της διαδικασίας της αεριοποίησης της βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με άμεση καύση σε μηχανές, στροβίλους και λέβητες, μετά από κατάλληλο καθαρισμό για παραγωγή ηλεκτρικής, αλλά και θερμικής ενέργειας. Επιτυγχάνονται υψηλότερα επίπεδα μετατροπής (40-50%) με την διαδικασία της αεριοποίησης και συγκριτικά με την καύση παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα όσον αφορά στην επίτευξη οικονομιών κλίμακας, καθώς και όσον αφορά στην καθαρή και αποδοτική λειτουργία. Υπάρχουν εκατοντάδες αεροποιητές σταθερής κλίνης μικρής κλίμακας ανά τον κόσμο σε λειτουργία και ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Μακροπρόθεσμα τα τυποποιημένα συστήματα αεριοποίησης, τα οποία χρησιμοποιούν κυψελίδες καυσίμου και μικρό-αεροστροβίλους, θα μπορούσαν να αποτελούν σημαντική προοπτική για την βιομάζα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρής κλίμακα εγκαταστάσεις [31].

Συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος

Με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλες ποσότητες θερμότητας απορρίπτονται στο περιβάλλον, είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων, είτε μέσω των καυσαερίων. Τα τελευταία χρόνια, ορισμένες χώρες οι οποίες διέθεταν προϋπάρχοντα δίκτυα τηλεθέρμανσης, όπως οι χώρες της Ανατολικής Ευρώπης, της Σκανδιναβίας, ή πόλεις όπως η Νέα Υόρκη μπορούν να χρησιμοποιήσουν τεχνολογίες συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος (CHP), αντικαθιστώντας τους ήδη υπάρχοντες λέβητες που χρησιμοποιούνται. Με τη συμπαραγωγή, όπως ονομάζεται η συνδυασμένη παραγωγή

θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από την ίδια ενεργειακή πηγή, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας αυτής ανακτάται και χρησιμοποιείται επωφελώς. Έτσι, αφ' ενός επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς αυξάνεται ο βαθμός ενεργειακής μετατροπής του καυσίμου σε ωφέλιμη ενέργεια, αφ' ετέρου μειώνονται αντίστοιχα και οι εκπομπές ρύπων. Επίσης, ελαττώνονται οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς τα συστήματα συμπαραγωγής είναι συνήθως αποκεντρωμένα και βρίσκονται πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ό,τι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Πράγματι, οι συμβατικοί σταθμοί παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης 15-40%, ενώ στα συστήματα συμπαραγωγής αυτός φθάνει μέχρι και 75-85% [73]. Η συμπαραγωγή από βιομάζα στην Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον σε αστικό-περιφερειακό επίπεδο. Η εξάπλωση της εφαρμογής της πρέπει να εξετασθεί με βασικό στόχο τη δημιουργία πολλών μικρών αποκεντρωμένων σταθμών συμπαραγωγής. Αυτοί θα πρέπει να εγκατασταθούν σε περιοχές της χώρας με σημαντικές ποσότητες διαθέσιμης βιομάζας, οι οποίες να βρίσκονται συγχρόνως κοντά σε καταναλωτές θερμότητας, καθώς η μεταφορά της θερμότητας παρουσιάζει υψηλές απώλειες και αυξημένο κόστος. Οι καταναλωτές της παραγόμενης θερμότητας των προαναφερθέντων σταθμών συμπαραγωγής μπορεί να είναι χωριά ή πόλεις, τα οποία θα θερμαίνονται μέσω κάποιας εγκατάστασης συστήματος τηλεθέρμανσης, θερμοκήπια, βιομηχανικές μονάδες με αυξημένες απαιτήσεις σε θερμότητα κ.ά.

Παραγωγή καυσίμων για μεταφορές και άλλες χρήσεις

Η θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας οδηγεί είτε στην απευθείας παραγωγή ενέργειας (καύση), είτε στην παραγωγή καυσίμου, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα. Η τεχνολογία της αστραπιαίας πυρόλυσης αποτελεί μία από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις για την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας. Κατ' αυτήν, τα ογκώδη δασικά και αγροτικά υπολείμματα, αφού ψιλοτεμαχισθούν, μετατρέπονται, με τη βοήθεια ειδικού αντιδραστήρα, σε υγρό καύσιμο υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, το βιο-έλαιο. Το βιο-έλαιο, το οποίο αποτελεί προϊόν της αστραπιαίας πυρόλυσης διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως της εύκολης μεταφοράς και αποθήκευσης, καθώς αποτελεί σημαντική πηγή χημικών μεγάλης αξίας. Ωστόσο, το βιο-έλαιο έχει ορισμένες ιδιότητες οι οποίες δυσχεραίνουν τη χρήση του και επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του καυσίμου. Τέτοιες είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, η χαμηλή θερμογόνος δύναμη, η ασυμβατότητα με συμβατικά καύσιμα, η περιεκτικότητα σε στερεά, το υψηλό ιξώδες, η ατελής πτητικότητα και η χημική αστάθεια. Το βιο-έλαιο μπορεί να αναβαθμισθεί σε επίπεδο ποιοτικού καυσίμου για μεταφορές, παρόλα αυτά θέτει ορισμένες προκλήσεις οι οποίες δεν είναι ελκυστικά οικονομικές. Το βιο-έλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του πετρελαίου σε εφαρμογές θέρμανσης (λέβητες, φούρνους κ.λπ.), αλλά και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

(μηχανές εσωτερικής καύσης κ.ά.). Η αστραπιαία πυρόλυση της βιομάζας αποτελεί την οικονομικότερη διεργασία ηλεκτροπαραγωγής, ιδίως στην περιοχή μικρής κλίμακας ισχύος (<5MWe).

Με την αεριοποίηση παράγεται αέριο καύσιμο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καυστήρες αερίου για την παραγωγή ενέργειας. Καύσιμα για μεταφορές, τα οποία μπορούν να παραχθούν από την αεριοποίηση της βιομάζας, είναι η μεθανόλη, το υδρογόνο και το ντίζελ το οποίο παράγεται με την μέθοδο FischerTropsch.

Τέλος, υπάρχει και η παραγωγή υγρών καυσίμων με βιοχημική μετατροπή βιομάζας. Η παραγωγή υγρών καυσίμων με βιοχημική διεργασία επικεντρώνεται κυρίως στην παραγωγή βιο-αιθανόλης (οινοπνεύματος) με ζύμωση σακχάρων, αμύλου, κυτταρινών και ημικυτταρινών που προέρχονται από διάφορα είδη βιομάζας (αραβόσιτος, σόργο το σακχαρούχο κ.ά.). Η τεχνολογία ζύμωσης των σακχάρων είναι σήμερα γνωστή και ανεπτυγμένη, ενώ εκείνη της ζύμωσης των κυτταρινών και ημικυτταρινών βρίσκεται υπό εξέλιξη. Η βιο-αιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες οχημάτων, ως έχει ή σε πρόσμιξη με βενζίνη, ως καύσιμο κίνησης. Παρά το γεγονός ότι, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων (π.χ. αντικατάσταση αεροπορικής βενζίνης), το κόστος της βιο-αιθανόλης είναι υψηλότερο εκείνου της βενζίνης, η χρήση της ως καύσιμο κίνησης αυξάνει συνεχώς ανά τον κόσμο, με προεξάρχουσες τη Βραζιλία και τις ΗΠΑ. Αυτό συμβαίνει διότι αφ' ενός η βιο-αιθανόλη είναι καθαρότερο καύσιμο από περιβαλλοντικής πλευράς και αφ' ετέρου δίνει διέξοδο στα γεωργικά προβλήματα. Για τους λόγους αυτούς η παραγωγή και χρήση της βιο-αιθανόλης παρουσιάζουν εξαιρετικά ευνοϊκές προοπτικές για το μέλλον [34].

2.3 Καύση Αγροτικών Υπολειμμάτων

2.3.1 Βασικές αρχές καύσης

Βήματα της Διεργασίας Καύσης Βιομάζας

Σε ένα σύστημα ιδανικών συνθηκών, η αντίδραση διεξάγεται μεταξύ στοιχειομετρικών ποσοτήτων της βιομάζας και του οξυγόνου, οι οποίες είναι διαθέσιμες, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί τέλεια καύση, δηλαδή να καταναλωθούν πλήρως καθένα από τα αντιδρώντα και να παραχθούν μόνο διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, μία καύση τέτοιου είδους δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τα περισσότερα από τα στερεά καύσιμα, που περιέχουν άνθρακα, όπως και η βιομάζα. Μία εμπειρική θεώρηση της καύσης της βιομάζας περιλαμβάνει την εξάτμιση των πτητικών ουσιών υψηλού ενεργειακού περιεχομένου, που καίγονται στην αέρια φάση με φλόγα [44]. Το λιγνοκυτταρινικό περιεχόμενο του στερεού τμήματος της βιομάζας υπό την επήρεια της

υψηλής θερμοκρασίας ή μιας αρκετά ισχυρής πηγής ενέργειας, αποσυντίθεται και σχηματίζει προϊόντα πυρόλυσης, τα οποία επίσης καίγονται στην αέρια φάση με φλόγα. Το υπολειπόμενο εξανθράκωμα καίγεται με πιο αργούς ρυθμούς με επιφανειακή οξείδωση ή διάπυρη καύση. Τα κυτταρινικά υλικά μετατρέπονται σε καύσιμα και μη καύσιμα πτητικά υλικά, μεταξύ των οποίων και σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ οι λιγνίνες καταλήγουν σε μεγάλο βαθμό στο υπολειπόμενο εξανθράκωμα. Ο μηχανισμός ο οποίος συμμετέχει στη καύση της στερεάς βιομάζας μπορεί να θεωρηθεί σαν μία διεργασία σε βήματα, όπου όλα τα βήματα διεξάγονται ταυτόχρονα στο θάλαμο καύσης [44].

Διάφοροι παράμετροι της καύσης όπως, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της οξείδωσης, η εμφάνιση της φλόγας και η παραγόμενη θερμότητα, εξαρτώνται από το είδος του καυσίμου και την αναλογία του καυσίμου προς το οξειδωτικό. Από τις παραμέτρους που πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα είναι η προσαγωγή του καυσίμου στο χώρο καύσης, η προσαγωγή της απαραίτητης ποσότητας οξυγόνου για την ολοκλήρωση της καύσης, η δημιουργία του κατάλληλου περιβάλλοντος καύσης (κατάλληλες συνθήκες και αναλογίες μίξης). Στόχος είναι η επίτευξη πλήρους καύσης έτσι ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή απόδοση. Η ταχύτητα της καύσης εξαρτάται από τη ταχύτητα αντίδρασης, τη ταχύτητα ανάμιξης των διαφόρων ουσιών και τη θερμοκρασία μέσα στο χώρο καύσης. Η διαδικασία της καύσης διακρίνεται σε τέλεια και ατελή καύση, η οποία καθορίζει την αποδιδόμενη ποσότητα της θερμότητας και περιεκτικότητα των καυσαερίων. Η παροχή μεγαλύτερης ποσότητας περίσσειας αέρα από την απαιτούμενη, μειώνει την θερμοκρασία καύσης (συνεπώς μειώνει την απόδοση θερμότητας στο μέσο μετάδοσης θερμότητας) και αυξάνει τις απώλειες θερμότητας μέσω των καυσαερίων. Η παροχή μικρότερης ποσότητας περίσσειας αέρα από την απαιτούμενη, έχει σαν αποτέλεσμα την ατελή καύση και απώλεια χημικής ενέργειας μέσω των καυσαερίων. Η ποσότητα της περίσσειας αέρα εξαρτάται από το είδος του καυσίμου και το σύστημα καύσης. Συνήθως, η απαιτούμενη ποσότητα περίσσειας αέρα είναι 10-50% [45].

Ατελής καύση παρατηρείται όταν κάποιο από τα στοιχεία του καυσίμου δεν οξειδώνεται πλήρως. Αποτέλεσμα της ατελούς καύσης είναι η μη αποδοτική εκμετάλλευση του καυσίμου (μείωση απόδοσης λειτουργίας του συστήματος, αύξηση της κατανάλωσης). Η διαδικασία γίνεται επικίνδυνη (λόγω της παραγωγής και απελευθέρωσης μονοξειδίου του άνθρακα), συμβάλλει στην ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα λόγω της απελευθέρωσης μέσω των καυσαερίων, μονοξειδίου του άνθρακα (χαρακτηριστικό της ατελούς καύσης) και άκαυστων μορίων άνθρακα (π. χ. αιθάλη, μαύρος καπνός καυσαερίων), επιβαρύνεται ο χώρος καύσης και γενικότερα το σύστημα και ο εξοπλισμός. Η ατελής καύση μπορεί να προκληθεί από την μη ικανοποιητική μίξη του αέρα με το καύσιμο, την έλλειψη της απαραίτητης για την καύση

ποσότητας οξυγόνου, το μικρό χρόνο παραγωγής σε κατάλληλες συνθήκες μέσα στο χώρο καύσης των προς αντίδραση στοιχείων, την χαμηλή θερμοκρασία που αποδίδει η φλόγα για την ολοκλήρωση της καύσης, την ύπαρξη κρύων επιφανειών στο χώρο καύσης [46].

Ξήρανση-αποπτηκοποίηση

Καταρχάς, λόγω της συνεχούς αύξησης της θερμοκρασίας η εισερχόμενη φρέσκια βιομάζα σταδιακά ξηραίνεται. Η φυσική υγρασία που περιέχει η βιομάζα μετατρέπεται σε υδρατμούς. Όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από 150 °C με 200 °C ξεκινά η θερμική αποσύνθεση και η απομάκρυνση των πτητικών από τη στερεή φάση της βιομάζας στην επιφάνειά της. Τα πτητικά αποτελούνται από οργανικές πίσσες, που συμπυκνώνονται κατά τη δειγματοληψία, ελαφρά σταθερά αέρια (CO, CO₂, H₂ κ.λπ.), υδρατμούς, ελαφρούς αέριους υδρογονάνθρακες (CH₄, C₂H₄ κ.λπ.) και οργανικά αέρια τα οποία βρίσκονται κατά τη δειγματοληψία στο μη πισσώδες υγρό συμπύκνωμα (ακεταλδεΐδη, ακρολεΐνη, ακετόνη, μεθανόλη, φουράνιο κ.λπ.). Τα κύρια πτητικά απελευθερώνονται απευθείας από τη στερεή μάζα, όταν ο χρόνος παραμονής των κύριων πτητικών στη στερεή μάζα είναι ελάχιστος και η θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή. Επιπρόσθετα, γίνεται απελευθέρωση των ελαφριών αερίων CO, CO₂ και H₂O, που σχηματίζονται απευθείας με αντίδραση των χαρακτηριστικών ομάδων των μορίων του καυσίμου. Καθώς γίνεται αύξηση της θερμοκρασίας του στερεού τα κύρια πτητικά αντιδρούν εν μέρει με τα οργανικά αέρια και ελαφρά συμπυκνώσιμα αέρια, τα οποία επίσης απελευθερώνονται. Ωστόσο, αν τα πτητικά δεσμεύονται μέσα στη στερεή μάζα για επαρκείς χρόνους παραμονής και η θερμοκρασία είναι χαμηλή, τα κύρια πτητικά συμπυκνώνονται σε εξανθράκωμα. Παρόλα αυτά, με την αύξηση της θερμοκρασίας τα δεσμευμένα πτητικά υφίστανται αυτοκατάλυση η οποία οδηγεί σε αυξημένη απελευθέρωση των οργανικών και των ελαφρών συμπυκνωμένων αερίων [45].

Καύση στην αέρια φάση

Περίπου το 80% της στερεής βιομάζας καίγεται σαν πτητική ύλη, η οποία έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε πίσσα. Η αποπτητικοποίηση πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι μια ένδειξη ότι τα υλικά αυτά θα αναφλέγονταν αυτόματα αν εκτίθονταν σε υψηλές θερμοκρασίες ενός κλιβάνου. Κυρίαρχο βήμα κατά την καύση της βιομάζας είναι κατά κύριο λόγο η καύση των πτητικών [47]. Τα κύρια πτητικά τα οποία σχηματίζονται κατά την αποπτητικοποίηση, αναλόγως των συνθηκών, μπορεί να υπόκεινται και σε δευτερογενή αντίδραση στη στερεή και στην αέρια φάση για τη παραγωγή ενός μεγάλου εύρους, σε μεγάλο βαθμό οξυγονωμένων, μονοκυκλικών κυρίως ενώσεων, όπως οι φαινόλες και οι φουρφουραλδεΐδες

Η οξείδωση του CO προς CO₂, είναι η χημική αντίδραση η οποία ελέγχει το ρυθμό των μηχανισμών της καύσης. Οι αντιδράσεις καύσης των υδρογονανθράκων είναι ταχύτατες σε αέρια με επαρκή παροχή και σε θερμοκρασίες άνω των 1100 °C. Το άκαυστο υλικό αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα, επειδή η οξείδωση του μοριακού υδρογόνου είναι επαρκώς γρήγορη. Για να οξειδωθεί το μονοξείδιο του άνθρακα, ώστε η συγκέντρωσή του στα απαέρια να είναι μικρότερη από μερικές εκατοντάδες, ο χρόνος παραμονής των αερίων πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.1s. Η αντίδραση στην αέρια φάση, με επαρκή παροχή αέρα εξελίσσεται μακριά από τη κλίνη του καυσίμου. Κοντά στη κλίνη του καυσίμου τα πτητικά καίγονται σε τυρβώδεις φλόγες διάχυσης. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν ισχυρές διακυμάνσεις, όσον αφορά στη θερμοκρασία και στη σύνθεσή τους, κυμαινόμενα από πολύ πλούσια σε καύσιμο αέρια, μέχρι αέρια με υψηλή περιεκτικότητα σε αέρα [48]. Στις πλούσιες σε καύσιμο ζώνες, αν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 800 °C, τα πτητικά λόγω της χαμηλής παροχής αέρα αντιδρούν και σχηματίζουν πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες και αιθάλη. Οι ενώσεις αυτές μπορούν να επιβιώσουν άκαυστες σε μικρούς καυστήρες βιομάζας. Για να καούν τα πτητικά συστατικά της βιομάζας οι μέγιστες θερμοκρασίες μπορεί να φτάσουν μέχρι 1700 °C. Επειδή, οι ρυθμοί των χημικών αντιδράσεων σε μία φλόγα διάχυσης είναι ταχύτατοι, ο συνολικός ρυθμός αντίδρασης ελέγχεται από το ρυθμό μίξης του αέρα μέσα στη φλόγα.

Οξείδωση του εξανθρακώματος

Τελευταίο στάδιο της καύσης της στερεής βιομάζας είναι η οξείδωση του εξανθρακώματος. Μετά την απομάκρυνση των πτητικών, το οξυγόνο διαχέεται στην επιφάνεια και μέσα στους πόρους ενός υπολειπόμενου σωματιδίου εξανθρακώματος, σε θερμοκρασίες μεταξύ 400 °C και 800 °C και αντιδρά με το εξανθράκωμα, σχηματίζοντας μονοξείδιο και πιθανόν διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία διαχέονται στο ελεύθερο ρεύμα. Η οξείδωση επιτυγχάνεται με απορρόφηση ενέργειας, που ακτινοβολείται από τα θερμά προϊόντα της καύσης και τις επιφάνειες του θαλάμου καύσης. Έχουν παρατηρηθεί θερμοκρασίες μέχρι 1500 °C, όταν το εισερχόμενο φρέσκο καύσιμο είναι ξηρό και η διεργασία καύσης ελέγχεται με προσοχή. Η χρήση προθερμασμένου αέρα επιτρέπει παρόμοιες θερμοκρασίες σε μερικά συστήματα, ακόμα και με βιομάζα η οποία περιέχει κάποια ποσότητα υγρασίας [49]. Όμως η καύση της βιομάζας δεν θα φθάνει συνήθως θερμοκρασίες φλόγας άνω των 1500 °C, λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας της βιομάζας και του μηχανισμού καύσης.

2.3.2 Οικιακά και Μικρά Εμπορικά Συστήματα

Τα τελευταία χρόνια, η βιομάζα προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και οικονομικά οφέλη και για το λόγο αυτό παρατηρείται αύξηση της χρήσης της σε οικιακό επίπεδο πέραν της βιομηχανικής χρήσης. Παρά το γεγονός του ανταγωνισμού από άλλα καύσιμα, κυρίως λόγω μεγαλύτερης ευκολίας διαχείρισης, τα πλεονεκτήματα της βιομάζας οδηγούν στην αύξηση της τάσης εγκατάστασης και χρήσης οικιακών και άλλων μικρών εμπορικών συστημάτων καύσης βιομάζας. Ενώ, οι μέσης και υψηλής δυναμικότητας βιομηχανικές και εμπορικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας μπορούν να κάψουν μια μεγάλη ποικιλία παρθένας ή υπολειμματικής βιομάζας, η βιομάζα που χρησιμοποιείται σε οικιακό επίπεδο είναι κατά κύριο λόγο μικρά και μεγάλα κομμάτια ξύλου [59].

Εστίες καύσης ξύλου

Αρχικά γίνεται μία ταξινόμηση των εστιών καύσης ξύλου, αναλόγως με την διαδρομή του αέρα διαμέσου του θαλάμου καύσης. Έχουν επικρατήσει στην αγορά τέσσερις διαφορετικοί τύποι, που βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή και έχουν τη δυνατότητα να τροποποιηθούν. Οι τύποι αυτοί διακρίνονται από την ροή του πρωτεύοντα αέρα σε ανοδικής ροής, καθοδικής ροής, διασταυρούμενης ροής ή ροής τύπου S.

Οι κύριοι τρόποι μεταφοράς θερμότητας με τους οποίους απελευθερώνεται θερμική ενέργεια από τις εστίες είναι η ακτινοβολία και η συναγωγή και για αυτό το λόγο γίνεται συνήθως επένδυση με πυρίμαχα υλικά του πατώματος και των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Επιπλέον, για την αφαίρεση της τέφρας, είτε με περισυλλογή με τοποθέτηση ενός δοχείου, είτε άμεσα από το πάτωμα, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια αποσπώμενη εσχάρα από χυτοσίδηρο στο κέντρο του πυθμένα του θαλάμου καύσης. Ο αέρας της καύσης είναι ελεγχόμενος από χειροκίνητες βαλβίδες. Για την μεγιστοποίηση της ποιότητας και της αποδοτικότητας της καύσης μπορεί να γίνει επιπρόσθετη βελτίωση του θαλάμου καύσης, εξοπλίζοντας τον με στοιχεία ελέγχου της ροής σε οριζόντια και κεκλιμένη διάταξη, κατασκευασμένα από βερμικουλίτη ή ατσάλι. Για να γίνει ταυτόχρονη βελτίωση της αποδοτικότητας της καύσης και μείωση των εκπομπών, πρέπει να γίνει χρήση μηχανικής τροφοδοσίας αέρα ή καταλυτική καύση. Είναι δεδομένο ότι μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικότητα καύσης μεγαλύτερη από 95% και ελάττωση εκπομπών σε μεγάλο ποσοστό με τη χρήση μηχανικής τροφοδοσίας. Ακόμη, σε μικρά οικιακά συστήματα επιτυγχάνεται ταχεία καύση με χρήση ακροφύσιων που οδηγούν τον αέρα στο καύσιμο ξύλο και η θερμική ενέργεια που εκλύεται μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα σχεδόν πλήρους καύσης στην αέρια φάση χρησιμοποιώντας έναν στρόβιλο που κατευθύνει τον αέρα προς το καύσιμο ξύλο.

Όσον αφορά τους καταλυτικούς καυστήρες, γίνεται τοποθέτηση τους στο κανάλι των απαερίων, μακριά από το θάλαμο καύσης οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από πυρίμαχο κεραμικό υλικό, το οποίο εξωθείται σε μια διάταξη με μορφή κυψελίδας. Μετά την εξώθηση, γίνεται ανάφλεξη του κεραμικού υλικού, το οποίο έπειτα καλύπτεται με μια μικρή ποσότητα καταλύτη ευγενούς μετάλλου (παλλάδιο, ρόδιο ή το πιο συνηθισμένο πλατίνα αλλά γίνεται και συνδυασμός των παραπάνω) ή οξειδίων μετάλλων. Ο καταλύτης συμβάλλει στην επίτευξη ταχύτερων αντιδράσεων, όταν ο καπνός του καιγόμενου ξύλου φτάσει στην επιφάνεια του, καθώς επίσης με αυτόν τον τρόπο ο καπνός αναφλέγεται σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες 260 °C αντί για 540 °C που θα αναφλεγόταν χωρίς καταλύτη. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, οι καταλύτες έχουν υποσχόμενο χρόνο ζωής 10 χιλιάδων ωρών με την προϋπόθεση της σωστής συντήρησής τους, λόγω της ευκολίας τους να υποστούν έμφραξη, δίνοντας μια αποδοτικότητα καύσης της τάξεως 70-80% [62-63].

Μια δοκιμή καύσης απορριμμάτων ξύλου που πραγματοποιήθηκε στην Ολλανδία, σε μία τυπική εστία καύσης ξύλου δυναμικότητας 70 kW, είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή του συμπεράσματος ότι, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί μια μονάδα καύσης ξύλου δυναμικότητας 1.5 MW για κεντρική θέρμανση. Ωστόσο, για να είναι περιβαλλοντικά φιλική και αποδοτική πρέπει να είναι διαθέτει μια συσκευή τεμαχισμού, μαγνητικό διαχωριστή και αυτόματο σύστημα απομάκρυνσης της τέφρας, ενώ πρέπει να γίνεται και ταυτοχρόνως καθαρισμός των απαερίων με πολύ- κυκλώνα ή ηλεκτροστατικό φίλτρο [64].

Εστίες αποθήκευσης θερμότητας

Ένα τυπικό παράδειγμα αποτελούν οι κλίβανοι φυσαλίδων, οι οποίοι μπορούν να διατηρήσουν την θερμότητα. Κατά κύριο λόγο, οι μεγάλες εστίες που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμότητας είναι συνήθως από προκατασκευασμένες πλάκες από βαριά πέτρα, ή μόνο από πέτρα. Ένα μεγάλο μέρος θερμότητας αποθηκεύεται στην εστία κατά την καύση, έτσι ώστε μετά την κατάσβεση της φωτιάς στην εστία, η εστία εκλύει την αποθηκευμένη θερμότητα για θέρμανση χώρου, για μεγάλες χρονικές περιόδους (μία ή δύο ημέρες). Η καύση του ξύλου που χρησιμοποιείται συνήθως ως καύσιμο είναι γρήγορη και με μεγάλους ρυθμούς καύσης σε μία τέτοια εστία συσσώρευσης θερμότητας, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμικής ενέργειας συγκρατείται στην μάζα του κλιβάνου φυσαλίδων, όπου ακόμα και μετά την κατάσβεση της φωτιάς συνεχίζει να ακτινοβολεί θερμότητα σταθερά και ομοιόμορφα για μεγάλη χρονική περίοδο. Στις τυπικές διατάξεις, η θερμότητα εκλύεται κυρίως με ακτινοβολία, διαμέσου της γυάλινης θύρας μπροστά. Ένας ακόμη τύπος εστίας αποθηκευμένης θερμότητας είναι η επιστρωμένη με πλάκες εστία, η οποία είναι κατασκευασμένη από κεραμικό υλικό και υπάρχει η δυνατότητα να είναι προκατασκευασμένη εν μέρει, είτε να χτιστεί επί τόπου.

Σε αυτές τις εστίες, για την μεταφορά θερμότητας από τα θερμά απαέρια στη μάζα της πέτρας γίνεται χρήση ενός συστήματος αντίθετης ροής, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε κλιβάνους φυσαλίδων και κεραμικές εστίες. Αυτό έχει ως απόρροια την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών γρήγορα, μεταφέροντας τα καιγόμενα απαέρια στο πάνω μέρος του θαλάμου καύσης, κάτω από το πάνω καπάκι, όταν το ξύλο καίγεται γρήγορα στο θάλαμο καύσης. Έπειτα η θερμότητα εκλύεται στις εξωτερικές πέτρες, καθώς τα θερμά αέρια κατευθύνονται προς τα κάτω και έξω προς τα πλευρικά κανάλια. Την ίδια στιγμή, σε μία κατεύθυνση αντίθετη με την εσωτερική καθοδική ροή, γίνεται θέρμανση του αέρα του δωματίου έξω από τους τοίχους της εστίας και μεταφέρεται στην επιφάνεια της πέτρας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμικής ενέργειας που παράγεται μεταφέρεται ομοιόμορφα στο χώρο, υπό την μορφή ακτινοβολίας. Τέτοιου τύπου εστίες προτιμούνται στις χώρες της Σκανδιναβίας και με παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες, όπου η θερμοκρασία του αέρα στην ύπαιθρο δεν αλλάζει γρήγορα και ο αέρας δεν θερμαίνεται με γοργούς ρυθμούς, καθώς η χρονική τους απόκριση στην έκλυση θερμότητας είναι αρκετά αργή [61].

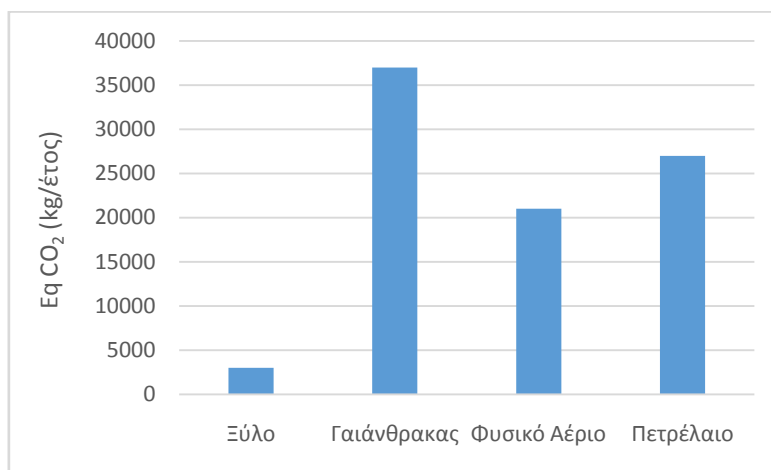
Καυστήρες και εστίες για συσσωματώματα ξύλου (μπρικέτες, πέλλετ)

Τα τελευταία χρόνια κυρίως, ξεκίνησε η καύση συσσωματωμάτων ξύλου για οικιακή χρήση και στην Ελλάδα. Οι πρώτες δυναμικές εμφανίσεις τέτοιων καυστήρων έγιναν στην αγορά σε χώρες όπως η Σουηδία, η Αυστρία και οι ΗΠΑ. Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα των συσσωματωμάτων ξύλου είναι ότι αποτελούν ένα καλό καθορισμένο καύσιμο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτείται αυτόματα σε μια συσκευή καύσης και έχει επίσης χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Έτσι, ακόμα και σε μικρά συστήματα καθίσταται δυνατή η συνεχής λειτουργία και δίνεται η δυνατότητα τα συστήματα αυτά να αντικαταστήσουν ακόμα και τους καυστήρες πετρελαίου σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις λέβητα [65-67].

Προσδιορίζονται τρεις τέτοιοι τύποι καυστήρων, με βάση το σύστημα τροφοδοσίας τους. Η φλόγα του καυστήρα μπορεί να καίει είτε οριζόντια, είτε προς τα πάνω, που αυτό εξαρτάται από την κατασκευή τους και για αυτό το λόγο υπάρχει η αναγκαιότητα να είναι συμβατός ο καυστήρας με το λέβητα. Ωστόσο, αν υπάρξει επαφή κρύας επιφάνειας με την φλόγα έχει ως απόρροια χαμηλή αποδοτικότητα του καυστήρα και υψηλές εκπομπές αιθάλης και υδρογονανθράκων. Τις περισσότερες φορές γίνεται προσαρμογή των καυστήρων για συσσωματώματα ξύλου σε ένα σταθερό επίπεδο θερμικής παραγωγής. Αν μειωθεί κάτω από μία ελάχιστη τιμή η θερμοκρασία του λέβητα, ο καυστήρας θα αρχίσει να λειτουργεί και θα εξακολουθήσει να λειτουργεί, ωστόσο επέλθει ή ανώτερη επιτρεπτή θερμοκρασία στο λέβητα. Η τροφοδοσία του καυσίμου γίνεται με την χρήση ενός κοχλία κατά κύριο λόγο, αλλά υπάρχουν διάφορα συστήματα τροφοδοσίας και μέσω μίας ηλεκτρικής συσκευής γίνεται η ανάφλεξη. Ωστόσο, υπάρχει και το ενδεχόμενο ο καυστήρας να είναι σε συνεχής

λειτουργία σε ένα ελάχιστο επίπεδο. Η παροχή αέρα γίνεται με την χρήση ενός ή περισσότερων ανεμιστήρων, χωρίς να είναι ξεκάθαρη η κατανομή μεταξύ πρωτεύοντα και δευτερεύοντα αέρα και αναλόγως τις απαιτήσεις παροχής θερμότητας ρυθμίζεται και η τροφοδοσία του καύσιμου.

Σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, τα συσσωματώματα ξύλου που καίγονται για την παροχή θερμότητας στα ήδη υπάρχοντα συστήματα αποφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή αποδοτικότητα και οι χαμηλές εκπομπές ρύπων. Πιο συγκεκριμένα, από μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Πολωνία, αποδείχθηκε ότι το κόστος παραγωγής θερμικής ενέργειας από μπρικέτες ξύλου ήταν χαμηλό, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να ανταγωνιστεί τα ορυκτά καύσιμα, αλλά είχε υψηλότερο κόστος από τα θρύμματα ξύλου. Επιπλέον, η χρήση μπρικετών ξύλου είχε ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των αέριων του θερμοκηπίου συγκριτικά με την καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αεριού όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.5 [65-67].



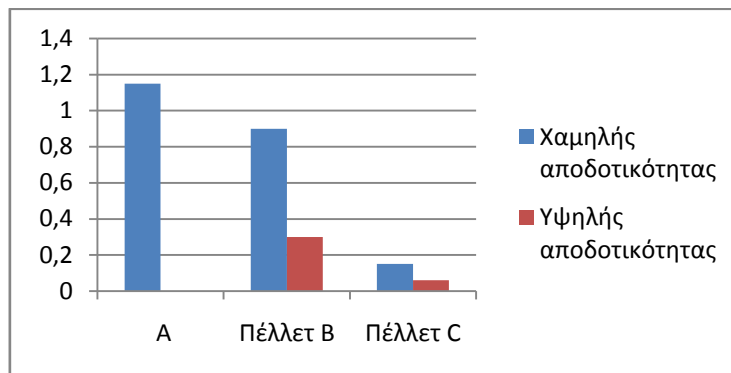
Σχήμα 2.5: Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για μπρικέτες ξύλου, γαιάνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο [69].

Στις ΗΠΑ και άλλες χώρες όπως η Κίνα και η Αυστραλία, τα συσσωματώματα ξύλου καίγονται επίσης σε τζάκια και εστίες με διαβαθμισμένη καύση. Κατά κύριο λόγο, η θερμική παραγωγή είναι μικρότερη από 25 kW, όσον αφορά καυστήρες συσσωματωμάτων ξύλου που προορίζονται για οικιακή χρήση. Η ονομαστική θερμική παραγωγή μπορεί να φτάσει σε επίπεδα αποδοτικότητας έως και πάνω από 90%, στη περίπτωση που υπάρχει ορθός σχεδιασμός του συνδυασμού καυστήρα και λέβητα. Στους καυστήρες συσσωματωμάτων ξύλου επιτυγχάνονται χαμηλά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων, όμως παρά τη χαμηλή περιεκτικότητα της βιομάζας σε άζωτο γίνεται μετατροπή σχεδόν όλου του αζώτου σε NO_x. Πολλές μελέτες, έδειξαν ότι σημαντικό ρόλο στις εκπομπές έχουν η πυκνότητα, η αντοχή, το μέγεθος και το είδος του υλικού των συσσωματωμάτων ξύλου, καθώς και ο εξοπλισμός της καύσης που χρησιμοποιήθηκε. Ακόμη, οι εκπομπές

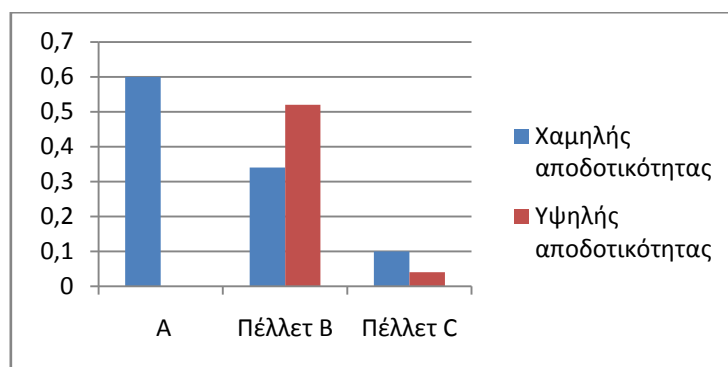
σωματιδιακής ύλης μπορεί να είναι σημαντικές σε μικρής κλίμακας καυστήρες, όπως αυτοί που προορίζονται για οικιακή χρήση. Συνήθως οι εκπομπές αυτές προέρχονται από αιθάλη από την ατελή καύση του καυσίμου και σωματίδια τέφρας ή σωματιδιακή ύλη. Όταν υπάρχει ένας καλά σχεδιασμένος και άρτιος καυστήρας για καύση συσσωματωμάτων ξύλου, οι εκπομπές σωματιδιακής ύλης περιορίζονται σε ένα βαθμό, άλλα δεν παύει να εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ανόργανης ύλης του βιοκαυσίμου [69].

Σύμφωνα με μια πολύ πρόσφατη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Κίνα, χύδην βιοκαύσιμα, συσσωματώματα βιομάζας και πελλετοποιημένα μίγματα βιομάζας-άνθρακα κάηκαν σε παραδοσιακούς αγροτικούς συμβατικούς οικιακούς καυστήρες και καυστήρες υψηλής απόδοσης, ώστε να μετρηθούν οι εκπομπές σωματιδίων, οι εκπομπές οργανικού και στοιχειακού άνθρακα. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα είδη βιομάζας όπως άχυρο σίτου, τσόφλια ρυζιού, υπολείμματα καλαμποκιού και φασολιών, βαμβάκι σε χύμα μορφή, άλλα και σε μορφή συσσωματώματος ξύλου σε διάφορους συνδυασμούς. Σε καυστήρα χαμηλής αποδοτικότητας, με την καύση βιομάζας με την μορφή συσσωματώματος ξύλου, οι εκπομπές σωματιδίων, οργανικού και στοιχειακού άνθρακα ήταν σημαντικά χαμηλότερες από την καύση βιομάζας σε χύδην μορφή. Αντίστοιχα, μειωμένες ήταν οι εκπομπές όταν γίνεται καύση της ίδιας βιομάζας σε καυστήρα υψηλής αποδοτικότητας σε σχέση με χαμηλής. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ότι, το μίγμα καλαμποκιού σε συμπιεσμένη μορφή συσσωματώματος ξύλου με την προσθήκη 10% ανθρακίτη σε καυστήρα υψηλής αποδοτικότητας οδήγησε σε μείωση των εκπομπών σωματιδίων, εκπομπών οργανικού και στοιχειακού άνθρακα κατά 84%, 96% και 93%, αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν έχοντας σχετικά χαμηλό κόστος να μειωθούν οι ρύποι από την καύση χύδην βιομάζας, διότι ο συνδυασμός καυστήρα υψηλής αποδοτικότητας με βιομάζα (καύση συσσωματώματος ξύλου και μίγμα ανθρακίτη) μπορεί να βελτιώσει και να μειώσει την ατμοσφαιρική ρύπανση, καθώς και να ανταγωνιστεί τα ορυκτά καύσιμα και την παραδοσιακή βιομάζα [70].

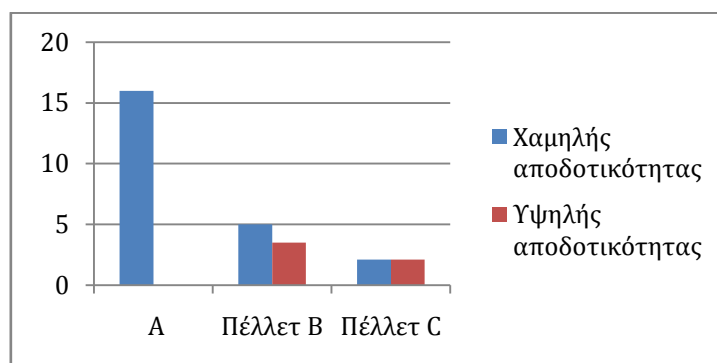
Στα Σχήματα 2.6 έως 2.8 γίνεται σύγκριση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των εκπομπών EF_{oc} (οργανικού άνθρακα), EF_{EC} (στοιχειακού άνθρακα) και $EF_{PM_{2.5}}$ (σωματιδίων) από την καύση συσσωματώματος ξύλου (πέλλετ) τριών δειγμάτων (Α : χύδην καλαμποκιού, Πέλλετ Β : πέλλετ καλαμποκιού, Πέλλετ C: πέλλετ καλαμποκιού +10% ανθρακίτη) σε καυστήρες χαμηλής και υψηλής αποδοτικότητας [70].



Σχήμα 2.6: Οργανικός Άνθρακας σε χύδην καλαμπόκι και συσσωματώματα EF_{oc} (g/kg).



Σχήμα 2.7: Στοιχειακός Άνθρακας σε χύδην καλαμπόκι και συσσωματώματα EF_{ec} (g/kg).



Σχήμα 2.8: Ιπτάμενα Σωματίδια σε χύδην καλαμπόκι και συσσωματώματα $EF_{PM2.5}$ (g/kg).

Συσκευές για καύση θρυμμάτων ξύλου

Μια ακόμη επιλογή για οικιακή θέρμανση με χρήση βιομάζας είναι η καύση θρυμμάτων ξύλου και άλλων θρυμμάτων από καρπούς κ.λπ. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σε μεγάλες οικίες και φάρμες. Διαθέτουν σημαντικά προτερήματα, όπως είναι της αυτόματης τροφοδοσίας, των χαμηλών εκπομπών ρύπων λόγω της συνεχούς καύσης, ενώ οι εκπομπές CO, NO_x και πτητικών υδρογονανθράκων παραμένουν περιορισμένες. Ωστόσο, υπάρχουν και τα αντίστοιχα μειονεκτήματα της καύσης θρυμμάτων ξύλου, που είναι κυρίως το υψηλό κόστος, γιατί απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός και χώρος αποθήκευσης κατά την παραγωγή, αποθήκευση και ξήρανση τους.

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, για την ξήρανση των θρυμμάτων προς καύση, όταν αυτά έχουν πολύ υγρασία, χρησιμοποιούνται προ-καυστήρες, μέσα στους οποίους γίνεται καύση ή μερική αεριοποίηση, σε αυτούς τους καλά μονωμένους θαλάμους. Όταν ο αέρας τροφοδοτείται από έναν ανεμιστήρα και τα θρύμματα προς καύση με τη βοήθεια ενός κοχλία, επιτυγχάνεται η καύση μόνο μιας μικρής ποσότητας του καυσίμου. Οι προ-καυστήρες αποδίδουν τα καλύτερα αποτελέσματα, αν είναι καλά συνδυασμένοι με τον λέβητα.

Για την καύση θρυμμάτων υπάρχουν οι λέβητες με πρωτεύοντα αέρα που μοιάζουν με τους λέβητες για ξύλινους κορμούς, με την διαφορά όμως ότι ο χώρος αποθήκευσης του καυσίμου είναι κατασκευασμένος από καλύτερο υλικό για μην διαβρώνεται. Σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα, οι λέβητες με πρωτεύοντα αέρα δεν χρησιμοποιούνται συχνά για θρύμματα και προτιμούνται αυτόματες μονάδες. Αντίθετα, οι καυστήρες με εσχάρα είναι συσκευές για την αυτόματη καύση θρυμμάτων ξύλου μέσα στο θάλαμο καύσης του λέβητα και παρουσιάζουν αρκετά κοινά στοιχεία με τους καυστήρες για συσσωματώματα ξύλου. Πιο συνηθισμένοι είναι οι καυστήρες με τροφοδοσία από κάτω ή οριζόντια τροφοδοσία. Στους καυστήρες με τροφοδοσία από κάτω η φλόγα καίει προς τα πάνω, ενώ σε αυτούς με οριζόντια τροφοδοσία, η φλόγα καίει στην οριζόντια κατεύθυνση.

Εδώ και μια εικοσαετία είναι διαθέσιμοι στην αγορά καυστήρες, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για καύση βιομάζας. Κατά κύριο λόγο, το εύρος της δυναμικότητας για τους καυστήρες αυτούς κυμαίνεται μεταξύ 20-40 kW, ενώ έχουν κατασκευαστεί και καυστήρες με εσχάρα που μπορούν να φθάσουν ακόμα και 1 MW. Γενικότερα, υπάρχει μια αύξηση της ανάπτυξης και ζήτησης των καυστήρων σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και όχι μόνο, όπως η Σουηδία, η Γερμανία και η Αυστρία. Αναλόγως τις ανάγκες τις κάθε χώρας και της διαθεσιμότητας της βιομάζας, διαμορφώνονται διαφορετικοί καυστήρες, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικές μορφές θρυμμάτων. Στις Μεσογειακές χώρες, η τεχνική καύσης που έχει

αναπτυχθεί με χρήση θρυμμάτων μπορεί να προσαρμοσθεί για χρήση υλικού, το οποίο προέρχεται από ελαιοπυρήνες. Ωστόσο, σε τέτοιες περιπτώσεις, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των ελαιοπυρήνων σε τέφρα, χρειάζεται τροποποίηση των συστημάτων αποθήκευσης και απομάκρυνσης της τέφρας, για να επιτευχθεί η ορθή λειτουργία των καυστήρων. Ανάλογες μετατροπές και τροποποιήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν αναλόγως τις ανάγκες του κάθε βιοκαυσίμου.

Ανάπτυξη καυστήρων για θρύμματα ξύλου και ξυλώδη βιομάζα υπάρχει όχι μόνο σε χώρες της Ευρώπης, αλλά και σε χώρες του υπόλοιπου κόσμου, με τρανό παράδειγμα την Ινδονησία που αναφέρεται παρακάτω. Με βάση μια πρόσφατη μελέτη, ως εναλλακτική πηγή ενέργειας για την αποφυγή χρήσης ορυκτών καυσίμων, στην Ινδονησία χρησιμοποιούνται ως καύσιμα τα κελύφη καρύδας και κελύφη φοινοκοπυρήνων, για παραγωγή οικιακής θέρμανσης με μεγάλη επιτυχία τα τελευταία χρόνια. Η Ινδονησία έχει την μεγαλύτερη παραγωγή παγκοσμίως σε φοινικέλαιο και την δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγή σε λάδι καρύδας. Η εκμετάλλευση των στερεών αποβλήτων ως καύσιμο είναι μια λύση, η οποία προσαρμόστηκε για την παραγωγή οικιακής θέρμανσης. Τα κελύφη καρύδας και κελύφη φοινοκοπυρήνων αποτελούν ιδανικό καύσιμο, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας τους σε τέφρα, τις χαμηλές εκπομπές ρύπων και την σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Ακόμη, διαθέτουν υψηλή θερμογόνο δύναμη, πράγμα το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας από το καύσιμο. Αποδοτικοί καυστήρες βιομάζας συμβάλλουν σε μειωμένο κόστος καυσίμου για ένα νοικοκυριό. Σε περιοχές όπου χρησιμοποιείται η βιομάζα παραδοσιακά για μαγείρεμα, βελτιωμένοι καυστήρες θα αναβαθμίσουν την ποιότητα αέρα και θα εξασφαλίσουν καλύτερες συνθήκες υγείας. Η έρευνα, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός βελτιωμένου καυστήρα βιομάζας έχει ήδη αναληφθεί στην Ινδονησία. Αυτές οι δραστηριότητες δημιουργούν καυστήρες σχεδιασμού για ένα συγκεκριμένο καύσιμο και συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένας καυστήρας σχεδιασμένος για συγκεκριμένο καύσιμο και συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικά καύσιμα και εφαρμογές, αλλά δεν μπορεί να λειτουργήσει με την ίδια αποτελεσματικότητα. Ο καυστήρας βιομάζας που έχει σχεδιαστεί για τη χρήση στερεών αποβλήτων (κελύφη φοινοκοπυρήνων και κελύφη καρύδας) βασίστηκε στην τοπική κοινωνία που ζει γύρω από την συγκεκριμένη βιομηχανία. Είναι σημαντικό οι καυστήρες να δοκιμάζονται πριν από την εφαρμογή, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών ροής αέρα καύσης και θερμοκρασίας καύσης. Οι παράμετροι αξιολόγησης ήταν η κατανάλωση καυσίμου, η αποδοτικότητα, η θερμοκρασία καύσης και η ταχύτητα καύσης [15].

Τέλος, καυστήρες ή εστίες θρυμμάτων χρησιμοποιούνται όχι μόνο στον αναπτυγμένο κόσμο, άλλα και σε περιοχές όπου υπάρχουν πιο ζωτικές ανάγκες για παροχή θερμότητας. Σύμφωνα

με μια ακόμη μελέτη, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας εστίας τροφοδοτούμενης από ρύζι-φλούδα για τη βελτίωση της ενεργειακής πρόσβασης των φτωχών ανθρώπων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η διαθεσιμότητα φλοιού ρυζιού, αγροτικού υποπροϊόντος που δεν χρησιμοποιείται σήμερα, ούτε έχει αξία σε πολλές αγορές, προτείνεται για ανάκτηση αυτής της βιομάζας για σκοπούς οικιακής χρήσης. Σύμφωνα με τους τυπικούς κοινωνικό-τεχνικούς περιορισμούς της υπαίθρου, έχει σχεδιαστεί ένας πρότυπος καυστήρας φλοιού ρυζιού στην Ιταλία. Αφού δοκιμάστηκαν διάφορες διατάξεις, μια δομή ακατέργαστης γης με μεταλλικό αντιδραστήρα, τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο καύσης, αποτέλεσε την πιο ελπιδοφόρα διάταξη. Μια καμινάδα αποβάλλει τις ροές αερίων, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία στο θάλαμο καύσης, ενώ ταυτόχρονα εξαλείφει τις επιβλαβείς εκπομπές από το περιβάλλον διαβίωσης. Η καπνοδόχος συμβάλλει στη μη χρήση ηλεκτρικών ανεμιστήρων, οι οποίοι μπορεί να μην τεχνικά κατάλληλοι για πολλά αγροτικά περιβάλλοντα. Τα αποτελέσματα από δοκιμές βρασμού σε νερό (μέση θερμική απόδοση 18%) και ελεγχόμενες δοκιμές μαγειρέματος (ειδική κατανάλωση 4,2 MJ ανά kg μαγειρεμένου φαγητού) δείχνουν πως αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση σε παραδοσιακές εστίες και σε άλλα στοιχειώδη συστήματα μαγειρέματος, που βασίζονται σε ενέργεια από βιομάζα αποβλήτων. Τα αποδεικτικά στοιχεία από την αξιολόγηση ασφάλειας και την παρακολούθηση του μονοξειδίου του άνθρακα επιδεικνύουν την απουσία κινδύνων στην οικιακή χρήση της σόμπας. Τέλος η μελέτη δείχνει ότι υπάρχει οικονομική προσιτότητα αυτής της συγκεκριμένης λύσης σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο για φτωχές περιοχές σε υπό-σαχαράνο περιβάλλον [71].

Ο γενικός στόχος της μοντελοποίησης των καυστήρων, είτε πρόκειται για καυστήρες για συσσωματώματα ξύλου, είτε για θρύμματα ξύλου, είναι να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο, επικυρωμένο υπολογιστικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση του σχεδιασμού των οικιακών συστημάτων βιομάζας, που χρησιμοποιούνται από περισσότερα από 2.4 δισεκατομμύρια άτομα στον αναπτυσσόμενο κόσμο και μη. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, χρειάζεται ένα μοντέλο ή ένα σύνολο μοντέλων που μπορεί να :

- 1.επικυρώνεται σε μια σειρά κοινών γεωμετριών και συνθηκών λειτουργίας.
- 2.διαστασιολογήσει τη ροή του πρωτογενούς και του δευτερεύοντος αέρα.
- 3.περιλαμβάνει ζεύξεις μεταφοράς θερμότητας με αέρια φάση και στερεή καύση φάσης.
- 4.υπολογίσει τις απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον από το κυρίως σώμα του καυστήρα και το καπάκι στην επιφάνεια.
- 5.διαμορφώσει παραλλαγές στον τύπο του καυσίμου, το μέγεθος και την ταχύτητα τροφοδοσίας.
- 6.έχει κλίνες καύσης με ή χωρίς εσχάρα.
- 7.προβλέπει σωματιδιακές και αέριες εκπομπές και να περιλαμβάνει τις επιδράσεις των ενεργειών του χειριστή (π.χ. μέθοδος τροφοδότησης και καύσης) [72].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. Προέλευση και Προετοιμασία Δειγμάτων

Τα δείγματα βιομάζας που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα ήταν πυρήνες ελιάς, πυρήνες ροδάκινου και φλοιοί από αμύγδαλο. Τα βιοκαύσιμα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και σαν μίγματα, λόγω της μεγάλης ομοιότητας στο είδος, υφή και τα ενεργειακά τους χαρακτηριστικά (μικρή διαφορά στη μέση θερμογόνο δύναμη, παρόμοιο ποσοστό τέφρας και παρόμοια στοιχειομετρική σύνθεση). Για την πραγματοποίηση των παραμετρικών μελετών του συστήματος καύσης επιλέχθηκε το δείγμα πυρήνα ελιάς ή αλλιώς πυρηνόξυλο. Σημαντικό κριτήριο της επιλογής του πυρήνα ελιάς αποτέλεσε η μεγάλη διαθεσιμότητά του στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στη Κρήτη. Το πυρηνόξυλο παραχωρήθηκε από την εταιρεία ABEA-Ανώνυμος Βιομηχανική Εταιρεία 'Ανατολή', την παλαιότερη ελαιουργική βιομηχανία πανελλαδικά, με βάση τα Χανιά της Κρήτης. Ειδικεύεται στην επεξεργασία του ελαιοπυρήνα για τη παραγωγή ακατέργαστου πυρηνόξυλου. Αντίστοιχα, από την Ένωση Αγροτικών Συνεταιρισμών Γιαννιτσών (Γιαννιτσά, Πέλλα) παραχωρήθηκαν οι πυρήνες ροδάκινου, ενώ οι φλοιοί του αμυγδάλου χορηγήθηκαν από τον κο Χάρη Χοχλίο από τη Ξάνθη.

Όσον αφορά την προετοιμασία των δειγμάτων βιομάζας, ακολουθήθηκαν ορισμένα στάδια προεργασίας πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της άλεσης, κατά την οποία τα δείγματα συνθλίφτηκε από τον σιαγονωτό σπαστήρα (Jaws Crusher Σχήμα 3.1) σε κοκκομετρία <6mm. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ο μαχαιρόμυλος (Σχήμα 3.2) όπου με την κατάλληλη σίτα ελήφθη η επιθυμητή κοκκομετρία (1-6 mm). Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, ακολούθησε η κοσκίνιση, ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη κοκκομετρία και στα τρία δείγματα βιομάζας. Τέλος, η προετοιμασία των δειγμάτων ολοκληρώθηκε με την ξήρανση τους. Η διαδικασία της ξήρανσης έγινε με τη χρήση κλιβάνου (Σχήμα 3.4) σε θερμοκρασία 110 °C για 8 ώρες περίπου, μέχρις ότου να απομακρυνθεί η υγρασία από τα δείγματα.



Σχήμα 3.1: Σιαγωνοτός Σπαστήρας (JawsCrusher).



Σχήμα 3.2: Μαχαιρόμυλος.



Σχήμα 3.3: Κόσκινο 1mm.



Σχήμα 3.4: Κλίβανος Ξήρανσης.

Παραγωγή Θερμότητας σε Πρότυπη Μονάδα Σταθερής Κλίνης μέσω Πολυτροφοδοσίας Καυσίμων

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Στα πλαίσια της προετοιμασίας, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του καυστήρα για κάθε δείγμα βιομάζας που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα. Ο σκοπός της βαθμονόμησης ήταν ο προσδιορισμός της ποσότητας κάθε καυσίμου, που εισάγεται στο καυστήρα από το σιλό σε σχέση με το χρόνο. Πιο αναλυτικά, για τον υπολογισμό της παροχής του εκάστοτε βιοκαυσίμου τοποθετήθηκε μια συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου στο σιλό και τέθηκε σε λειτουργία ο ατέρμονος κοχλίας του καυστήρα για διάρκεια 5 λεπτών σε διάφορους ρυθμούς τροφοδοσίας με σταθερή αναρρόφηση αέρα με μέση παροχή αέρα 501.87 (m³/h). Ο ρυθμός τροφοδοσίας καθορίζεται από ένα ζεύγος χρονοδιακοπών-ροοστατών (ON/OFF). Έτσι υπολογίστηκαν οι διάφορες παροχές όπως φαίνεται στο Πίνακα 3.1 παρακάτω:

Πίνακας 3.1: Βαθμονόμηση.

	Ροοστάτης ON (sec)	Ροοστάτης OFF (sec)	Μέσος Ρυθμός Τροφοδοσίας (kg/h)
Πυρήνας Ελιάς	10	30	13.5
	20	30	17.7
	30	30	23.7
	40	30	27.9
	50	30	32.7
Πυρήνας Ροδάκινου	10	30	18
	20	30	24.9
	30	30	33.3
	40	30	35.1
	50	30	39.9
Φλοιός Αμυγδάλου	10	30	15.3
	20	30	16.2
	30	30	24.3
	40	30	26.1
	50	30	31.2

Τέλος, για τη βαθμονόμηση του ανεμιστήρα απαερίων (Fan), με σκοπό τον υπολογισμό της μέσης παροχής αέρα για κάθε θέση του ροοστάτη στο πίνακα ελέγχου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα στις διάφορες θέσεις της διαμέτρου του απαγωγού των καυσαερίων. Χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο των μετρήσεων αυτών και το εμβαδόν του σωλήνα, υπολογίστηκαν οι μέσες παροχές αέρα, οι οποίες φαίνονται στο Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2:Βαθμονόμηση Ανεμιστήρα Απαερίων

Θέση Ροοστάτη	Μέση Ταχύτητα (m/s)	Μέση Παροχή (m³/h)
1.5	2.84	501.87
2	7.96	1406.65

3.2 Τυπικές Αναλύσεις Καυσίμου των Δειγμάτων

3.2.1 Προσεγγιστική Ανάλυση

Σε κάθε αντιπροσωπευτικό δείγμα βιομάζας έγινε η προσεγγιστική ανάλυση, ώστε να προσδιοριστούν τα ποσοστά υγρασίας, τέφρας, πτητικών συστατικών και μόνιμου άνθρακα.

Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε υγρασία

Ξηραίνοντας ένα δείγμα σε θερμοκρασία 100-110 °C σε ατμοσφαιρική πίεση, γίνεται ο προσδιορισμός της φυσικής περιεκτικότητας σε υγρασία. Πρακτικά λήφθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα 2g, το οποίο ζυγίστηκε σε αναλυτικό ζυγό με ακρίβεια $\pm 0,1\text{mg}$. Έπειτα το δείγμα εισήχθη στο κλίβανο ξήρανσης και θερμάνθηκε για 90 min στη θερμοκρασία που προαναφέρθηκε. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο υπό συνθήκες έλλειψης υγρασίας για 30 min και ξαναζυγίστηκε. Με βάση το παρακάτω τύπο υπολογίστηκε η περιεκτικότητα του δείγματος σε υγρασία:

$$\text{Υγρασία(\%)} = \frac{W_{\text{αρχ}} - W_{\text{τελ}}}{W_{\text{αρχ}}} \cdot 100$$

όπου,

$W_{\text{αρχ}}$: το αρχικό βάρος του δείγματος σε g.

$W_{\text{τελ}}$: το τελικό βάρος του δείγματος μετά τη ξήρανση σε g.

Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε τέφρα

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού της τέφρας της βιομάζας, κάθε ξηρό δείγμα κάηκε σε κλίβανο σε θερμοκρασία 550 °C και το ανόργανο υπόλειμμα ζυγίστηκε σε αναλυτικό ζυγό. Με βάση το παρακάτω τύπο υπολογίστηκε η περιεκτικότητα σε τέφρα του δείγματος:

$$\text{Τέφρα επί ξηρού(\%)} = \frac{W_{\text{τελ}}}{W_{\text{αρχ}}} \cdot 100$$

Προσδιορισμός πτητικών συστατικών

Για να απελευθερωθεί η πτητική ύλη ενός δείγματος βιομάζας, θα πρέπει να θερμανθεί απουσία οξυγόνου στους 900 °C περίπου. Αναλυτικά, με τη χρήση ενός θερμοζυγού TGA-6 πραγματοποιήθηκαν πειράματα θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης. Το δείγμα προς ανάλυση τοποθετήθηκε στην υποδοχή του θερμοζυγού και έπειτα αυξήθηκε η θερμοκρασία στους 110 °C για ορισμένο χρόνο, έως ότου απομακρυνθεί η υγρασία από το δείγμα. Έπειτα, η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 900 °C με ρυθμό θέρμανσης 10 °C/min, ώστε να γίνει η πυρόλυση του δείγματος. Με το παρακάτω τύπο υπολογίζονται τα πτητικά συστατικά του δείγματος:

$$\text{Πτητικά(\%)} = \frac{W_{110} - W_{900}}{W_{110}} \cdot 100$$

όπου,

W_{110} : το βάρος του ξηρού δείγματος στους 110°C σε g.

W_{900} : το τελικό βάρος του δείγματος στους 900 °C σε g.

Προσδιορισμός μόνιμου άνθρακα

Με το παρακάτω τύπο υπολογίστηκε ο μόνιμος άνθρακας του δείγματος:

$$\begin{aligned} \text{Μόνιμος Άνθρακας επί ξηρού(\%)} &= \\ &= 100 - \text{Τέφρα επί ξηρού(\%)} - \text{Πτητικά επί ξηρού(\%)} \end{aligned}$$

3.2.2 Στοιχειακή Ανάλυση

Χρησιμοποιώντας τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή του εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων πραγματοποιήθηκε ποσοτικός προσδιορισμός των στοιχείων C,H,N,S,O.



Σχήμα 3.5 : Αυτόματος Στοιχειακός Αναλυτής Flash 2000 Series, της εταιρείας ThermoFisherScientific.

Ο στοιχειακός αναλυτής, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.5, περιλαμβάνει έναν αυτόματο δειγματολήπτη τύπου MAS 200R, που συνδέεται με μια στήλη χαλαζία και έναν αναλυτικό ζυγό τύπου XP6. Η στήλη χαλαζία βρίσκεται σε κλίβανο σε θερμοκρασία 900 °C, έχοντας σταθερή παροχή ηλίου (He). Έπειτα, συνδέεται με τον αέριο χρωματογράφο και αυτός με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας.

Πειραματικά, ζυγίστηκαν περίπου 5mg για κάθε ξηρό δείγμα και τοποθετήθηκαν σε κάψα κασσίτερου μαζί με συγκεκριμένη ποσότητα πεντοξειδίου του βαναδίου ως καταλύτη (V_2O_5). Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στην αρχή της δυναμικής ανάφλεξης-καύσης του δείγματος με εισαγωγή οξυγόνου. Με την εκκίνηση της διαδικασίας άρχισε η ροή οξυγόνου στη στήλη χαλαζία και λίγα δευτερόλεπτα αργότερα η κάψα κασσίτερου έπεσε στη στήλη, όπου κατέληξε σε ένα ισχυρά οξειδωτικό περιβάλλον. Λόγω της εξώθερμης αντίδρασης η θερμοκρασία φτάνει στους 1800 °C, πράγμα που υποδηλώνει ότι όλα τα στοιχεία του δείγματος κάηκαν και μετατράπηκαν σε αέρια. Το ήλιο χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς των αερίων της καύσης από τη στήλη χαλαζία προς τον αέριο χρωματογράφο. Τυχόν ενώσεις όπως NO_x και SO_3 που μπορεί να σχηματίστηκαν ανάγονται καταλυτικά σε N_2 και SO_2 . Τα συστατικά της καύσης που προκύπτουν (N_2 , CO_2 , H_2O και SO_2) διαχωρίστηκαν στο χρωματογράφο και έπειτα εντοπίστηκαν από τον ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας.

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό επεξεργάστηκαν τα ηλεκτρικά σήματα που παρείχε ο ανιχνευτής και εν τέλει υπολογίστηκαν τα ποσοστά επί τοις εκατό άνθρακα, αζώτου, υδρογόνου και θείου που περιέχονταν στα προς εξέταση ξηρά δείγματα.

Το ποσοστό του οξυγόνου υπολογίστηκε αφαιρώντας από το 100 τα ποσοστά άνθρακα (C), υδρογόνου (H), αζώτου (N), θείου (S) και τέφρας επί ξηρού.

Θερμογόνος Δύναμη

Όσον αφορά τη θερμογόνο δύναμη, αποτελεί τη ποσότητα θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη πλήρη καύση συγκεκριμένης ποσότητας καυσίμου βιομάζας. Για τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις και διαγράμματα όταν δεν είναι δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός της. Η σχέση με την οποία υπολογίστηκε η θερμογόνος δύναμη είναι [81]:

$$Q \left(\frac{MJ}{kg} \right) = \frac{33.5 \cdot C + 142.3 \cdot H - 15.4 \cdot O - 14.5 \cdot N}{100}$$

Όπου, Q: θερμογόνος σε ξηρή βάση άνευ τέφρας

C: το ποσοστό του άνθρακα που προέκυψε από τη στοιχειακή ανάλυση σε ξηρή βάση άνευ τέφρας. H, O, N: ποσοστά των στοιχείων (Υδρογόνο H, Οξυγόνο O, Άζωτο N) που προέκυψαν από τη στοιχειακή ανάλυση σε ξηρή βάση άνευ τέφρας.

3.2.3 Χημική Ανάλυση Τέφρας

Μέθοδος Φασματομετρίας Ακτίνων-X Φθορισμού (XRF)

Η μονάδα φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού EDXRF είναι τύπου Bruker AXS S2 Ranger με λυχνία ακτίνων X- ανόδου Pd (max 50 Watt, 50 KV, 2mA) και βρίσκεται στο Εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας. Η μέθοδος της φασματομετρίας ακτίνων-X φθορισμού είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος, γίνεται με σκοπό να προσδιοριστεί η χημική σύσταση των δειγμάτων και βασίζεται στη μέτρηση της εκλυόμενης ακτινοβολίας ακτίνων-X κατά το «βομβαρδισμό» του δείγματος με ακτίνες-X. Τα στοιχεία του υλικού διεγείρονται και η ενέργεια, η οποία απορροφάται από αυτά επανεκπέμπεται με την μορφή ακτίνων -X, με παράλληλη εκδήλωση του φαινομένου του φθορισμού. Για τη πραγματοποίηση της μεθόδου XRF παρασκευάστηκε μίγμα αποτελούμενο από 5g δείγματος τέφρας ανεμιγμένο με 0.5g κερί (Wax). Έπειτα, το παραπάνω μίγμα τοποθετήθηκε σε ειδικό μεταλλικό καλούπι μαζί με ποσότητα βορικού

οξέος και συμπίεστηκε στην υδραυλική πρέσα μεχρις ότου ολοκληρώθηκε η κατασκευή της ταμπλέτας προς ανάλυση [79].

3.3 Περιγραφή Πρότυπης Μονάδας Καύσης

Η πρότυπη μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας (Σχήμα 3.6) στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είναι ένα σύστημα παραγωγής θερμότητας. Η θερμότητα αυτή παράγεται από τη καύση βιομάζας (θρύμματα και συσσωματώματα ξύλου). Η μονάδα αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα. Τα τμήματα του συστήματος είναι ένας λέβητας, ένας καυστήρας με σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου ατέρμονος κοχλία, ένας κυκλοφορητή νερού, διάφορα στοιχεία ασφαλείας (όπως δοχείο διαστολής, βαλβίδα πλήρωσης κτλ.) και ένα σιλό τροφοδοσίας (ιδιοκατασκευή) [83].



Σχήμα 3.6: Πρότυπη Μονάδα Καύσης.

Ο λέβητας μεταβιβάζει θερμότητα στο θερμαντικό μέσο που είναι νερό χαμηλών θερμοκρασιών, το οποίο κυκλοφορεί σε ένα κλειστό κύκλωμα. Η πιο διαδεδομένη σχεδίαση είναι ο λέβητας φλογοσωληνών (ή κυψελωτός), όπου τα καυσαέρια διέρχονται μέσω συστοιχίας σωλήνων προσαρμοσμένων στο κύριο σώμα του λέβητα. Σε αυτόν τον τύπο λέβητα όπου χρησιμοποιήθηκε και πειραματικά, οι σωλήνες περιέχουν το νερό και τα καυσαέρια διέρχονται γύρω από τους σωλήνες και μεταφέρουν τη θερμότητα από την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων προς το εσωτερικό. Αποτελείται από διπλό τοίχωμα και διαθέτει ονομαστική ισχύ 65 kW. Το υλικό του λέβητα είναι από χυτοσίδηρο. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής του, όσον αφορά τη διάβρωση. Επιπρόσθετα, οι λέβητες που είναι κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο απαιτούν μικρότερες ποσότητες νερού κατά τη λειτουργία τους, συγκριτικά με τους χαλύβδινους.

Η συσκευή που έχει προσαρμοστεί πάνω στο λέβητα μέσα στην οποία επιτυγχάνεται η ανάμειξη του καύσιμου υλικού με τον αέρα, ώστε να προκαλείται και να συντηρείται η καύση αποτελεί το καυστήρα. Το σύστημα τροφοδοσίας που είναι ενσωματωμένο στο καυστήρα είναι ένας ατέρμων κοχλίας 1 ½ ίντσας, που τροφοδοτεί τα προς μελέτη στερεά βιοκαύσιμα.

Ο κυκλοφορητής είναι μία αντλία φυγοκεντρικού τύπου, μέσω της οποίας μεταφέρεται το θερμαντικό μέσο από το λέβητα στα θερμαντικά σώματα και αντιστρόφως. Οι διατάξεις ασφαλείας, με τις οποίες εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης, είναι ένα κλειστό δοχείο διαστολής, η βαλβίδα ασφαλείας και η βαλβίδα ανοδικής προστασίας. Μέσω αυτών διατηρείται η σταθερή πίεση του νερού μέσα στην εγκατάσταση.

Το δίκτυο σωληνώσεων, από το οποίο αποτελείται το σύστημα, είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά του νερού από το λέβητα στα θερμαντικά σώματα και αντίστροφα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τρία είδη σωλήνων: Χαλκοσωλήνες, χαλυβδοσωλήνες και πλαστικοί σωλήνες. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σωλήνες, λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας τοποθέτησης και της μεγάλης διαθεσιμότητά τους στην αγορά. Τα θερμαντικά σώματα αποτελούν τις τελικές συσκευές ενός συστήματος εγκατάστασης κεντρικής θέρμανσης, μέσω των οποίων η θερμότητα του συστήματος μεταδίδεται στους εσωτερικούς χώρους. Για τις πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν αερόθερμα (fan coils) εσωτερικού χώρου, υψηλής απόδοσης.

Για την απομάκρυνση των καυσαερίων, που δημιουργούνται κατά την καύση των βιοκαυσίμων, χρησιμοποιήθηκε ένας απαγωγός αερίων ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το λέβητα. Για τον έλεγχο της αναρρόφησης αέρα χρησιμοποιήθηκε ανεμιστήρας τοποθετημένος μέσα στον απαγωγό, ο οποίος ρυθμίζεται από το πίνακα ελέγχου μέσω ενός ροοστάτη.

3.4 Τροποποιήσεις και Αναβαθμίσεις της Μονάδας Καύσης

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν ορισμένες τροποποιήσεις-αναβαθμίσεις της πρότυπης μονάδας καύσης, με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας της μονάδας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Η σημαντικότερη, όσον αφορά τη βελτίωση της απόδοσης της πρότυπης μονάδας καύσης τροποποίηση, ήταν η μόνωση του καυστήρα και των σωληνώσεων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας του συστήματος. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μόνωση του καυστήρα ήταν ο υαλοβάμβακας. Το συγκεκριμένο θερμομονωτικό υλικό παρουσιάζει αντοχή στο χρόνο, στην υγρασία και πολύ μικρή αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, σχετικά με τη αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Μία ακόμη αναβάθμιση που πραγματοποιήθηκε ήταν η τοποθέτηση θερμιδομετρητή που παρουσιάζει ενδείξεις για θερμοκρασία νερού στην είσοδο, θερμοκρασία νερού στην έξοδο, παροχή νερού και θερμίδες. Τέλος, έγινε τροποποίηση στον κυκλοφορητή, μετακινώντας τον από τη θέση εξόδου του νερού στη θέση εισόδου, ώστε να μην αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η θερμοκρασία του και να μην δημιουργούνται προβλήματα στη λειτουργία του.

3.5 Μεθοδολογία Εκτέλεσης των Πειραμάτων

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη μονάδα καύσης όπου, κάηκαν τα τρία καύσιμα με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης απόδοσης του λέβητα, σε συνδυασμό με χαμηλές εκπομπές αερίων. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε καύσιμο σε δύο ρυθμίσεις των ροοστατών τροφοδοσίας καυσίμου (ON/OFF) 10/30 και 20/30. Ακόμη, εκτός από τη μελέτη και ανάλυση ‘καθαρών’ υλικών, χρησιμοποιήθηκαν στη βέλτιστη τροφοδοσία και μίγματα των επιλεγμένων υλικών σε δύο αναλογίες. Τα μίγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος ήταν: πυρήνας ελιάς με πυρήνα ροδάκινου και πυρήνας ελιάς με φλοιό αμυγδάλου σε αναλογίες 70-30 % και 50-50 % στο εκάστοτε μίγμα.

3.6 Πειραματική Διαδικασία

Για τη πραγματοποίηση των πειραμάτων ακολουθήθηκε μια συγκεκριμένη διαδικασία αποτελούμενη από ορισμένα στάδια. Αρχικά, τα προς μελέτη δείγματα βιομάζας ήταν πυρήνας ελιάς, φλοιός αμυγδάλου και πυρήνας ροδάκινου, τα οποία προετοιμάστηκαν κατάλληλα ακολουθώντας μια σειρά άλεσης, κοσκίνισης και ξήρανσης. Με το ήδη επεξεργασμένο υλικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη καύση, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του καυστήρα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα. Από το εκάστοτε υλικό φορτώθηκε συγκεκριμένη ποσότητα στο σιλό της τάξης των 15 kg. Αρχικά, πριν την έναρξη λειτουργίας του καυστήρα ενεργοποιήθηκε ο ατέρμον κοχλίας, ώστε να περάσει ποσότητα υλικού στο θάλαμο του καυστήρα και να πληρωθεί ο νεκρός όγκος μεταξύ σιλό και καυστήρα. Με τη βοήθεια προσανάμματος επιτεύχθηκε η έναρξη της καύσης. Αφού έγινε έλεγχος ότι η ένταση της φλόγας βρίσκεται στο επιθυμητό επίπεδο, ρυθμίστηκε ο θερμοστάτης του νερού με όριο στους 70 °C, έτσι ώστε όταν το νερό φτάσει αυτή τη θερμοκρασία να διακόπτεται η τροφοδοσία καυσίμου και αέρα. Όταν η θερμοκρασία του νερού στο εσωτερικό του λέβητα έφθανε τους 50 °C περίπου ενεργοποιείτο ο κυκλοφορητής, ώστε να ξεκινήσει η κυκλοφορία του νερού στο σύστημα και να γίνει εκτόνωση της θερμότητας του συστήματος μέσω των αερόθερμων του εργαστηρίου (FanCoils). Η λειτουργία του κοχλίας διακοπτόταν στους 70 °C, όπου το σύστημα παρουσιάζει αδράνεια με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του νερού να φτάνει έως και τους 85 °C. Η επανεκκίνηση της τροφοδοσίας γινόταν περίπου στους 67.5 °C.

Στάδια Μέτρησης Θερμοκρασίας

Με τη χρήση δύο θερμομέτρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην έξοδο και είσοδο του νερού από το λέβητα, γινόταν η μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού. Κατά την πειραματική διαδικασία όταν η θερμοκρασία του νερού ξεπερνούσε τους 30 °C ξεκινούσε η καταγραφή σε φύλλο αναφοράς των ενδείξεων των θερμομέτρων του νερού, που είχαν τοποθετηθεί στην είσοδο (T_{in}) και έξοδο (T_{out}) του λέβητα. Οι θερμοκρασίες αυτές καταγράφονταν ανά ένα λεπτό, μέχρις ότου ολοκληρωθούν τρεις πλήρεις πειραματικοί κύκλοι.

Στάδιο Μέτρησης Καυσαερίων

Σημαντικό ρόλο κατά την εκτέλεση του πειράματος κατείχε η ανάλυση των καυσαερίων, για το λόγο ότι έδωσε χρήσιμες πληροφορίες για τη ποιότητα της καύσης που πραγματοποιούνταν στο καυστήρα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των καυσαερίων είναι ένας φασματικός πολυαναλυτής GA-40plus (Σχήμα 3.7) του αυστριακού οίκου Madur Electronics, στον οποίο περιλαμβάνεται διπλό εσωτερικό φίλτρο, ξηραντήρας και μία σειρά

από ηλεκτροχημικούς αισθητήρες. Αυτοί έχουν την ικανότητα να μετρούν τη συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NO_x), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), οξυγόνου (O_2), διοξειδίου του θείου (SO_2) κ.λπ., καθώς και του συντελεστή 'lambda' (λ) δηλαδή το λόγο περίσσειας του αέρα. Ακόμη, έχει τη δυνατότητα να μετράει τη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της καπνοδόχου, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και μία σειρά από εξειδικευμένες μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Αυτό πραγματοποιείται είτε μέσω προβολής των μετρήσεων στην οθόνη του αναλυτή, είτε με εκτύπωση από τον ενσωματωμένο θερμικό εκτυπωτή (σε μορφή απόδειξης), οποιαδήποτε χρονική στιγμή, είτε μέσω σειριακής θύρας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και αποθήκευση σε αρχείο (.csv).



Σχήμα 3.7: Πολυαναλυτής GA-40plus.

Όσον αφορά το πείραμα, ο αναλυτής συνδέθηκε με ένα ακροφύσιο δειγματοληψίας με τη καπνοδόχο. Το ακροφύσιο δειγματοληψίας τοποθετήθηκε στο σημείο με τη καλύτερη ανάμειξη καυσαερίων, σε ειδική οπή που ανοίχτηκε στη κάμινο. Ακόμη, πρέπει να βρίσκεται στο μέσο της ροής του καυσαερίου, ώστε οι αναλύσεις των καυσαερίων να είναι αξιόπιστες. Πριν την έναρξη κάθε πειράματος γινόταν έλεγχος και τυχόν αντικατάσταση των φίλτρων του αναλυτή. Η καταγραφή των μετρήσεων από τον αναλυτή ξεκινούσε σε θερμοκρασία περίπου των 30 °C, όταν δηλαδή το επίπεδο της καύσης του βιοκαυσίμου ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα. Ο αναλυτής είχε ρυθμιστεί να καταγράφει μέτρηση κάθε 30 δευτερόλεπτα (sec). Με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας, για κάθε υλικό, μεταφέρθηκαν τα δεδομένα που αφορούσαν τις εκπομπές των καυσαερίων σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, όπου έγινε η επεξεργασία τους στο πρόγραμμα Microsoft Excel.

3.7 Μετρήσεις Παραμέτρων Καύσης

Συντελεστής Λ (περίσσεια αέρα)

Ο συντελεστής περίσσειας αέρα (λ) είναι ο λόγος του παρεχόμενου αέρα στο καυστήρα προς το στοιχειομετρικό αέρα που απαιτείται για την τέλεια καύση. Για να επιτευχθεί πλήρης καύση, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η πλήρης ανάμιξη του βιοκαυσίμου με τον αέρα. Πρακτικά όμως, πλήρης ανάμιξη δε επιτυγχάνεται. Οπότε, για την αποφυγή ατελούς καύσης που θα οδηγήσει στην παραγωγή αέριων εκπομπών, παρέχεται περισσότερο οξυγόνο από το θεωρητικά προαπαιτούμενο στοιχειομετρικό. Όταν ο συντελεστής ' λ ' λαμβάνει τη τιμή 1.2 υπάρχει 20% περίσσεια αέρα, δηλαδή παρέχεται στο καυστήρα 20% μεγαλύτερη ποσότητα αέρα από ότι απαιτείται στοιχειομετρικά. Το οξυγόνο της περίσσειας αέρα δε συμμετέχει στη καύση, αλλά αποβάλλεται από το λέβητα μαζί με τις εκπομπές αερίων. Η παράμετρος της περίσσειας του αέρα είναι πολύ σημαντική για το λόγο ότι συνδέεται άμεσα με την απόδοση του λέβητα. Πειραματικά το ' λ ' παρουσίαζε τιμές της τάξεως 1.1-2.8 όταν η καύση του καυσίμου γινόταν ομαλά με αποτέλεσμα την καλή απόδοση του λέβητα και χαμηλές εκπομπές ρύπων. Αντίθετα, όταν κατά τη διάρκεια της καύσης υπήρχε αρκετό άκαυστο υλικό, λόγω μεγάλης τροφοδοσίας (30/30), οι τιμές του λ ήταν πολύ μικρές, και η απόδοση του λέβητα χαμηλή.

Θερμοκρασία καυσαερίων T_{gas} και Θερμικές απώλειες καύσης

Η θερμοκρασία απαγωγής των καυσαερίων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τον έλεγχο των απωλειών θερμότητας. Οι θερμικές απώλειες καύσης είναι το ποσοστό της θερμικής ενέργειας του καυσίμου που δεν αξιοποιείται και οι τιμές τους θα πρέπει να είναι μηδαμινές. Πρακτικά όμως αυτό δεν είναι εφικτό, για το λόγο ότι υπάρχουν απώλειες εξαιτίας της θερμικής ακτινοβολίας του λέβητα, του χαμηλού επιπέδου της μόνωσης και των απωλειών θερμικών φορτίων στα καυσαέρια. Για να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των βασικών αυτών απωλειών, πρέπει η θερμοκρασία απαγωγής των καυσαερίων να βρίσκεται σε επίπεδο τέτοιο, ώστε να μην δημιουργούνται συμπυκνώσεις καυσαερίων και ταυτόχρονα να παραμένει σχετικά χαμηλή, για να μην αυξάνονται οι απώλειες θερμότητας των καυσαερίων. Οι τυχόν συμπυκνώσεις καυσαερίων που μπορεί να δημιουργηθούν προκαλούν διάβρωση του πειραματικού εξοπλισμού. Η έλλειψη περίσσειας αέρα ($\lambda < 1$), οι επικαθίσεις στα τοιχώματα του λέβητα και η κακή ρύθμιση του καυστήρα μπορούν να προκαλέσουν υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων μαζί με τις επιπτώσεις τους.

Παραγωγή Θερμότητας σε Πρότυπη Μονάδα Σταθερής Κλίνης μέσω Πολυτροφοδοσίας Καυσίμων

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Εκπομπές ρύπων

Οι εκπομπές των καυσαερίων αποτελούνται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO_x) και διοξείδιο του θείου (SO₂), οι οποίες εκφράζονται σε ppm. Όσον αφορά το μονοξείδιο του άνθρακα αποτελεί προϊόν ατελούς καύσης. Η τιμή του πρέπει να βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αυξημένες συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα μπορεί να οφείλονται στη μικρή παροχή αέρα στο θάλαμο καύσης ή στη κακή ανάμιξη αέρα-καυσίμου [74-77]. Το όριο που έχει τεθεί σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για τις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι 2400-4000 ppm_v (ανηγμένη για 10% O₂). Τα οξείδια του αζώτου που εμπεριέχονται στις εκπομπές επηρεάζονται από το 'lambda' και τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Το όριο που έχει τεθεί σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για μικρές μονάδες για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου είναι 200-350 mg/Nm³ (ανηγμένη για 10% O₂). Τέλος, η ποσότητα του διοξειδίου του θείου θα πρέπει να είναι όσον το δυνατόν χαμηλότερη και επηρεάζεται άμεσα από τη περιεκτικότητα του θείου στο καύσιμο. Ωστόσο, η βιομάζα έχει διαπιστωθεί ότι δεν περιέχει σημαντικές ποσότητες στοιχειακού θείου. Το όριο που σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για τις εκπομπές του διοξειδίου του θείου είναι < 20 ppm_v (ανηγμένη για 10% O₂)[82].

Στοιχειομετρικός Αέρας Καύσης

Πίνακας 3.3: Στοιχειομετρικός Αέρας Καύσης [83].

Βιοκαύσιμο	Παροχή καυσίμου (kg/h)	Στοιχειομετρικός αέρας καύσης ανά kg καυσίμου (m ³ /h)	Στοιχειομετρικός αέρας καύσης συναρτήσει της παροχής καυσίμου (m ³ /h)	Λόγος περίσσειας αέρα κατά τη καύση λ	Αέρας καύσης σε περίσσεια (m ³ /h)
Πυρήνας ελιάς	13.5	5.58	68.9	1.6-2.8	110.2-192.9
	17.7		90.2	1.39-2.26	125.4-203.9
	23.7		120.7	1.59-2.36	191.9-284.9
Πυρήνας ροδάκινου	18	4.67	84.2	1.14-2.76	96-232.4
	24.9		116.4	1.21-1.92	140.9-223.5
Φλοιός Αμύγδαλου	15.3	4.5	68.7	1.43-2.69	98.2-184.8
	16.2		72.8	1.1-1.71	80.1-124.5

3.8 Θερμικός Βαθμός Απόδοσης και Βαθμός Απόδοσης Καύσης

Για το προσδιορισμό του συντελεστή απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προσδιορισμού βάσει της ωφέλιμης ενέργειας (θερμότητα) προς τη προσφερόμενη, η οποία προσδιορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$n_{\sigma} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100$$

Όπου,

Q_{out} : αποδιδόμενη θερμότητα λέβητα στο νερό.

Q_{in} : προσφερόμενη θερμότητα βιοκαυσίμου.

Πιο αναλυτικά ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\begin{aligned} n_{\sigma} &= \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100 = \left(\frac{\frac{m_w}{t} \cdot C_{pw} \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{m_k \cdot Q} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(\frac{q_w \left(\frac{kg}{h} \right) \cdot C_{pw} \left(\frac{MJ}{kg \cdot K} \right) \cdot \Delta T (K) \cdot \Delta t (h)}{m_k (kg) \cdot Q \left(\frac{MJ}{kg} \right)} \right) \cdot 100 = \\ &= \left(\frac{q_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{m_k \cdot Q} \right) \cdot \frac{(MJ)}{(MJ)} \cdot 100 = \frac{q_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{m_k \cdot Q} \% \end{aligned}$$

όπου,

q_w : παροχή νερού (kg/h).

C_{pw} : θερμοχωρητικότητα νερού (MJ/kg*K).

ΔT : μέσος όρος της διαφοράς των θερμοκρασιών εξόδου και επιστροφής στο λέβητα μετά τους 70 °C (K).

Δt : χρόνος λειτουργίας μετά τους 70 °C (h).

m_k : ποσότητα καυσίμου που φορτώθηκε (kg).

Q : θερμογόνος δύναμη βιοκαυσίμου (MJ/kg).

Βαθμός απόδοσης καύσης

Με βάση τους δύο συντελεστές IL(συντελεστής ατελούς καύσης) και SL(συντελεστής απωλειών καμινάδας) υπολογίστηκε και έμμεσα ο βαθμός απόδοσης καύσης του λέβητα σύμφωνα με το εγχειρίδιο του αναλυτή (Madur) [80]. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με τις καταγραφές του αναλυτή καυσαερίων για παραμέτρους όπως T_{gas} , T_{amb} , CO, CO₂ %.

Αρχικά, υπολογίστηκε ο δείκτης SL από το παρακάτω τύπο:

$$SL = (T_K - T_{amb}) \cdot \left(\frac{A_1}{CO_2} + B \right)$$

όπου,

SL: ποσοστό της θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από τα καυσαέρια κατά τη καύση (%).

T_K : θερμοκρασία καυσαερίων στη καπνοδόχο (°C).

T_{amb} : θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C).

CO₂: το ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα που μετρήθηκε από τον αναλυτή.

A_1, B : παράμετροι που εξαρτώνται από το τύπο καυσίμου. Για ξυλώδη βιομάζα η παράμετρος

A_1 ισούται με 0,650 ενώ η παράμετρος B ισούται με 0.

Έπειτα, υπολογίστηκε ο δείκτης IL από το παρακάτω τύπο:

$$IL = \frac{a \cdot CO(\%)}{CO(\%) + CO_2(\%)}$$

όπου,

IL: απώλειες θερμότητας από ατελή καύση (%).

CO, CO₂: συγκεντρώσεις όγκου μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια (%).

a: παράμετρος που εξαρτάται από το τύπο καυσίμου. Για ξυλώδη βιομάζα η παράμετρος a ισούται με 69.

Και τέλος υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης καύσης από το παρακάτω τύπο:

$$n = 100 - SL - IL (\%)$$

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

4.1 Αναλύσεις Καυσίμου των Δειγμάτων και Χαρακτηρισμός Τεφρών Καύσης

4.1.1 Προσεγγιστική Ανάλυση

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής ανάλυσης των βιοκαυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν στο Πίνακα 4.1, που παρατίθεται παρακάτω. Όπως παρατηρείται, όλα τα δείγματα παρουσιάζουν χαμηλά ποσοστά τέφρας, με τον πυρήνα ροδάκινου να περιέχει το χαμηλότερο ποσοστό τέφρας από τα δείγματα. Αντίστοιχα, παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις σε πτητικά συστατικά, που τα καθιστά δείγματα με μεγάλη αντιδραστικότητα, με το φλοιό του αμυγδάλου να διαθέτει το μεγαλύτερο ποσοστό, συμβάλλοντας θετικά στη διαδικασία της καύσης. Τέλος τα ποσοστά υγρασίας των τριών υλικών βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, έτσι δεν αναμένεται να επιδρούν αρνητικά στην καύση.

Πίνακας 4.1 : Αποτελέσματα προσεγγιστικής ανάλυσης των δειγμάτων επί ξηρού.

Δείγμα	Υγρασία (%)	Τέφρα (%)	Πτητικά Συστατικά (%)	Μόνιμος Ανθρακας (%)
Πυρήνας Ελιάς (ΠΞ)	4.35	7.33	78.2	14.47
Πυρήνας Ροδάκινου (ΡΟ)	5.47	4.38	76.2	19.42
Φλοιός Αμυγδάλου (ΑΜ)	2.71	5.54	81.4	13.06

4.1.2 Στοιχειακή ανάλυση και θερμογόνος δύναμη

Στο Πίνακα 4.2, που παρατίθεται παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης των καυσίμων βιομάζας, που αναλύθηκαν από τον αυτόματο στοιχειακό αναλυτή. Όπως παρατηρείται, το ποσοστό του στοιχειακού άνθρακα, το ποσοστό υδρογόνου και τα αυξημένα πτητικά συστατικά συνδέονται άμεσα με τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, καθώς ο πυρήνας ελιάς έχει τα μεγαλύτερα ποσοστά στοιχειακού άνθρακα και ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη. Οι εκπομπές θείου αναμένονται αμελητέες για τα τρία καύσιμα βιομάζας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς η περιεκτικότητά τους σε θείο είναι μηδενική. Η βαθμονόμηση του αναλυτή έγινε με δείγμα στοιχειακού θείου 7.5% και όριο αβεβαιότητας 0.19. Επιπλέον, στον πίνακα αναφέρεται η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των τριών καυσίμων, η οποία είναι αρκετά υψηλή και συγκρίσιμη με αυτή των γαιανθράκων χαμηλής τάξης.

Πίνακας 4.2 : Στοιχειακή ανάλυση επί ξηρού και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων.

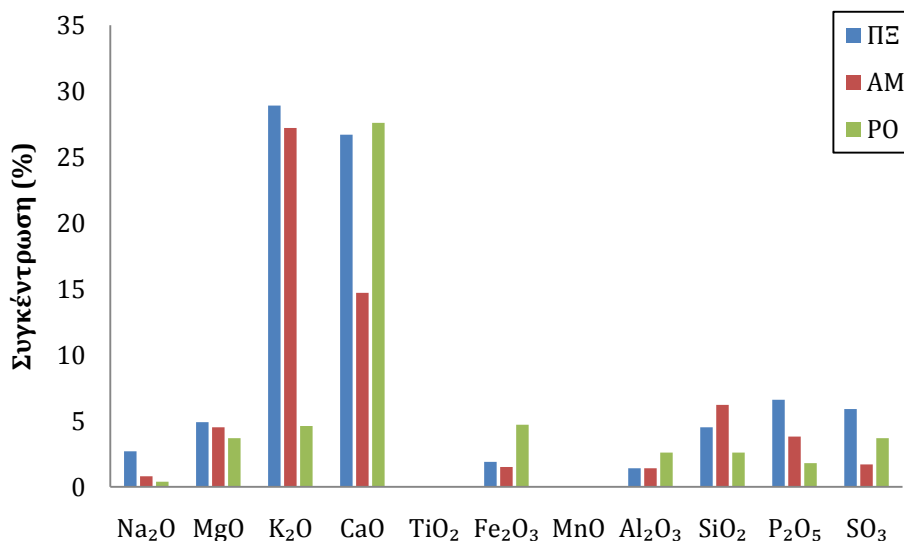
Δείγμα	C(%)	O(%)	N(%)	H(%)	S(%)	Θερμογόνος Δύναμη (MJ/kg)
PO	47.96	41.75	-	5.91	-	19.80
ΠΞ	49.54	35.94	0.92	6.27	-	22.05
AM	46.50	40.06	2.22	5.67	-	18.57

4.1.3 Χημική ανάλυση τέφρας

Στο Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται η χημική ανάλυση των τεφρών σε κύρια οξείδια που παρήχθησαν από τη καύση των αρχικών δειγμάτων (πυρήνα ελιάς, πυρήνα ροδάκινου και φλοιό αμυγδάλου) σε θερμοκρασία 550 °C.

Πίνακας 4.3 : Χημική ανάλυση τέφρας (οξείδια %).

	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
ΠΞ	2.7	4.9	28.9	26.7	0.02	1.9	0.03	1.4	4.5	6.6	5.9
AM	0.8	4.5	27.2	14.7	0.02	1.5	0.03	1.4	6.2	3.8	1.7
PO	0.4	3.7	4.6	27.6	0.03	4.7	0.04	2.6	2.6	1.8	3.7



Σχήμα 4.1: Κύρια οξείδια στις τέφρες των αρχικών δειγμάτων από τη καύση στους 550 °C.

Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 4.1, οι τέφρες των αρχικών δειγμάτων πυρήνα ελιάς και φλοιού αμυγδάλου περιέχουν περισσότερα οξείδια του καλίου σε σχέση με τον πυρήνα ροδάκινου. Ενώ, οι τέφρες των αρχικών δειγμάτων πυρήνα ελιάς και ροδάκινου περιέχουν περισσότερα οξείδια του ασβεστίου συγκριτικά με το φλοιό αμυγδάλου. Τα οξείδια καλίου και του ασβεστίου συνδέονται άμεσα με τους δείκτες επικαθίσεων $R_{b/A}$, $R_{b/A+P}$ και AI , οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Επίσης, τα δείγματα περιέχουν σχετικά μικρή συγκέντρωση οξειδίων του αργιλίου και του σιδήρου, πράγμα που σημαίνει ότι τα ανόργανα αυτά στοιχεία εμπεριέχονταν στην αρχική χημική δομή των δειγμάτων και δεν προέρχονται από υλικά του εδάφους που έχουν προσχωρήσουν στα δείγματα. Τέλος, τα δείγματα περιέχουν σημαντική ποσότητα οξειδίου του μαγνησίου, καθώς είναι χαρακτηριστικό της ξυλώδους βιομάζας, αφού το μαγνήσιο αποτελεί βασικό συστατικό της χλωροφύλλης.

Πίνακας 4.4: Δείκτες επικαθίσεων.

	$R_{b/A}$	$R_{b/A+P}$	AI	Τάση Επικάθισης
ΠΕ	11.00	12.11	1.17	βέβαιη
ΑΜ	6.39	6.89	0.56	βέβαιη
ΡΟ	7.84	8.18	0.15	χαμηλή τάση

Οι δείκτες επικαθίσεων χρησιμοποιούνται σε αρχικό στάδιο για την αποτίμηση της τάσης ενός καυσίμου να δημιουργεί επικαθίσεις. Αρχικά, ο λόγος βασικών/όξινων οξειδίων $R_{b/A}$ αλλά και ο λόγος $R_{b/A+P}$ που διαθέτει την προσθήκη ευτηκτικού P_2O_5 , χρησιμοποιούνται ευρέως. Ωστόσο, λόγω απουσίας βιβλιογραφικών δεδομένων, συνιστάται η χρήση τους

συνδυαστικά με άλλους δείκτες για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη τάση επικαθίσεων. Για $R_{b/A+P} > 1$ και για $R_{b/A} > 2$ θεωρείται βέβαιη η τάση επικαθίσεων. Τέλος, ο πιο αξιόπιστος δείκτης επικαθίσεων για βιομάζα, πάντα σε προκαταρκτικά στάδια, είναι ο δείκτης αλκαλίων AI , ο οποίος είναι ο μοναδικός δείκτης που λαμβάνει υπόψη τη ποσότητα αλκαλίων ανά μονάδα θερμογόνου δύναμης στο καύσιμο και όχι μόνο την περιεκτικότητα αυτών στη τέφρα. Η τάση θεωρείται χαμηλή για $AI \leq 0.17$, πιθανή για $0.17 < AI \leq 0.34$ και βέβαιη για $AI > 0.34$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.4, ο πυρήνας ροδάκινου παρουσιάζει τη χαμηλότερη τάση επικαθίσης σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά.

4.2 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης – Σύγκριση Καυσίμων για Σταθερή Τροφοδοσία

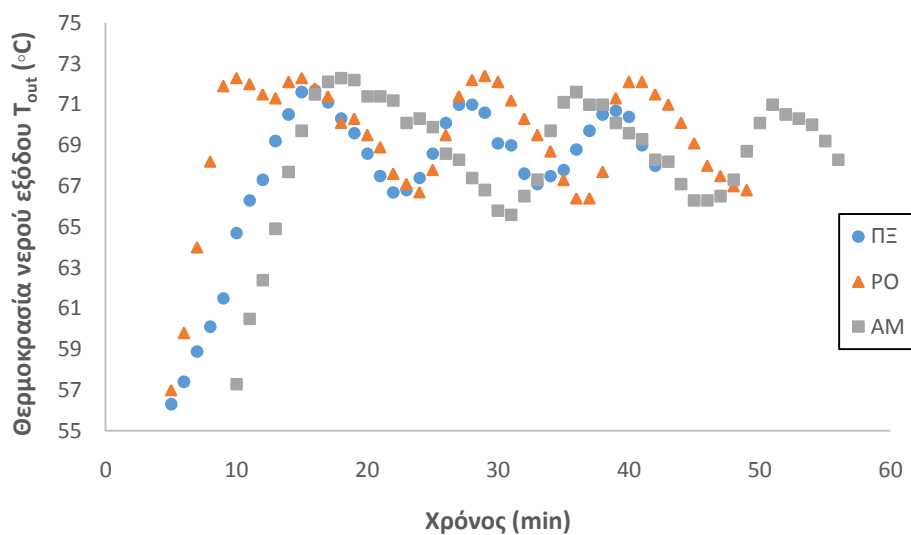
Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης όπως η θερμοκρασία των καυσαερίων T_f , η περίσσεια αέρα λ , οι εκπομπές αέριων ρύπων, η απόδοση καύσης η_c και η_i , οι απώλειες θερμότητας και η διαφορά θερμοκρασίας νερού εισόδου-εξόδου για σταθερή αναρρόφηση αέρα. Οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν αφορούν τις τροφοδοσίες 13.5, 18.0, 15.3 kg/h για πυρήνα ελιάς, πυρήνα ροδάκινου και φλοιό αμυγδάλου αντίστοιχα και αναγράφεται η μέση τιμή τους μόνο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κοχλίου τροφοδοσίας καυσίμου. Αυτές προέκυψαν από μία σειρά πειραμάτων βαθμονόμησης του καυστήρα και επιλέχθηκαν ως βέλτιστες. Όλα τα αποτελέσματα της Ενότητας 4.2 αναφέρονται στις παραπάνω τροφοδοσίες.

Πίνακας 4.5 : Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης για τις τροφοδοσίες 13.5, 18, 15.3 kg/h για πυρήνα ελιάς, πυρήνα ροδάκινου και φλοιό αμυγδάλου, αντίστοιχα.

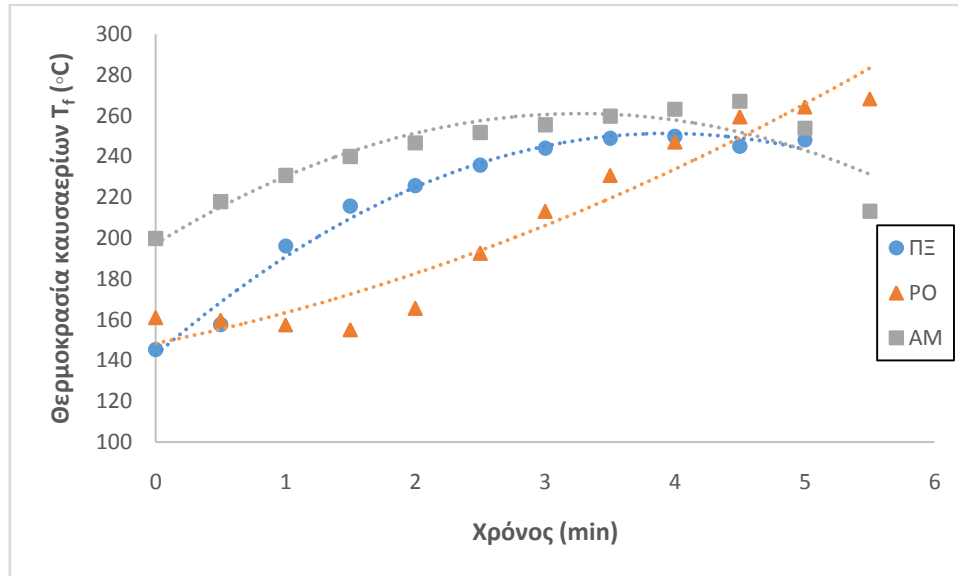
Δείγμα	T_f (°C)	λ	CO(ppm _v)	SO ₂ (ppm _v)	NO _x (ppm _v)	SL (%)	IL (%)	η_c (%)	ΔT (°C)	η_i (%)
ΠΕ	241.06	1.88	1224.7	3	136.1	14.74	0.76	84.5	23.1	86.3
ΡΟ	245.23	1.49	1014.5	9.2	81.9	13.52	0.68	85.8	26.17	93.4
ΑΜ	267.61	1.82	1194.4	10.6	81.7	15.1	0.7	84.2	21.43	90.5

4.2.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοκρασίας νερού εξόδου και θερμοκρασίας καυσαερίων σε συνάρτηση με το χρόνο για τα τρία βιοκαύσιμα, στα Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.3, αντίστοιχα. Η σύγκριση των τριών δειγμάτων βιομάζας γίνεται για ίδιο ρυθμό τροφοδοσίας καυσίμου (10/30 ON/OFF) στον καυστήρα. Από το Σχήμα 4.2 παρατηρείται ότι οι πυρήνες ροδάκινου προσέφεραν τη θερμική τους ενέργεια στο νερό ταχύτερα σε σύγκριση με τα άλλα δύο καύσιμα, ανεβάζοντας την θερμοκρασία στους 75 °C 4 λεπτά νωρίτερα. Η θερμοκρασία των καυσαερίων εξαρτάται από το είδος του καυσίμου. Ο φλοιός αμυγδάλου είχε της υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, το οποίο συνεπάγεται και περισσότερες απώλειες θερμότητας από τον κλίβανο.



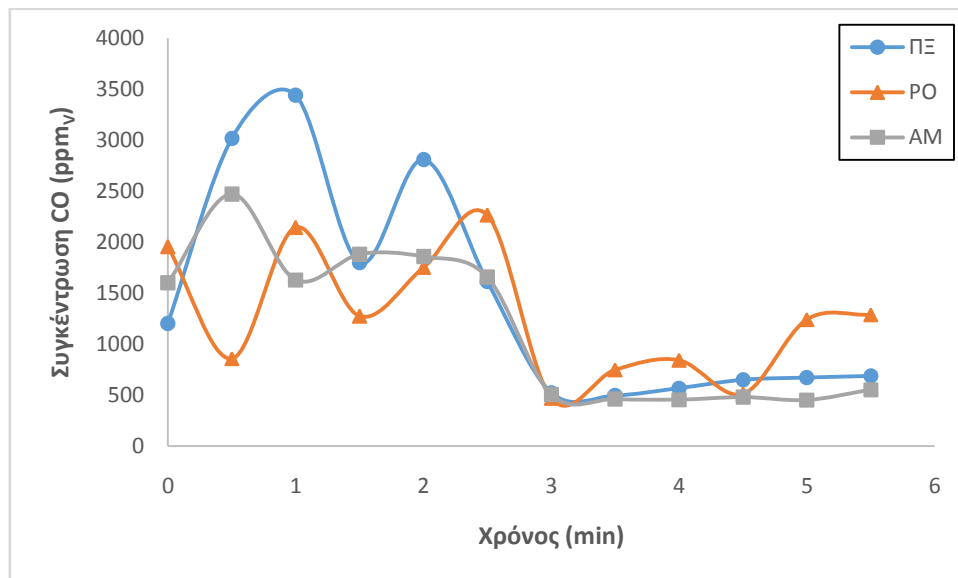
Σχήμα 4.2 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.



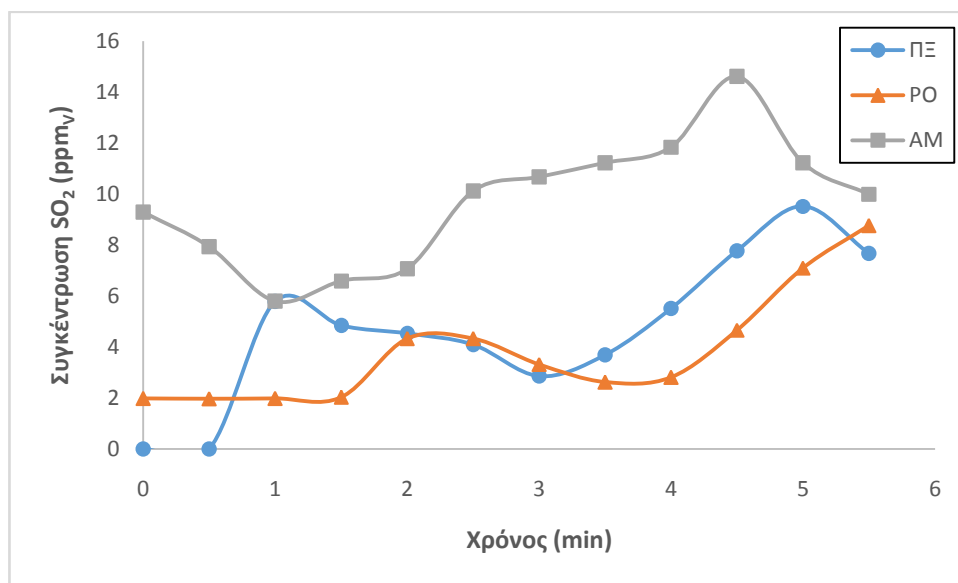
Σχήμα 4.3 : Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.

4.2.2 Εκπομπές αερίων ρύπων

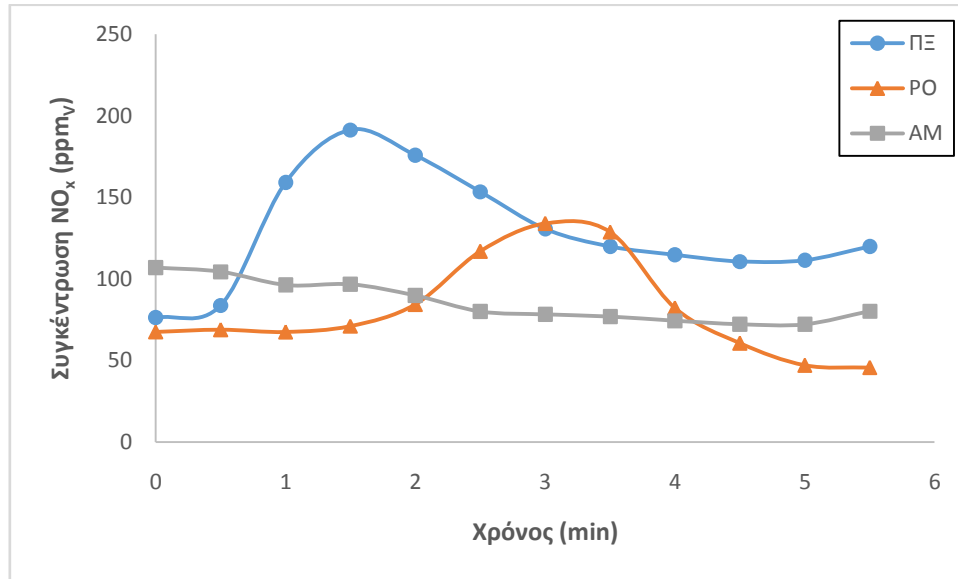
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η συγκέντρωση των αερίων εκπομπών σε συνάρτηση με το χρόνο, στον τρίτο κύκλο πλήρους λειτουργίας του λέβητα, ώστε στο σύστημα να έχουν επέλθει σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Στα Σχήματα 4.4, 4.5, 4.6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου, αντίστοιχα. Οι εκπομπές αερίων ρύπων που μετρήθηκαν από τον αναλυτή δεν αντιστοιχούν σε ποσοστό οξυγόνου 10%. Έτσι πραγματοποιήθηκε αναγωγή τους σε 10% οξυγόνο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα επιτρεπόμενα όρια βάσει νομοθεσίας. Τα όρια τα οποία έχουν τεθεί σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για μικρές μονάδες παραγωγής θερμότητας για τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα είναι 2400-4000 ppm_v και για οξείδια του αζώτου 200-350mg/Nm³ αντίστοιχα [82]. Σύμφωνα με τα διαγράμματα, παρατηρείται ότι ο πυρήνας ροδάκινου παρουσιάζει τις χαμηλότερες εκπομπές ρύπων κατα μέσο όρο συγκριτικά με τα άλλα δύο βιοκαύσιμα και κανένα από τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν δεν ξεπερνά τα όρια του μονοξειδίου του άνθρακα τα οποία έχουν τεθεί από την νομοθεσία. Τέλος, υπάρχουν ελάχιστες τιμές εκπομπών οξειδίων του αζώτου που ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια για το πυρήνα της ελιάς σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας. Ωστόσο, υπολογίζοντας τον μέσο όρο των εκπομπών αυτών, παρατηρείται ότι βρίσκονται εντός ορίων.



Σχήμα 4.4 : Συγκέντρωση CO συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.

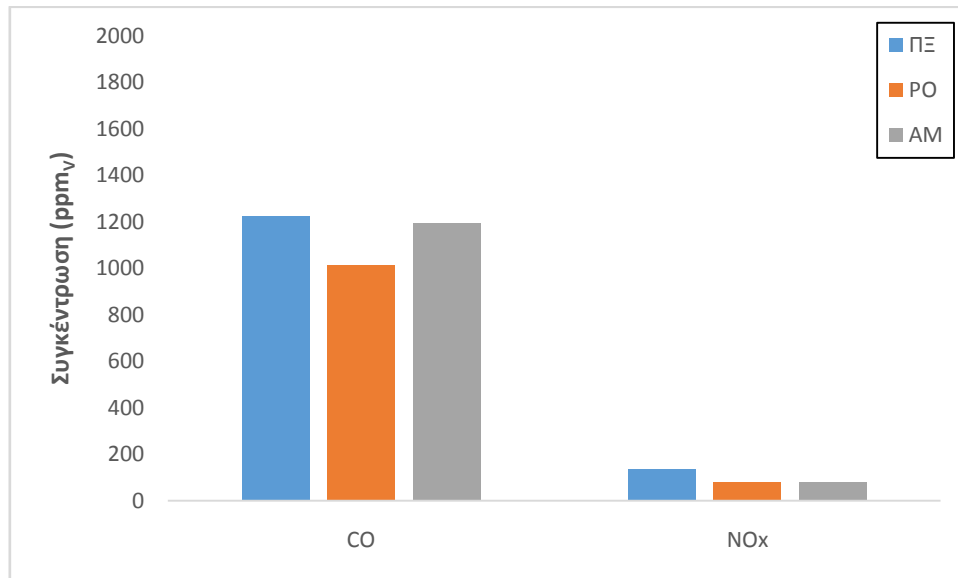


Σχήμα 4.5 : Συγκέντρωση SO₂ συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.

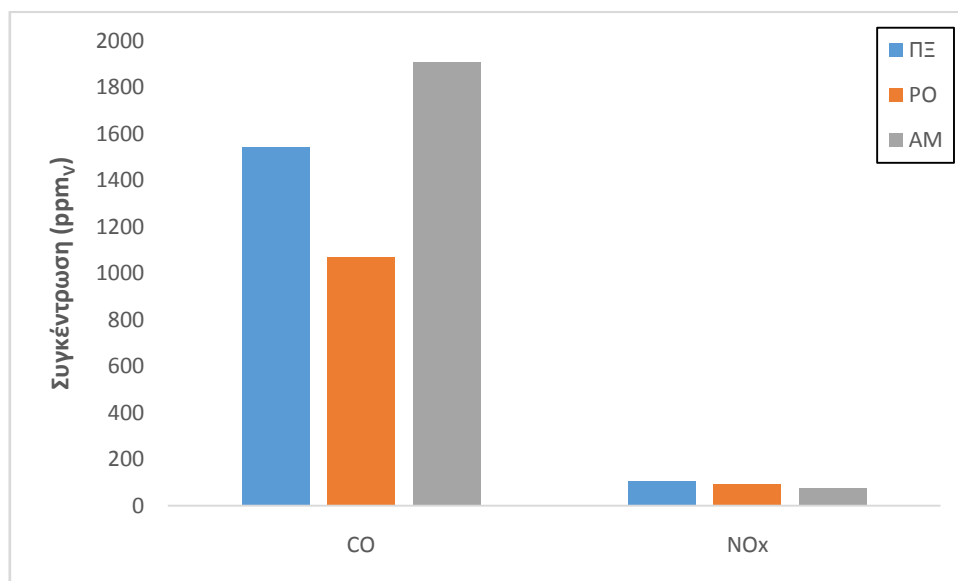


Σχήμα 4.6 : Συγκέντρωση NO_x συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζονται οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων για τα τρία βιοκαύσιμα κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του λέβητα (λειτουργία κοχλία τροφοδοσίας καυσίμου). Ακόμα, στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων για τα τρία βιοκαύσιμα καθόλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας για θερμοκρασία νερού εξόδου μεγαλύτερη από 45 °C. Παρατηρείται ότι, για όλα τα βιοκαύσιμα που μελετήθηκαν, οι τιμές των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Όσον αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων επίσης, καθώς δεν ξεπερνάται το όριο των 200-350 mg/Nm³[82]. Επιπρόσθετα, ο πυρήνας ροδάκινου σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά βιομάζας αποφέρει τις χαμηλότερες εκπομπές αέριων ρύπων και στις δύο περιπτώσεις. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου είναι αμελήτες, οπότε δεν απεικονίζονται στα διαγράμματα παρακάτω. Τέλος, συγκρίνοντας τις εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας και καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα παρατηρήθηκε ότι, στη δεύτερη περίπτωση οι εκπομπές CO αυξήθηκαν αρκετά, αλλά ταυτόχρονα παρέμειναν εντός των επιτρεπόμενων ορίων.



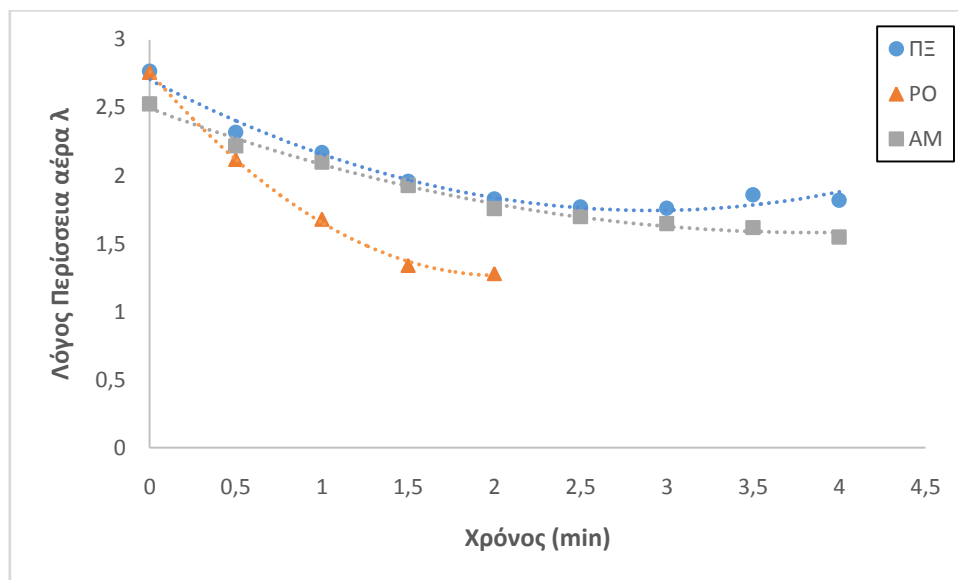
Σχήμα 4.7 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.



Σχήμα 4.8 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα τρία καύσιμα.

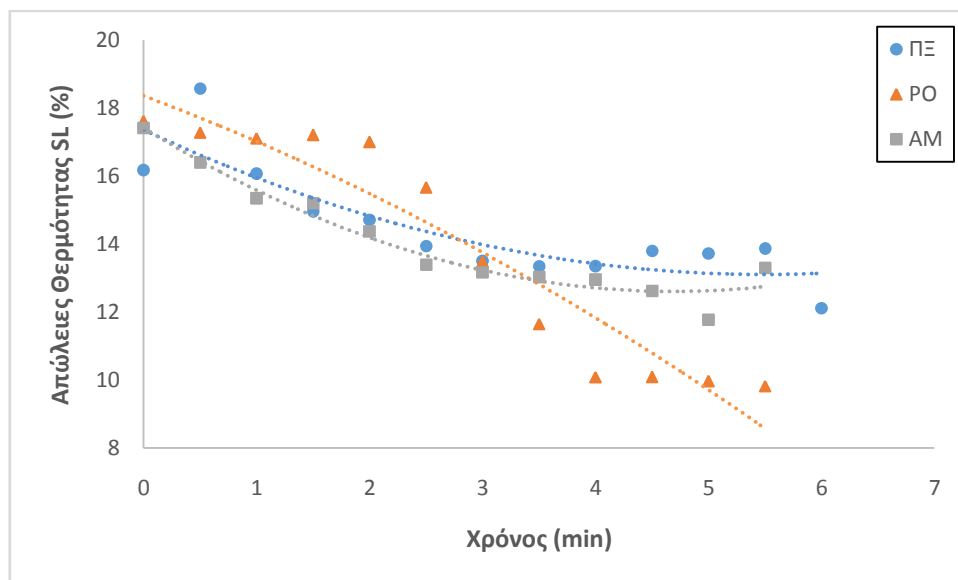
Τέλος, στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται ο λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει του χρόνου, μόνο για το τρίτο κύκλο πλήρους λειτουργίας του καυστήρα, δηλαδή όταν υπάρχουν σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Παρατηρείται για τον πυρήνα ροδάκινου ότι, ενώ στην αρχή ο συντελεστής λ λαμβάνει μεγάλες τιμές, στην συνέχεια με την πάροδο του χρόνου λαμβάνει τιμές $\lambda=1.3$ που πλησιάζουν πολύ τις ιδανικές τιμές που κυμαίνονται από 1.2 έως 2. Ωστόσο

και τα άλλα δύο καύσιμα λαμβάνουν εξίσου κάλεις τιμές για τον συντελεστή λ , καθώς με την πάροδο του χρόνου οι τιμές τους είναι από 2 και κάτω.



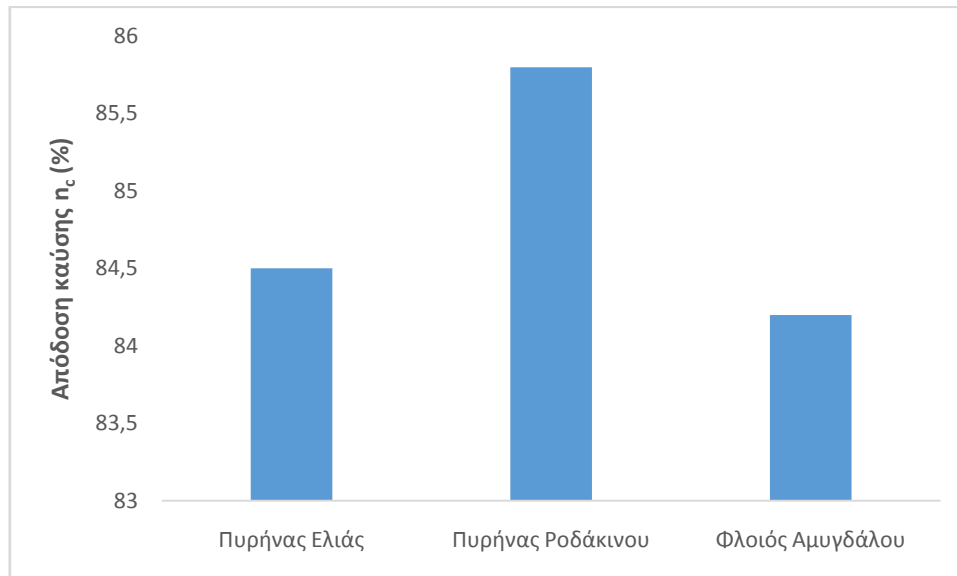
Σχήμα 4.9 : Λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα, για τα τρία καύσιμα.

4.2.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης



Σχήμα 4.10 : Απώλειες θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα, για τα τρία καύσιμα.

Πολυτεχνείο Κρήτης -Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων



Σχήμα 4.11 : Απόδοση καύσης (μέση τιμή) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα, για τα τρία καύσιμα.

Ακόμη, στα Σχήματα 4.10 και 4.11 που παρατίθενται παραπάνω, φαίνονται οι απώλειες θερμότητας SL και η απόδοση καύσης η_c σε συνάρτηση με το χρόνο, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, για τον πυρήνα ροδάκινου οι απώλειες θερμότητας ήταν χαμηλότερες, καθιστώντας τον ως το καύσιμο με την καλύτερη απόδοση καύσης 85.8%. Ωστόσο, και τα άλλα δύο καύσιμα, ο πυρήνας ελιάς και ο φλοιός αμυγδάλου εμφανίζουν αποδόσεις καύσης μεγαλύτερες από 84%. Ο πυρήνας ροδάκινου παρουσιάζει τον μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης με 93.4% και αυτό οφείλεται, στην υψηλή θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, καθώς και στη μικρότερη ποσότητα υλικού που απαιτήθηκε για καύση κατά την πειραματική διαδικασία, ώστε να φθάσει το νερό του λέβητα στην επιθυμητή θερμοκρασία. Ακολουθούν ο φλοιός αμυγδάλου και ο πυρήνας ελιάς με 90.5% και 86.3% αντίστοιχα.

4.3 Χαρακτηριστικές Παράμετροι Καύσης των Μιγμάτων για Σταθερή Τροφοδοσία

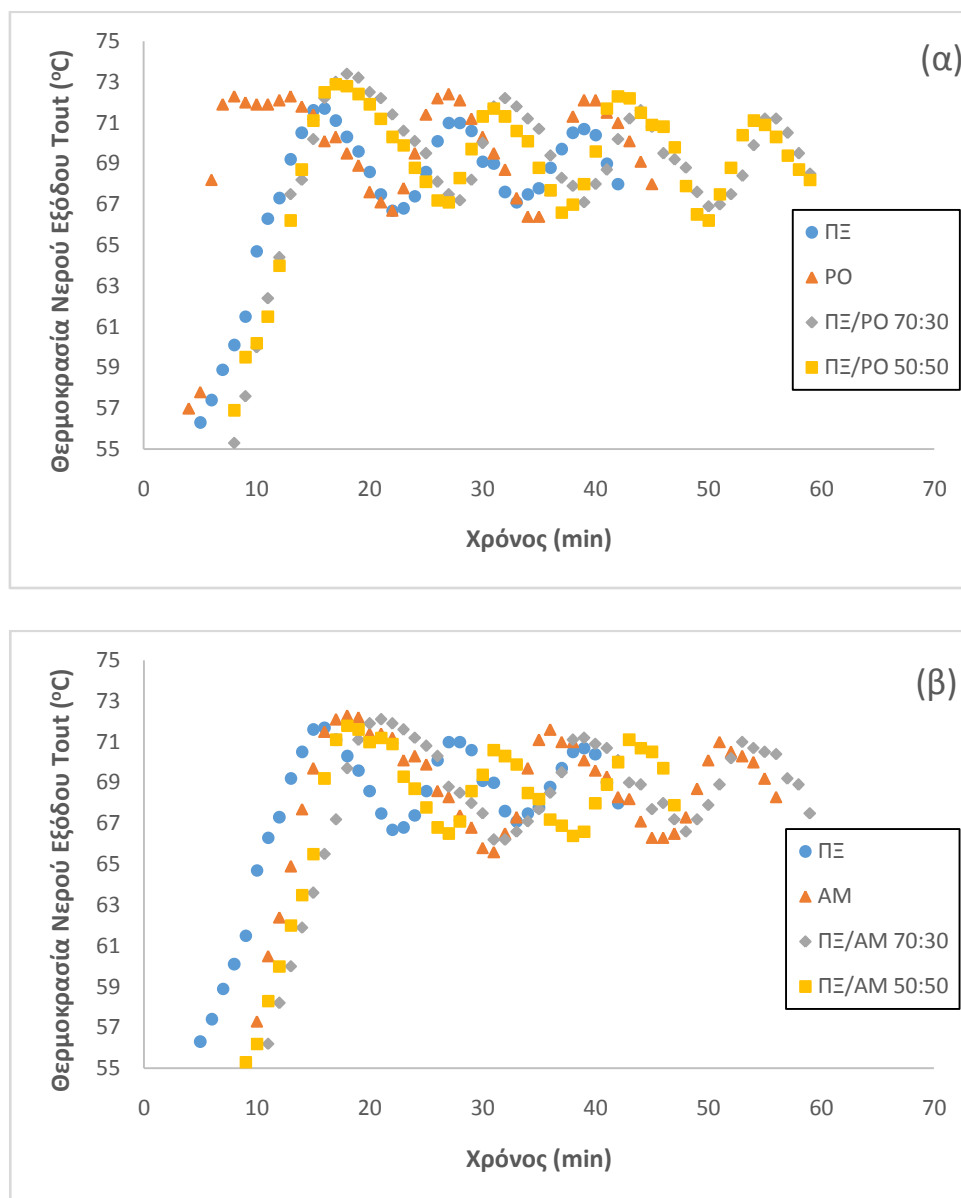
Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης για τα μίγματα πυρήνα ελιάς με πυρήνα ροδάκινου και πυρήνα ελιάς με φλοιό αμυγδάλου, που χρησιμοποιήθηκαν σε δύο αναλογίες. Οι δύο αναλογίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 50-50% και 70-30%, αντίστοιχα και οι παράμετροι που αναφέρονται παρακάτω αφορούν τη βέλτιστη τροφοδοσία και αναγράφεται η μέση τιμή τους μόνο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κοχλίου τροφοδοσίας καυσίμου.

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσηςμειγμάτωντων καυσίμων για βέλτιστη τροφοδοσία.

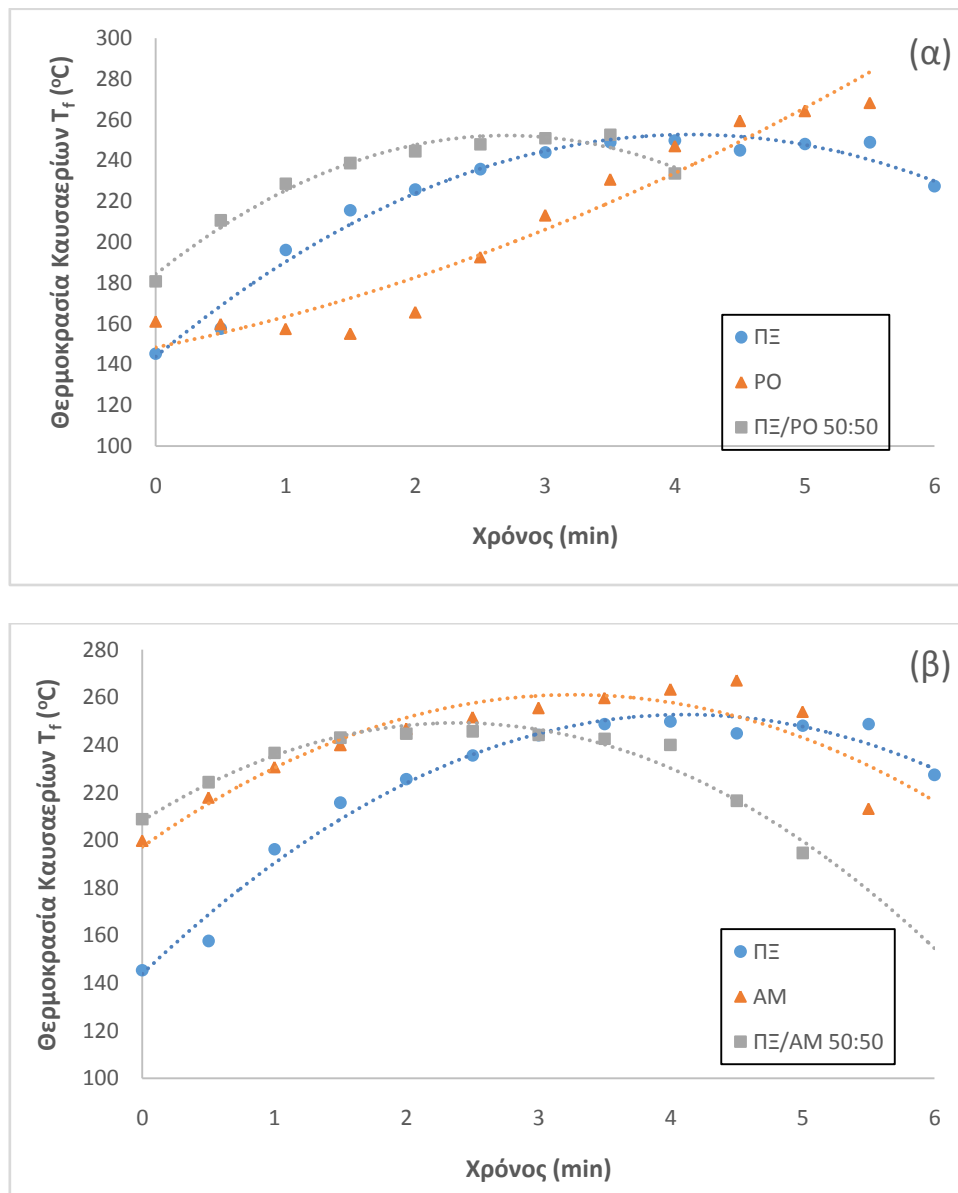
Δείγμα	$\dot{m}$ (kg/h)	T_f (°C)	λ	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	SL (%)	IL (%)	n_c (%)	ΔT (°C)	n_l (%)
ΠΞ/ΡΟ 70:30	14.85	240.63	1.59	1143.8	3.6	96.5	13.5	1	85.5	20	88.8
ΠΞ/ΡΟ 50:50	15.75	238.67	1.66	1121.3	8	86.6	13.5	0.9	85.6	21.08	91.4
ΠΞ/ΑΜ 70:30	14.04	255.10	1.85	1210.8	12.5	129	14.3	1.2	84.5	22.1	87.7
ΠΞ/ΑΜ 50:50	14.40	253.76	2	1199.3	19.6	113.1	14.7	1.1	84.2	21.15	87.2

4.3.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων

Στα Σχήματα 4.12 (α) και (β) παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας του νερού εξόδου συναρτήσει του χρόνου, για τα αρχικά δείγματα και τα μίγματα. Παρατηρείται στο Σχήμα 4.12 (α) ότι, τα μίγματα πυρήνα ελιάς με πυρήνα ροδάκινου και στις δύο αναλογίες παρέχουν τη θερμική τους ενέργεια στο νερό βραδύτερα, σε σύγκριση με τα αρχικά δείγματα καυσίμων, αφού η θερμοκρασία εξόδου του νερούφτάνει τους 70°C σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Όμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο Σχήμα 4.12 (β), όπου τα μίγματα πυρήνα ελιάς με φλοιό αμυγδάλου και στις δύο αναλογίες θερμαίνουν το νερό εξόδου πιο αργά, όχι όμως με τόση μεγάλη χρονική διαφορά.



Σχήμα 4.12 : Θερμοκρασία νερού εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

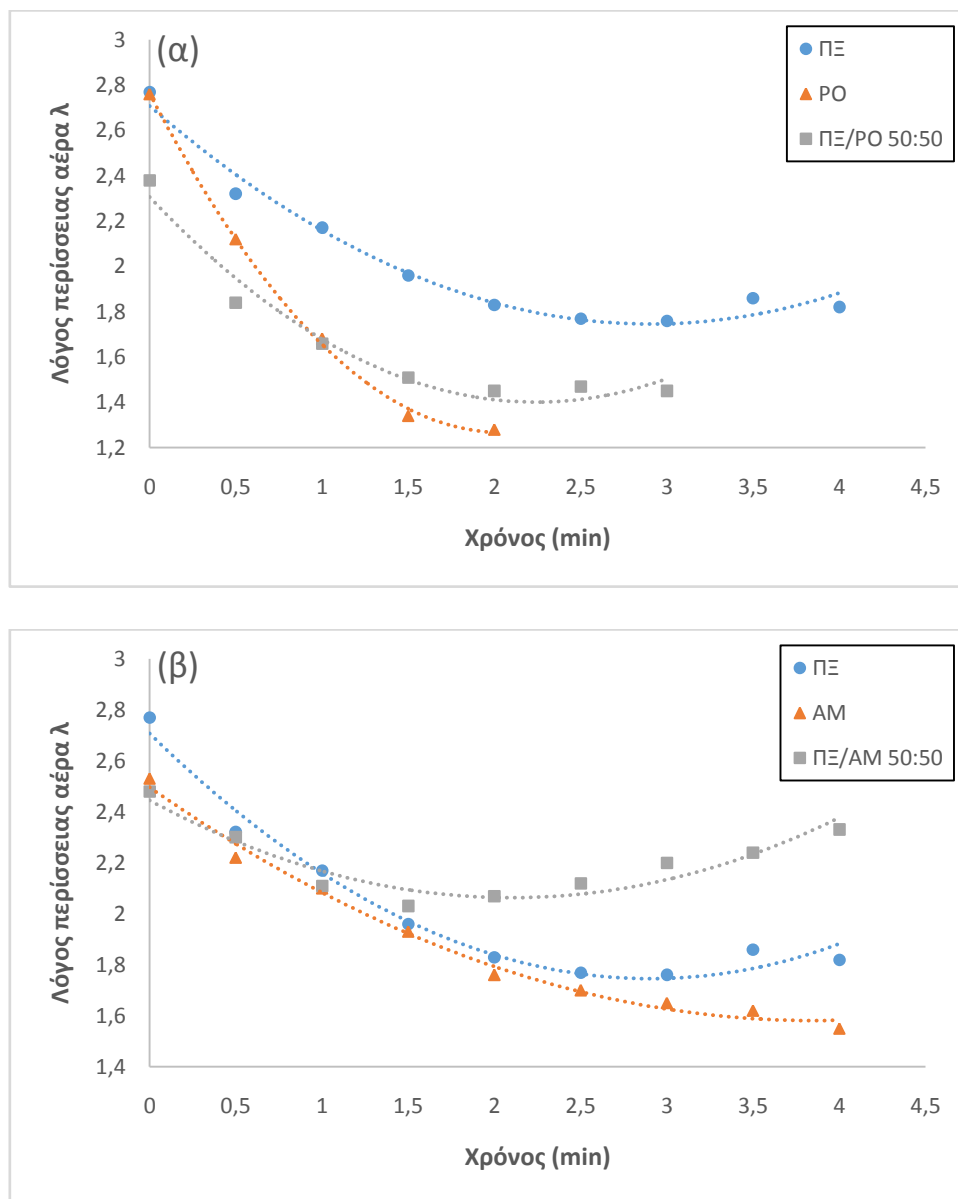


Σχήμα 4.13: Θερμοκρασία καυσαερίων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

Στα παραπάνω Σχήματα 4.13 (α) και (β) παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των καυσαερίων σε συνάρτηση με το χρόνο για τα αρχικά υλικά και τα μίγματα μεταξύ τους. Όπως παρατηρείται, το μίγμα πυρήνα ελιάς με πυρήνα ροδάκινου και το μίγμα πυρήνα ελιάς με φλοιό αμυγδάλου παρουσιάζουν κοντινές θερμοκρασίες καυσαερίων συγκριτικά με τα αρχικά δείγματα, με το μίγμα πυρήνα ελιάς με πυρήνα ροδάκινου να φτάνει σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες κατά μέσο όρο.

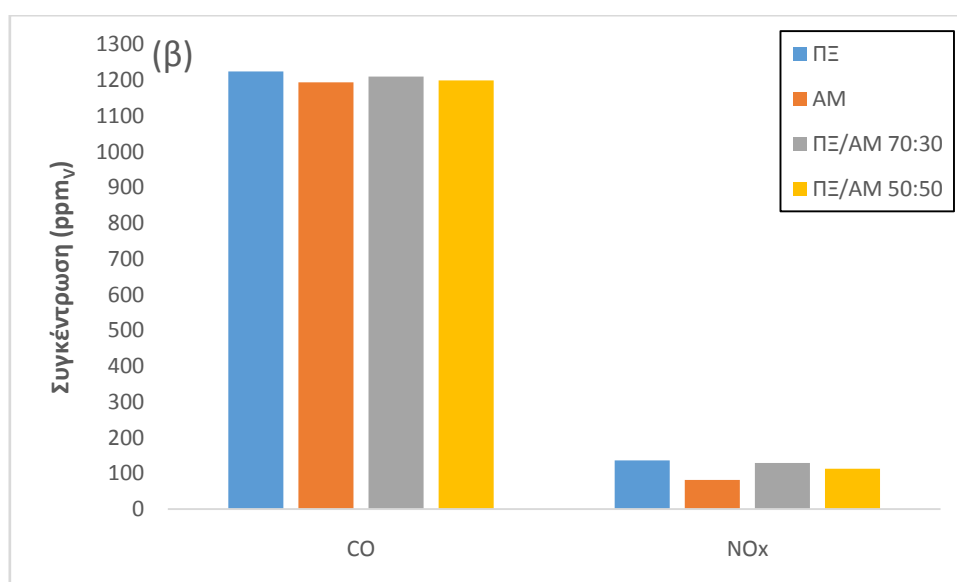
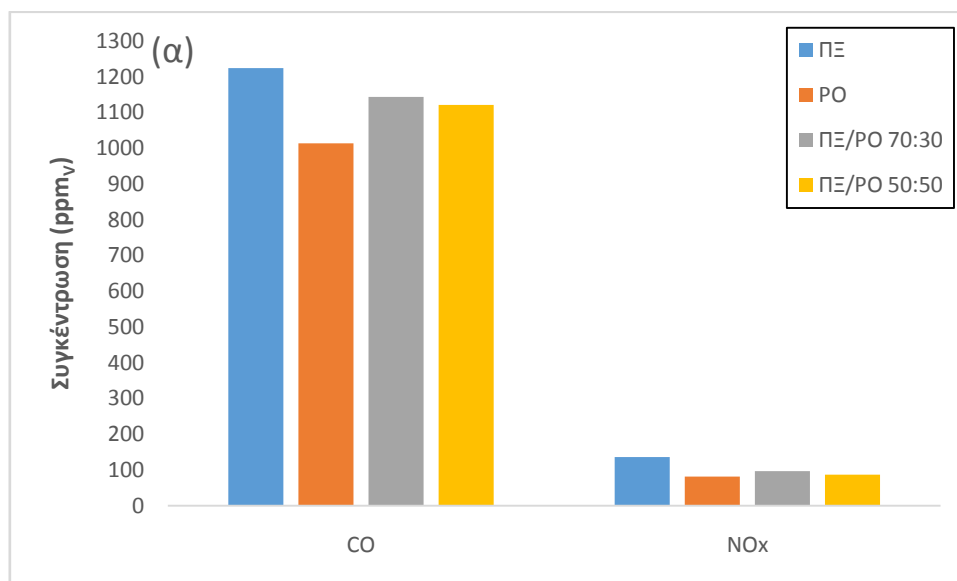
4.3.2 Εκπομπές αερίων ρύπων

Στα παρακάτω διάγράμματα παρατίθεται ο συντελεστής περίσσειας λ συναρτήσει του χρόνου για τα αρχικά καύσιμα και τα μίγματα τους. Όπως φαίνεται, το μίγμα πυρήνα ροδάκινου με πυρήνα ελιάς παρουσιάζει χαμηλό συντελεστή περίσσειας αέρα λ και αναμενόμενες τιμές με βάση τα αρχικά δείγματα, ενώ το μίγμα πυρήνα ελιάς με φλοιό αμυγδάλου εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή λ κατά μέσο όρο.



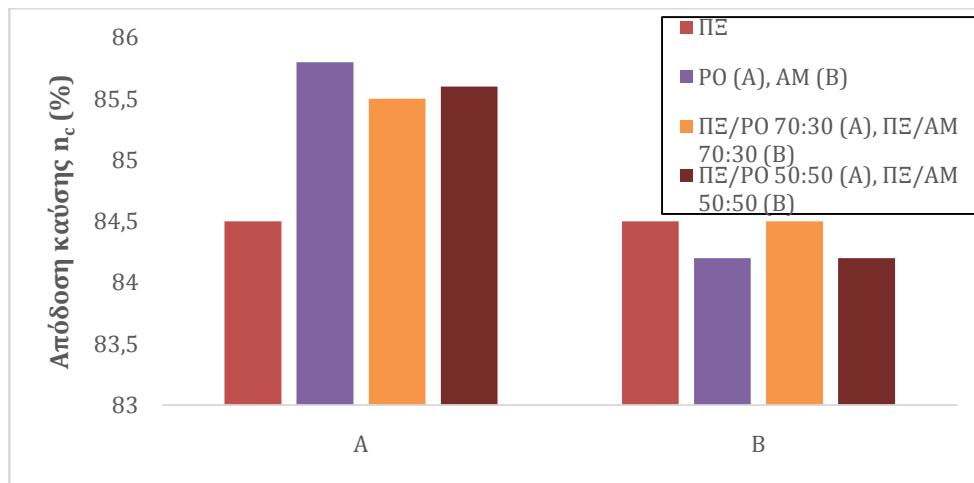
Σχήμα 4.14 : Λόγος περίσσειας αέρα λ σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

Στα Σχήματα 4.15 (α) και (β) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εκπομπές αερίων ρύπων για το αρχικό δείγμα πυρήνα ελιάς, το αρχικό δείγμα πυρήνα ροδάκινου, τα μίγματα τους στις δύο αναλογίες, καθώς επίσης και για τα αρχικά δείγματα πυρήνα ελιάς, φλοιό αμυγδάλου και τα μίγματά τους, αντίστοιχα. Στα σχήματα που ακολουθούν λόγω των σχεδόν μηδενικών τιμών συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου, δεν γίνεται γραφική απεικόνιση τους. Παρατηρείται από το Σχήμα 4.15 (α) ότι, το μίγμα πυρήνα ελιάς και πυρήνα ροδάκινου στις δύο αναλογίες παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές εκπομπών αερίων ρύπων για μονοξείδιο του άνθρακα και οξείδια του αζώτου σε σχέση με τα αρχικά δείγματα. Όμοια, στο Σχήμα 4.15 (β) παρατηρείται ότι, το μίγμα πυρήνα ελιάς με φλοιό αμυγδάλου στις δύο αναλογίες, αντίστοιχα, παρουσιάζει τιμές εκπομπών αερίων ρύπων που κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές των αρχικών δειγμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις, οι τιμές των εκπομπών αερίων ρύπων (CO , NO_x) για τα μίγματα δε ξεπερνούν τα όρια σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα [82]. Ωστόσο, πρέπει να εξετασθεί ταυτόχρονα και η απόδοση καύσης για όλα τα παραπάνω καύσιμα, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η συνολική εικόνα και βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός.



Σχήμα 4.15 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

4.3.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης



Σχήμα 4.16 : Απόδοση καύσης (μέση τιμή) σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για τα μίγματα των καυσίμων.

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται ο μέσος όρος του βαθμού απόδοσης καύσης, κατά την διάρκεια της οποίας υπήρχε τροφοδοσία καυσίμου από τον ατέρμονα κοχλία και παροχή αέρα στον καυστήρα για όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμα, είτε αυτούσια, είτε ως μίγματα στις δύο αναλογίες. Όπως παρατηρείται, την μεγαλύτερη απόδοση καύσης παρέχει ο πυρήνας ροδάκινου με 85.8%. Ακολουθεί με την δεύτερη μεγαλύτερη απόδοση με μέσο όρο 85.5 % το μίγμα πυρήνα ελιάς 50% με πυρήνα ροδάκινου 50%. Αντίστοιχα, το ίδιο ισχύει και για τα μίγματα φλοιού αμυγδάλου με πυρήνα ελιάς, καθώς παρατηρούνται ενδιάμεσες τιμές απόδοσης καύσης σε σχέση με τα αρχικά καύσιμα. Ο φλοιός αμυγδάλου χαρακτηρίζεται ως το πιο φτωχό καύσιμο συγκριτικά με τα άλλα δύο υλικά βιομάζας, καθώς η απόδοση καύσης κυμάνθηκε χαμηλότερα, εξαιτίας των περισσότερων απωλειών καύσης. Οσον αφορά το θερμικό βαθμό απόδοσης, το μίγμα πυρήνα ελιάς 50% με πυρήνα ροδάκινου 50% παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή με 91.41%. Ακολουθούν τα μίγματα πυρήνα ελιάς 70% και πυρήνα ροδάκινου 30%, ενώ τα μίγματα πυρήνα ελιάς με φλοιό αμυγδάλου είχαν παρόμοιες τιμές, λίγο μικρότερες. Τα μίγματα που μελετήθηκαν, εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές βαθμού απόδοσης καύσης σε σχέση με τα αρχικά δείγματα, όπως ήταν αναμενόμενο.

4.4 Επίδραση του Ρυθμού της Τροφοδοσίας του Καυσίμου στις Χαρακτηριστικές Παράμετρους Καύσης

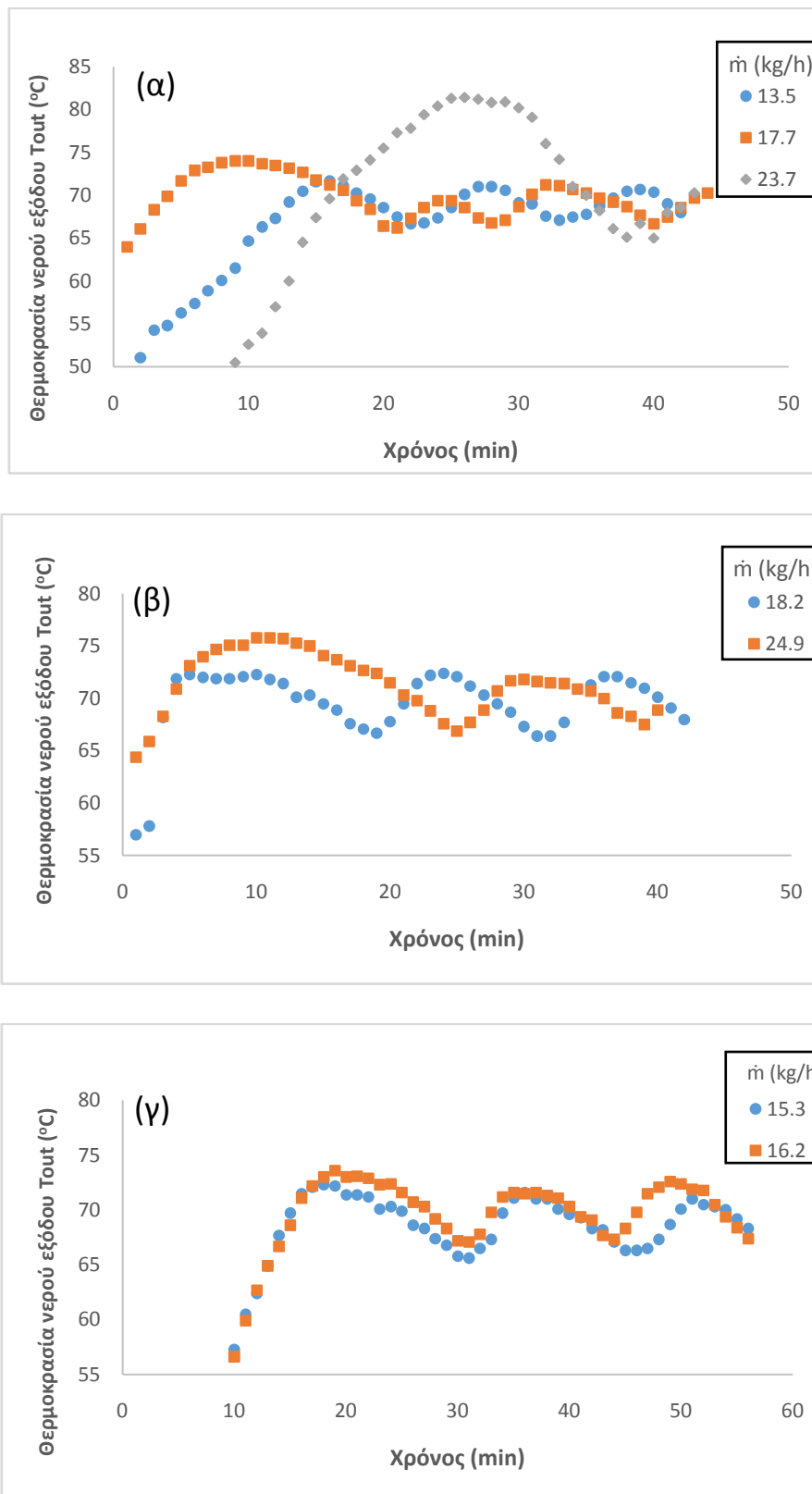
Στο Πίνακα 4.7 παρατίθενται οι βασικές παράμετροι καύσης των δειγμάτων για δύο ρυθμούς τροφοδοσίας, σε σταθερή αναρρόφηση αέρα της τάξης $501.87 \text{ m}^3/\text{h}$ για να μελετηθεί η επίδραση της αύξησης του ρυθμού ροής μάζας στις παραμέτρους καύσης και κυρίως στις εκπομπές αερίων ρύπων και στον βαθμό απόδοσης καύσης.

Πίνακας 4.7: Χαρακτηριστικές παράμετροι καύσης συναρτήσει της τροφοδοσίας των τριών καυσιμών.

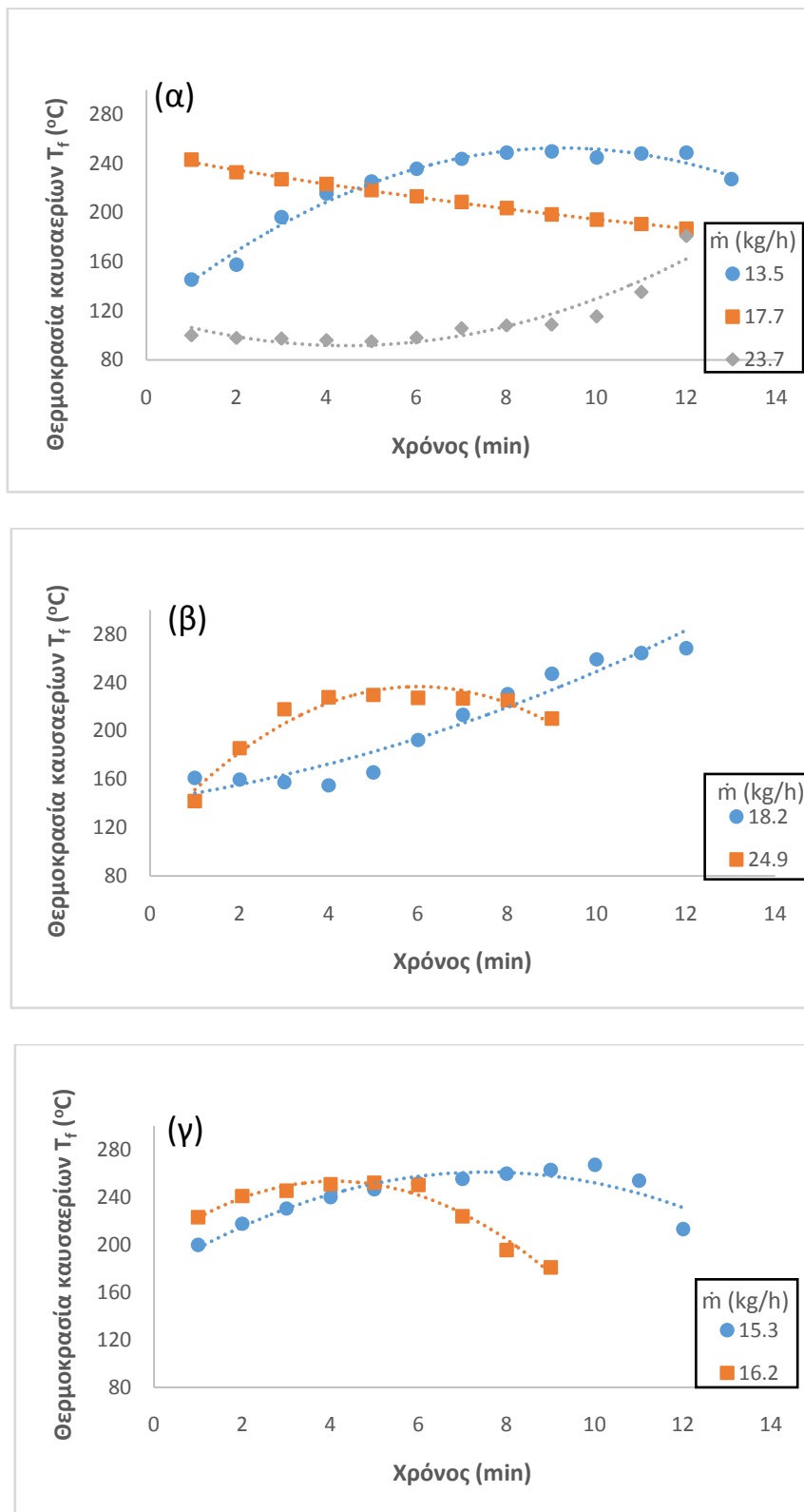
Δείγμα	$\dot{m}$ (kg/h)	T_f (°C)	λ	CO(ppm _v)	SO ₂ (ppm _v)	NO _x (ppm _v)	SL (%)	IL (%)	η_c (%)	ΔT (°C)	η_t (%)
ΠΞ	13.6	241.06	1.88	1224.7	3	136.1	14.6	0.9	84.5	23.1	86.3
	17.6	189.02	1.75	1671.8	14.5	114.9	16.6	1.7	81.7	22.97	87.1
	23.7	140.13	1.66	2055.4	20	135.3	16.7	1.8	81.5	23.55	76.1
ΡΟ	18.2	245.23	1.49	1014.5	9.2	81.9	13.4	0.8	85.8	26.17	93.4
	25.1	214.73	1.27	1450.5	3	144.4	10.8	1.2	88	23.1	95.2
ΑΜ	15.3	267.61	1.82	1194.4	10.6	81.7	14.9	0.9	84.2	21.43	90.5
	16.2	217.59	1.24	865.1	16.8	72	9.4	0.8	89.8	22.13	97.1

4.4.1 Θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα και θερμοκρασία καυσαερίων

Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας, σε όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν, τόσο στη φάση εκκίνησης όσο και στη φάση όπου το σύστημα ήταν σε πλήρη λειτουργία, γίνονταν ταχύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού εξόδου κατά περίπου 5 λεπτά, όταν χρησιμοποιήθηκε υψηλότερη ποσότητα καυσίμου. Όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.17 (α), (β) και (γ), όταν η αύξηση της τροφοδοσίας ήταν της τάξης 4-7 kg/h, η παροχή θερμότητας στο νερό του λέβητα ήταν μεγαλύτερη, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του στην επιθυμητή τιμή σε βραχύτερο χρόνο. Επίσης, παρατηρείται στο Σχήμα 4.17 (α), ότι αυξάνοντας αρκετά την τροφοδοσία για το δείγμα πυρήνα ελιάς, της τάξεως των 10 kg/h, χρειάστηκε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ώστε να θερμανθεί το νερό εξόδου, λόγω του ότι δεν πραγματοποιείται πλήρης καύση από την συνεχομένη τροφοδοσία υλικού και δεν επαρκούσε ο αέρας καύσης, έτσι ώστε να καεί γρήγορα το υλικό.



Σχήμα 4.17 : Θερμοκρασία νερού εξόδου συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) πυρήνα ροδάκινου και (γ) φλοιό αμυγδάλου.

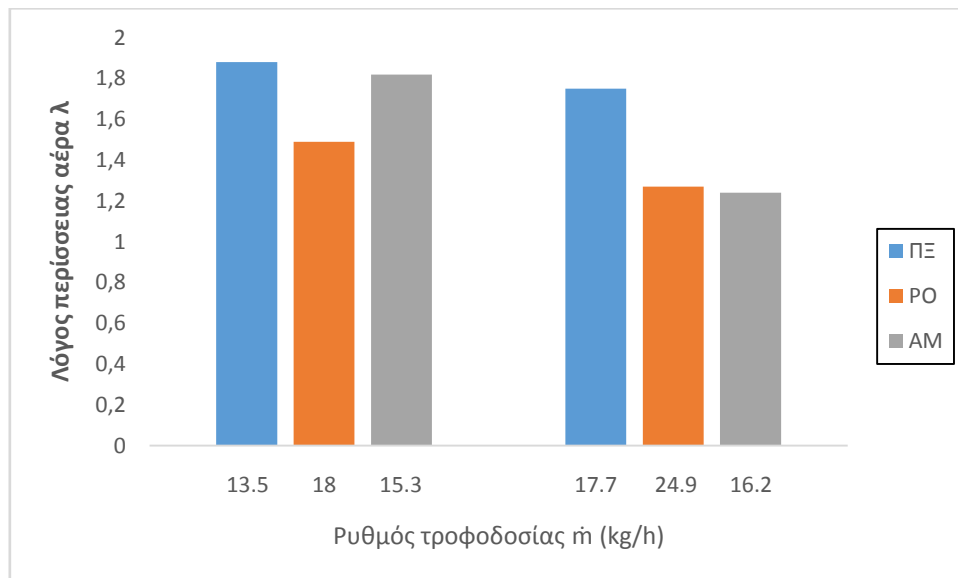


Σχήμα 4.18 : Θερμοκρασία καυσαερίων συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) πυρήνα ροδάκινου και (γ) φλοιό αμυγδάλου.

Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες καυσαερίων συναρτήσει του χρόνου για πυρήνα ελιάς, πυρήνα ροδάκινου και φλοιό αμυγδάλου σε διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας. Σύμφωνα και με το Πίνακα 4.7 παρατηρείται ότι, οι θερμοκρασίες καυσαερίων είναι χαμηλότερες κατά μέσο όρο όσο αυξάνεται η ποσότητα της βιομάζας που τροφοδοτείται στο λέβητα. Αυτό συμβαίνει για τον λόγο ότι μειώθηκε η θερμοκρασία μέσα στο λέβητα, όπως φαίνεται από τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (Σχήμα 4.20) και κατ' επέκταση η θερμοκρασία των καυσαερίων, αφού δεν πραγματοποιήθηκε τόσο καλή καύση όσο στις μικρότερες τροφοδοσίες καυσίμου.

4.4.2 Εκπομπές αερίων ρύπων

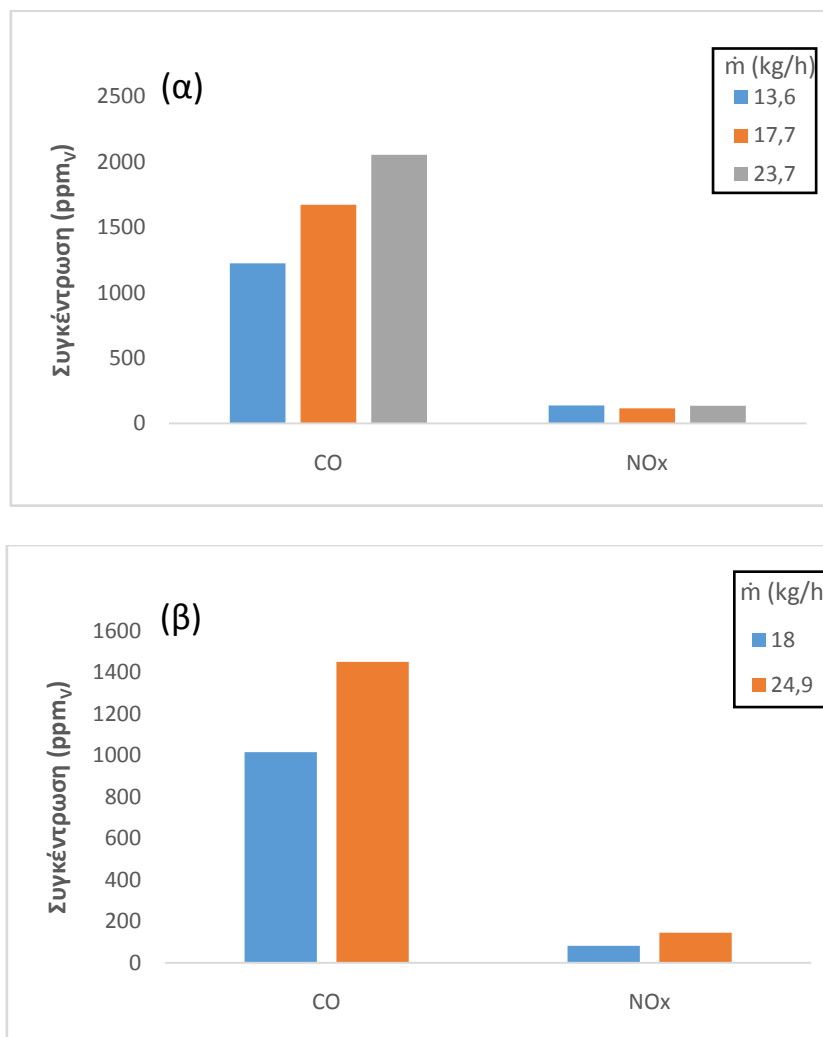
Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται ότι, ο μέσος συντελεστής λ μειώθηκε όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας βιομάζας αυξήθηκε. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας βιοκαυσίμου απαιτεί και μεγαλύτερη ποσότητα αέρα, ενώ κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν αυξήθηκε η παροχή αέρα με την αύξηση της τροφοδοσίας του καυσίμου.

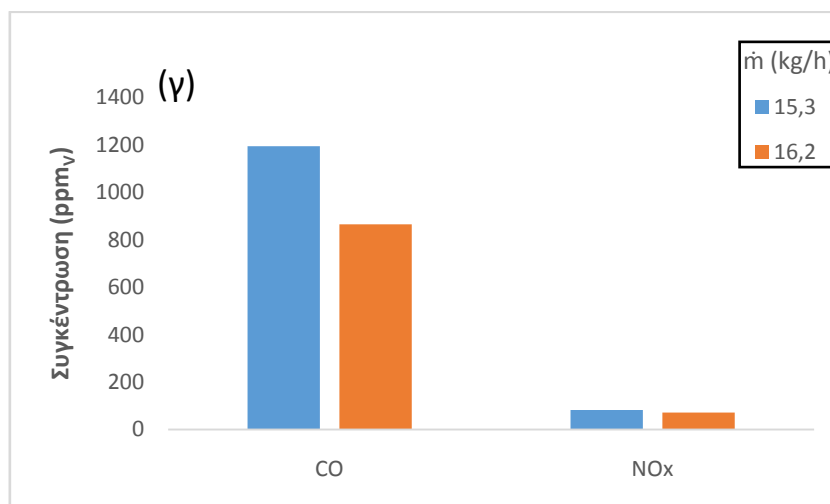


Σχήμα 4.19 : Λόγος περίσσειας αέρα λ συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα.

Στα Σχήματα 4.20 (α), (β) και (γ) απεικονίζεται η επίδραση της αύξησης του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στις εκπομπές αερίων ρύπων, για κάθε καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε. Όπως παρατηρείται, οι συγκεντρώσεις CO στον πυρήνα ελιάς και πυρήνα ροδάκινου αυξάνονται σε αρκετά μεγάλο βαθμό παραμένοντας εντός ορίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν η διαδικασία καύσης ξεκινάει και η θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης είναι χαμηλή, η συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου που

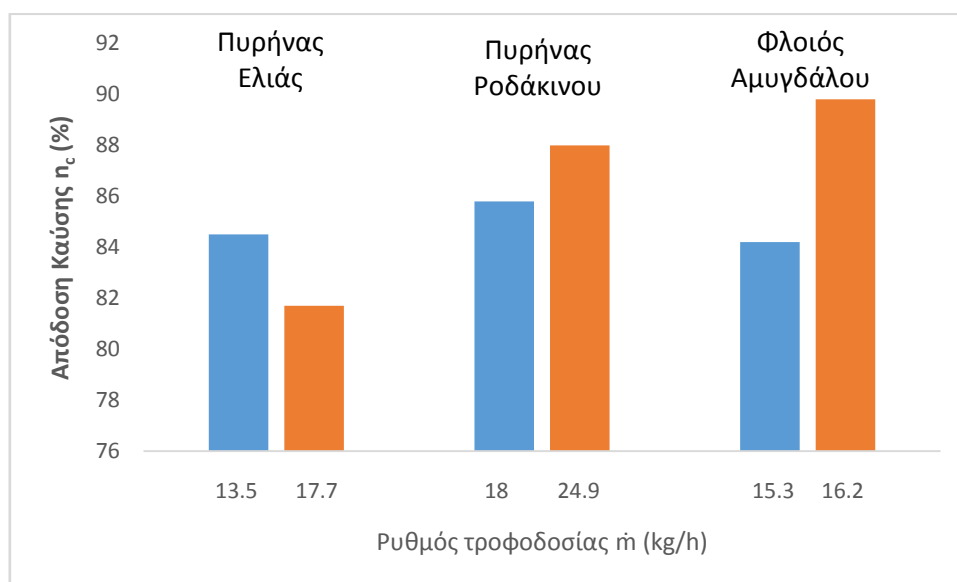
τροφοδοτείται συνεχώς. Αυτό οδηγεί σε υψηλές τιμές μονοξειδίου του άνθρακα που υποδηλώνουν ότι πρέπει να δοθεί μεγάλη βαρύτητα στην ακριβή ρύθμιση του τροφοδοσίας αέρα κατά την περίοδο εκκίνησης, με σκόπο τις χαμηλότερες εκπομπές. Οι τιμές του διοξειδίου του θείου συνεχίζουν να παραμένουν σε μηδενικά επίπεδα, όπως παρατηρείται και στην στοιχειακή ανάλυση των καυσίμων, όπου η περιεκτικότητα σε στοιχειακό θείο είναι αμελητέα και για αυτό το λόγο δεν γίνεται γραφική αναπαράσταση των συγκεντρώσεων αυτών. Τέλος, παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση των οξειδίων του αζώτου με την αύξηση της τροφοδοσίας, παραμένοντας ωστόσο χαμηλότερα από το όρια τα οποία έχουν οριστεί βάσει των Ελληνικών προτύπων για μικρά οικιακά συστήματα [82].





Σχήμα 4.20 : Μέση συγκέντρωση αέριων ρύπων συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα για (α) πυρήνα ελιάς, (β) πυρήνα ροδάκινου και (γ) φλοιό αμυγδάλου.

4.4.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης και βαθμός απόδοσης καύσης



Σχήμα 4.21 : Απόδοση καύσης (μέση τιμή) συναρτήσει της τροφοδοσίας των καυσίμων σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας του λέβητα.

Τέλος, στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας στην απόδοση καύσης. Παρατηρείται ότι, στο πυρήνα ροδάκινου και στο φλοιό αμυγδάλου, όσο αυξάνεται η τροφοδοσία καυσίμου, αυξάνεται η απόδοση καύσης. Ενώ, όσον αφορά το πυρήνα ελιάς παρατηρείται μείωση της απόδοσης καύσης όσο αυξάνεται η τροφοδοσία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, με την αύξηση της τροφοδοσίας καυσίμου μειώθηκε η θερμοκρασία των καυσαερίων λόγω της όχι τόσο καλής καύσης συγκριτικά με τη βέλτιστη τροφοδοσία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη αύξηση των θερμικών απωλειών SL που συνεπάγεται την μείωση της απόδοσης καύσης. Η μείωση της απόδοσης καύσης με την αύξηση της τροφοδοσίας για το πυρήνα της ελιάς οφείλεται και στην αύξηση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα που επηρεάζουν τις απώλειες IL.

Όσον αφορά το θερμικό βαθμό απόδοσης, παρατηρείται ότι, ο φλοιός αμυγδάλου εμφανίζει την υψηλότερη τιμή με 97.1% σε μεγάλους ρυθμούς τροφοδοσίας καυσίμου, ενώ σε μικρότερη τροφοδοσία αρχικά είχε την τιμή 90.5%. Για το πυρήνα ροδάκινου, ομοίως ο βαθμός απόδοσης ήταν 93.4% και σε μεγαλύτερους ρυθμούς τροφοδοσίας αυξήθηκε σε 95.2%. Ακόμη, ο πυρήνας ελιάς εμφανίζει σε χαμηλές τροφοδοσίες καυσίμου την τιμή 86.3% και με αύξηση της τροφοδοσίας αυξήθηκε στο 87.1%. Ωστόσο, με περαιτέρω αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας καυσίμου στο πυρήνα ελιάς παρατηρήθηκε μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης σε 76.1 %. Γενικώς, παρατηρείται ότι, η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας καυσίμου αυξάνει το θερμικό βαθμό απόδοσης, για το λόγο ότι επηρεάζεται η ποσότητα υλικού που εισάγεται στο λέβητα, καθώς και ο συνολικός χρόνος τροφοδοσίας κατά την εκτέλεση του πειράματος. Τέλος, μεγάλη αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας οδηγεί σε μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, όπως παρατηρείται και απο το θερμικό βαθμό απόδοσης του πυρήνα ελιάς, καθώς η καύση ήταν ατελής, όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 4.4.1.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την πειραματική μελέτη αυτή, ακολουθώντας την σειρά των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου, καθώς και η προτεινόμενη μελλοντική εργασία ή τυχόν βελτιώσεις της.

- Όλα τα αγροτικά υπολείμματα που χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηρίζονται από υψηλό περιεχόμενο σε πτητικά συστατικά και σχετικά χαμηλά ποσοστά τέφρας. Η ανώτερη θερμογόνο δύναμη των δειγμάτων ήταν υψηλότερη από το μέσο όρο των γαιανθράκων χαμηλής τάξης.
- Οι τέφρες των αρχικών δειγμάτων που μελετήθηκαν είχαν υψηλές συγκεντρώσεις σε κάλιο και ασβέστιο, τα οποία συνδέονται άμεσα με τη τάση για επικαθίσεις. Ο πυρήνας ελιάς και ο φλοιός αμυγδάλου παρουσίασαν μεγάλη τάση επικαθίσεων, ενώ ο πυρήνας ροδάκινου χαμηλή τάση.
- Για τη θερμοκρασία νερού εξόδου του λέβητα παρατηρήθηκε ότι, ο πυρήνας ροδάκινου ως καύσιμο προσέφερε τη θερμική του ενέργεια στο νερό ταχύτερα σε σύγκριση με το πυρήνα ελιάς και το φλοιό αμυγδάλου, σε σταθερή τροφοδοσία καυσίμου. Όσον αφορά τα μίγματα των βιοκαυσίμων, παρατηρήθηκε ότι, παρείχαν τη θερμική τους ενέργεια στο νερό βραδύτερα σε σχέση με τα αρχικά δείγματα.
- Από τα καύσιμα που μελετήθηκαν, ο πυρήνας ροδάκινου παρουσίασε τις χαμηλότερες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου, για σταθερή τροφοδοσία καυσίμου. Ωστόσο, οι ρύποι από όλα τα δείγματα βιομάζας δεν ξεπέρασαν τα επιτρεπόμενα όρια σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα για μικρές μονάδες. Τα μίγματα των καυσίμων παρουσίασαν εκπομπές αερίων ρύπων ενδιάμεσες με τα αρχικά δείγματα.
- Οι τιμές του βαθμού απόδοσης καύσης και για τα τρία δείγματα βιομάζας ήταν υψηλές και μεγαλύτερες από 84%. Ο πυρήνας ροδάκινου παρουσίασε την καλύτερη απόδοση καύσης και θέρμανσης του λέβητα. Τα μίγματα των καυσίμων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές απόδοσης με αυτές των αρχικών δειγμάτων.
- Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου παρατηρήθηκε ότι, γίνεται ταχύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού εξόδου του λέβητα στην επιθυμητή θερμοκρασία και η απόδοση αυξήθηκε. Ωστόσο, πολύ μεγάλη αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας, είχε ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση μη καλής καύσης και καθύστερηση της θέρμανσης του νερού εξόδου ή κατά συνέπεια μείωση της απόδοσης.

- Με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου παρατηρήθηκε ότι οι εκπομπές αερίων ρύπων αυξήθηκαν, αλλά παρέμειναν εντός των επιτρεπόμενων ορίων σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα.
- Σύμφωνα με την παραπάνω πειραματική μελέτη, ο πυρήνας ροδάκινου αποδεικνύεται ως το καλύτερο καύσιμο βιομάζας συγκριτικά με τον πυρήνα ελιάς και το φλοιό αμυγδάλου, καθώς παρουσιάζει τη χαμηλότερη τάση επικαθίσεων, τους χαμηλότερους ρύπους κατά μέσο όρο, τον υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης λέβητα και βαθμό απόδοσης καύσης.

Προτάσεις βελτίωσης πειραματικής διαδικασίας

Για μελλοντικές πειραματικές μελέτες συνιστώνται οι παρακάτω προτάσεις. Η πραγματοποίηση περισσότερων επαναλήψεων των πειραμάτων για στατιστικά αποτελέσματα και η χρήση περισσότερων αναλογιών στα μίγματα των καυσίμων. Ακόμη, η ανάλυση της τέφρας πυθμένα από την καύση των βιοκαυσίμων και η χρήση πολυτροφοδοσιών με άλλα καύσιμα. Όσον αφορά τις βελτιώσεις του λέβητα, ενεργοποίηση του ενσωματωμένου ξηραντήρα του συστήματος για την αφύγρανση της πρώτης ύλης προς καύση. Κατόπιν, η βελτιστοποίηση της ροής του νερού στο κλειστό κύκλωμα, μέσω μείωσης των τριβών με αλλαγή της διάταξης των σωληνώσεων. Η ύπαρξη περισσότερων διαβαθμίσεων στο ροοστάτη του ανεμιστήρα απαερίων. Επίσης, μια πολύ σημαντική βελτίωση είναι ο έλεγχος του αέρα τροφοδοσίας, ώστε να μπορεί να γίνει βελτίωση των εκπομπών αερίων ρύπων. Τέλος, η σύνδεση του συστήματος με ηλεκτρονικό υπολογιστή για άμεση καταγραφή όλων των πειραματικών παραμέτρων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. D.L.Klass, Biomassforrenewableenergy, fuelsandchemicals, AcademicPress (1998), p.91.
2. M.P Ciria, E Gonzalez and J.E. Carrasco, Brassica carinata as a new energy crop for the production of biomass for heat and electricity in southern EU countires, Proceedings of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla (2000), p.218.
3. Μ. Μαρδίκης και Ε. Ναμάτοβ, Ενεργειακές καλλιέργειες ΚΑΠΕ, Γεωργία, Κτηνοτροφία 6 (1999) σ. 13.
4. ΚΑΠΕ. Ενεργειακές καλλιέργειες για την παραγωγή υγρών και στερεών βιοκαυσίμων στην Ελλάδα ; 2007.
5. www.fao.org.2004
6. I. Piscionari, N Sharma, G Baviello and S. Orlandini, Promising industrial energy crop Cynara Cardunculus: a potential source of biomass production and alternative energy, Energy Conversion and Management 41 (2000), p. 1091.
7. Edenhofer O, Pichs Madruga R, Sokona Y. Renewable energy sources and climate change mitigation (special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Clim Policy 2012;6:1–1088.
8. Popp J, Lakner Z, Harangi-Rakos M, Fari M. The effect of bioenergy expansion: food, energy, and environment. Renew Sustain Energy Rev 2014;32:559–78.
9. Bilgen S, Keleş S, Sarikaya I, Kaygusuz K. A perspective for potential and technology of bioenergy in Turkey: present case and future view. Renew Sustain Energy Rev 2015;48:228–39.
10. Demirbas A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. Energy Convers Manag 2008;49:2106–16.
11. Openshaw K. Biomass energy: employment generation and its contribution to poverty alleviation. Biomass Bioenergy 2010;34:365–78.
12. Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. Renew Sustain Energy Rev 2011;15:1513–24.
13. Godard C, Boissy J, Gabrielle B. Life-cycle assessment of local feedstock supply scenarios to compare candidate biomass sources. GCB Bioenergy 2013;5:16–29.
14. Oztürk M, Gücel S, Armağan B, Küçük M. An overview of the biomass potential in Turkey and possibilities for the utilization of degraded areas. In: Proceedings 1st international nucl. renew. energy conference, Amman, Jordan, March 21–24; 2010.
15. Hermawan Fevriansyah, Gama Stove: Biomass stove for Palm Kernal shells in Indonesia ,Energy Procedia 47 (2014) 123-132 ,
16. H. Hartmann and I. Lewandowski, Herbaceous biomass fuel characteristics and pre-treatment. In : M. Kaltschmitt and A.V. Bridgwater, Editors, Biomass gasification and pyrolysis-state of the art and future prospects, CPL Press, U.K (1997).
17. R.R Bakker and H.W Elbersenm, Managing ash content and quality in herbaceous biomass : and analysis plant to product, Proceedings of the 14th European Biomass Conference, Paris (2005), p .210.
18. J.H Fike, D.J Parrish, D.D Wolf, J.A Balasko, J.T Jr Green , M. Rasnake and J.H Reynoldsm Long-tern yuield potential of switchgrass for biofuel systems, Biomass and Bioenergy 30 (2006) p. 198.
19. S.van Loo and J. Koppejan, Handbook of biomass combustion and co-firing, Twente University Press, Enschede (2002), p. 23.
20. www.ieabioenergy-task32.com

21. www.vt.tuwien.ac.at/
22. www.ecn.nl/Phyllis
23. D. Vamvuka, E. Kastanaki, P. Grammelis and E. Kakaras, Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with poor coal Fuel 82 (2003), p. 1949.
24. D. Vamvuka, V. Topouzi, A. Stratakis, M. Christou, E. Alexopoulou and C. Panoutsoy, Giant reed as a fuel for heat and electricity applications in Greece, Proceeding of the 15th European Biomass Conference and Exhibitions, Berlin, (2007), p. 777.
25. A. Rossi, Fuel characteristics of wood and nonwood biomass fuels, Progress in biomass conversion 5 (1984), p.69
26. A. Demirbas, Fuel characteristics of olive husk and walnutm hazelnut, sunflower and almond shells, Energy Sources 24 (2002) p. 215.
27. W.C. Turkenburg, A. Faaij and E. Lysen, Renewable energy technologies. In: J. Goldemberg, Editor, World energy assessment of the United Nations, UNDO, N.Y. (2000) p. 219.
28. A. Faaij, Modern biomass conversion technologies, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11 (2006), p. 343.
29. S. Van Loo and J. Koppenjan, Handbook of biomass combustion and co-firing, IEA Bioenergy Twente Univ. Press, Enschede (2002)
30. A. Demirbas, Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, Energy Conversion and Management 42(11) (2001), p.1357.
31. A.P.C Faaij, Bioenergy in Europe: Changing technology choices, Energy Policy 34 (2006), p. 322.
32. U.S. Dept of Energy, Renewable energy technology characterizations, Washington; 1998.
33. R.E.H Sims, A. Hastings, B. Schlamadinger, G. Taylor and P. Smith, Energy crops : current status and future prospects, Global Change Biology 12 (2006) p. 2054.
34. J. Tustin. IEA Bioenergy Annual Report; 2006
35. W. Palz and A. Kyramarios, Bioenergy perspectives in developing countries, Proceeding of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla (2006), p. 6.
36. B. Notarnicola, I. Mongelli and G. Tassielli, Globalization, international trade and global warming : modern biomass as a possible solution, Proceeding of the 2nd World Conference on Biomass for Energy and Climate Protection, Rome (2004) p. 2363.
37. Focus. Biomass as a burning issue. 14710846/07; 2007
38. K. Maniatis, G. Giu and J. Resgo, The European Commission perspective in biomass and waste thermochemical conversion. In: A.V. Bridgwater, Editor, Pyrolysis and gasification of biomass and waste, Strasbourg (2002) p. 1.
39. EUBIONET IIb. Bioenergy and renewable energy in Europe : country basis information for EU-25. www.eybionet.net : 2005
40. H.P Grimm, P. Helm, M. Cameron, D. Chiaramonti and A. Grassi, Promotion of biomass utilization in the urban environment, Proceedings of the 2th World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, (2000) p. .1430.
41. M. Kaltschmitt and M. Weber, Markets for solid biofuels within the EU-15, Biomass and Bioenergy 30(11) (2006), p. 897.
42. CRES. An overview of the Greek energy market; 2002
43. W. Wei, Emissions of carbon monoxide and carbon dioxide from uncompressed and pelletized biomass fuel burning in typical household stoves in China, Atmospheric Environment 56 (2012) 136-142

44. F. Shafizadeth and W.F. DeGrooy, Combustion characteristics of cellulosic fuels. In F. Shafizadeth, K. V. Sarkanen and D. A. Tillman, Editors, Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins, Academic Press, N.Y. (1976) p.1.
45. P.C. Lewellen, W.C. Peters and J.B. Howard, Cellulose pyrolysis kinetics and char formations mechanism, Proceedings of the 16th Symposium (Int.) on combustions, The Combustion Institute, Pittsburgh (1977) p.1471.
46. S. Martin, Diffusion-controlled ignition of cellulosic materials by intense radiant energy, Proceeding of the 10th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (1965) p.877.
47. J. Werther, M. Saenger, E.U. Hartge, T. Ogada and Z. Siagi, Combustions of agricultural residues, Progress in Energy and Combustion Science 26 (2000), p.1.
48. W. M. Cooke, J.M. Allen and R.E. Hall, Characterization of emissions from residential wood combustions sources, Proceedings 1981 Int. Conf. on Residential Solid Fuels: Environmental Impacts and Solutions, Beaverton, Oregon (1982) p. 139
49. D.L. Klass, Biomass for renewable energy, fuels and chemicals , Academic Press (1998) p. 191.
50. D. Vamvuka, E. Kastanaki, A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal/biomass char blends, Fuel 85 (2006), p. 1186.
51. M.A. Field, D.W. Gill, B.B. Morgan and P.G. W. Hawksley , Combustion of pulverized coal, The Institute of Fuel, London (1971)
52. E. Winijkul, Emissions from residential combustion considering end-uses and spatial constraints: Part I, methods and spatial distribution, Atmospheric Environment 125(2016) 126-139
53. M. Gehrig, Influence of firebed temperature on inorganic particle emissions in residential wood pellet boiler, Atmospheric Environment 136 (2016) 61-67
54. M. Korelainer, Ash behavior and emission formation in a small-scale reciprocating-grate combustion reactor operated with wood chips, reed canary grass and barley straw, Fuel (2015) 80-88
55. S. Ghafghazi ,Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3019-3028
56. A. Messerer, Combined particle emissions reduction and heat recovery from combustion exhaust- A novel approach for small wood-fired appliances, Biomass and Bioenergy 31(2007) 512-521
57. J. Salazar, J. Meil, Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence, Journal of Cleaner Production 17 (2009) 1563-1571
58. Δ. Βάμβουκα, Αντιρυπογόνο χρήσις γαιανθράκων, Εκδόσεις Ιων (2002) σ. 171
59. S. Salat, T. Campana and M. Cusi, District heating biomass for Southern Europe, Proceeding of the 1st World Conference on Biomass and Energy Industry, Sevilla, (2000), p. 752
60. J.M. Allen and W.M. Cooke, Control of emissions from residential wood burning by combustion modification. EPA-600/7-81-091. Research Triangle Park; 1981
61. C.P. Mitchell, A.V. Bridgwater, D.J. Stevens, A.J. Toft and M.P. Watters, Techno-economic assessment of biomass to energy, Biomass and Bioenergy 9(1-5) (1995), p.205.
62. Oregon Dept. of Environmental Quality Woodstoves, Portland; 1986
63. P.C. Malte, Combustion. In: O. Kitani and C.W. Hall, Editors, Biomass handbook, Gordon and Breach Science Publishers (1989). p.371

64. L. Dinkelbach and A. van der Drift, Small scale combustion of waste concrete processing, Proceeding of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla (2000), p. 901
65. L. Gustavon, C. Tullin and I. Wrande, Small scale biomass combustion in Sweden-research towards a sustainable society, Proceeding of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla (2000), p. 1553.
66. F. Fiedler, The state of the art of small-scale pellet based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews 8(3) (2004), p. 201.
67. I. Obernberger and G. Thek, Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour, Biomass and Bioenergy 27(6) (2004), p. 653.
68. B. Musil, H. Hofbauer and T. Schiffert, Development and analyses of pellers fired tiled stoves, Proceeding of the 14th European Biomass Conference, Paris (2005), p. 1117.
69. M.J. Stolarski, Energy, economic and environmental assessment of heating a family house with biomass, Energy Buildings 66(2013) 395-404
70. Y. Xu, Characterization of fine and carbonaceous particles emissions from pelletized biomass-coal blends combustion : Implications on residential crop residue utilization in China, Atmospheric Environment 141 (2016) 312-319
71. S.P. Parmigiani, Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-saharan setting, Energy for Sustainable Development 23 (2014) 15-24
72. N.A. MacCarty, K.M. Bryden, Modeling of household biomass cookstoves: A review, Energy for Sustainable Development 26 (2015) 1-13
73. www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass_guide.pdf
74. Oravainen, H. Emission limits for biomass fired boilers in some IEA member countries. Finland VTT Energy, 1998.
75. Biomass Action Plan. 2005. Commission of the European Communities. Pvl. COM 628 final.
76. Olsson, M. Kjallstrand, J. Emissions from burning of softwood pellets, Biomass and Bioenergy. 2004. Pvl. 27. pp. 607-611.
77. Spreitzer, K., Riickbrodt, D. Straky, H. Observer-based estimation of the water-mass-flow through a central heating boiler, Proceedings of the American Control Conference Anchorage. 2002.
78. Δ. Βάμβουκα, Βιομάζα : Βιοενέργεια και περιβάλλον, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ (2009) σ. 158-164
79. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ, Αριάδνη Αργυράκη, ΕΚΠΑ 2013, σ.77
80. Principles Of Calculating Results By The Madur Gas Analysers, Information brochures, σ. 8-11.
81. Demirbas MF. Microalgae as a feedstock for biodiesel. Energy Educ Sci Technol Part A 2010; 25:31–43.
82. ΥΑΟΙΚ 189533/2011, ΦΕΚ 2654Β/9/11/2011
83. Εργαστηριακός Οδηγός: Τεχνολογίες Αξιοποίησης Στερεών Καυσίμων, Σφακιωτάκης Στυλιανός, Βάμβουκα Δέσποινα