



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αεριοποίηση αστικών απορριμμάτων και ανάλυση της
συμπεριφοράς της τέφρας στο αδρανές υλικό της
κλίνης**

ΚΑΛΥΒΗ ΚΟΡΙΝΑ

Επιβλέπων καθηγητής

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΚΑΚΑΡΑΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Το πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων	7
1.2 Μέθοδοι διαχείρισης απορριμμάτων	8
1.3 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση	10
1.4 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα	12
1.5 Η ανάγκη θερμικής επεξεργασίας των απορριμμάτων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	17
2.1 Γενικά	17
2.2 Λειτουργία αεριοποίησης	17
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση του καυσίμου	19
2.4 Είδη αεριοποιητών	23
2.5 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης	24
2.5.1 Χαρακτηριστικά	24
2.5.2 Είδη αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης	26
2.6 Διαδικασία ρευστοποίησης	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	29
3.1 Περιγραφή της εγκατάστασης	29
3.2 Λειτουργία αντιδραστήρα	32
3.3 Μετατροπές της εγκατάστασης	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ STABILAT	37
4.1 Επεξεργασία απορριμμάτων	37
4.2 Αξιοποίηση stabilat	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	43
5.1 Προετοιμασία πειραματικής διαδικασίας	43
5.1.1 Επεξεργασία stabilat στο εργαστήριο	43
5.1.2 Υλικό της κλίνης	45
5.1.3 Προετοιμασία αντιδραστήρα	46
5.2 Πειραματική διαδικασία	46
5.3 Προβλήματα κατά την πειραματική διαδικασία	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	49
6.1 Αέριο καύσιμο	49
6.2 Υλικό κλίσης	51
6.3 Ιπτάμενη τέφρα	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Ευχαριστώ τον κ.Εμμανουήλ Κ. Κακαρά, καθηγητή στον τομέα θερμότητας του τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο που μου προσέφερε πολύτιμες γνώσεις και πολύ περισσότερο πρακτικές γνώσεις του αντικειμένου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Κυριάκο Πανόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του που ήταν απαραίτητη σε όλη την πορεία για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων και τη Σοφία Τούλιου για τη βοήθεια τους στη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Καλύβη Κορίνα

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Περίληψη

Η διαχείριση των απορριμμάτων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του πλανήτη. Η επιλογή μιας αποτελεσματικής μεθόδου διαχείρισης στοχεύει στη μείωση των βλαβερών συνεπειών που έχουν τα απορρίμματα στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Οι μέθοδοι διαχείρισης χωρίζονται σε θερμικές και βιολογικές. Η ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι η εδαφική εναπόθεση η οποία είναι τελευταία στην ιεράρχηση των μεθόδων. Η αυστηρή νομοθεσία σχετικά με την εφαρμογή της αλλά και η ανικανότητα ανάκτησης υλικού και ενέργειας οδηγεί στην προσπάθεια εφαρμογής άλλων μεθόδων όπως είναι οι θερμικές. Θερμικές μέθοδοι είναι η καύση, πυρόλυση, αεριοποίηση και έχουν δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης.

Η αεριοποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής στερεού καυσίμου σε αέριο καύσιμο το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Κατά την αεριοποίηση το καύσιμο αντιδρά με συγκεκριμένη ποσότητα οξυγόνου και προκαλείται ατελής καύση. Τα παράγωγα της είναι αέριο αποτελούμενο από H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 και προκύπτουν μετά από μια σειρά αντιδράσεων αεριοποίησης. Τα υπόλοιπα παράγωγα είναι τέφρα, πίσσες και εξανθρακώματα. Η αεριοποίηση λαμβάνει χώρα σε ειδικούς αντιδραστήρες όπως ρευστοποιημένης κλίνης που μπορούν να διαχειρίζονται καύσιμα όπως τα αστικά απορρίμματα και η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης.

Στο εργαστήριο έγινε εφαρμογή της αεριοποίησης αστικών απορριμμάτων σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Η πειραματική εγκατάσταση του εργαστηρίου αποτελείται από το τμήμα τροφοδοσίας του καυσίμου, το κυρίως τμήμα του αεριοποιητή και τη γραμμή εξόδου του παραγόμενου αερίου που περιλαμβάνει καθαρισμό και καταλήγει σε μετρητικά όργανα για μέτρηση της σύστασης του. Για τις ανάγκες του πειράματος έγιναν κάποιες μετατροπές στον αντιδραστήρα και κυρίως στο σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου.

Η εφαρμογή της αεριοποίησης απαιτεί ένα καύσιμο αρκετά ομογενοποιημένο. Έτσι η αξιοποίηση των ΑΣΑ γίνεται αφού έχει προηγηθεί επεξεργασία τους για παραγωγή ενός δευτερογενούς καυσίμου. Ένα δευτερογενές καύσιμο που ονομάζεται stabilat παράγεται με την τεχνολογία Herhof-stabilat η οποία περιλαμβάνει απομάκρυνση βλαβερών υλικών, βιολογική ξήρανση, ανάκτηση ανακυκλώσιμου υλικού και απομάκρυνση αδρανών υλικών. Το παραγόμενο καύσιμο έχει βελτιωμένη θερμογόνο ικανότητα και είναι περισσότερο ομοιογενές.

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα αεριοποίησης stabilat σε ρευστοποιημένη κλίνη. Το καύσιμο stabilat αξιοποιήθηκε σε δύο μορφές όπου η μία ήταν αυτούσιο το υλικό και η δεύτερη ήταν το αποτέλεσμα εργαστηριακής επεξεργασίας για ομογενοποίηση και ξήρανση του υλικού. Το κάθε ένα υλικό

αεριοποιήθηκε σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες 800⁰C και 850⁰C ενώ οι υπόλοιπες συνθήκες ήταν ίδιες σε όλα τα πειράματα. Στην κλίνη χρησιμοποιήθηκε υλικό χαλαζίας.

Το παραγόμενο αέριο από κάθε πείραμα είχε διαφορετικές συστάσεις λόγω των διαφορετικών συνθηκών. Ιδιαίτερη σημασία παρουσίασε το υλικό της κλίνης το οποίο μελετήθηκε σε μικροσκοπικό επίπεδο. Στο υλικό βρέθηκαν σωματίδια όπως γυαλιά, τμήματα μετάλλων, κόκαλα, εξανθρακώματα, αντικείμενα συγκεκριμένης μορφής αλλά που δε μπορούν να προσδιοριστούν. Τα ελάχιστα συσσωματώματα που βρέθηκαν ήταν είτε από επικάλυψη των γυαλιών με άμμο, είτε κολλημένα σωματίδια άμμου μεταξύ τους.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος διαπιστώνουμε την καταλληλότητα της μεθόδου για επεξεργασία καυσίμου προερχόμενο από ΑΣΑ. Για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση συμπεραίνουμε ότι το σύστημα τροφοδοσίας είναι κατάλληλο για επεξεργασμένη μορφή καυσίμου. Το παραγόμενο από το πείραμα αέριο ήταν ικανό να αξιοποιηθεί μέσω της καύσης για παραγωγή ενέργειας. Η τέφρα του καυσίμου που εντοπίστηκε στο υλικό της κλίνης δεν εμφάνισε πρόβλημα στη διαδικασία, αφού ο μηχανισμός σχηματισμού συσσωματωμάτων λόγω τέφρας δεν ευνοήθηκε και δεν επηρεάστηκε η ρευστοποίηση του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων

Η διαχείριση των απορριμμάτων αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα και επίκαιρα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης. Τα απορρίμματα ρυπαίνουν το περιβάλλον, καταλαμβάνουν πολύτιμο χώρο και επιβαρύνουν με μολυσματικά υπολείμματα το έδαφος και τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Τελικά τα αποτελέσματα της ευζωίας, συνεχώς αυξανόμενα φτάνουν περίπου σε παραγωγή τα 1,8 δισεκατομμύριο τόνους ετησίως στην Ευρώπη [1], με συνέπεια η διαχείριση τους να αποτελεί πλέον ένα από τα τρία σημαντικότερα προβλήματα παγκοσμίως, μαζί με την έλλειψη νερού και την κλιματική αλλαγή.

Λόγω της αυξημένης παραγωγής απορριμμάτων, είναι ζωτικής σημασίας η διαχείριση τους με σκοπό τη μείωση των βλαβερών αποτελεσμάτων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Για αυτό το σκοπό, επειδή τα απορρίμματα δε μπορούν να εξαφανιστούν, μετατρέπονται, με φυσικές ή με τεχνητές μεθόδους σε άλλη μορφή (στερεά, υγρή ή αέρια) έτσι ώστε το τελικό αυτό προϊόν να μη ρυπαίνει το περιβάλλον.

Η ευρωπαϊκή επιτροπή έχει συντάξει νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των απορριμμάτων, μέρος του οποίου είναι η ιεραρχία στις επιλογές διαχείρισης τους [2]. Οι μέθοδοι που αναφέρονται σε αυτό το πλαίσιο δεν περιορίζονται μόνο στα θέματα της τελικής διάθεσης των απορριμμάτων αλλά αποδίδεται μεγάλη σημασία στην πρόληψη της παραγωγής τους, στη μείωση της παραγωγής τους, στη μείωση της βλαπτικότητας τους, στην ανακύκλωση- επαναχρησιμοποίηση τους, στην ανάκτηση υλικών και ενέργειας από αυτά, στην ασφαλή διάθεση των υπολειμμάτων τους χωρίς προβλήματα για το περιβάλλον. Επειδή όμως η παραγωγή και η κατανάλωση προϊόντων αποτελούν αναπόφευκτες πηγές αποβλήτων θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη μέγιστη αξιοποίηση των προϊόντων που έχουν αποβεί άχρηστα.

Τα απορρίμματα στα οποία γίνεται αναφορά περιλαμβάνουν, απορρίμματα και κατάλοιπα από νοικοκυριά, εμπόριο, βιομηχανία, γεωργία, κατασκευές και κατεδαφίσεις, μεταλλευτική βιομηχανία και λατομεία, παραγωγή ενέργειας. Ένα σημαντικό ποσοστό των απορριμμάτων που παράγονται έχουν βιολογική προέλευση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας, πράγμα που σημαίνει ότι γίνεται πλήρης αξιοποίηση τους και ταυτόχρονα ανάκτηση ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες διαχείρισης των απορριμμάτων. Αντίστοιχη περίπτωση παραγωγής ενέργειας από βιολογικής προέλευσης καύσιμα, βιοκαύσιμα είναι και οι βιοκαλλιέργειες όπου γίνεται η παραγωγή τους ειδικά για την ενεργειακή αξιοποίηση τους, πράγμα που δε συμβαίνει με τα απορρίμματα τα οποία, σαν αποτέλεσμα της οικονομικής

δραστηριότητας, παράγονται και θα παράγονται συνεχώς. Με αυτό τον τρόπο δεν αυξάνεται η περιβαλλοντική επιβάρυνση για την παραγωγή του καυσίμου, αλλά μειώνεται η επιβάρυνση που είναι αποτέλεσμα χρήσης άλλων μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων, όπως η εδαφική εναπόθεση.

Σε νομοθετικό επίπεδο για την παραγωγή ενέργειας από απορρίμματα, οι κανονισμοί που αφορούν τις εκπομπές αερίων είναι αυστηρότεροι για τη χρήση καυσίμου από απορρίμματα ή βιομάζα σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα. Έτσι ο διαχωρισμός των καυσίμων από βιομάζα είναι: μη άχρηστη βιομάζα που διαχειρίζεται όπως τα άλλα καύσιμα (NWB- non-waste biomass), άχρηστη βιομάζα (EWB- exempted waste biomass) που διαχειρίζεται όπως και τα υπόλοιπα καύσιμα και τέλος άχρηστη βιομάζα (WB- waste biomass) όπου διαχειρίζεται αντίστοιχα με τα απορρίμματα. Τα απορρίμματα όμως αποτελούν μια ευρύτερη κατηγορία διότι μπορεί κάποια να ανήκουν στην κατηγορία της μη καθαρής βιομάζας αλλά ένα μέρος αυτών περιέχουν υλικά μη βιολογικής προέλευσης, όπως πλαστικά. Αυτό τα αποκλείει και από την κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω του ότι είναι μη βιοδιασπώμενα [3].

1.2 Μέθοδοι διαχείρισης απορριμμάτων

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων περιλαμβάνει την εφαρμογή προγραμμάτων για τον περιορισμό της παραγωγής τους, τη διαλογή και ανακύκλωση των διαχωρισθέντων υλικών, τη χρήση μεθόδων επεξεργασίας με στόχο την ενεργειακή αξιοποίηση ή την επαναχρησιμοποίηση των υλικών και τη διάθεση του τελικού υπολείμματος σε σύγχρονους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Η καλύτερη μέθοδος διαχείρισης απορριμμάτων είναι ένας συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων με βέλτιστη λύση την ανάκτηση υλικού ή ενέργειας κατά το μέγιστο δυνατό. Οποιαδήποτε όμως μέθοδος καταλήγει στην ανάγκη ταφής κάποιου υπολείμματος που δε μπορεί να αξιοποιηθεί.

Οι σημαντικότερες μέθοδοι διαχείρισης απορριμμάτων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, οι θερμικές μέθοδοι και οι βιολογικές μέθοδοι. Η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων μετατρέπει το περιεχόμενο τους σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα με ταυτόχρονη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας. Οι τεχνικές αυτές είναι η αποτέφρωση-καύση (combustion-incineration), αεριοποίηση (gasification), πυρόλυση (pyrolysis) και τεχνική του πλάσματος (plasma technology).

Η καύση είναι η οξείδωση των αποβλήτων και για να επιτευχθεί προϋποθέτει, επαρκή ποσότητα καυσίμου και οξυγόνου, επιθυμητή θερμοκρασία ανάφλεξης, σωστή αναλογία μείγματος και απομάκρυνση των υπολειμμάτων. Τα προϊόντα της καύσης εκτός από τα τυπικά: διοξείδιο του άνθρακα, ατμός, μονοξείδιο του

άνθρακα είναι και κάποιες άλλες ουσίες όπως διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, υδροχλώριο, υδροφθόριο, πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες. Επιπλέον τα στερεά υπολείμματα που παραμένουν αποτελούν το 25-40% του βάρους των εισερχόμενων αποβλήτων και είναι τέφρα που συγκεντρώνεται στα διάφορα μέρη της εγκατάστασης.

Η πυρόλυση είναι διεργασία διαχωρισμού οργανικών ουσιών σε αέρια, υγρά και στερεά κλάσματα με απαίτηση εξωτερικής πηγής ενέργειας ως ισχυρά ενδόθερμη διεργασία. Τα προϊόντα της πυρόλυσης είναι αέρια κυρίως υδρογόνο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υγρό κλάσμα σε ελαιώδη μορφή με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο μετά από επεξεργασία, στερεό υπόλειμμα από άνθρακα και τυχόν αδρανή υλικά [4].

Η αεριοποίηση είναι διεργασία ατελούς ελεγχόμενης καύσης για παραγωγή αερίου καυσίμου πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες, κυρίως μεθάνιο, στερεό υπόλειμμα από άνθρακα και αδρανή και συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα αντίστοιχο του υγρού κλάσματος κατά την πυρόλυση. Η αεριοποίηση με τεχνική κλάσματος είναι αντίστοιχη διεργασία με την αεριοποίηση, μόνο που πραγματοποιείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες της τάξης των 6000°C και παράλληλα το ανόργανο μέρος των αποβλήτων μετατρέπεται σε τηγμένο υπόλειμμα, το οποίο ύστερα από ψύξη σχηματίζει ένα σταθερό, αδρανές, υψηλής πυκνότητας, υαλώδες υλικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό υλικό σε διάφορες εφαρμογές [5].

Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι η αερόβια βιολογική επεξεργασία (κομποστοποίηση), η αναερόβια βιολογική επεξεργασία ή αναερόβια ζύμωση, η βιολογική ξήρανση και η εδαφική εναπόθεση. Επιπλέον υπάρχουν μονάδες μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας, όπου συνδυάζεται η μηχανική ανακύκλωση με τη βιολογική επεξεργασία. Σαν τελικό προϊόν μπορούν να δώσουν RDF(Refused Derived Fuel), SRF(Solid Recovered Fuel). Στις βιολογικές μεθόδους συγκαταλέγεται και η εδαφική εναπόθεση των απορριμμάτων σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) [5].

Οι θερμικές μέθοδοι, αεριοποίηση, καύση, πυρόλυση αποτελούν μια ομάδα μεθόδων που αφορούν την αποτέφρωση των απορριμμάτων. Η αποτέφρωση ως μια κατηγορία αναμένεται να αποκτήσει ένα σημαντικό ρόλο στη διαχείριση και ανάκτηση των απορριμμάτων λόγω των πλεονεκτημάτων σε σχέση με την ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδο που είναι η εδαφική εναπόθεση απορριμμάτων αλλά και της αυστηρής νομοθεσίας που επιβάλλει η Ευρωπαϊκή Ένωση ως προς την εφαρμογή της τελευταίας μεθόδου. Η ταφή απορριμμάτων και η θερμική επεξεργασία, ειδικά όταν η τελευταία αποσκοπεί και στην ανάκτηση ενέργειας, βρίσκονται τελευταίες στην πυραμίδα της στρατηγικής διαχείρισης όπου προτεραιότητα έχει η προσπάθεια αποφυγής παραγωγής απορριμμάτων και η ανακύκλωση. Η εδαφική

εναπόθεση απορριμμάτων ενώ αποτελεί τη τελευταία λύση στη διαχείριση απορριμμάτων, κατέχει την πρώτη θέση σε εφαρμογή, συγκεντρώνοντας το 70% των αστικών απορριμμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, σε αντίθεση με τις θερμικές μεθόδους με ποσοστό διαχείρισης 20% [4].

Επειδή όμως η παραγωγή απορριμμάτων είναι αναπόφευκτη, είναι σημαντικό να βρεθεί η κατάλληλη μέθοδος ικανή να διαχειριστεί αποτελεσματικά τα απορρίμματα κι όσο είναι δυνατόν ανακτώντας υλικό ή ενέργεια. Η επιλογή όμως και η εφαρμογή μιας μεθόδου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οικονομικούς, τεχνολογικούς, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς. Λαμβάνοντας υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες για κάθε κοινωνία ξεχωριστά μπορεί να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός μεθόδων και μια στρατηγική διαχείρισης αστικών απορριμμάτων ανάλογα με τις ανάγκες και τα δεδομένα της.

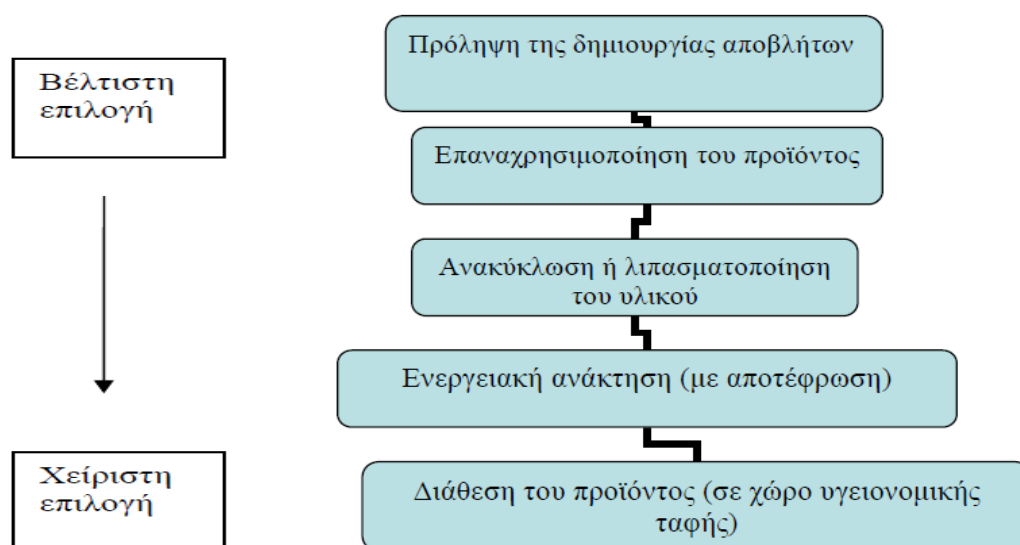
Εξαιτίας των αυξημένων αναφορών για μόλυνση των υπόγειων υδάτων, τη μείωση των διαθέσιμων χώρων καθώς και θέματα αισθητικής και δημόσιας υγείας όσο αφορά την ταφή των απορριμμάτων, η αποτέφρωση παραμένει μια αποδεκτή μέθοδος διαχείρισης και των αστικών αλλά και των βιομηχανικών αποβλήτων. Το γεγονός ότι υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί για την εφαρμογή της ταφής απορριμμάτων καθώς και το γεγονός ότι με την αποτέφρωση των απορριμμάτων υπάρχει δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας, κάνουν την δεύτερη να πλεονεκτεί ως προς την πρώτη. Επιπλέον μια μέθοδος η οποία εκτός από διαχείριση παράγει και ενέργεια συμβάλλει και σε άλλο πεδίο αντιμετώπισης περιβαλλοντικού προβλήματος που αφορά τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται και για διαχείριση άλλων ειδών απορριμμάτων, όχι μόνο αστικά, καθώς και τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων. Ένας σημαντικός κλάδος στον οποίο χρησιμοποιείται ευρέως αυτή η μέθοδος είναι η τσιμεντοβιομηχανία, όπου όχι μόνο χρησιμοποιούνται τα απόβλητα για την παραγωγή ενέργειας, που υπολογίζεται στο 12% [4], αλλά χρησιμοποιούν και τα ανόργανα υλικά που παραμένουν, ως υλικό των προϊόντων παραγωγής τους. Άλλες εφαρμογές των μεθόδων αποτέφρωσης είναι με την ταυτόχρονη αποτέφρωση και άλλων καυσίμων πέρα των αποβλήτων.

1.3 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Σήμερα με τη δεδομένη κατάσταση στην Ευρώπη, η ενέργεια που παράγεται από τα απορρίμματα εκτιμάται 43 000 GWh/yr ή το 1,8% της ενεργειακής κατανάλωσης, ο όγκος των απορριμμάτων που διαχειρίζονται ετησίως είναι 47Mt/yr και υπάρχουν συνολικά 437 εγκαταστάσεις θερμικής διαχείρισης τους [4].

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ιεραρχεί τις επιλογές σε σχέση με τη διαχείριση των αποβλήτων όπως προαναφέρθηκε και όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 1.1).

Η ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης διαφέρει σημαντικά μεταξύ των κρατών-μελών. Χώρες όπως η Γερμανία, η Ολλανδία, η Δανία, η Σουηδία και το Βέλγιο έχουν σχεδόν καταργήσει την εδαφική εναπόθεση των οικιακών απορριμμάτων. Άλλες χώρες όπως η Πολωνία και η Λιθουανία, διαθέτουν περισσότερο από το 90% των οικιακών απορριμμάτων τους σε ΧΥΤΑ. Η ανακύκλωση και η κομποστοποίηση των οικιακών απορριμμάτων στην ΕΕ έφτασε το 40%, το 2007, με τη Γερμανία και την Ολλανδία να έχουν τα μεγαλύτερα ποσοστά, 64% και 60% αντίστοιχα. Το 19% των απορριμμάτων των 27 κρατών-μελών αποτεφρώθηκαν, με τη Δανία να έχει το μεγαλύτερο ποσοστό αποτέφρωσης των οικιακών απορριμμάτων, 53%. Τελικά το 41% των απορριμμάτων κατέληξε σε χώρους εδαφικής διάθεσης [5]. Μια γενική εικόνα της ποσότητας των απορριμμάτων και των μεθόδων διαχείρισης τους φαίνεται στα σχήματα 1.2 και 1.3.



Σχήμα 1.1 Ιεράρχηση μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων [6].

Η δημιουργία αποβλήτων στην ΕΕ υπολογίζεται σε 1,3 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως περίπου. Στην ποσότητα αυτή περιλαμβάνονται τα απόβλητα της μεταποίησης (427 εκατομμύρια τόνοι), της ενεργειακής παραγωγής και της υδροδότησης (127 εκατομμύρια τόνοι), του κατασκευαστικού τομέα (510 εκατομμύρια τόνοι) και των οικιακών απορριμμάτων (241 εκατομμύρια τόνοι). Πέραν αυτών, σημαντικές ποσότητες αποβλήτων παράγονται από τη γεωργία, τη δασοκομία, την αλιεία, τις εξορυκτικές δραστηριότητες, τις δραστηριότητες λατομείων και τους τομείς των υπηρεσιών και του δημοσίου· ωστόσο, δεν υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία για τις ποσότητες.

Σε γενικές γραμμές, η δημιουργία αποβλήτων αυξάνεται με ρυθμούς συγκρίσιμους με αυτούς της οικονομικής ανάπτυξης. Λόγου χάριν, στο διάστημα 1998-2002, η δημιουργία επικίνδυνων αποβλήτων αυξήθηκε κατά 13%, φθάνοντας τα 58,4 εκατομμύρια τόνους, δηλαδή 129 χιλιόγραμμα κατά κεφαλήν και τα οικιακά απορρίμματα, αυξήθηκαν κατά 19% στο διάστημα 1995-2003. Ο τομέας της μεταποίησης παράγει το 40% περίπου όλων των επικίνδυνων αποβλήτων.

Οι ανοδικές αυτές τάσεις στη δημιουργία αποβλήτων αναμένεται να συνεχιστούν, με μεγαλύτερες αυξήσεις στα νέα κράτη μέλη, λόγω των εντονότερων αναπτυξιακών ρυθμών.

Τα αριθμητικά αυτά στοιχεία συνιστούν μέσους όρους για τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και υποκρύπτουν σημαντικές διαφορές, ιδίως μεταξύ των 15 αρχικών κρατών και των 12 νέων. Αφενός, η δημιουργία οικιακών απορριμμάτων στα νέα κράτη μέλη είναι πολύ χαμηλότερη (της τάξεως των 300-350 εκατομμυρίων τόνων) και έχει παραμείνει σε σταθερά επίπεδα ή έχει μειωθεί ελαφρά.

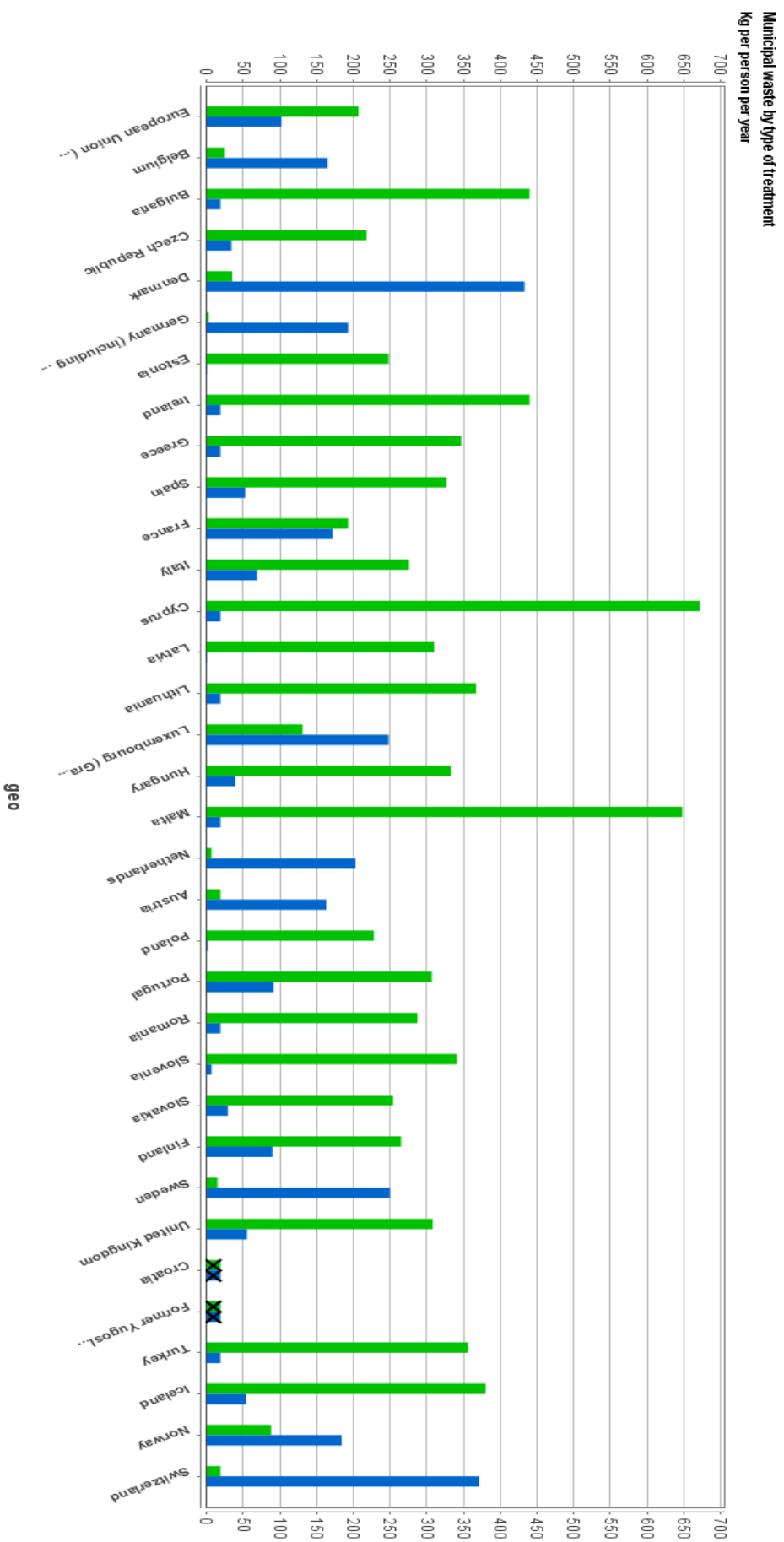
Η εικόνα όσον αφορά την ανακύκλωση των οικιακών απορριμμάτων είναι θετικότερη. Η ποσότητα έχει σχεδόν διπλασιαστεί στο διάστημα 1995-2003, φθάνοντας τα 82,3 εκατομμύρια τόνους. Η αποτέφρωση αυξάνεται αργά και αποδίδει περίπου 8 εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου σε ενέργεια.

Σε ότι αφορά τα απόβλητα μεταποίησης, πολλά κράτη μέλη της ΕΕ αναφέρουν υψηλά ποσοστά ανάκτησης και ανακύκλωσης, με ποσοστά υγειονομικής ταφής περίπου 10%. Στην ΕΕ, τα εν λόγω απόβλητα διοχετεύονται κυρίως σε χώρους υγειονομικής ταφής. [6]

1.4 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα

Η ετήσια παραγωγή στερεών αποβλήτων από τον οικιακό και εμπορικό Τομέα ανήλθε το 2007 σε 5 εκατομμύρια τόνους, με την κατά κεφαλήν παραγωγή να βρίσκεται χαμηλότερα από το μέσο όρο της ευρωπαϊκής ένωσης δηλαδή 448kg ετησίως έναντι 522kg, αλλά συνεχώς αυξανόμενη ακολουθώντας την άνοδο του βιοτικού επιπέδου και την αλλαγή του τρόπου διαβίωσης.

Το 87% της ποσότητας των απορριμμάτων συλλέγεται και διατίθεται συστηματικά, αν και προσωρινά μόνο το 55% αποτίθεται σε οργανωμένους χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ). Η ανακύκλωση, ανήλθε το 2007 στο 24% του βάρους των απορριμμάτων, συμπεριλαμβανομένων των ποσοτήτων από τα 2 εργοστάσια μηχανικής ανακύκλωσης σύμμεικτων απορριμμάτων των Χανίων και της Αθήνας (Άνω Λιόσια).



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα απεικόνισης της ποσότητας αστικών απορριμμάτων που αναποτίθεται στο έδαφος και αποτεφρώνονται σε kg ανά κεφαλή και έτος για διάφορες χώρες [7].

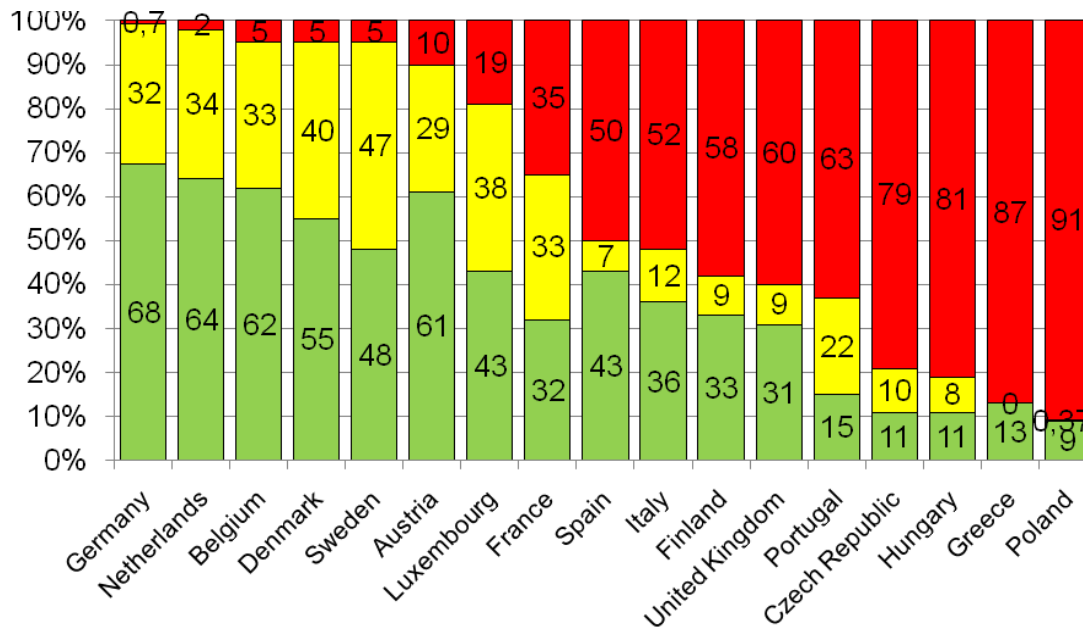
Η σύνθεση των οικιακών απορριμμάτων διαφοροποιείται από το μέσο όρο της ΕΕ. Το πολύ υψηλό ποσοστό οργανικών υλικών, που σχετίζεται με τις διατροφικές συνήθειες, δυσχεραίνει την επίτευξη υψηλού ποσοστού ανάκτησης και εφαρμογής της καύσης ως μεθόδου διαχείρισης απορριμμάτων, λόγω του μεγάλου ποσοστού υγρασίας που συνοδεύει την παρουσία των ζυμώσιμων (βιοαποδομήσιμων) υλικών.

Η διαχείριση στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από την εφαρμογή της ταφής των απορριμμάτων (με διάφορες μορφές) ως αποκλειστικής μεθόδου διάθεσης. Οι διάφορες μορφές εδαφικής εναπόθεσης απορριμμάτων αφορούν την ύπαρξη διάφορων χώρων εναπόθεσης, όπως οι χώροι ανεξέλεγκτης απόθεσης και παλαιού τύπου απόθεσης απορριμμάτων, εκτός από τους χώρους υγειονομικής ταφής. Ένας σύγχρονος χώρος διάθεσης διαθέτει σύστημα αντιπυρικής προστασίας, δίκτυο απορροής όμβριων υδάτων και σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων, σύστημα μόνωσης και στεγανοποίησης για την αποφυγή ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, σύστημα αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου και σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης του ΧΥΤΑ. Σε αντίθεση με όλα αυτά στους χώρους ανεξέλεγκτης απόθεσης τα απορρίμματα διατίθενται σε φυσικές εδαφικές κοιλάτητες, χωρίς καμία επεξεργασία, ενώ στου παλαιού τύπου χώρους απόθεσης τα στερεά απορρίμματα στοιβάζονται και καλύπτονται από χώμα χωρίς εφαρμογή των παραπάνω μέτρων.

Ένα από τα σοβαρά προβλήματα της μεθόδου είναι η δυσκολία εντοπισμού κατάλληλων περιοχών σε οικονομικά αποδεκτές αποστάσεις από αστικές περιοχές, σημαντικότερο όμως είναι το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διάθεσης αστικών αποβλήτων. Από τις συνολικά 6500 χωματερές που υπάρχουν, σύμφωνα με την πιο πρόσφατη καταγραφή, οι 3097 είναι τέτοιοι χώροι (ΧΑΔΑ) από τους οποίους οι 1638 είναι ενεργοί.

Το ποσοστό της ανεξέλεγκτης απόρριψης ή ελλιπούς εφαρμογής της υγειονομικής ταφής παραμένει υψηλό, προκαλώντας προβλήματα ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, ενώ η αυτανάφλεξη, καθώς και η εκούσια καύση των απορριμμάτων στους χώρους αυτούς, ευθύνονται για την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με τοξικά αέρια και, σε ένα ποσοστό της τάξης του 10%, και για την πρόκληση πυρκαγιών.

Πέρα από τις μεθόδους εδαφικής εναπόθεσης, στην Ελλάδα έχουν αρχίσει από το 1986 προγράμματα ανακύκλωσης. Τα ποσοστά ανακύκλωσης όμως είναι ακόμα χαμηλά σε σχέση με τις κατευθύνσεις της ΕΕ αλλά και τις περιβαλλοντικές ανάγκες [5].



■ Ανακύκλωση απορριμμάτων, ■ αξιοποίηση απορριμμάτων για παραγωγή ενέργειας, ■ εδαφική εναπόθεση απορριμμάτων.

Σχήμα 1.3: Διάγραμμα απεικόνισης των μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων σε ποσοστά απορριμμάτων [7].

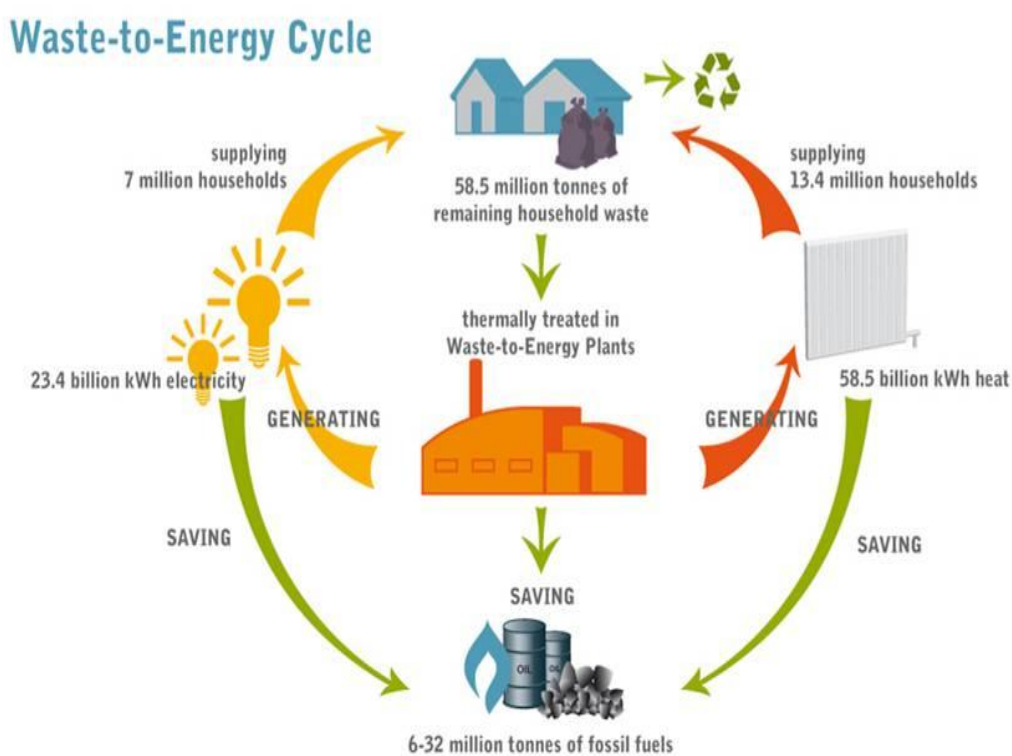
1.5 Η ανάγκη θερμικής επεξεργασίας των απορριμμάτων

Η ανθρώπινη δραστηριότητα οδηγεί στην αναπόφευκτη δημιουργία άχρηστων υλικών που θα πρέπει με κάποιο τρόπο να διαχειριστούν έχοντας ταυτόχρονα και ενεργειακές απαιτήσεις. Ο σκοπός της διαχείρισης απορριμμάτων είναι να παρέχει όσο το δυνατό πιο προσιτά την καλύτερη προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος από τις μολυσματικές συνέπειες των αποβλήτων και να είναι αποδοτική σε όλα τα επίπεδα.

Έχοντας υπόψη την ποικιλία των διαφορετικών άχρηστων υλικών, είναι σημαντικό να είναι διαθέσιμες πολλές μέθοδοι διαχείρισης ώστε να εκμεταλλευόμαστε τα πλεονεκτήματα της κάθε μίας σε κάθε διαφορετική περίπτωση. Δεν υπάρχει μέθοδος που να μπορεί να χειριστεί όλα τα απορρίμματα, εκτός από την εδαφική εναπόθεση. Παρ' όλα αυτά η τελευταία δεν οδηγεί σε ανάκτηση υλικού ή ενέργειας άρα είναι σκόπιμο να θεωρείται η τελευταία λύση και θα πρέπει να εφαρμόζονται μέθοδοι που επιτρέπουν ένα βέλτιστο επίπεδο ανάκτησης. Οι μέθοδοι αποτέφρωσης έχουν δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας (waste to energy) που είναι και η μόνη πρακτική μορφή ανάκτησης για κάποιου είδους απορρίμματα (Σχήμα 1.4).

Τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης, η ταχύτατη αδρανοποίηση των απορριμμάτων, η ελαχιστοποίηση του όγκου τους και η δυνατότητα εγκαταστάσεων κοντά σε αστικά κέντρα με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των μεταφορικών αναγκών καθώς και δυνατότητα παροχής υπηρεσιών θέρμανσης. Στην τελευταία περίπτωση η ενεργειακή απόδοση μπορεί να είναι πού υψηλή (>70%). Επιπλέον, σε αντίθεση με την εδαφική εναπόθεση, δεν παράγεται μεθάνιο και τέλος οι μέθοδοι αυτές μπορούν να διαχειριστούν μεγάλη ποικιλία απορριμμάτων [4].

Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι το κόστος, ο κίνδυνος ατμοσφαιρικής ρύπανσης και κάποια ανεπιθύμητα υπολείμματα όπως η ιπτάμενη τέφρα, όπου θα πρέπει να ταφούν στο έδαφος. Όλες οι μέθοδοι αποτέφρωσης είναι αποδεκτές και αλληλοσυμπληρώνονται ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα.



Σχήμα 1.4: Εξοικονόμηση ενέργειας και ισοδυναμία σε ορυκτά καύσιμα από ενεργειακή αξιοποίηση απορριμμάτων [8].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η μέθοδος της αεριοποίησης

2.1 Γενικά

Η αεριοποίηση αναφέρεται σε ένα σύνολο διαδικασιών που μετατρέπουν στερεά και υγρά καύσιμα σε εύφλεκτο αέριο καύσιμο με ή χωρίς επαφή με το μέσο της αεριοποίησης.

Η αεριοποίηση γενικά πραγματοποιείται μέσω της αντίδρασης του καυσίμου με συγκεκριμένη ποσότητα οξυγόνου, ή συχνά σε συνδυασμό με ατμό. Η θερμότητα που προκύπτει από την εξώθερμη αντίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο συμβάλλει στη διατήρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του αεριοποιητή καθώς και στη διεξαγωγή των ενδόθερμων αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα. Ο ατμός μπορεί να είναι το μέσο αεριοποίησης μόνο όταν υπάρχει εξωτερική πηγή θερμότητας για τις ενδόθερμες αντιδράσεις.

Η επιλογή μιας τεχνολογίας αεριοποίησης εξαρτάται από το είδος του καυσίμου και από τις συνθήκες αποτέφρωσης. Μία όμως κοινή παράμετρος είναι τα θερμοκρασιακά όρια στα οποία λαμβάνει χώρα μια τέτοια διεργασία. Τα όρια είναι μεταξύ 850⁰C και 1100⁰C, όπου το κάτω όριο εξασφαλίζει την πλήρη καταστροφή κάποιων βλαβερών χημικών ουσιών και το άνω όριο εξασφαλίζει την παραγωγή οξειδίων του αζώτου NOx σε αποδεκτά όρια.

Η αεριοποίηση πλεονεκτεί της καύσης διότι ο όγκος του αερίου που προέρχεται από την αεριοποίηση είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με αυτόν της καύσης οπότε απαιτείται και μικρότερη εγκατάσταση και έτσι ενδείκνυται για εφαρμογή σε απομακρυσμένες περιοχές όπου οι ενεργειακές ανάγκες από την αξιοποίηση του καυσίμου είναι μειωμένες. Το αέριο καύσιμο από την αεριοποίηση μπορεί να αξιοποιηθεί σε μονάδες παραγωγής ενέργειας, με καύση για παραγωγή ατμού για κίνηση συστήματος στροβίλου- γεννήτριας.

Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η μειωμένη απόδοση στη μετατροπή του άνθρακα, με αποτέλεσμα ένα μέρος της ενέργειας του καυσίμου να παραμένει στα άκαυστα. Επιπλέον υπάρχουν και απώλειες λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων στη περίπτωση που δεν αξιοποιηθεί από εναλλάκτες θερμότητας.[9],[10]

2.2 Λειτουργία αεριοποίησης

Στους τυπικούς αεριοποιητές λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω διεργασίες σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες η κάθε μία:

1. Ξήρανση, Drying (>150⁰C)

2. Πυρόλυση, Pyrolysis (devolatilization) (150–700°C)
3. Καύση, Combustion (700–1500°C)
4. Αεριοποίηση, Reduction (800–1100°C)

Η πρώτη, η δεύτερη και η τέταρτη διεργασία απορροφούν θερμότητα η οποία προσφέρεται από την εξώθερμη διεργασία της καύσης.

Ξήρανση : Κατά τη διεργασία της ξήρανσης, αποβάλλεται η υγρασία του καυσίμου.

Πυρόλυση: Κατά τη διεργασία της πυρόλυσης γίνεται διαχωρισμός των συστατικών του καυσίμου σε αέρια, υγρά και στερεά παράγωγα. Η πυρόλυση ξεκινά αργά χαμηλότερα από 350°C και συνεχίζει να επιταχύνεται πάνω από τους 700°C. Ουσιαστικά ξεκινά στους 250°C όπου τα θερμικά ασταθή συστατικά αποδεσμεύονται και εξατμίζονται με άλλα πτητικά συστατικά. Τα προϊόντα της πυρόλυσης είναι:

- Ελαφρά αέρια: H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄
- Πίσσα: μαύρο, πηκτό, διαβρωτικό ρευστό που αποτελείται από οργανικές και ανόργανες ουσίες.
- Εξανθράκωμα: Στερεό υπόλειμμα που αποτελείται κυρίως από άνθρακα

Καύση: Η οξείδωση, καύση του άνθρακα είναι μία από τις βασικότερες αντιδράσεις που συμβαίνει μέσα στον αεριοποιητή αφού παράγει όλη τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για τις υπόλοιπες ενδόθερμες αντιδράσεις. Τα παράγωγα της καύσης είναι CO₂ και H₂O. Η καύση περιγράφεται από τις παρακάτω αντιδράσεις:

- $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 393,77 \text{ kJ/mol}$ άνθρακα
- $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O + 742 \text{ kJ/mol}$ H₂

Η τελευταία είναι η οξείδωση του υδρογόνου για παραγωγή ατμού.

Αεριοποίηση: Η αεριοποίηση περιλαμβάνει μια σειρά από ενδόθερμες αντιδράσεις που ενεργειακά υποστηρίζονται από τη διεργασία της καύσης. Συνολικά το στερεό καύσιμο μετατρέπεται κυρίως σε σταθερά αέρια (CO, H₂, CO₂, H₂O, και CH₄), άλλες ανόργανες ενώσεις με συγκεντρώσεις της τάξης των ppm (H₂S, COS, HCl, NH₃, HCN, κτλ), ενώσεις βαρέων υδρογονανθράκων (πίσσες), ενώ απομένει κάποιο ποσοστό στερεού εξανθρακώματος και τέφρας (κυρίως μεταλλικά ανόργανα συστατικά). Οι βασικότερες αντιδράσεις αεριοποίησης είναι οι παρακάτω:

1. Ετερογενής αντίδραση μετατόπισης (Water–gas reaction): η μερική οξείδωση του άνθρακα με ατμό, ο οποίος μπορεί να προέρχεται από

υδρατμούς του αέρα εισόδου ή από τα παράγωγα της πυρόλυσης και καύσης.

- $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO - 131,38 \text{ kJ/kg mol άνθρακα}$
- 2. Αντίδραση boudouard (Boudouard reaction): το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τα υπολείμματα άνθρακα για παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα.
 - $CO_2 + C \rightarrow 2CO - 172,58 \text{ kJ/mol άνθρακα}$
- 3. Αντίδραση μετατόπισης (Shift conversion) : γίνεται αντίδραση του μονοξειδίου με τον ατμό για παραγωγή υδρογόνου που έχει μεγαλύτερη θερμογόνο ικανότητα από το μονοξείδιο του άνθρακα.
 - $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 - 41,98 \text{ kJ/mol}$
- 4. Αντίδραση σχηματισμού μεθανίου (Methanation): η παραγωγή του μεθανίου γίνεται με βάση την παρακάτω αντίδραση.
 - $C + 2H_2 \rightarrow CH_4 - 74,90 \text{ kJ/mol άνθρακα}$

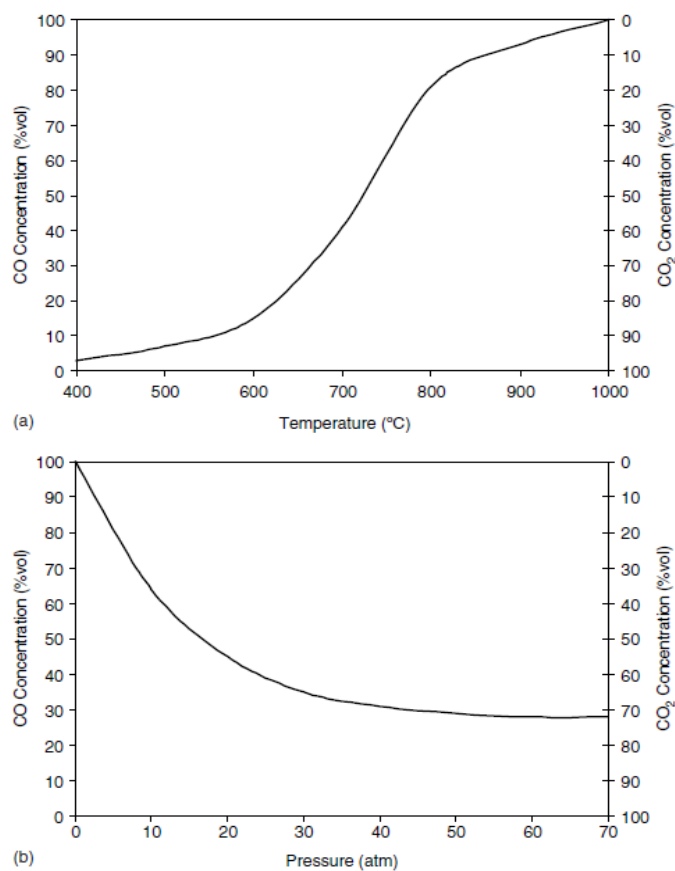
Η σημαντικότερη πρόσμιξη του παραγόμενου αερίου είναι οι βαρείς συμπυκνώσιμοι υδρογονάνθρακες (πίσσα), οι οποίοι είναι ένα μίγμα οξυγονούχων οργανικών ενώσεων που παράγονται κυρίως κατά το στάδιο της πυρόλυσης του υλικού. Οι ενώσεις που περνούν στην αέρια φάση είτε υπόκεινται σε περαιτέρω διάσπαση προς το σχηματισμό σταθερών αερίων είτε συμμετέχουν σε μια σειρά αντιδράσεων προς σχηματισμό πηκτών. Σύμφωνα με ένα γενικά αποδεκτό ορισμό, πίσσα είναι το σύνολο των οργανικών μορίων με μοριακά βάρη μεγαλύτερα από το βάρος του βενζενίου (MBβενζενίου= 78). Η σύσταση της πίσσας είναι πολύπλοκη και εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες στις οποίες λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση και, κυρίως, από τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα [10],[11].

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση του καυσίμου

Το αέριο καύσιμο που παράγεται με τη μέθοδο της αεριοποίησης είναι μείγμα διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου, υδρογόνου, αζώτου κ.α, αλλά η σύσταση του είναι δύσκολο να προβλεφθεί διότι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

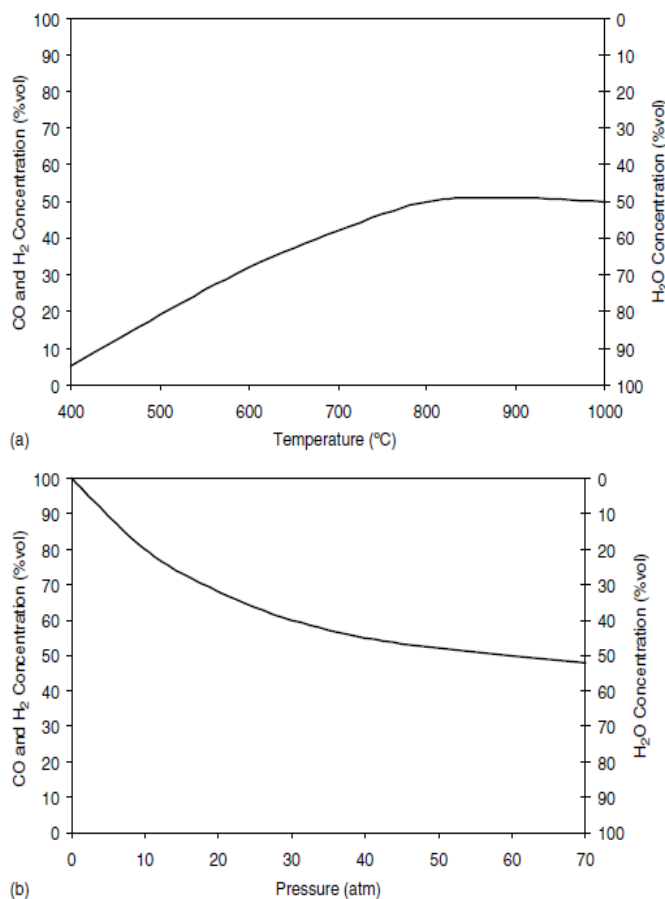
- Σύσταση στερεού καυσίμου
- Μέσο αεριοποίησης
- Πίεση λειτουργίας
- Θερμοκρασία
- Υγρασία του καυσίμου
- Τρόπος επαφής των αντιδρώντων στον αεριοποιητή

Είναι φανερό πως οι παράγοντες αυτοί αφορούν τόσο τις συνθήκες λειτουργίας της αεριοποίησης όσο και τα χαρακτηριστικά του αρχικού καυσίμου. Κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές επηρεάζουν διαφορετικά τη σύσταση του καυσίμου, μέσω της επίδρασης τους στη διαδικασία της αεριοποίησης.



Σχήμα 2.1 Μεταβολή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει (α) της θερμοκρασίας για σταθερή πίεση 1atm και (β) συναρτήσει της πίεσης για σταθερή θερμοκρασία 800°C.

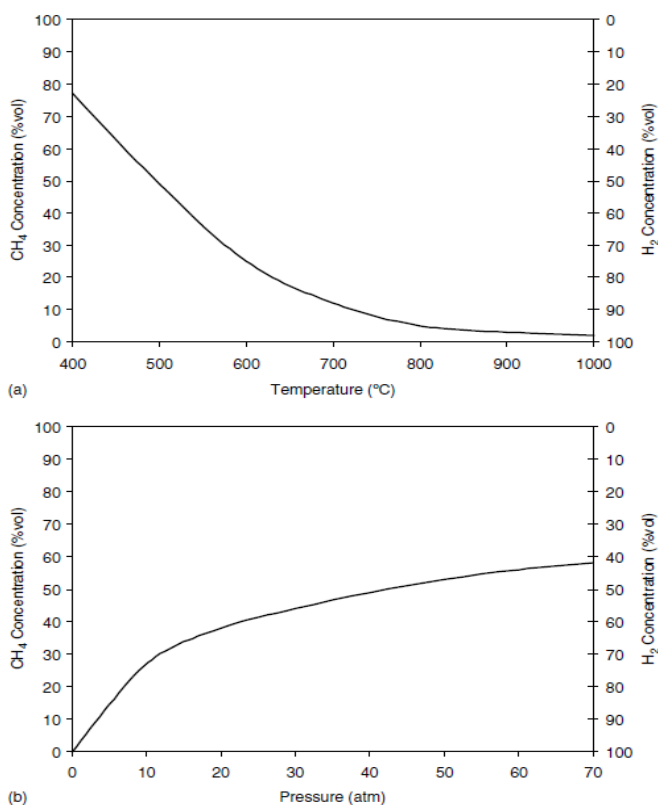
Οι λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση του αερίου είναι η θερμοκρασία και η πίεση του αεριοποιητή και εξετάζεται πως επηρεάζουν κάθε μία από τις αντιδράσεις αεριοποίησης.



Σχήμα 2.2 Μεταβολή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου, υδρογόνου και ατμού συναρτήσει (α) της θερμοκρασίας για σταθερή πίεση 1atm και (β) συναρτήσει της πίεσης για σταθερή θερμοκρασία 800°C.

- Η σύνθεση του μονοξειδίου ευνοείται από την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ το αντίστροφο γίνεται με την πίεση όπου το μονοξείδιο αυξάνεται όσο μειώνεται η πίεση (Σχήμα 2.1).
- Η water-gas αντίδραση, όπου παράγεται μονοξείδιο και υδρογόνο ευνοείται από υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση (Σχήμα 2.2).
- Αντίθετα η σύνθεση του μεθανίου ευνοείται από χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση (Σχήμα 2.3).
- Αύξηση της ποσότητας του ατμού που τροφοδοτείται αυξάνει την παραγωγή υδρογόνου και μειώνει το μονοξείδιο του άνθρακα.
- Το οξυγόνο δεν εμφανίζεται ποτέ στη σύσταση του αερίου, αλλά η μεταβολή του λόγου αέρα καύσης επηρεάζει τη σύσταση του αερίου.

- Με αύξηση του οξυγόνου, αυξάνονται το υδρογόνο και διοξείδιο, τα θερμοκρασιακά επίπεδα στον αντιδραστήρα και η θερμότητα που απελευθερώνεται.



Σχήμα 2. 3 Συγκέντρωση του μεθανίου και του υδρογόνου συναρτήσει (α) της θερμοκρασίας για σταθερή πίεση 1atm και (β) συναρτήσει της πίεσης για σταθερή θερμοκρασία 800°C.

Παράγοντες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του αρχικού στερεού καυσίμου είναι τα πτητικά, η τέφρα, η υγρασία και επηρεάζουν όχι άμεσα τη σύσταση του παραγόμενου αερίου καυσίμου αλλά τη διαδικασία της αεριοποίησης ως εξής:

- Καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα πτητικών, είναι πιο δραστικά και μετατρέπονται ευκολότερα σε αέρια καύσιμα, με μικρότερη παραγωγή εξανθρακωμάτων.
- Καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα πτητικών είναι κατάλληλα για αεριοποίηση αλλά παράγουν καύσιμο με υψηλή ποσότητα πησών που δημιουργεί δυσκολίες στον καθαρισμό του αερίου.
- Η τέφρα στο καύσιμο δεν επηρεάζει άμεσα τη σύσταση του καυσίμου αλλά επηρεάζει πρακτικά τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Η τέφρα θα πρέπει να διαχωρίζεται από το καύσιμο και να απομακρύνεται από την εγκατάσταση με τρόπο τέτοιο ώστε να αποφεύγονται προβλήματα. Σε περίπτωση διαμόρφωσης της εγκατάστασης ώστε η τέφρα να απομακρύνεται σε στερεή

μορφή θα πρέπει η θερμοκρασία του αντιδραστήρα να είναι χαμηλότερη από το σημείο τήξης της τέφρας.

- Υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου οδηγεί στην μείωση της θερμοκρασίας μέσα στον αεριοποιητή, διότι και η εξάτμιση και η αντίδραση του ατμού με τον άνθρακα που έχει περιγραφεί, είναι ενδόθερμες αντιδράσεις. Για ρευστοποιημένες κλίνες θεωρούνται καταλληλότερα τα καύσιμα με περιεκτικότητα υγρασίας που έχει μειωθεί σε ποσοστά 5%-10%. [9]

2.4 Είδη αεριοποιητών

Τα είδη των αεριοποιητών με κριτήριο το μέσο αεριοποίησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Αεριοποιητές με μέσο αέρα
- Αεριοποιητές με μέσο οξυγόνο

Οι αεριοποιητές αέρα παράγουν αέριο καύσιμο με χαμηλή θερμογόνο ικανότητα της τάξης των 5000 με 6000 kJ/kg, και 50% περιεκτικότητα σε άζωτο N.

Οι αεριοποιητές οξυγόνου, λόγω της απουσίας του αζώτου, παράγουν καύσιμο υψηλότερης θερμογόνου ικανότητας, της τάξης των 15.000 kJ/kg, που είναι και πάλι φτωχότερο από το φυσικό αέριο που έχει 50.000 kJ/kg. Για τη λειτουργία τους απαιτείται διαχωριστής αέρα για την παραγωγή του οξυγόνου.

Με κριτήριο τον τρόπο που το αέριο καύσιμο έρχεται σε επαφή με το αρχικό καύσιμο, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Entrained bed, (σχήμα 2.1δ)
- Ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized bed):
 - Αναβρασμού (Bubbling), (σχήμα 2.1β)
 - Ανακυκλοφορίας (Circulating), (σχήμα 2.1γ)
- Spouted bed
- Fixed/moving bed (σχήμα 2.1α)

Η πρώτη κατηγορία αεριοποιητών τροφοδοτούνται με κονιορτοποιημένα συνήθως καύσιμα τα οποία αιωρούνται στον αέρα ή τον ατμό. Η τέφρα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας απομακρύνεται σε υγρή μορφή και είναι κατάλληλα για μονάδες με ισχύ >100MWe και για καύσιμα όπως απόβλητα διυλιστηρίων.

Η δεύτερη κατηγορία έχει δύο υποκατηγορίες που είναι αεριοποιητές αναβρασμού και ανακυκλοφορίας που αναλύονται παρακάτω.

Η Τρίτη κατηγορία έχουν συνήθως αέρα για μέσο αεριοποίησης, ο οποίος διαπερνά ένα στρώμα αδρόκοκκου υλικού με μεγάλη ταχύτητα και συμπαρασύρει υλικό στην επιφάνεια του στρώματος. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου.

Στην τελευταία κατηγορία το μέσο αεριοποίησης διέρχεται από το στρώμα του υλικού καυσίμου και ανάλογα με την κατεύθυνση που ακολουθεί χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- Ανοδικού ρεύματος (Updraft)
- Καθοδικού ρεύματος (Downdraft)
- Sidedraft

Η συνηθέστεροι είναι οι downdraft και ειδικά για αεριοποίηση βιομάζας, χρησιμοποιούνται σε μικρές μονάδες <1.5 MWth. Οι αεριοποιητές αυτοί χωρίζονται σε δύο ζώνες: καύσης και αεριοποίησης. Η καύση που γίνεται παράγει το διοξείδιο του άνθρακα και προσφέρει την απαιτούμενη ενέργεια για να γίνει η αεριοποίηση.[9]

2.5 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης

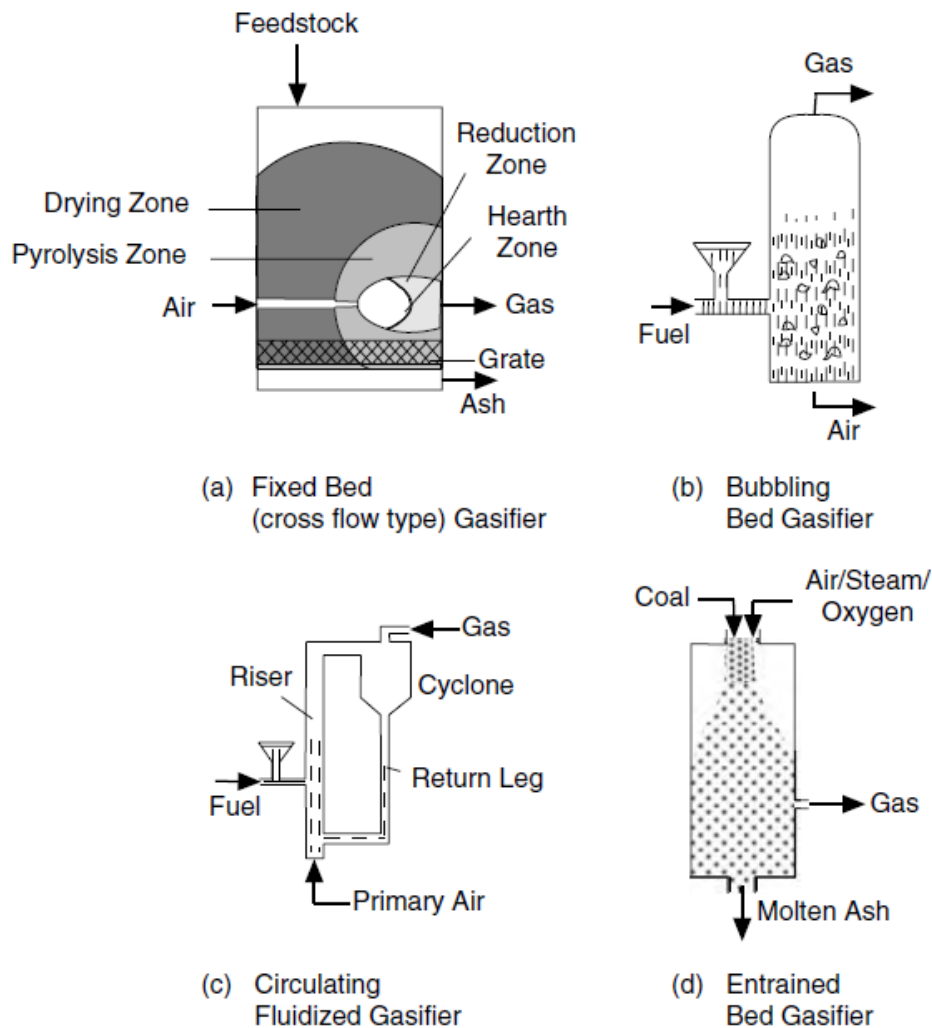
2.5.1 Χαρακτηριστικά

Στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης ο αέρας και το καύσιμο αναμιγνύονται σε ένα θερμό στρώμα κοκκώδους υλικού (κλίνη) που συνήθως είναι άμμος. Λόγω της ανάμειξης αυτής, οι διάφορες φάσεις που λαμβάνουν χώρα, πυρόλυση, καύση, αεριοποίηση δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν, παρόλα αυτά στην κλίνη επιτυγχάνεται ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία, επίσης, μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα με την αλλαγή του λόγου αέρα. Το αρνητικό είναι ότι το παραγόμενο αέριο περιέχει πάντα πίσσες που θα πρέπει με κάποιο τρόπο να απομακρυνθούν.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των τύπων αντιδραστήρα είναι:

- Υψηλότερος συνολικός όγκος έργου
- Βελτιωμένη μεταφορά μάζας και θερμότητας από το καύσιμο

- Υψηλή θερμογόνος αξία
- Μειωμένα υπολείμματα άνθρακα(άκαυστα) char



Σχήμα 2. 4 Διάφορα είδη αεριοποιητών [9]

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι η τέφρα του καυσίμου δε λιώνει και έτσι μπορεί να απομακρυνθεί ευκολότερα.

Σε ένα τυπικό αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης μέρη του στερεού καυσίμου έρχονται σε επαφή με πολύ συγκεκριμένη ποσότητα οξυγόνου καθώς τροφοδοτούνται μέσα στην κλίνη σε συνδυασμό με την τροφοδοσία αέρα ή οξυγόνου. Τα μέρη του καυσίμου θερμαίνονται γρήγορα στη θερμοκρασία της κλίνης και υποβάλλονται σε διεργασίες ξήρανσης και πυρόλυσης.

Η μέθοδος της ρευστοποιημένης κλίνης είναι κατάλληλη για αεριοποίηση βιομάζας. Η περιορισμένη χρήση της οφείλεται στη χαμηλή απόδοση όσον αφορά τη μετατροπή του άνθρακα, εξαιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν

(800°C-1000°C), ώστε να μην προκληθούν συσσωματώματα από την παρουσία της τέφρας στο καύσιμο. Έτσι οι αντιδραστήρες αυτοί είναι κατάλληλοι για καύσιμα που μπορούν να αεριοποιηθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες όπως είναι τα αστικά απορρίμματα και ο λιγνίτης. Επιπλέον επειδή λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, τα περισσότερα καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα μπορούν να αεριοποιηθούν χωρίς να εμφανιστούν προβλήματα συσσωματωμάτων από τήξη της τέφρας.

2.5.2 Είδη αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης.

Με κριτήριο τον τρόπο επαφής αερίου και στερεού χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης αναβρασμού (σχήμα 2.2α)
- Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (σχήμα 2.2β)

Ο αντιδραστήρας αναβρασμού χάρη στον απλό σχεδιασμό και σε άλλα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιείται ευρέως. Ειδικά στην βιομηχανία της βιομάζας βρίσκει εφαρμογές σε μικρή ή μεγάλη δυναμικότητα της τάξης <math><25\text{MW}_{\text{th}}</math>.

Ο αντιδραστήρας ανακυκλοφορίας πλεονεκτεί όσο αφορά τη μετατροπή του στερεού καυσίμου, διότι επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη μεταφορά θερμότητας και μάζας στο χώρο της κλίνης, και ο χρόνος παραμονής του καυσίμου είναι μεγαλύτερος ώστε να αυτό να αντιδράσει αποτελεσματικότερα. Επιπλέον υπερτερούν και λόγω του μικρού μεγέθους κατασκευής. Βρίσκουν εφαρμογή και σε μεγάλες μονάδες 100 MW_{th} και άνω και κυρίως για υλικά γαιάνθρακα και λιγνίτη.

Με κριτήριο το μέσο αεριοποίησης χωρίζονται σε αεριοποιητές με μέσο:

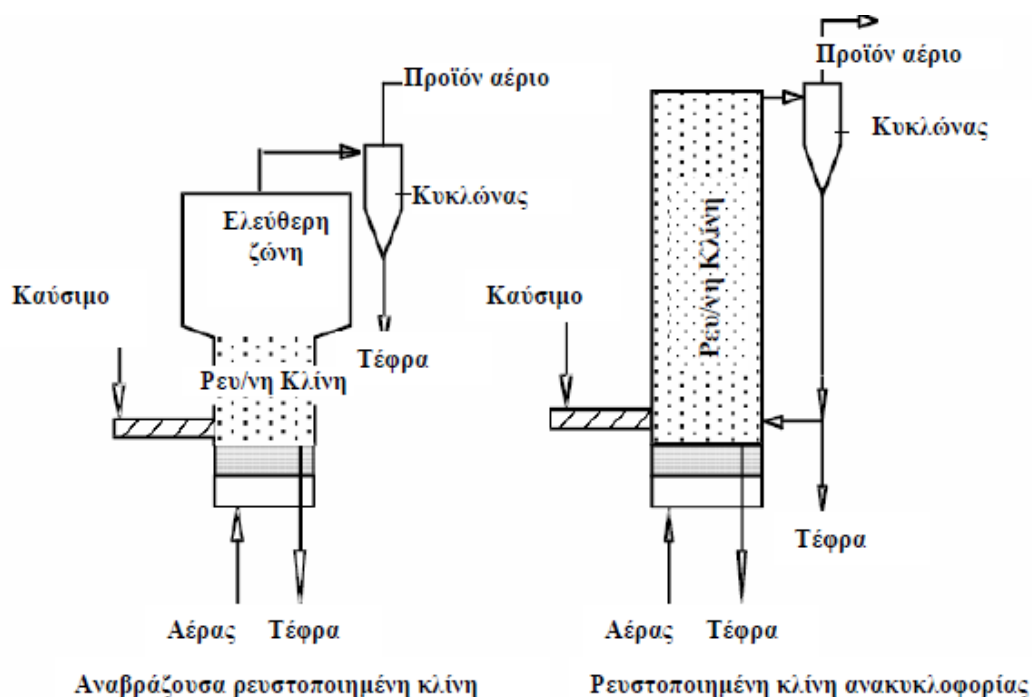
- Αέρα
- Οξυγόνο (άμεση αεριοποίηση)
- Ατμό (έμμεση αεριοποίηση)

Οι δύο πρώτες κατηγορίες έχουν αναλυθεί παραπάνω για την τελευταία με μέσο ατμό απαιτείται πηγή θερμότητας για τις ενδόθερμες αντιδράσεις. Η αεριοποίηση με ατμό έχει τα ίδια πλεονεκτήματα με την άμεση αεριοποίηση δηλαδή παραγωγή αερίου υψηλής θερμογόνου ικανότητας λόγω της απουσίας του αζώτου. [10]

Με κριτήριο την πίεση λειτουργίας χωρίζονται σε:

- Ατμοσφαιρικής πίεσης
- Συμπίεσης

Αεριοποιητές με πίεση λειτουργίας την ατμοσφαιρική αποτελούν παλαιά αλλά καθιερωμένη τεχνολογία σε αντίθεση με αυτούς που έχουν πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, που αποτελούν μια νέα εξέλιξη και μια υποσχόμενη μέθοδο.



Σχήμα 2. 5 Είδη ρευστοποιημένης κλίνης και περιγραφή λειτουργίας. [9]

Με κριτήριο τον τρόπο πρόσδοσης θερμότητας χωρίζονται σε αντιδραστήρες:

- Άμεσης θέρμανσης
- Έμμεσης θέρμανσης

Στην πρώτη περίπτωση της άμεσης θέρμανσης, η θερμότητα προέρχεται από την οξείδωση μέρους του υλικού. Στην έμμεση θέρμανση η θερμότητα προέρχεται από θερμό μέσο το οποίο θερμαίνεται αντίστοιχα από καύση που πραγματοποιείται σε ξεχωριστό αντιδραστήρα.

2.6 Διαδικασία ρευστοποίησης

Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης λειτουργούν και εξασφαλίζουν την αεριοποίηση σε συνδυασμό με τη διαδικασία της ρευστοποίησης. Ρευστοποίηση είναι η ιδιότητα των σωματιδίων της ύλης να διατηρούνται σε κατάσταση αιώρησης με τη διέλευση από αυτά ενός ρευστού. Αυτή η ιδιότητα βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα μεταφοράς μάζας και θερμότητας, π.χ. αντιδραστήρες καύσης, αεριοποίησης, ομογενή ανάμιξη υλικών, καθώς επιτυγχάνεται άριστη επαφή του ρευστού και των αιωρούμενων σωματιδίων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των

ρευστοποιημένων στερεών σωματιδίων είναι ότι συμπεριφέρονται ως υγρό το οποίο ζέει. Έτσι, ισχύει η αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων, η επιφάνεια του στρώματος των σωματιδίων μένει πάντα οριζόντια και σημειώνεται σημαντική πτώση πίεσης καθ' ύψος του δοχείου που τα περιέχει. Η λειτουργία της ρευστοποιημένης κλίνης βασίζεται σε στρώμα άμμου το οποίο διατηρείται σε ρευστή κατάσταση καθώς το διαπερνά ζεστό ρεύμα αέρα, που αποτελεί και τον αέρα καύσης. Η διαδικασία λειτουργεί σε μέγιστα θερμοκρασιακά όρια από 750°C έως 1000°C αλλά τυπικότερα μεταξύ 750°C και 850°C.

Βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό της ρευστοποιημένης κλίνης είναι ότι στο σημείο έναρξης της ελάχιστης ρευστοποίησης, το οποίο επιτυγχάνεται για μια ελάχιστη (ή οριακή) παροχή \dot{V}_{mf} επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ της δύναμης του βάρους των σωματιδίων (gravity force), και της συνδυασμένης ανωστικής δύναμης (buoyancy force) με τη δύναμη τριβής που ασκείται από το ανερχόμενο αέριο προς τα σωματίδια (drag force), με αποτέλεσμα να εξουδετερώνονται οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των σωματιδίων και να διατηρούνται σε κατάσταση συνεχούς αιώρησης. Σε αυτό το οριακό σημείο η πτώση πίεσης σε οποιαδήποτε περιοχή της κλίνης ισούται με τη δύναμη λόγω βάρους των σωματιδίων δια της επιφάνειας διατομής του αντιδραστήρα σε αυτή την περιοχή. Πέρα από αυτό το σημείο ισορροπίας η αυξανόμενη παροχή οδηγεί στο σχηματισμό διακριτών φυσαλίδων και καναλιών αερίου μέσω της κλίνης, που συνοδεύεται από έντονη ανάδευση του υλικού. Κατά την έναρξη της ρευστοποίησης το διάκενο της κλίνης των σωματιδίων αυξάνεται και παραμένει (όπως και ο όγκος της ρευστοποιημένης κλίνης) ο ίδιος με τον όγκο που έχει κατά την ελάχιστη ρευστοποίηση του. Το σαφές άνω όριο της κλίνης των σωματιδίων χάνεται καθώς εκεί πλέον επικρατεί νέφος σωματιδίων από την εκτόνωση των ανοδικά κινούμενων φυσαλίδων.

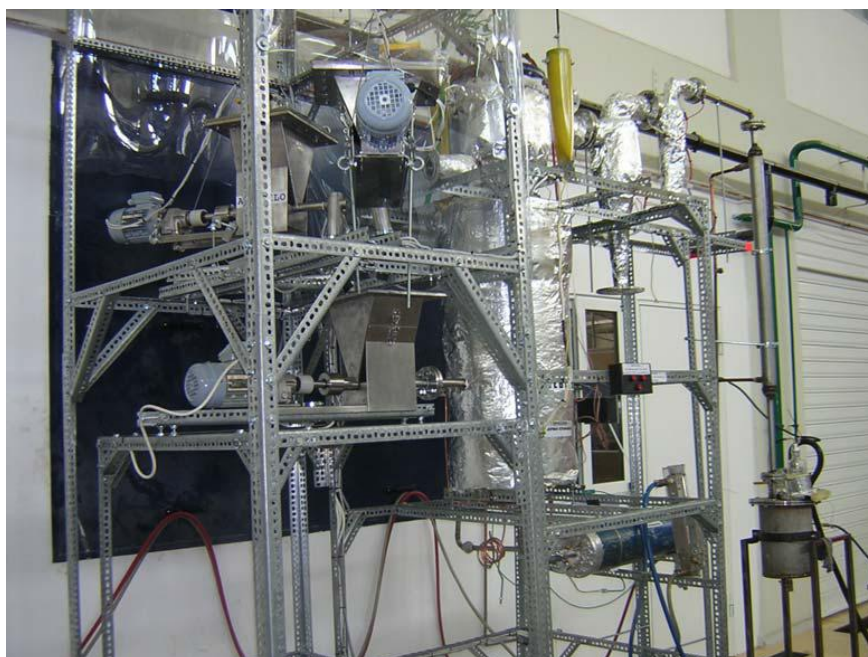
Δύο είναι οι βασικοί τύποι ρευστοποιημένης κλίνης που χρησιμοποιούνται και είναι η κλίνη αναβρασμού και με ανακύκλωση. Στον πρώτο τύπο η ταχύτητα του αέρα εισόδου παραμένει τέτοια ώστε να μην ξεπερνά το όριο που θα οδηγούσε το υλικό της κλίνης να παρασυρθεί εκτός του αντιδραστήρα. Αντίθετα στη ρευστοποιημένη κλίνη με ανακύκλωση η ταχύτητα του αέρα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να παρασύρει το υλικό της κλίνης το οποίο παγιδεύεται στην πορεία και επιστρέφει στο λέβητα, η διαδικασία αυτή επιτρέπει να καεί μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου και να μεταφερθεί μεγαλύτερη θερμότητα μέσω του αέρα. [11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πειραματική εγκατάσταση

3.1 Περιγραφή της εγκατάστασης

Στο εργαστήριο ατμοπαραγωγών του τομέα θερμότητας του ΕΜΠ έγινε εφαρμογή της διαδικασίας της αεριοποίησης σε αστικά απορρίμματα. Ο αντιδραστήρας του εργαστηρίου στον οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα είναι ρευστοποιημένης κλίνης αναβρασμού με μέσο αεριοποίησης αέρα. Η εγκατάσταση του αντιδραστήρα μπορεί να χωριστεί σε τρία τμήματα, το ένα αφορά την τροφοδοσία του καυσίμου, το δεύτερο είναι το κύριο τμήμα όπου γίνεται η αεριοποίηση και το τρίτο αφορά τις διεργασίες που γίνονται μετά την παραγωγή του αερίου καυσίμου. Επιπλέον την πειραματική εγκατάσταση απαρτίζουν και τα μετρητικά όργανα καθώς και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, που λαμβάνει σήματα από τον αντιδραστήρα.

Το κύριο μέρος του αντιδραστήρα έχει κυλινδρική μορφή ύψους 1,3μ και εσωτερικής διαμέτρου 8,9 cm ενώ το πάνω τμήμα του έχει ύψος 300mm και διάμετρο 200mm και ονομάζεται ζώνη απεμπλοκής (freeboard). Το υλικό του είναι ανοξείδωτος χάλυβας (Σχήμα 3.1).

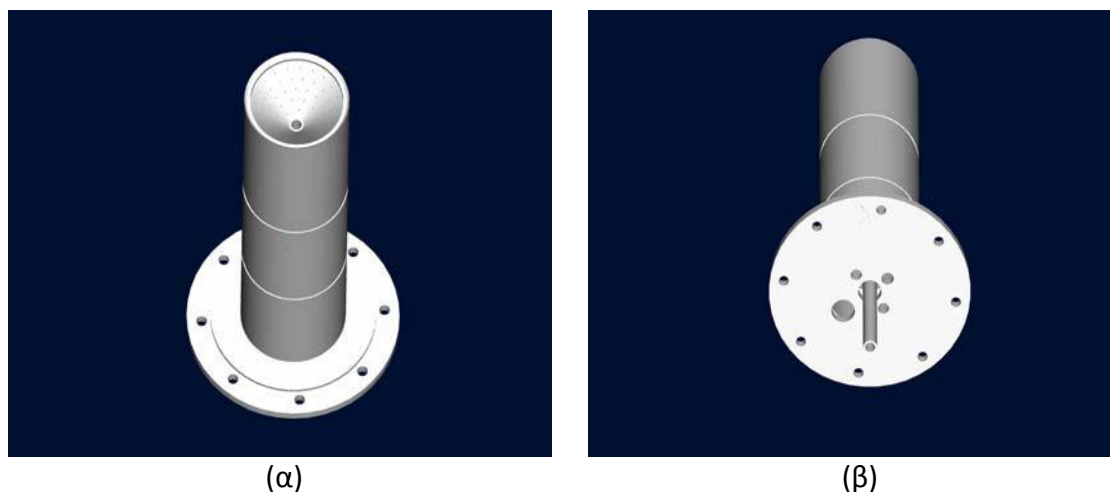


Σχήμα 3.1 Φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης

Το κάτω τμήμα του αντιδραστήρα φέρει εξωτερικά ηλεκτρικές αντιστάσεις ενώ ολόκληρος είναι μονωμένος με υαλοβάμβακα και κεραμοβάμβακα. Εσωτερικά του αντιδραστήρα υπάρχουν θερμοστοιχεία τύπου K κατάλληλα τοποθετημένα σε διάφορα ύψη για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, τα οποία εισέρχονται από το άνω και κάτω καπάκι του αντιδραστήρα, συγκεκριμένα δέκα θερμοστοιχεία από το πάνω καπάκι με μεταξύ τους απόσταση περίπου 10cm και ένα θερμοστοιχείο από το κάτω καπάκι.

Το άνω καπάκι φέρει ακόμα βάνα για γέμισμα του αντιδραστήρα με το υλικό που είναι το μέσο της ρευστοποίησης, οπή για σύνδεση με σωλήνα δειγματοληψίας του αερίου που παράγεται, σωλήνα που συνδέεται με όργανο μέτρησης της πίεσης. Το κάτω καπάκι φέρει οπή από όπου διέρχεται ο σωλήνας του διασκορπιστή, σωλήνα συνδεδεμένο για την είσοδο του αέρα καθώς και σωλήνα για μέτρηση της πίεσης.

Ο διασκορπιστής είναι κυλινδρικό εξάρτημα που εισέρχεται στο εσωτερικό του κάτω τμήματος του αντιδραστήρα. Ο διασκορπιστής στο πάνω τμήμα του είναι κωνικός και έχει διάσπαρτες οπές διαμέτρου λίγων χιλιοστών, επιπλέον κατά μήκος του υπάρχει μεταλλικός αγωγός συνδεδεμένος με την κορυφή του κώνου στο χαμηλότερο τμήμα (κέντρο) του διασκορπιστή όπου υπάρχει οπή. Ο αγωγός καταλήγει στο κάτω μέρος του εξαρτήματος και από εκεί εκτός του αντιδραστήρα αφού εξέλθει από το κάτω καπάκι στεγανοποίησης του συστήματος. Το ανώτερο τμήμα, όπου βρίσκεται ο διασκορπιστής έχει αντεστραμμένο κωνικό σχήμα και παρέχει τη δυνατότητα εν θερμώ αποβολής του υλικού της κλίνης χωρίς να είναι ανάγκη ο αντιδραστήρας να αποσυναρμολογηθεί εντελώς (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 Απεικόνιση του διασκορπιστή σε δύο όψεις (α),(β)

Το τμήμα τροφοδοσίας της εγκατάστασης αποτελείται από τρία σιλό. Τα δύο σιλό που περιέχουν καύσιμο ή καύσιμα τροφοδοτούν το τρίτο σιλό, συνδεδεμένα με αυτό με ελαστικό αγωγό ώστε το υλικό να διέρχεται από τα πάνω σιλό στο κάτω που είναι συνδεδεμένο άμεσα με τον αντιδραστήρα και τον τροφοδοτεί. Η τροφοδοσία γίνεται με περιστροφική κίνηση κοχλιών που είναι ανοξείδωτα τρυπάνια για τσιμέντο. Η κίνηση των κοχλιών γίνεται με ηλεκτροκινητήρες. Το καπάκι του πάνω σιλό έχει βάνα για την τροφοδοσία του καυσίμου καθώς και οπή για σύνδεση αγωγού τροφοδοσίας αζώτου. Το σημείο που ο αγωγός τροφοδοσίας συνδέεται με το εσωτερικό του αντιδραστήρα είναι περίπου 8cm πάνω από το διασκορπιστή.

Το τμήμα μετά τον αντιδραστήρα αποτελείται από δύο κυκλώνες (Σχήμα 3.3α) διαφορετικής διαμέτρου για την κατακράτηση σωματιδίων και ιπτάμενης τέφρας που έχουν παρασυρθεί μαζί με το αέριο. Οι κυκλώνες φέρουν βάνες για το άδειασμα τους. Οι κυκλώνες θερμαίνονται εξωτερικά με ηλεκτρικές αντιστάσεις ώστε να μην επιτρέπεται η συμπύκνωση πρισών καθώς θα δημιουργούσε μόνιμες επικαθίσεις τέφρας στο εσωτερικό τους. Ακολουθεί σύστημα ψύξης-συμπύκνωσης με νερό για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συμπυκνώσιμων ενώσεων (κυρίως πρισών και υδρατμού) που σχηματίστηκαν στις συνθήκες διεξαγωγής της αεριοποίησης.



(α)



(β)

Σχήμα 3.3 (α) οι κυκλώνες της εγκατάστασης, (β) ηλεκτρικά θερμαινόμενος φούρνος για προθέρμανση του αέρα εισαγωγής.

Στα διάφορα σημεία δειγματοληψίας του αερίου υπάρχουν φίλτρα για την απομάκρυνση σωματιδίων. Μία γραμμή δειγματοληψίας, θερμαινόμενη με κεραμικό φίλτρο ξεκινά από το πάνω μέρος του αντιδραστήρα και καταλήγει σε συσκευή ψύξης και καθαρισμού του αερίου για την είσοδο του στα μετρητικά όργανα (Σχήμα 3.4α).

Το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιείται (SICK MAIHAK S710) και φαίνεται στο σχήμα 3.4γ μετράει τη σύσταση του αερίου ως προς τις συγκεντρώσεις των CO, CO₂, CH₄, O₂, H₂. Αντίστοιχες συγκεντρώσεις δίνονται και από το λογισμικό του υπολογιστή που συνδέεται με τα μετρητικά όργανα (Σχήμα 3.4β). Το πρόγραμμα του υπολογιστή δίνει τη δυνατότητα πλήρους εποπτείας αυτών που γίνονται μέσα

στον αντιδραστήρα καθώς εμφανίζει όλες τις θερμοκρασίες καθ ύψος, τη μέση θερμοκρασία, τη διαφορά πίεσης καθώς και διαγράμματα πίεσης και θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου διεξαγωγής των πειραμάτων. Μέσω του υπολογιστή γίνεται ακόμα ρύθμιση της παροχής του αέρα και του αζώτου. Ο πίνακας ελέγχου που δίνει σήματα στον αντιδραστήρα και συνδέεται με τον υπολογιστή, εκτός από όλες τις ασφάλειες που απαιτούνται για τη λειτουργία της εγκατάστασης, έχει διακόπτες ρύθμισης των θερμοκρασιών των αντιστάσεων καθώς και των συχνοτήτων λειτουργίας των κινητήρων των σιλό, επομένως και των στροφών και τελικά της παροχής του καυσίμου. [11]

3.2 Λειτουργία αντιδραστήρα

Αρχικά γίνεται το γέμισμα του αντιδραστήρα με άμμο, συγκεκριμένης κοκκομετρίας ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος, από τη βάνα στο άνω καπάκι.

Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από τη βάση του αντιδραστήρα αφού πρώτα προθερμανθεί περνώντας από ηλεκτρικά θερμαινόμενο φούρνο (Σχήμα 3.3β), ο οποίος αποτελείται από τέσσερις κυλινδρικές ηλεκτρικές αντιστάσεις ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται και για ανάκτηση των απωλειών θερμότητας. Ο αέρας που τροφοδοτείται διέρχεται μέσα από το διασκορπιστή και συγκεκριμένα μέσα από τις μικρές οπές (σύνολο επιφάνειας διέλευσης ρευστού ~5%, διάμετρος οπών 1 mm) της κωνικής επιφάνειας του. Το εξάρτημα αυτό εξυπηρετεί την ομαλή διοχέτευση του αέρα προς το υλικό της κλίνης ώστε να πραγματοποιηθεί ρευστοποίηση και να αποφευχθεί η δημιουργία καναλιών που θα επιτρέπει στον αέρα να διαπερνά χωρίς να ρευστοποιεί.

Παράλληλα γίνεται και η τροφοδοσία του καυσίμου από τα άνω σιλό στο κάτω και τελικά στον αντιδραστήρα. Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται η ομαλότερη παροχή καυσίμου ώστε να εξισορροπούνται οι διακυμάνσεις της παροχής των δοσιμετρικών σιλό και να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη ροή. Τα σιλό είναι 100% στεγανά σε μεγάλες πιέσεις λειτουργίας. Μέσα από το άνω σιλό γίνεται και η τροφοδοσία μικρής παροχής αζώτου με σκοπό να αποφευχθεί η είσοδος του αερίου μέσα από τα σιλό και μεταφορά θερμότητας στο καύσιμο. Το άζωτο επιλέγεται επειδή δεν είναι ικανό να αντιδράσει με το στερεό καύσιμο, όπως θα γινόταν με τον αέρα σε πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας. Για τη ρύθμιση της παροχής του αέρα και του αζώτου χρησιμοποιούνται παροχόμετρα μάζας.

Για να πραγματοποιηθεί αεριοποίηση θα πρέπει η κλίνη να φτάσει μια θερμοκρασία υψηλότερη των 700°C. Η απαραίτητη θερμότητα για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων αεριοποίησης εξασφαλίζεται από τις

αντιστάσεις που βρίσκονται στο κάτω τμήμα του αντιδραστήρα. Το σύστημα των ηλεκτρικών αντιστάσεων ελέγχεται με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή PID.

Όταν λειτουργεί ο αντιδραστήρας μπορούμε να έχουμε μια εικόνα θερμοκρασιών και πιέσεων στο εσωτερικό του, μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Το αέριο καύσιμο που παράγεται ακολουθεί μια πορεία αρχικά μέσω της freeboard στην οποία επιτυγχάνεται μείωση της ταχύτητας του παραγόμενου αερίου για τον περιορισμό της απομάκρυνσης του υλικού της κλίνης με συμπαρασυρμό. Έπειτα ένα μέρος περνά από γραμμή δειγματοληψίας με φίλτρα, από συσκευή ψύξης και καθαρισμού και τελικά στα όργανα μέτρησης της σύστασης του, ενώ το υπόλοιπο περνώντας από σύστημα ψύξης με νερό καταλήγει με σωλήνες στο περιβάλλον για αξιοποίηση. [11]



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3.4 (α) φωτογραφία οθόνης του υπολογιστή που απεικονίζει θερμοκρασίες κλίνης και την πορεία του πειράματος, (β) φωτογραφία του συστήματος ψύξης-συμπύκνωσης αερίου, (γ) φωτογραφία μετρητικού οργάνου

3.3 Μετατροπές της εγκατάστασης

Για τη διεξαγωγή και τις απαιτήσεις των πειραμάτων έγιναν κάποιες μετατροπές στην εγκατάσταση του εργαστηρίου. Οι μετατροπές αυτές είτε έγιναν από την αρχή ως βασική προϋπόθεση για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, είτε προέκυψαν στην πορεία λόγω προβλημάτων που εμφανίζονταν στην πορεία των πειραμάτων. Η τελική μορφή του αντιδραστήρα φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Για την έναρξη λειτουργίας του αντιδραστήρα έγινε μια σειρά εργασιών για να εξασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Αρχικά έγινε αλλαγή όλων των στεγανωτικών δακτυλίων στα καπάκια του αντιδραστήρα. Επιπλέον προστέθηκε στεγανωτική ταινία στα καπάκια των σιλό όπως και στεγανωτικά στα συνδετικά σημεία των αγωγών. Ακολούθησε έλεγχος στεγανότητας του αντιδραστήρα σε συνδετικά σημεία που θα υπήρχε πιθανότητα διαρροής. Έγινε αλλαγή όλων των θερμοστοιχείων, από τα οποία δέκα εισέρχονται από το πάνω καπάκι και τοποθετήθηκαν με διαφορά ύψους περίπου 10cm και ένα θερμοστοιχείο από το κάτω καπάκι. Έγινε ακόμα αλλαγή όλων των κεραμικών φίλτρων στους αγωγούς καθαρισμού του αερίου. Τέλος απομονώθηκε το ένα από τα άνω σιλό αφού τα πειράματα δεν απαιτούσαν συνδυασμό καυσίμων.

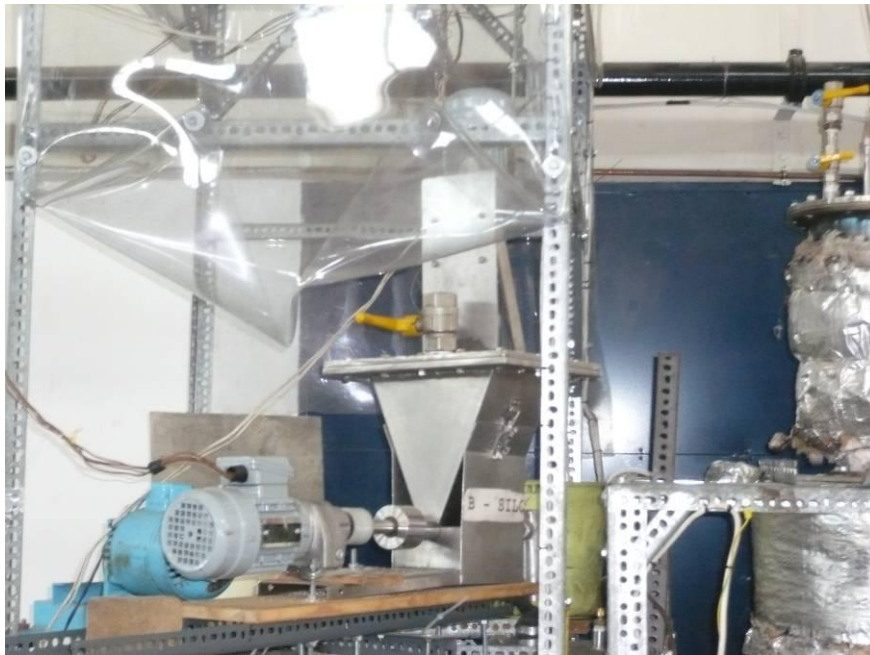
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εμφανίστηκαν διάφορα προβλήματα τα οποία οδήγησαν στην ανάγκη για αλλαγές της εγκατάστασης προκειμένου να δοθούν λύσεις.



Σχήμα 3.5 Απεικόνιση πειραματικής εγκατάστασης μετά τις μετατροπές

Το πρώτο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν ανεπαρκής παροχή καυσίμου ακόμα και στις μέγιστες στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Για αυτό το λόγο έγινε αλλαγή

των μειωτήρων με άλλους μικρότερης σχέση μετάδοσης ώστε να εξασφαλίζονται περισσότερες στροφές και άρα μεγαλύτερη παροχή καυσίμου.



(α)



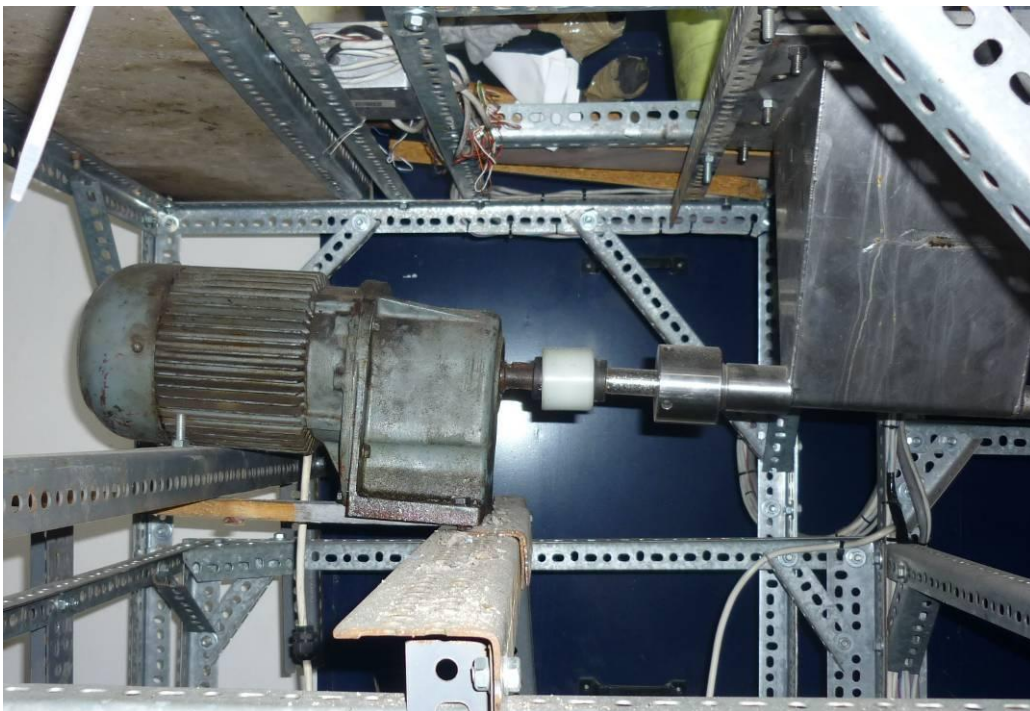
(β)

Σχήμα 3.6 (α) Σύστημα ανάδευσης του άνω σιλό, (β) Λεπτομέρεια του κινητήρα του συστήματος ανάδευσης.

Εκτός από τη μικρή παροχή καυσίμου δεν ήταν ομοιόμορφη δηλαδή το καύσιμο δεν είχε μια ομαλή και σταθερή ροή αλλά υπήρχαν στιγμές που δεν τροφοδοτούταν η κλίση με υλικό. Έτσι η εγκατάσταση ενισχύθηκε με μηχανισμό ανάδευσης του υλικού για να υποβοηθηθεί η τροφοδοσία του. Ο μηχανισμός αυτός προσαρμόστηκε στο καπάκι του άνω σιλό. Στην ουσία το ίδιο το καπάκι έφερε σπή

κατάλληλη για να το διαπερνά κοχλίας που περιστρεφόμενος κάθετα σε σχέση με τον κοχλία τροφοδοσίας ωθούσε το υλικό προς την έξοδο του σιλό. Ο κοχλίας περιστρεφόταν από κινητήρα κατάλληλα προσαρμοσμένο σε βάση πάνω στο καπάκι του σιλό (Σχήμα 3.6α,β).

Το υλικό όμως λόγω της υφής και μορφής του καθώς τροφοδοτούταν από τον κοχλία στην κλίση λόγω του ότι αρχικά θρυμματιζόταν και γινόταν σα σκόνη και δεύτερον λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στο σημείο τροφοδοσίας, προσκολλούσε στα περύγια του κοχλία με αποτέλεσμα να περιστρέφεται μαζί με αυτόν δημιουργώντας έτσι μία μάζα που συνεχώς αυξανόμενη δημιουργούσε αντίσταση στην ίδια την κίνηση του κοχλία, μέχρι και διακοπή της λειτουργίας του, πέρα από τη διακοπή τροφοδοσίας του καυσίμου. Έτσι ακολούθησε αλλαγή του κινητήρα με άλλον μεγαλύτερης ισχύος για να μη διακόπτεται ούτε η λειτουργία του ούτε η τροφοδοσία του καυσίμου (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Κινητήρας του σιλό τροφοδοσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παραγωγή καυσίμου stabilat

4.1 Επεξεργασία απορριμμάτων

Για μια σωστή και αποδοτική διαδικασία αεριοποίησης απαιτείται ένα αρκετά ομογενοποιημένο και πλούσιο σε άνθρακα καύσιμο. Οι δυσκολίες αεριοποίησης αστικών απορριμμάτων υπόκεινται στην ετερογένεια που τα χαρακτηρίζει σαν καύσιμο. Έτσι η αξιοποίηση τους με μεθόδους όπως η αεριοποίηση δε γίνεται στην αρχική μορφή τους αλλά αφού υποστούν άλλες διεργασίες από τις οποίες παράγεται ένα δευτερογενές καύσιμο RDF (refused derived fuel). Η επεξεργασία των απορριμμάτων γίνεται σε εγκαταστάσεις μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας όπου αρχικά γίνεται βιολογική ξήρανση με σκοπό τη μείωση της υγρασίας και του όγκου τους, στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός των άχρηστων υλικών και τέλος παράγεται το δευτερογενές καύσιμο RDF (Refused Derived Fuel).

Η εταιρεία Herhof GmbH έχει αναπτύξει μια μέθοδο επεξεργασίας των απορριμμάτων με βίο-ξήρανση. Με την προτεινόμενη τεχνολογία επιτυγχάνονται σε πολύ σημαντικό βαθμό τόσο η ανάκτηση των αξιοποιήσιμων κλασμάτων, σε περίπτωση επεξεργασίας σύμμεικτων απορριμμάτων, όσο και του ενεργειακού περιεχομένου τους με την παραγωγή ενός στερεού καυσίμου που ονομάζεται stabilat.

Με την τεχνολογία Herhof-stabilat ο όγκος των απορριμμάτων μειώνεται βιολογικά με την απομάκρυνση της υγρασίας, ώστε τελικά το ποσοστό της υγρασίας που παραμένει να είναι μικρότερο από 15%. Έτσι διευκολύνεται και ο μηχανικός διαχωρισμός των υλικών. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας γίνεται διαχωρισμός των επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών, ώστε να ανακυκλωθούν. Το οργανικό κλάσμα που παραμένει συμπιέζεται σε παλέτες και αποτελεί τη νέα μορφή πηγής ενέργειας. Ένα σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής του stabilat φαίνεται στο σήμα 4.2

Η διαδικασία γίνεται σε τρεις φάσεις: Η πρώτη φάση αφορά την απομάκρυνση εξωγενών και βλαπτικών ουσιών από το υλικό το οποίο στη συνέχεια τεμαχίζεται σε τεμάχια μικρότερα των 250mm, και μεταφέρεται με πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ανυψωτικών μηχανημάτων στο λεγόμενο bio-box.

Στη δεύτερη φάση που ονομάζεται stabilization και λαμβάνει χώρα στο bio-box γίνεται η απομάκρυνση της υγρασίας με βιολογική ξήρανση. Αφού γεμίσει η συγκεκριμένη εγκατάσταση, λαμβάνει χώρα αερόβια βιολογική επεξεργασία, δηλαδή κομποστοποίηση. Κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη βιολογική οξείδωση ετερογενών οργανικών υλικών με τη βοήθεια ετερότροφων μικροοργανισμών (βακτήρια-μύκητες), οι οποίοι αποδομούν τα οργανικά συστατικά παρουσία οξυγόνου. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης που διαρκεί επτά ημέρες παρέχεται ο

βιολογικά απαιτούμενος αέρας για να επιτυγχάνεται η βιο-αποδόμηση. Η παραγόμενη θερμότητα κατά τις αντιδράσεις βιο-αποδόμησης χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της υγρασίας και κατά συνέπεια την ξήρανση των υλικών. Κατά αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται μείωση της μάζας των εισερχόμενων υλικών σε ποσοστό 30-35%, το οποίο αντιστοιχεί σε απώλεια περίπου 75% υγρασίας των εισερχόμενων υλικών. Το υλικό που παράγεται μετά τη διεργασία της βιο-ξήρανσης έχει υγρασία της τάξης του 15-20% και ενεργειακό περιεχόμενο περίπου 12 kJ/kg.

Μετά τη βιολογική ξήρανση τα υλικά διαχωρίζονται βάσει των διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων τους, ώστε να ανακτηθούν τα ανακυκλώσιμα και αυτά με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Η προηγηθείσα ξήρανση επιτρέπει τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των ανακυκλώσιμων. Σε αυτή τη φάση γίνεται και η απομάκρυνση των αδρανών υλικών, δηλαδή τα ανόργανα συστατικά που είναι γυαλί, κεραμικά και μέταλλα τα οποία διαχωρίζονται σε σιδηρούχα και μη –σιδηρούχα ώστε να παραμείνει το εύφλεκτο υλικό που αποτελεί μια νέα μορφή καυσίμου. Οι διεργασίες για την παραγωγή του stabilat φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 4.1).

Το παραγόμενο προϊόν της βιο-ξήρανσης, λόγω της απόλυτα ελεγχόμενης προεπεξεργασίας του πληροί όλες τις προϋποθέσεις ενός καυσίμου που είναι:

- Ομοιογένεια υλικού,
- υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο,
- ελαχιστοποίηση των βλαβερών υλικών, χαμηλό περιεχόμενο σε βαρέα μέταλλα,
- δυνατότητα αποθήκευσης και διάθεσης

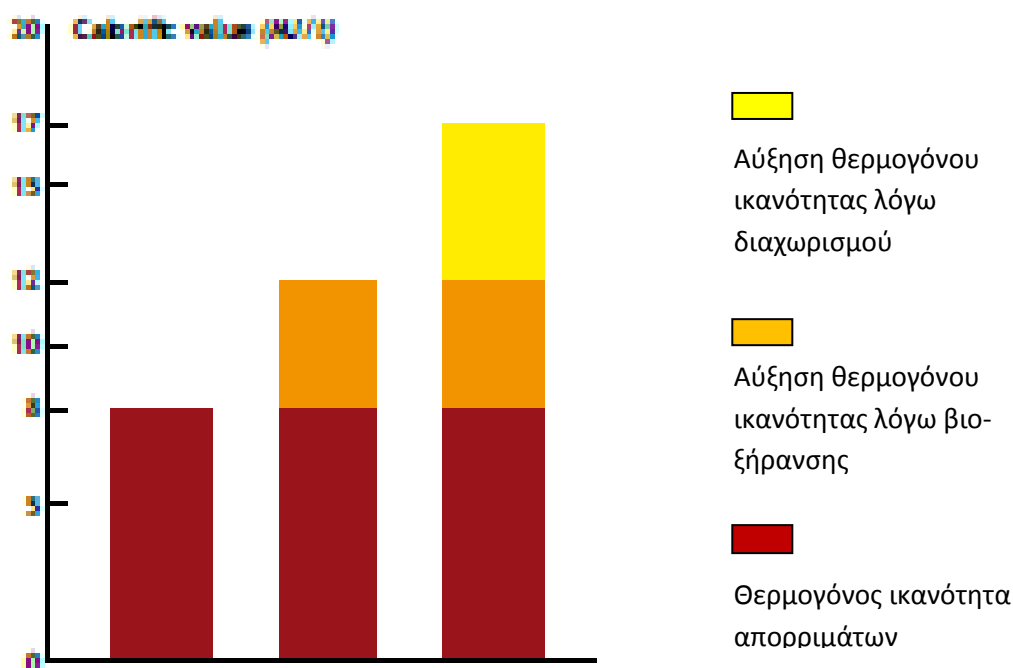
Το δευτερογενές καύσιμο αποτελείται από τα εξής:

- Οργανικά υλικά/χαρτί/χαρτόνι/ξύλο/υφάσματα: 65%
- Πλαστικά και υλικά συσκευασίας: 9%,
- Συνθετικά υλικά/δέρματα/φορμάικες: 25%,
- Υπολείμματα μετάλλων και αδρανών: 1%.

Η ποσότητα του τελικά παραγόμενου ελαφρού κλάσματος (stabilat) μετά και τον διαχωρισμό των αδρανών υλικών ανέρχεται σε περίπου 53% κ.β. των εισερχόμενων υλικών. Τα υπόλοιπα 47% που απομακρύνονται από την αρχική μορφή των αστικών στερεών απορριμμάτων αποτελούνται από:

- 30% συμπυκνώματα,
- 5% μέταλλα (4% σιδηρούχα, 1% μη σιδηρούχα)
- 12% αδρανή, (γυαλί, μπαταρίες, ηλεκτρονικά απόβλητα)

Μέσω των σταδίων επεξεργασίας της βιο-ξήρανσης και του διαχωρισμού των αδρανών επιτυγχάνεται η ανύψωση της θερμογόνου δύναμης σε δύο στάδια στο επίπεδο των 15-18 kJ/kg όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. [12]

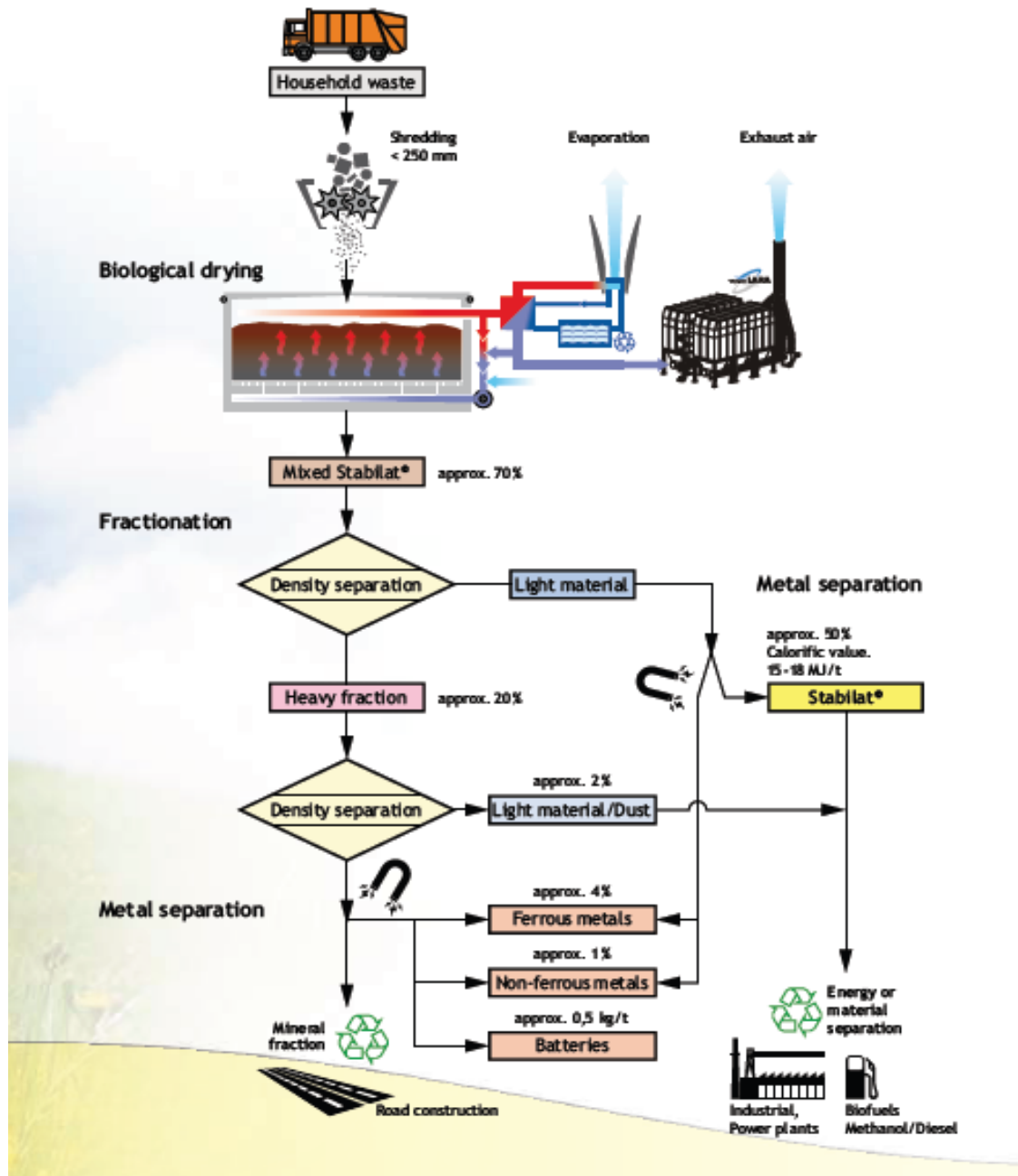


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα απεικόνισης της θερμογόνου ικανότητας στα διάφορα στάδια επεξεργασίας του αρχικού υλικού, (α) θερμογόνος ικανότητα της αρχικής μορφής των απορριμμάτων, (β) θερμογόνος ικανότητα υλικού μετά τη διεργασία της βιο-ξήρανσης στο bioBox, (γ) θερμογόνος ικανότητα υλικού μετά το διαχωρισμό των αδρανών υλικών. [12]

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας stabilat είναι:

- ✓ Μετατροπή του 50% των ΑΣΑ σε δευτερογενές στερεό καύσιμο (SRF), μέσω μίας βιολογικής διεργασίας, η οποία συντελείται σε ένα κλειστό σύστημα, χωρίς εκπομπές αερίων ή υγρών ρύπων
- ✓ Εκμετάλλευση ανακυκλώσιμων υλικών (σιδηρούχων ή μη-μετάλλων)
- ✓ Παραγωγή ενός τυποποιημένου καυσίμου (κατά CEN /TC 343) με υψηλό βιογενές κλάσμα, αυξημένη θερμογόνο ικανότητα, χαμηλό ποσοστό CI και βαρέων μετάλλων

- ✓ Ελαχιστοποίηση όγκου απορριμμάτων προς τελική διάθεση (μόνο αδρανή υπολείμματα), ~15% των εισερχόμενων ΑΣΑ
- ✓ Απομάκρυνση επικίνδυνων ρυπαντών (Cd, Cu, Hg, κλπ.) []



Σχήμα 4.2: Διαγραμματική απεικόνιση των διεργασιών επεξεργασίας των αστικών απορριμμάτων με την τεχνολογία της herhof-stabilat. [12]

4.2 Αξιοποίηση stabilat

Η παραγωγή του δευτερογενούς καυσίμου stabilat γίνεται με σκοπό την ενεργειακή αξιοποίηση του με τη μέθοδο της αεριοποίησης. Παραγωγή ενέργειας από τα αστικά στερεά απορρίμματα γίνεται με άλλες μεθόδους χωρίς την ανάγκη επεξεργασίας τους κι αυτές είναι η αναερόβια χώνευση και η καύση. Στην αναερόβια χώνευση παράγεται βιοαέριο (CO_2, CH_4) και χρησιμοποιείται σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση των απορριμμάτων γίνεται μέσω κύκλο ατμού.

Παρόλο που υπάρχουν μέθοδοι ανάκτησης ενέργειας χωρίς την ανάγκη επεξεργασίας των απορριμμάτων, η επιλογή της επεξεργασίας και διαχείρισης των απορριμμάτων με τη μέθοδο της αεριοποίησης πλεονεκτεί των υπολοίπων μεθόδων. Η αξιοποίηση του RDF για παραγωγή ενέργειας γίνεται σε σύστημα αεριοποίησης και κύκλο ατμού και με δυνατότητα χρήσης άλλου καυσίμου, σε σύστημα αεριοποίησης και μηχανή εσωτερικής καύσης και σε συνδυασμένο κύκλο IGCC (integrate gasification combined cycle). Παράλληλα γίνεται και συμπαραγωγή θερμότητας.

Τα πλεονεκτήματα της αξιοποίησης του καυσίμου με τη μέθοδο της αεριοποίησης:

- Η μέθοδος της αεριοποίησης με χρήση δευτερογενούς καυσίμου προάγει την ανακύκλωση καθώς γίνεται διαχωρισμός των ανακτήσιμων και ανακυκλώσιμων υλικών
- Ο όγκος του αερίου που παράγεται από εγκατάσταση αεριοποίησης είναι 30% μικρότερος από ότι στην καύση και άρα οι εγκαταστάσεις καθαρισμού του αερίου είναι μικρότερες και οικονομικότερες.
- Με την αεριοποίηση επιτυγχάνονται ηλεκτρικές αποδόσεις έως και 30% πάνω σε σχέση με την καύση, λόγω υψηλότερης θερμογόνου ικανότητας του RDF μετά την επεξεργασία που έχει υποστεί καθώς και τον καθαρισμό του παράγωγου αερίου πριν την καύση για παραγωγή ενέργειας.
- Η παραγωγή της τέφρας είναι υψηλότερη κατά την καύση (>35%) σε αντίθεση με την αεριοποίηση όπου το καύσιμο περιέχει λιγότερα ανόργανα και βαρέα μέταλλα κι έτσι απαιτείται μέθοδος διαχείρισης της τέφρας.
- Με την καύση είναι μικρή η δυνατότητα αξιοποίησης της θερμότητας και, επομένως, χαρακτηρισμός του σταθμού ως μονάδα διάθεσης
- Υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης του RDF σε συνδυασμό με άλλα καύσιμα με τη διαδικασία της αεριοποίησης.

Η ενεργειακή αξιοποίηση του stabilat εκτός από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας γίνεται και στις τσιμεντοβιομηχανίες όπου υποκαθιστά ορυκτά καύσιμα έως και 75% ενώ ταυτόχρονα η τέφρα του υλικού ενσωματώνεται στο τελικό προϊόν. [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματικό μέρος

Σκοπός του πειράματος είναι η διαχείριση του δευτερογενούς καυσίμου stabilat, προερχόμενο από αστικά απορρίμματα, για την παραγωγή αερίου καυσίμου μέσω της διαδικασίας της αεριοποίησης, με χρήση αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης, ώστε να διαπιστωθεί η ομαλή λειτουργία της διαδικασίας και τα πιθανά προβλήματα από τα σωματίδια του υλικού που παραμένοντας στην κλίνη δε συμμετέχουν στη αεριοποίηση.

5.1 Προετοιμασία πειραματικής διαδικασίας

5.1.1 Επεξεργασία stabilat στο εργαστήριο

Σε πειραματικό επίπεδο γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης του stabilat με τη διεργασία της αεριοποίησης προκειμένου να παραχθεί τριτογενές καύσιμο σε μορφή αερίου το οποίο θα μπορεί να αξιοποιηθεί σε μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η αεριοποίηση έλαβε χώρα σε αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης αναβρασμού. Για τη δεδομένη εγκατάσταση του εργαστηρίου το stabilat δεν ήταν δυνατό να τροφοδοτηθεί στη μορφή που παραλήφθηκε από το εργοστάσιο παραγωγής του αλλά ήταν απαραίτητο να υποστεί μια επεξεργασία.

Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μορφές του καυσίμου stabilat. Η μία μορφή ήταν ουσιαστικά το ίδιο το καύσιμο χωρίς καμία επεξεργασία, απλά ήταν επιλεγμένα κομμάτια του καυσίμου τα οποία πέρασαν από κόσκινο με οπές επιφάνειας μικρότερες των 2cm² περίπου.



(α)



(β)

Σχήμα 2.3: (α) επεξεργασμένη μορφή stabilat, (β) αρχική μορφή stabilat

Η άλλη μορφή του καυσίμου προέκυψε μετά από μια σειρά διαδικασιών που δεν επηρέασαν βέβαια τη στοιχειακή σύσταση του αρχικού καυσίμου. Αρχικά το

καύσιμο πέρασε από μύλο κοπής ώστε να γίνει ένα ομοιόμορφο υλικό αποτελούμενο από κόκκους 1mm. Το αρχικό υλικό που αποτελείται από κομμάτια ανομοιόμορφα σε μέγεθος και υλικό, έπρεπε να κοπεί σταδιακά σε διάφορες διαστάσεις μέχρι και την ελάχιστη δυνατή μέσω του αντίστοιχου εξαρτήματος (κόσκινο) του μύλου με τυποποιημένες διαστάσεις 7mm, 5mm, 2mm, 1mm. Το επόμενο βήμα ήταν να προστεθεί νερό στο υλικό ώστε να πάρει τη μορφή πολτού. Στη συνέχεια ανά μικρές ποσότητες των 100gr περίπου γινόταν στράγγισμα ώστε να απομακρυνθεί η περιττή ποσότητα του νερού και να γίνει μια συμπαγής υγρή μάζα. Στο επόμενο βήμα γινόταν χρήση ειδικού μηχανήματος κοσκινίσματος με σκοπό η συμπαγής αυτή μάζα να διαχωριστεί σε τεμάχια μεγέθους 0,5-1cm μέσω των υψηλών δονήσεων. Το βήμα αυτό διαρκούσε 10min περίπου. Το τελικό βήμα ήταν η αφαίρεση της υγρασίας με τοποθέτηση του υλικού σε φούρνο στους 105⁰C για 5 ώρες.

Πίνακας 5.1: Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση καυσίμου stabilat.

Παράμετρος	Stabilat 1	Stabilat 2
Προσεγγιστική ανάλυση (% κατά βάρος)		
Υγρασία	22.1	3.6
Πτητικά	66.3	66.3
Άνθρακας	10.2	10.2
Τέφρα	23.5	23.5
Στοιχειακή ανάλυση (% κατά βάρος επί ξηρού)		
C	42.10	42.0
H	5.79	5.79
N	1.34	1.34
O	0.48	0.48
Τέφρα	26.79	26.79
HHV	23.5	23.5

Το αποτέλεσμα ήταν ένα υλικό με ίδια στοιχειακή σύσταση με το αρχικό αλλά με λιγότερο ποσοστό υγρασίας. Αισθητές ήταν οι διαφορές στη μορφή του επεξεργασμένου καυσίμου καθώς αποτελούταν από κόκκους ενός ομοιόμορφου υλικού σε αντίθεση με το αρχικό που τα διαφορετικά μεγέθη και υλικά από τα οποία αποτελούταν ήταν αναγνωρίσιμα και ξεχώριζαν. Γενικά έγινε προσπάθεια να παραχθεί ένα υλικό περισσότερο ομογενοποιημένο και λεπτόκοκκο.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία ήταν το stabilat σε δύο διαφορετικές μορφές: πριν την επεξεργασία που έγινε στο εργαστήριο και μετά την επεξεργασία. Η χημική ανάλυση του καυσίμου δίνεται στον Πίνακα 5.1. Το καύσιμο πριν την επεξεργασία θα ονομάζεται stabilat 1 και μετά την επεξεργασία stabilat 2.

5.1.2 Υλικό της κλίνης

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στον αντιδραστήρα είναι χαλαζίας (SiO_2). Για κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2000gr περίπου, μεγέθους κόκκων στο διάστημα 125 – 250 μm και με πυκνότητα 2600 kg/m^3 . Η χημική σύσταση του χαλαζία φαίνεται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Χημικά χαρακτηριστικά του υλικού της κλίνης χαλαζία.

	Χαλαζίας
Οξείδιο	(% κ.β)
SiO_2	99
FeO	-
MgO	-
$\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{NiO}+\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$	~1

Ο χαλαζίας είναι χημικά ουδέτερο υλικό με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες σε ρευστοποιημένες κλίνες, αλλά με περιορισμένη δραστηριότητα υποβοήθησης της διάσπασης βαρέων υδρογονανθράκων (πισσών). Πρόσθετα υλικά όπως αλουμίνα ή ασβεστίτης στην χαλαζιακή άμμο προσδίδουν καταλυτικές ιδιότητες ως προς τη διάσπαση της πίσσας. Παρόμοιες ιδιότητες έχουν αποδειχθεί με χρήση δολομίτη ή ολιβίνη ως κύρια υλικά κλίνης.

5.1.3 Προετοιμασία αντιδραστήρα

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης αναβρασμού, με μέσο αεριοποίησης αέρα και υλικό κλίνης χαλαζία.

Πριν από την έναρξη κάθε πειράματος και την τροφοδότηση του καυσίμου για την αεριοποίηση του, γίνεται η προετοιμασία της εγκατάστασης. Η προετοιμασία αφορά την προθέρμανση του αντιδραστήρα, το γέμισμα του σιλό με καύσιμο και της κλίνης με άμμο (χαλαζία).

Το καύσιμο τροφοδοτείται στο άνω σιλό μέσω της βάνας στο καπάκι, ενώ ο κινητήρας που περιστρέφει τον κοχλία είναι απενεργοποιημένος.

Η τροφοδοσία της άμμου γίνεται από τη βάνα που βρίσκεται στο άνω καπάκι του αντιδραστήρα. Για το γέμισμα της άμμου είναι απαραίτητο να είναι ενεργοποιημένος ο κινητήρας που κινεί τον κοχλία του κάτω σιλό, χωρίς βέβαια να τροφοδοτεί με καύσιμο, και μια μικρή παροχή αζώτου από το σιλό προκειμένου να αποφευχθεί η εισχώρηση της άμμου μέσα στο σωλήνα με τον οποίο επικοινωνεί ο αντιδραστήρας με το σιλό.

Η προθέρμανση του αντιδραστήρα γίνεται σταδιακά μέσω της ηλεκτρονικής ρύθμισης των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Βασική προϋπόθεση είναι αρχικά ο έλεγχος όλως των βανών ώστε να είναι κλειστές, και η παροχή μικρής ποσότητας αέρα, με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα και μεταφορά της θερμότητας σε αυτόν. Η αρχική ρύθμιση των αντιστάσεων είναι αρχικά στους 500°C και σταδιακά αυξάνουμε μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία 800-850°C για αεριοποίηση.

Η έναρξη του πειράματος γίνεται με την έναρξη της τροφοδοσίας του κάτω σιλό, με ενεργοποίηση του αντίστοιχου κινητήρα και με την αύξηση της παροχής του αέρα στην κατάλληλη για το εκάστοτε πείραμα, τιμή ανάλογα τον επιθυμητό λόγο αέρα καύσης.

5.2 Πειραματική διαδικασία

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν και για τις δύο διαφορετικές μορφές του καυσίμου σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, με τον ίδιο λόγο αέρα καύσης.

Ο λόγος αέρα καύσης ήταν $\lambda=0,3$ και δηλώνει το λόγο του αέρα που προσφέρουμε στο σύστημα, προς το λόγο του αέρα που απαιτείται για τη στοιχειομετρική καύση του καυσίμου. Με $\lambda < 1$ επιτυγχάνουμε την ατελή καύση του στερεού καυσίμου και την αεριοποίησης του.

Για τον παραπάνω λόγο αέρα καύσης και για παροχή αέρα τέτοια ώστε να πραγματοποιείται ρευστοποίηση στην κλίνη, με ταχύτητα $U = 0,025\text{m/sec}$, η παροχή του καυσίμου ήταν περίπου 200gr/h . Η τιμή αυτή της παροχής ρυθμίζεται μέσω των στροφών του κινητήρα που κινεί τον κοχλία τροφοδοσίας του πάνω σιλό. Η διαφορά πίεσης μέσα στον αντιδραστήρα ήταν $35\text{-}40\text{mbar}$.

Η παροχή του αέρα και του αζώτου ρυθμίζονται μέσω παροχόμετρων όπου η τιμές τους δίνονται μέσω λογισμικού στον υπολογιστή.

Έχοντας ως δεδομένα τις παροχές καυσίμου, αέρα και επομένως και το λόγο αέρα καύσης, για δύο διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας 800°C και 850°C και για δύο διαφορετικές μορφές του ίδιου καυσίμου πραγματοποιούμε τέσσερα διαφορετικά πειράματα διάρκειας περίπου 120min το καθένα. Αναλυτικά τα πειράματα είναι τα εξής:

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικές συνθήκες και καύσιμο για κάθε πείραμα

Πείραμα	λ	$\theta(^{\circ}\text{C})$	$\dot{m}_B(\text{gr/h})$	$t(\text{min})$	Καύσιμο
1 ^ο	0,3	800	200	120	Με επεξεργασία
2 ^ο	0,3	850	200	120	Με επεξεργασία
3 ^ο	0,3	800	200	120	Χωρίς επεξεργασία
4 ^ο	0,3	850	200	120	Χωρίς επεξεργασία

5.3 Προβλήματα κατά την πειραματική διαδικασία

Οι αναλύσεις των αερίων σε κάθε μια από τις περιπτώσεις (καυσίμου, θερμοκρασίας) λαμβάνονταν κατά τη διάρκεια μόνιμων καταστάσεων. Ως μόνιμη κατάσταση θεωρείται η σταθερή θερμοκρασία της κλίνης και της ελεύθερης ζώνης για περίοδο 120min με μικρή απόκλιση ως προς το χρόνο. Κάτι τέτοιο ήταν αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί καθώς ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα ήταν η επίτευξη σταθερής τροφοδοσίας του στερεού καυσίμου καθώς και ικανοποιητική παροχή για τις απαιτήσεις του πειράματος. Ιδανικά καύσιμα για τροφοδοσία του συγκεκριμένου αντιδραστήρα αποτελούν μικρές πελλέτες καυσίμου ή «ευκολόρευστα» καύσιμα όπως το πυρηνόξυλο.

Για την τροφοδοσία του stabilat κατασκευάστηκε μηχανισμός εσωτερικής ανάδευσης με κοχλία κατακόρυφο ως προς την επάνω επιφάνεια του άνω σιλό, ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα σπηλαιώσης εντός των σιλό όταν τροφοδοτείται καύσιμο που δε «ρέει» εύκολα.

Το επόμενο πρόβλημα που εμφανίστηκε ήταν η χαμηλή παροχή μάζας του καυσίμου ακόμα και στις μέγιστες στροφές των κινητήρων, αναμενόμενο από τη στιγμή που το υλικό αυτό έχει μικρή πυκνότητα και είναι πολύ ελαφρύ. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα δοκιμάστηκαν δύο τρόποι. Ο πρώτος ήταν με αύξηση των στροφών των κοχλιών τροφοδοσίας, χρησιμοποιώντας μειωτήρες μικρότερης σχέσης μετάδοσης. Ο δεύτερος δοκιμάστηκε αφού βέβαια είχαν προηγηθεί οι παραπάνω αλλαγές, και δε στόχευε στην αύξηση της παροχής του καυσίμου αλλά, διατηρώντας τον λόγο αέρα σταθερό, να μειωθεί η παροχή του αέρα. Με μειωμένη παροχή αέρα, όμως, για να πετύχουμε ρευστοποίηση θα πρέπει οι κόκκοι της άμμου να έχουν τέτοιο βάρος ώστε ο αέρας που τη διαπερνά να δημιουργεί τη ρευστοποιημένη κλίση και όχι να δημιουργεί κανάλια και να διαφεύγει χωρίς να αντιδρά. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε άμμος με κοκκομετρία μικρότερη των 250μm. Η παραπάνω δοκιμή απέτυχε διότι παρουσιάστηκαν δυσκολίες πρώτον στο να παραχθεί τόσο λεπτόκοκκη άμμος και δεύτερον στην τροφοδοσία της εγκατάστασης με αυτή διότι διασκορπιζόταν πολύ εύκολα.

Το γεγονός ότι το καύσιμο αυτό έχει πολύ μικρή πυκνότητα, είναι ελαφρύ και μαλακό κατά την τροφοδοσία προκάλεσε προβλήματα ακόμα και στη λειτουργία της εγκατάστασης ακόμα και διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα του κοχλία τροφοδοσίας. Η αιτία ήταν μεγάλη αντίσταση από το ίδιο το υλικό το οποίο αντί να τροφοδοτείται μέσα στην κλίση, γινόταν μία μάζα και συγκεντρωνόταν στο σωλήνα εισόδου του αεριοποιητή. Αυτό οδήγησε στη αλλαγή του κινητήρα του κάτω σιλό με άλλο μεγαλύτερης ισχύος για αποφυγή διακοπών της λειτουργίας του.

Τέλος δοκιμές σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, όπως χαμηλότερη θερμοκρασία και λόγο αέρα, απέτυχαν διότι προκάλεσαν αυξημένο σχηματισμό πηλιδίων που φράζει τους αγωγούς του αερίου, όταν ψύχονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα πειραμάτων

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων δεν αφορούν μόνο τη σύσταση του παραγόμενου από το πείραμα αερίου. Μετά το πέρας του πειράματος γίνεται συλλογή της ιπτάμενης τέφρας που έχει συγκεντρωθεί στους κυκλώνες καθώς και της άμμου από τον αεριοποιητή μέσω του σωλήνα που ξεκινά από τον διασκορπιστή και καταλήγει σε βάνα εξωτερικά της εγκατάστασης. Η άμμος περιλαμβάνει μέρη του καυσίμου που δεν έχουν υποστεί αεριοποίηση, δηλαδή τέφρα, καθώς και κάποια συσσωματώματα αυτών με τους κόκκους της άμμου. Η μελέτη και σχολιασμός των παραπάνω αποτελούν μέρος των αποτελεσμάτων των πειραμάτων.

Γενικότερα οι εκπομπές του αερίου καθώς και τα υπόλοιπα παράγωγα εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες: τη φύση του στερεού καυσίμου καθώς και τις διεργασίες που έχει υποστεί, την τεχνολογία αεριοποίησης που χρησιμοποιείται και τις συνθήκες λειτουργίας του πειράματος.

6.1 Αέριο καύσιμο

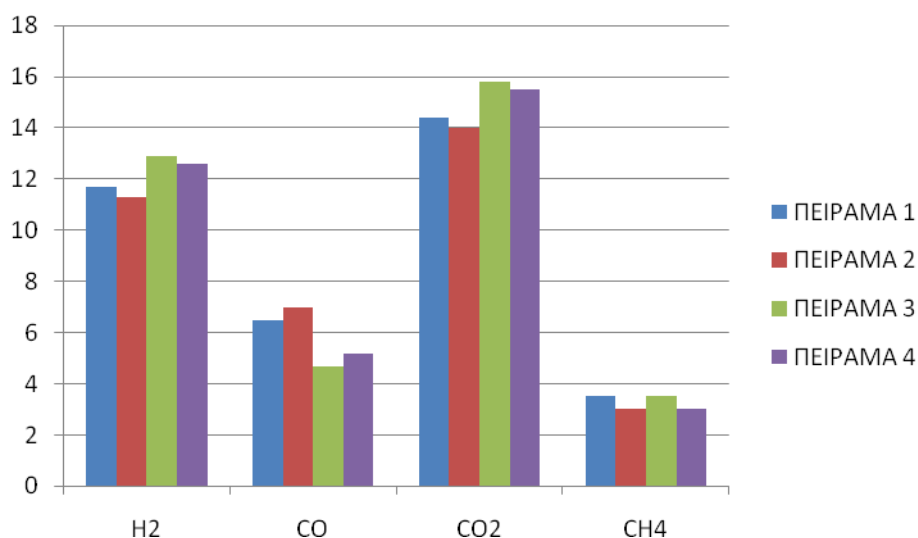
Η σύσταση του αερίου καυσίμου που προέκυψε από κάθε πείραμα, όπως μετρήθηκε από το όργανο μέτρησης του εργαστηρίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Χημική σύσταση του παραγόμενου αερίου καυσίμου

Πείραμα	(%vol)			
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
1 ^ο	11,7	6,5	14,4	3,5
2 ^ο	11,3	7,0	14,0	3,0
3 ^ο	12,9	4,7	15,8	3,5
4 ^ο	12,6	5,2	15,5	3,0

Το παραγόμενο αέριο αφού καθαριστεί από την ιπτάμενη τέφρα, περιλαμβάνει ακόμα και άλλες ανόργανες ενώσεις που οι περιεκτικότητες τους είναι της τάξεως των ppm καθώς και ενώσεις βαρέων υδρογονανθράκων δηλαδή πίσσες. Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνουμε ότι το ένα μεγάλο ποσοστό του άνθρακα (περίπου 50%) του στερεού καυσίμου δε συμμετέχει στις αντιδράσεις. Αποτέλεσμα

είναι η παραγωγή μικρής ποσότητας μονοξειδίου σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά και η υψηλή ποσότητα πίσσας, καθώς και η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα στην ιπτάμενη τέφρα.



Σχήμα 6.1: Γράφημα που απεικονίζει τις συστάσεις του παραγόμενου αερίου για κάθε πείραμα

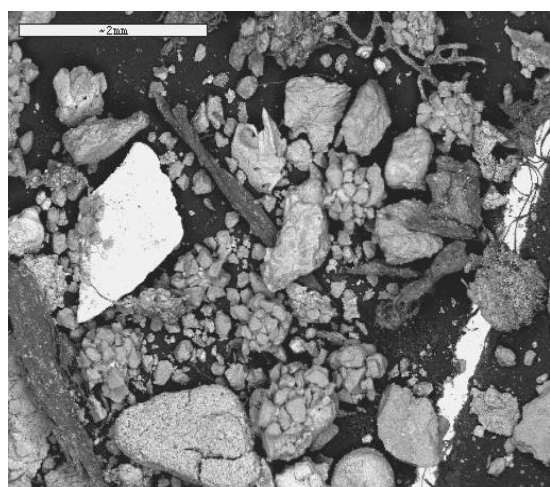
Παρατηρείται ότι για το ίδιο στερεό καύσιμο, η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το μονοξείδιο του άνθρακα στο παραγόμενο αέριο, ενώ μειώνει όλα τα άλλα συστατικά του αερίου H₂, CO₂, CH₄. Είναι γεγονός ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας ευνοείται η αντίδραση σχηματισμού του μονοξειδίου (boudouard reaction) όπως αντίστοιχα συμβαίνει και με την αντίδραση για την παραγωγή μονοξειδίου και υδρογόνου (water-gas). Αντίθετα η παραγωγή μεθανίου ευνοείται με μικρότερη θερμοκρασία για αυτό και μειώνεται η περιεκτικότητα του καυσίμου σε μεθάνιο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα που μόνο έρχονται σε αντίθεση με τα αναμενόμενα σύμφωνα με τη θεωρία είναι οι τιμές του υδρογόνου, που θα έπρεπε να αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας. Η μεταβολή, βέβαια, της τιμής του υδρογόνου είναι μικρή, κάτι που την καθιστά αποδεκτή από τη στιγμή που τα προβλήματα τροφοδοσίας μπορεί να επηρέασαν το λόγο αέρα καύσης, ο οποίος αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει τη σύσταση του αερίου καυσίμου. Εξάλλου με αύξηση του οξυγόνου παρατηρείται αύξηση του υδρογόνου στο αέριο.

Αντίστοιχα για σταθερή θερμοκρασία αλλά διαφορετικά καύσιμα παρατηρείται η αύξηση της παραγωγή του υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα, μειώνεται το μονοξείδιο ενώ το μεθάνιο παραμένει σταθερό. Οι χημικές συστάσεις των δύο καυσίμων είναι περίπου ίδιες οπότε δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα και τη σύσταση των παραγόμενων αερίων. Η μεγάλη διαφορά των καυσίμων είναι το

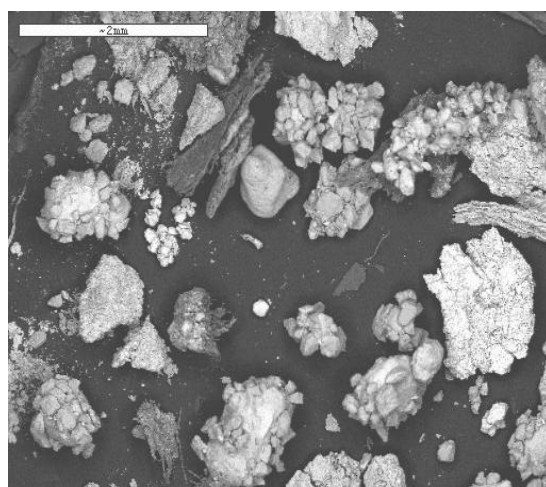
ποσοστό της υγρασίας, όπου στο μη επεξεργασμένο είναι 22,1% ενώ στο επεξεργασμένο μειώνεται στο 3,6%. Ο παράγοντας υγρασία επηρεάζει τη διαδικασία της αεριοποίησης μειώνοντας τη θερμοκρασία της κλίνης εξαιτίας της θερμότητας που απορροφάται για την εξάτμιση της υγρασίας του καυσίμου. Συνεπώς το καύσιμο με την περισσότερη υγρασία θα προκαλέσει μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας. Η ελάττωση της θερμοκρασίας επηρεάζει τις αντιδράσεις αεριοποίησης και συγκεκριμένα δεν ευνοεί το σχηματισμό CO και H₂ αλλά ευνοεί το σχηματισμό μεθανίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα, βέβαια, δε συμφωνούν απόλυτα με τα αναμενόμενα από τα θεωρητικά δεδομένα. Παρατηρείται μείωση του μονοξειδίου όπως ήταν αναμενόμενο, αλλά και αύξηση του υδρογόνου ενώ θα περιμέναμε να μειωθεί. Τέλος το ποσοστό του μεθανίου είναι ίδιο και για τα δύο καύσιμα. Γενικότερα καταλληλότερα καύσιμα για ρευστοποιημένες κλίνες θεωρούνται αυτά με ποσοστό υγρασίας 5%-10%.

6.2 Υλικό κλίνης

Στο τέλος κάθε πειράματος συγκεντρώθηκε το υλικό της κλίνης για ανάλυση. Το υλικό που συγκεντρώθηκε, εκτός από την άμμο, αποτελείται και από άλλα σώματα διαφόρων μεγεθών, σχημάτων και υλικών τα οποία αποκαλύπτουν στοιχεία για το περιεχόμενο του αρχικού καυσίμου και τον τρόπο που αυτό αεριοποιείται. Τα δείγματα του υλικού της κλίνης αναλύθηκαν με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης σε συνδυασμό με χημική στοιχειακή ανάλυση SEM/EDS. Οι πλέον ενδιαφέρουσες και χαρακτηριστικές περιπτώσεις αυτών παρουσιάζονται παρακάτω, δίνοντας πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση του τήγματος, και τη μορφή των συσσωματωμάτων. Οι εικόνες που ακολουθούν εμφανίζουν το περιεχόμενο του υλικού της κλίνης.

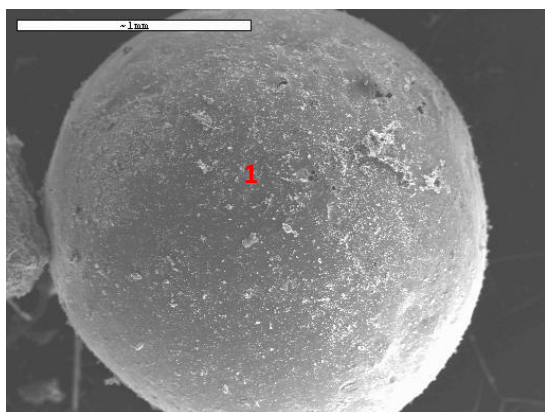


(α)

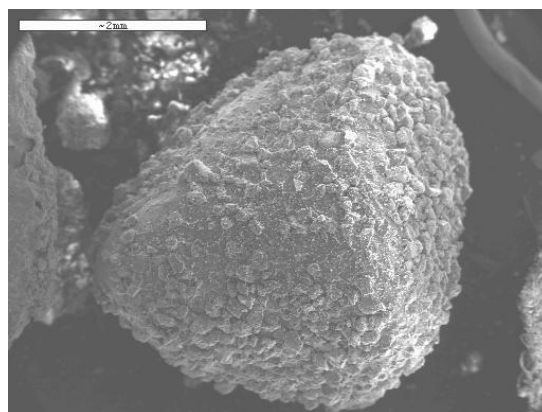


(β)

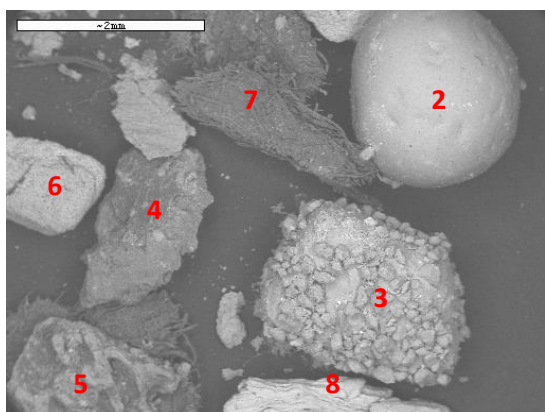
Σχήμα 6.2: (α),(β) φωτογραφίες περιεχομένου του υλικού της κλίνης



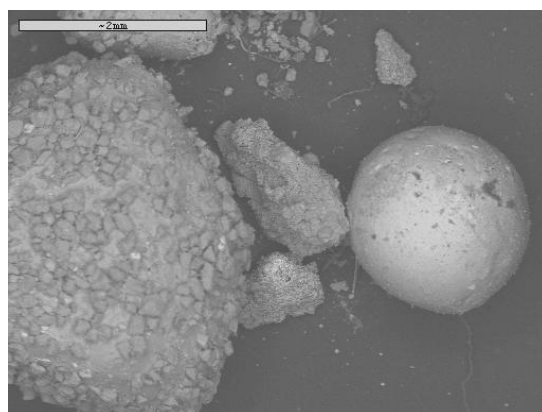
(α)



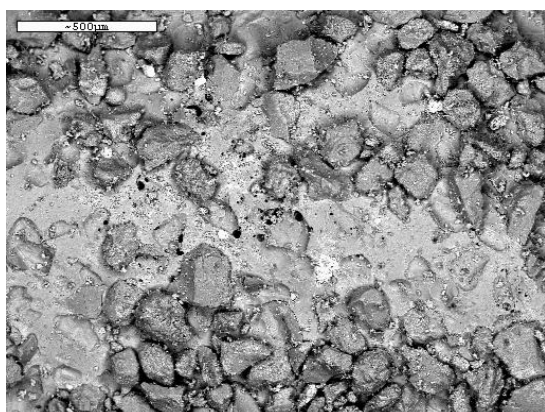
(β)



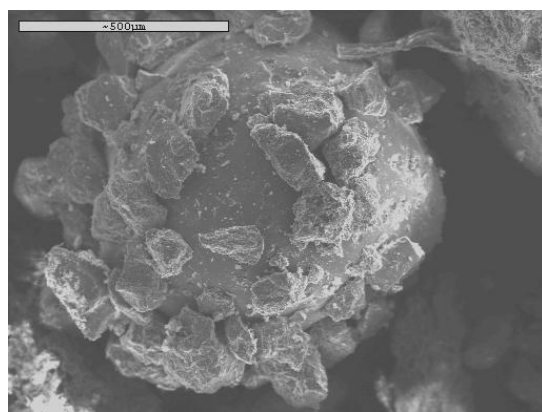
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχήμα 6.3: (α) τμήμα γυαλιού, (β) συσσωμάτωμα γυαλιού με άμμο της κλίνης, (γ) διάφορα υλικά της κλίνης και κομμάτια γυαλιού με (σημείο 3) και χωρίς (σημείο 2) επικάλυψη χαλαζία, (δ),(στ) τμήματα γυαλιού μερικώς επικαλυμμένα με χαλαζία, (ε) λεπτομέρεια επιφάνειας γυαλιού με επικάλυψη άμμου.

Στο υλικό αυτό εντοπίστηκαν αρκετά τμήματα σχήματος περίπου σφαιρικό σε μεγέθη από 0,5mm μέχρι 2mm, τα οποία μετά από ανάλυση προέκυψε ότι έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο Si. Οι παραπάνω πληροφορίες οδηγούν στο ότι τα

τιμήματα αυτά είναι κομμάτια γυαλιού τα οποία και δεν αντέδρασαν ούτε επηρεάστηκαν από το πείραμα, για αυτό και διατήρησαν ομοιόμορφο και συγκεκριμένο σχήμα. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 6.3α καθώς και στο σημείο 2 της εικόνας 6.3γ.

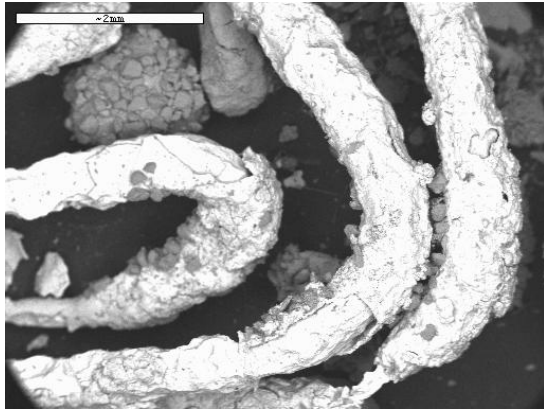
Πολλά από αυτά τα κομμάτια γυαλιού βρέθηκαν καλυμμένα εξ ολοκλήρου από την άμμο (χαλαζία) της κλίνης, δημιουργώντας έτσι συσσωματώματα, ή μερικώς καλυμμένα από μόρια άμμου, όπως φαίνεται στις εικόνες 6.3β,δ,στ και λεπτομέρεια στην εικόνα 6.3ε. Τομή τεμαχίου γυαλιού μερικώς επικαλυμμένο με σωματίδια άμμου φαίνεται στο σχήμα 6.6.

Πίνακας 6.2: Σημειακές αναλύσεις των υλικών που απεικονίζονται στο σχήμα 6.3

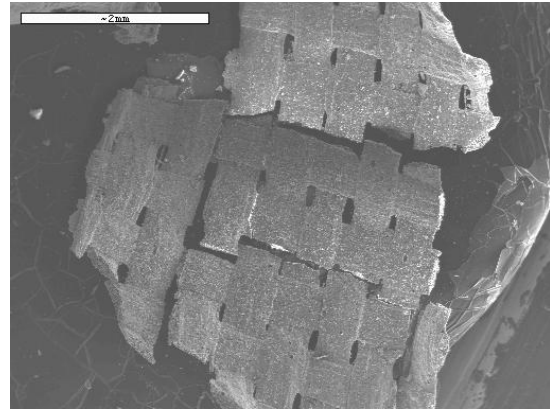
Σημεία	1	2	3	4	5	6	7	8
Na	7.78	6.40	8.98	16.61	8.89	0.90	9.33	0.07
Mg	1.88	0.83	2.71	5.40	2.15	0.99	1.22	0.55
Al	5.33	0.83	2.33	3.42	0.59	0.16	23.29	0.08
Si	50.77	74.77	61.57	9.96	0.39	21.72	36.56	0.23
P	1.04	1.20	0.38	2.29	24.49	0.19	1.18	28.28
S	2.97	0.14	0.16	1.21	1.99	3.10	1.52	0.84
Cl	1.81	0.14	0.98	19.02	4.55	1.64	5.40	9.87
K	13.12	6.36	8.11	7.26	1.38	0.34	11.56	1.28
Ca	8.85	10.57	3.21	28.70	56.36	67.36	6.87	57.6
Ti	0.26	0.61	0.14	0.75	0.97	2.21	0.24	0.46
V	0.12	0.22	0.81	1.22	0.22	0.66	0.02	0.18
Cr	0.39	1.49	0.09	0.79	0.54	0.55	0.11	0.34
Mn	0.27	0.25	0.78	1.12	0.30	0.97	0.41	0.09
Fe	5.53	1.00	9.74	1.91	0.90	0.42	1.80	0.51
Ni	0.40	0.4	0.47	0.18	0.32	1.30	0.05	0.47
Zn	1.36	1.04	0.42	1.42	1.93	0.66	1.41	0.09
Cu	0.29	2.11	0.83	0.32	1.04	2.15	0.01	0.88

Στην εικόνα 6.3γ φαίνονται μέρη διαφόρων υλικών όπου η σύσταση τους παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί, όπου έχουν επισημανθεί τα κύρια συστατικά τους. Τα σημεία 2 και 3 είναι κομμάτια γυαλιού μη καλυμμένο και

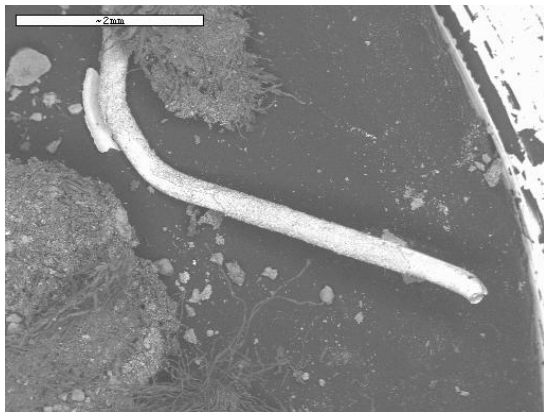
καλυμμένο αντίστοιχα από μόρια χαλαζία καθώς η περιεκτικότητά τους σε πυρίτιο ξεπερνά το 60%.



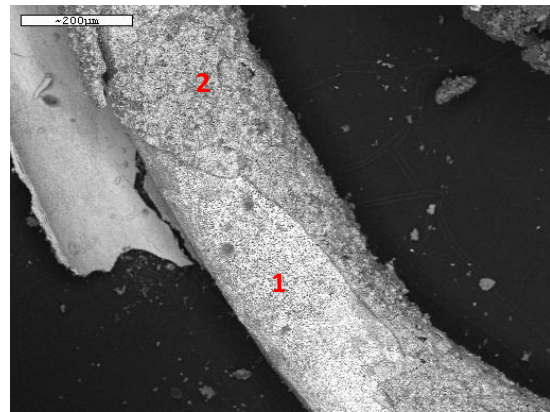
(α)



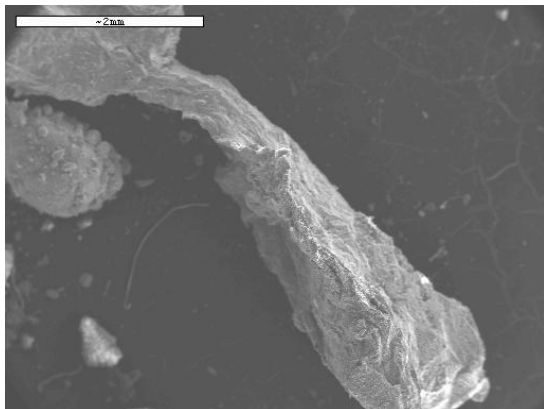
(β)



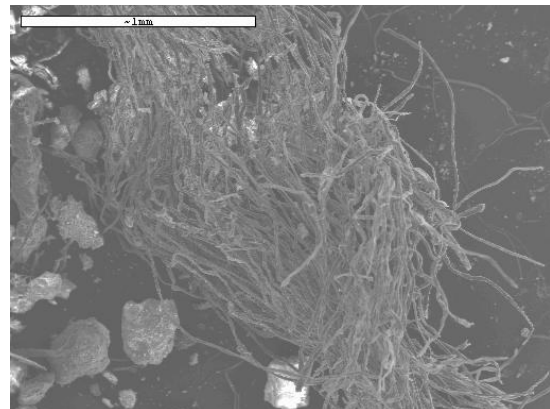
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχήμα 6.4: (α),(γ) Συρμάτινα τμήματα από ανοξείδωτο χάλυβα, (β) τμήμα απροσδιόριστου υλικού, (δ) λεπτομέρεια του σύρματος της εικόνας γ, (ε) κομμάτι αλουμινίου, (στ) κομμάτι εξανθρακώματος

Εκτός από τα κομμάτια γυαλιού που εντοπίστηκαν στο υλικό της κλίνης, μετά τη στοιχειακή ανάλυση, διαπιστώθηκε η ύπαρξη και άλλων υλικών τα οποία δε συμμετείχαν στην αεριοποίηση.

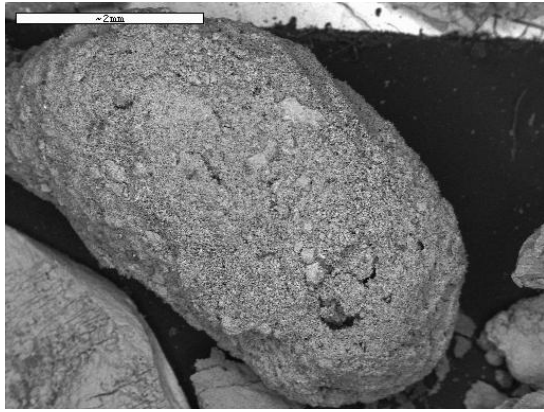
Πίνακας 6.3: Σημειακές αναλύσεις των υλικών που απεικονίζονται στις φωτογραφίες του σχήματος 6.4.

Σημεία	α	β	γ,δ 1	γ,δ 2	ε	στ
Na	5.29	5.51	4.07	0.44	2.03	32.24
Mg	1.16	5.12	1.14	0.26	0.69	8.51
Al	0.40	8.18	0.23	0.00	90.20	4.03
Si	1.58	31.63	1.55	0.12	3.53	11.04
P	0.03	0.17	0.04	0.04	0.32	0.03
S	0.32	0.35	0.58	0.51	0.29	2.86
Cl	0.18	0.64	0.04	0.45	0.26	6.13
K	0.45	2.14	0.08	0.77	0.28	5.91
Ca	0.81	34.77	0.14	0.36	1.73	23.78
Ti	0.07	7.74	0.21	0.08	1.69	0.29
V	0.06	0.28	0.17	0.03	0.08	0.52
Cr	0.59	0.26	6.27	4.93	0.63	0.31
Mn	0.59	0.27	0.16	5.45	0.53	0.40
Fe	89.13	2.00	70.86	82.15	1.33	2.30
Ni	0.01	0.19	15.66	2.08	0.11	1.05
Zn	0.25	0.33	0.19	1.17	0.45	1.30
Cu	0.07	0.96	0.45	2.63	0.03	0.07

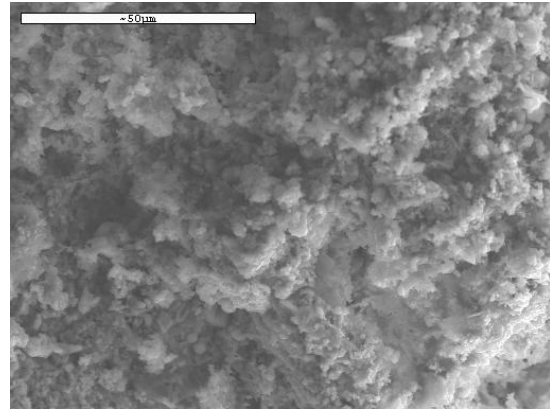
Στο υλικό της κλίνης εντοπίστηκαν συρμάτινα τμήματα από ανοξείδωτο χάλυβα μεγέθους 2 με 7mm. (Σχήμα 6.4α,γ,δ)

Εντοπίστηκαν κομμάτια αλουμινίου μεγέθους 1mm πλάτους και περίπου 2mm μήκους.(Σχήμα 6.4ε)

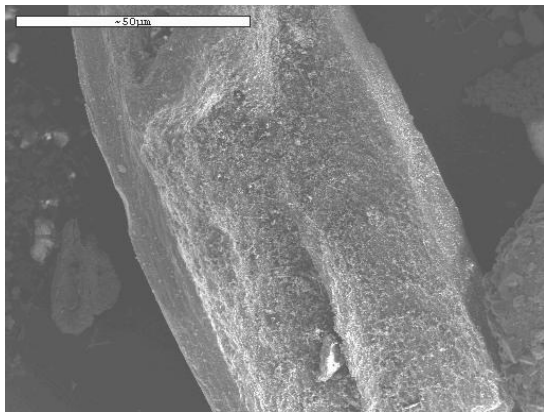
Εντοπίστηκαν ακόμα κομμάτια τα οποία δεν μπορεί να προσδιοριστεί το είδος τους όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 6.4β, με βασικά στοιχεία 35%Ca, 32% Si και 8,5% Al μεγέθους 1-2 mm.



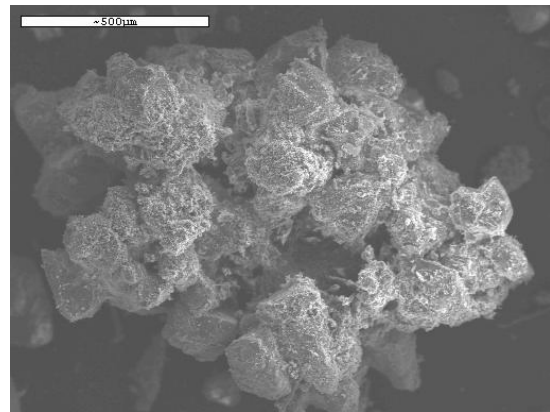
(α)



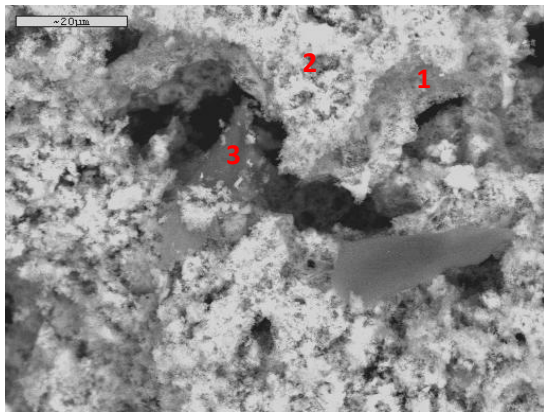
(β)



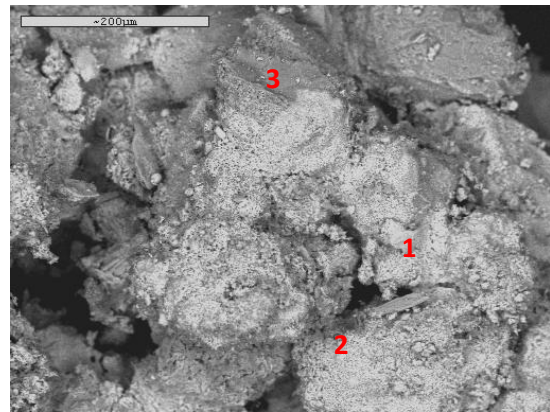
(γ)



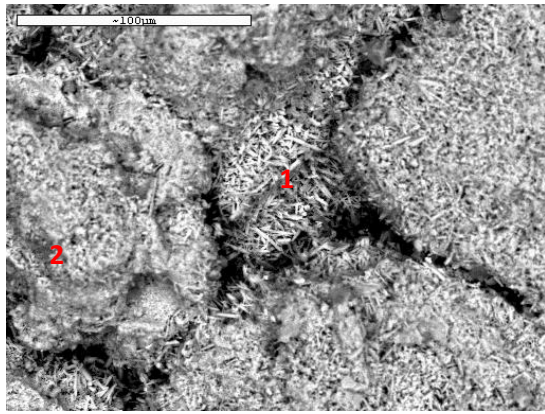
(δ)



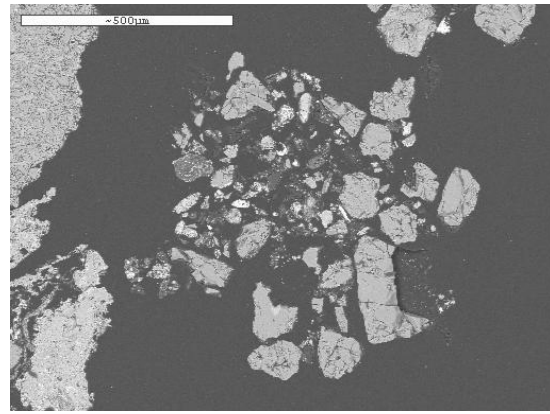
(ε)



(σ)



(ζ)



(η)

Σχήμα 6.5: (α) κομμάτι μη προσδιορισμένου υλικού αλλά με γνωστή σύσταση, (β) λεπτομέρεια του υλικού της εικόνας α, (γ) κομμάτι από κόκαλο, (δ) συσσωμάτωμα τέφρας με υλικό κλίνης, (ε) λεπτομέρεια απροσδιόριστου υλικού πλούσιου σε ασβέστιο, (στ) λεπτομέρεια του συσσωματώματος της εικόνας δ, (ζ) απροσδιόριστο υλικό με γνωστή σύσταση, (η) τομή του συσσωματώματος της εικόνας δ.

Επιπλέον στην εικόνα 6.4στ φαίνονται κομμάτια εξανθρακωμάτων που αποτελούνται κυρίως από άνθρακα μήκους 1-2 mm.

Στο σχήμα 6.5 απεικονίζονται και άλλα υλικά που εντοπίστηκαν. Τα κομμάτια που δεν προσδιορίστηκαν, ποικίλουν και ένα από αυτά φαίνεται στην εικόνα 6.5α, παρουσιάζουν μεγέθη 2-4 mm και σύσταση 34% Ca, 24% Cl, 15% K, 8% Fe, 6% Al.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κομμάτια εκείνα που εκτός από ασβέστιο σε μεγάλο ποσοστό έχουν και φώσφορο, στοιχείο που παραπέμπει στο να θεωρηθούν κομμάτια από κόκαλα. Συγκεκριμένα στη εικόνα 6.5γ απεικονίζεται τέτοιο κόκαλο πλάτους 50μm και μήκους 150μm με κύρια σύσταση 58% Ca και 22% P όπως εμφανίζονται και επισημαίνονται στον πίνακα 3.

Βρέθηκαν ακόμα λίγα συσσωματώματα του υλικού της κλίνης λόγω του τήγματος της τέφρας και σχηματισμού κολλώδους φάσης. Ένα τέτοιο συσσωμάτωμα φαίνεται στην εικόνα 6.5δ, λεπτομέρεια αυτού στην 6.5στ και τομή στην 6.5η. Το μέγεθος είναι περίπου 1mm και όπως φαίνεται από τον πίνακα με τη χημική ανάλυση, τα κύρια στοιχεία είναι Ca, Cl και Si στα δύο σημεία ενώ στο τρίτο έχουμε 93% Si που σημαίνει ότι στο σημείο αυτό είναι το υλικό της κλίνης, η άμμος που έχει σχηματίσει το συσσωμάτωμα. Αντίστοιχα τεμάχια βρέθηκαν με μέγεθος 500μm και 200μm.

Επομένως τα συσσωματώματα που εμφανίστηκαν στην κλίνη ήταν δύο μορφών. Αυτά που τα μόρια της άμμου είχαν προσκολληθεί στα κομμάτια γυαλιού και αυτά που τα μόρια της άμμου είχαν συγκολληθεί μεταξύ τους μέσω του τήγματος

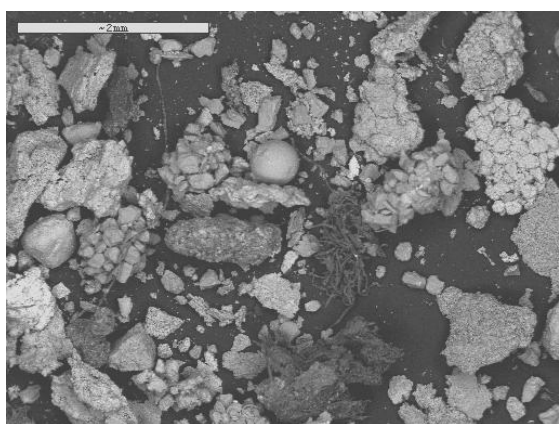
τέφρας. Γενικά ο μηχανισμός σχηματισμού συσσωματωμάτων δεν ευνοήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα. Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα του υλικού της κλίνης με διάφορες μορφές συσσωματωμάτων καθώς και η τομή αυτών.

Πίνακας 6.4: σημειακές αναλύσεις των υλικών που απεικονίζονται στις φωτογραφίες του σχήματος 6.5

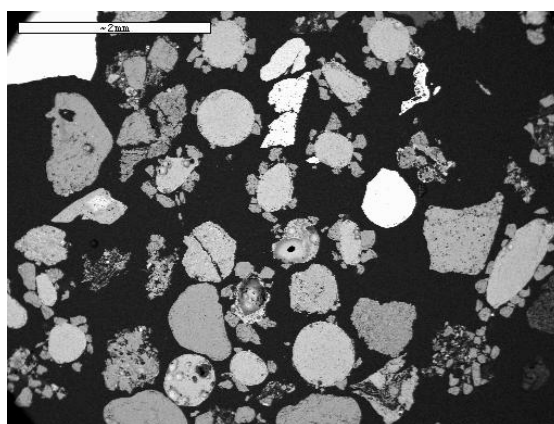
Σημεία	α	γ	ε1	ε2	ε3	στ1	στ2	στ3	ζ1	ζ2
Na	3.91	4.79	2.13	3.10	3.43	0.68	3.63	3.65	4.28	0.09
Mg	0.66	1.70	1.61	1.96	0.16	0.02	1.42	0.48	1.08	0.64
Al	6.71	1.42	0.54	0.27	0.36	0.05	0.81	0.01	0.20	1.33
Si	5.15	3.45	22.95	36.82	10.89	12.55	25.65	92.59	12.59	10.94
P	0.10	22.32	0.97	0.20	0.22	0.17	0.38	1.70	0.48	3.50
S	1.59	0.97	1.78	3.68	0.82	5.63	2.99	0.12	9.20	4.99
Cl	23.83	3.74	1.81	3.95	1.51	18.31	16.88	0.90	6.44	6.00
K	14.57	0.74	0.31	1.43	0.74	0.15	1.18	0.17	0.32	0.52
Ca	33.76	57.93	64.71	43.18	79.42	65.07	43.79	2.63	41.93	68.98
Ti	1.20	0.97	0.68	0.67	1.66	0.56	0.86	0.71	0.04	2.27
V	0.93	0.07	0.46	0.16	1.37	0.06	0.82	0.34	0.27	1.02
Cr	0.28	0.30	0.08	0.52	0.61	0.19	0.68	0.43	0.09	0.86
Mn	0.55	0.03	0.21	0.49	0.52	0.33	0.01	0.87	0.56	0.94
Fe	8.28	0.40	1.01	0.48	1.93	0.63	0.66	0.46	22.42	1.74
Ni	0.76	0.20	1.08	0.24	6.88	0.15	0.76	1.28	0.18	0.49
Zn	0.70	1.87	0.09	1.85	2.17	0.96	1.31	1.57	1.02	0.53
Cu	0.42	0.89	3.03	3.73	2.11	0.39	0.19	0.43	0.08	0.75

Ο βασικός μηχανισμός συσσωματωμάτων είναι η πλήρης τήξη της πυριτικής τέφρας και η εμφάνιση ιξώδους φάσης. Οι κόκκοι του υλικού της κλίνης καλύπτονται από τηγμένη τέφρα ή ενώνονται μεταξύ τους μέσω σχηματισμού «λαιμού». Αυτό είναι χαρακτηριστικό για τα συστήματα πλούσια σε πυρίτιο, και περιγράφεται ως τήξη λόγω ιξώδους ροής (viscous flow sintering). Γενικά δυο είναι οι βασικοί μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για το σχηματισμό συσσωματωμάτων σε εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης όπου αξιοποιούνται στερεά καύσιμα: (1) μερική ή εκτεταμένη τήξη τέφρας με σχηματισμό ρευστής ιξώδους φάσης (τήγμα) και (2) χημική αντίδραση μεταξύ των σωματιδίων. Ο μηχανισμός σχηματισμού

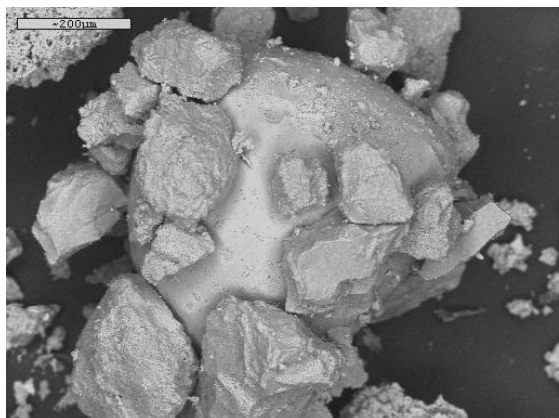
συσσωματωμάτων μέσω χημικής αντίδρασης εμφανίζεται όταν τα σωματίδια αντιδρούν χημικά με την τέφρα και σχηματίζεται μια νέα ένωση η οποία ενδεχομένως θα διαμορφώσει «λαιμό» μεταξύ των κόκκων. Ένας άλλος διαχωρισμός των μηχανισμών συσσωματωμάτων είναι : (1) συσσωμάτωση λόγω τήγματος και (2) συσσωμάτωση λόγω επίστρωσης. Και στις δυο περιπτώσεις η συσσωμάτωση κόκκων πραγματοποιείται μέσω σχηματισμού «λαιμού». Στην περίπτωση (1) ο «λαιμός» σχηματίζεται από τηγμένη τέφρα που προσπίπτει σε έναν κόκκο και δρα σαν κόλλα, ενώ στην περίπτωση (2) η επιφάνεια των κόκκων καλύπτεται από τήγμα, και η συσσωμάτωση συμβαίνει λόγω ελαχιστοποίησης της επιφανειακής τάσης των κόκκων που έρχονται σε επαφή υπό ορισμένες κρίσιμες συνθήκες (θερμοκρασία και πάχος επιστρώματος). [11]



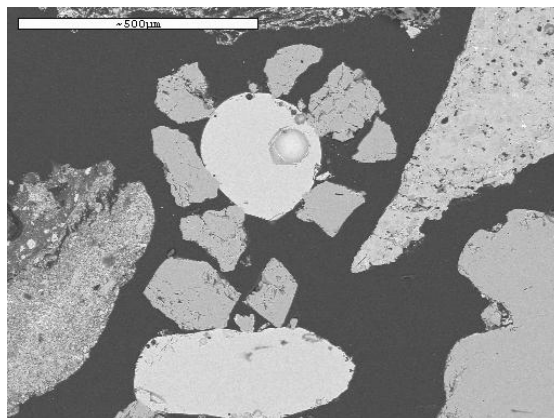
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.6: (α) απεικόνιση του υλικού της κλίνης, (β) τομή των υλικών που εμφανίζονται στην εικόνα α, (γ) συσσωμάτωμα γυαλιού με σωματίδια άμμου, (δ) τομή του συσσωματώματος της εικόνας γ.

Με γνωστό το μηχανισμό σχηματισμού συσσωματωμάτων και των δεδομένων του πειράματος διαπιστώνονται οι παράγοντες που συνέβαλαν στην εμφάνιση

ελάχιστων συσσωματωμάτων. Η παρουσία του καλίου στο καύσιμο συμβάλει στο σχηματισμό πυριτικών οξειδίων του καλίου που είναι υπεύθυνα για το σχηματισμό τήγματος. Παρόλα αυτά η χρονική διάρκεια του πειράματος πιθανόν να μην ήταν αρκετή για να συσσωρευτεί μεγάλη ποσότητα τήγματος στην κλίνη. Ένας ακόμα παράγοντας είναι το περιεχόμενο Cl στο καύσιμο, το οποίο βρέθηκε στη τέφρα ακόμα σε περιεκτικότητες 23,83%, το οποίο καθιστά το κάλιο πιο ενεργό προωθώντας την έκλυση του σε πτητικές μορφές. Στην περίπτωση που υπάρχει και χλώριο στο καύσιμο, η ισορροπία προβλέπει σχηματισμό αέριου KCl, που μειώνει λίγο τη διαθέσιμη ποσότητα του καλίου για σχηματισμό τηγμάτων οξειδίου και αλάτων. Τέλος η ποσότητα ασβεστίου που εντοπίστηκε στην τέφρα αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στο σχηματισμό ευτηκτικών ενώσεων πυριτίου καλίου. Παρατηρούμε λοιπόν όσα συσσωματώματα δημιουργήθηκαν αδρανοποίησαν αντιδράσεις της τέφρας ως προς το σχηματισμό μεγάλων συσσωματωμάτων ακόμα και μεταξύ των ήδη σχηματισμένων.

Τα υπόλοιπα στοιχεία που εμφανίζονται στις χημικές αναλύσεις αποτελούν βαρέα μέταλλα που είναι λιγότερο πτητικά από άλλα που διαφεύγουν μέσω του αερίου στην ιπτάμενη τέφρα. Κάποια από αυτά είναι ιδιαίτερα τοξικά και η μέθοδος απομάκρυνσης τους θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτική. Ένα από αυτά τα τοξικά είναι το Cr που εντοπίστηκε με μέγιστη περιεκτικότητα 6,7%. Λιγότερο τοξικά είναι τα Cu και Ni που εντοπίστηκαν ενώ τα Al και Fe που εντοπίστηκαν σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες έχουν και ιδιότητες καταλύτη. [4], [14]

Η συγκέντρωση δειγμάτων από το υλικό της κλίνης μετά το πέρας των πειραμάτων και η ανάλυση με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης με την χημική στοιχειακή ανάλυση αποκάλυψαν την ύπαρξη τμημάτων γυαλιού, χαλύβδινων συρμάτων, κομματιών αλουμινίου, εξανθρακωμάτων, κομματιών από κόκαλα, συσσωματωμάτων του υλικού της κλίνης και άλλων απροσδιόριστων υλικών γνωστής χημικής ανάλυσης τα οποία δεν εμπόδισαν τη λειτουργία της ρευστοποίησης και αεριοποίησης.

6.3 Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα συγκεντρώθηκε στους κυκλώνες της εγκατάστασης και παρακάτω φαίνεται η προσεγγιστική και η στοιχειακή ανάλυση της για κάθε μία από τις μορφές του καυσίμου και για κάθε ένα από τα πειράματα.

Ακολουθούν φωτογραφίες της τέφρας από ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Τα σωματίδια της τέφρας είναι πάρα πολύ μικρά καθώς όπως φαίνεται και στις εικόνες η κλίμακα είναι 2μm, 5μm και 10μm.

Από το ποσοστό του άνθρακα στην τέφρα διαπιστώνεται ότι δεν αεριοποιήθηκε ένα μέρος του άνθρακα του καυσίμου το οποίο παρασύρθηκε μαζί με τα υπόλοιπα υλικά της τέφρας για να συγκεντρωθεί τελικά στους κυκλώνες με σκοπό να απομακρυνθεί από το αέριο.

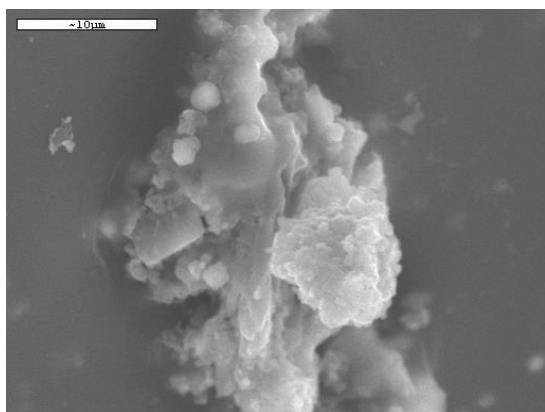
Το στερεό καύσιμο stabilat εξαιτίας της μικρής πυκνότητας και μάζας ήταν εύκολο να συμπαρασυρθεί από τον αέρα και να ξεφύγει στους κυκλώνες σε συνδυασμό με το γεγονός ότι παρόλη την προσπάθεια, κατά την επεξεργασία του, το υλικό να πάρει κοκκώδη μορφή ήταν πολύ εύκολο να θρυμματιστεί και να γίνει σα σκόνη λόγω του τρόπου τροφοδοσίας του στην κλίνη.

Πίνακας 6.5: Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας του stabilat

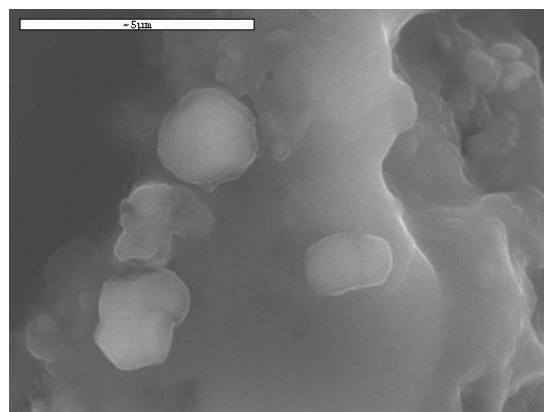
παράμετρος	Stabilat1 (χωρίς επεξεργασία)		Stabilat2 (με επεξεργασία)	
	800 °C	850 °C	800 °C	850 °C
Προσεγγιστική ανάλυση				
Υγρασία	8,2	8,3	4,1	4,1
Πτητικά	10,5	10,3	10,5	10,3
Άνθρακας	1,3	1,0	1,3	1,0
Τέφρα	88,2	89,3	88,2	89,3
Στοιχειακή ανάλυση				
C	14,40	14,31	14,81	16,26
H	1,13	1,13	1	1,03
N	0,99	0,57	1,11	1,13
S	0,57	0,54	0,47	0,5
O *	-	-	-	-
τέφρα	88,2	89,3	88,2	89,3

*από αφαίρεση

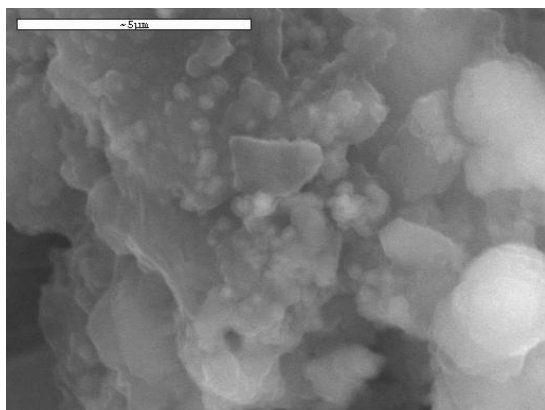
Επιπλέον η μεγάλη συσσώρευση ιπτάμενης τέφρας απαιτούσε το συνεχή καθαρισμό των κυκλώνων καθώς και άλλων σημείων της εγκατάστασης αποτελούμενων από φίλτρα για καθαρισμό του αερίου ειδικά πριν τη μεταφορά του στα όργανα μέτρησης. Είναι φανερό πως η χρήση ενός τέτοιου καυσίμου με μεγάλα ποσοστά τέφρας σε μια βιομηχανική εγκατάσταση θα απαιτούσε συνεχή απομάκρυνση της τέφρας και ιδανικότερα χωρίς να απαιτείται διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης.



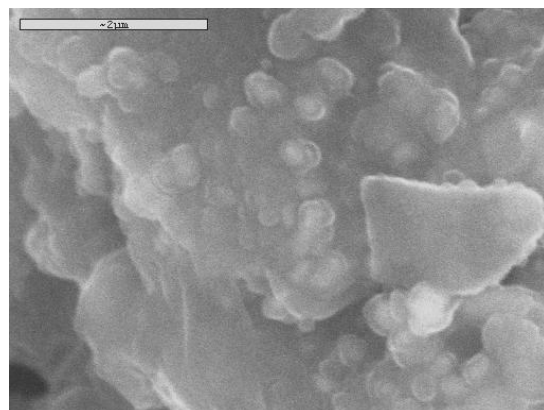
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.6: φωτογραφίες από ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης των μορίων της ιπτάμενης τέφρας, σε κλίμακα (α)10μm, (β),(γ)5μm, (δ)2μm.

Η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας ιπτάμενης τέφρας δημιουργεί την ανάγκη μεθόδου διαχείρισης της. Στην ιπτάμενη τέφρα είναι δυνατόν να σχηματιστούν διοξίνες και φουράνια τα οποία είναι τα πιο τοξικά παράγωγα μια θερμικής διεργασίας. Ο σχηματισμός τους ευνοείται από τις χαμηλές θερμοκρασίες <math><800^{\circ}\text{C}</math> καθώς και από την παρουσία Cu που δρα σαν καταλύτης, γι αυτό και η ιπτάμενη τέφρα κατά τη φάση που ψύχεται αποτελεί εύφορο έδαφος για το σχηματισμό τους. Διάφορες μέθοδοι διαχείρισης και εναπόθεσης της τέφρας είναι η υαλοποίηση, σταθεροποίηση με χρήση χημικών, φιλτράρισμα [15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα

Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο είχε σκοπό την αεριοποίηση αστικών απορριμμάτων. Η αεριοποίηση έγινε σε συγκεκριμένο αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Το στερεό καύσιμο που αεριοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εγκατάσταση ήταν μια δευτερογενής μορφή των αστικών απορριμμάτων, το stabilat. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εμφανίστηκαν διάφορα προβλήματα τα οποία ξεπεράστηκαν με αλλαγές στον αντιδραστήρα και με επεξεργασία στο καύσιμο. Σημαντικό μέρος της πειραματικής διαδικασίας ήταν η ανάλυση των αποτελεσμάτων και κυρίως του υλικού της κλίνης και της τέφρας του καυσίμου που παρέμεινε στην κλίνη. Η πειραματική διαδικασία και οι ανάγκες που προέκυψαν στην πορεία, καθώς και τα αποτελέσματα του πειράματος οδήγησαν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Μετά από δοκιμές παρατηρήθηκε ότι το καύσιμο stabilat δεν ήταν δυνατό να τροφοδοτηθεί στη συγκεκριμένη εγκατάσταση στη μορφή που παραλείφθηκε.
- Ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας μπορεί να διαχειριστεί ένα καύσιμο περισσότερο ομογενοποιημένο και με μικρότερα κομμάτια από ότι το stabilat κι έτσι έγινε επιπλέον επεξεργασία ώστε να παραχθεί μια καταλληλότερη μορφή καυσίμου.
- Η αεριοποίηση του καυσίμου ήταν επιτυχής ως προς την παραγωγή αερίου το οποίο μπορεί να καεί και να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας.
- Η τέφρα που συγκεντρώθηκε στην κλίνη δεν ευνόησε το σχηματισμό πολλών και μεγάλων συσσωματωμάτων κι επομένως δεν προέκυψαν προβλήματα απώλειας ρευστοποίησης.
- Τα συσσωματώματα που εμφανίστηκαν ήταν διαστάσεων έως 2mm δηλαδή αρκετά μικρού μεγέθους ώστε η ρευστοποίηση να μπορεί να αποκατασταθεί από μικρή μεταβολή της παροχής του αέρα σε περίπτωση μεγάλης συσσώρευσης τους μετά από πολύωρη διάρκεια αεριοποίησης.
- Η απομάκρυνση της τέφρας της κλίνης καθώς και της ιπτάμενης τέφρας γινόταν εύκολα αλλά ενώ είχε προηγηθεί διακοπή της λειτουργίας του αντιδραστήρα.
- Η επιτυχία της πειραματικής διαδικασίας επιβεβαίωσε την καταλληλότητα της μεθόδου αεριοποίησης για καύσιμα από αστικά απορρίμματα που περιέχουν μεγάλο ποσοστό τέφρας.
- Διαπιστώθηκε η εναλλαξιμότητα της μεθόδου αεριοποίησης με ρευστοποιημένη κλίνη όσο αφορά τη διαχείριση διαφορετικών καυσίμων, αφού στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, με ελάχιστες αλλαγές, έχουν αεριοποιηθεί και άλλα καύσιμα, κυρίως βιομάζας.
- Η αεριοποίηση του καυσίμου γενικότερα ήταν επιτυχής σε πειραματικό επίπεδο. Σε μια βιομηχανική εγκατάσταση όμως:

- Η συνεχής και πολύωρη λειτουργία ενός αντίστοιχου αντιδραστήρα θα απαιτούσε μέθοδο αποβολής της τέφρας χωρίς τη συνεχή διακοπή της λειτουργίας. Αυτό θα προϋπόθετε διαφορετικό σχεδιασμό του συστήματος από το οποίο απομακρύνεται η άμμος καθώς και του διασκορπιστή.
- Η μέθοδος τροφοδοσίας του αντιδραστήρα θα πρέπει να μπορεί να τροφοδοτήσει το καύσιμο stabilat στην αρχική του μορφή ή διαφορετικά να γίνεται μαζική επεξεργασία του, ώστε να προκύπτει καύσιμο σε αντίστοιχη μορφή με αυτή που προέκυψε από την εργαστηριακή επεξεργασία.
- Είναι απαραίτητη εφαρμογή μεθόδου διαχείρισης της τέφρας χωρίς να υπάρχουν βλαπτικές συνέπειες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EEA Report No 7/2006.
- [2] <http://europa.eu.int/comm/environment/waste/index.htm>.
- [3] How European waste will contribute to renewable energy, Roland V. Siemons, Energy Policy 30 (2002) 471-475
- [4] The incineration of waste in Europe: issues and perspectives, Laurent Bontoux, March 1999
- [5] Οδηγός για το περιβάλλον, Διαχείριση Απορριμμάτων, Δρ Ευάγγελος Τερζής, WWF Ελλάς, Αθήνα 2009
- [6] The story behind the strategy, EU waste policy, (http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/story_book.pdf)
- [7] http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
- [8] Waste-to-Energy in Europe, State of the art and further developments, CEWEP, Ella Stengler, Athens, November 2008
- [9] Combustion and Gasification in Fluidised Beds, Prabir Basu, Taylor & Francis Group, 2006
- [10] Energy from gasification of solid wastes, V.Belgiorno, G. De Feo, C.Della Rocca, R.M.A Napoli, Waste Management 23 (2003) 1-15
- [11] [Agglomeration in fluidised bed gasification of biomass](#), L.E. Fryda, K.D. Panopoulos, E. Kakaras, Powder Technology, Volume 181, Issue 3, 12 February 2008, Pages 307-320
- [12] Δικτυακός τόπος: www.herhof.com
- [13] Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology, M.Morris, L.Waldheim, Waste Management 18 (1998) 557-564
- [14] Behavior of metals in ash melting and gasification-melting of municipal solid waste, C.H.Jung, T.Matsuto, N.Tanaka, Waste Management 25 (2005) 301-310
- [15] Analysis of using gasification and incineration for thermal processing of wastes, Ladislav Bebar, Petr Stehlik, Leos Havlen, Jaroslav Oral, Applied Thermal Engineering 25 (2005) 1045-1055

