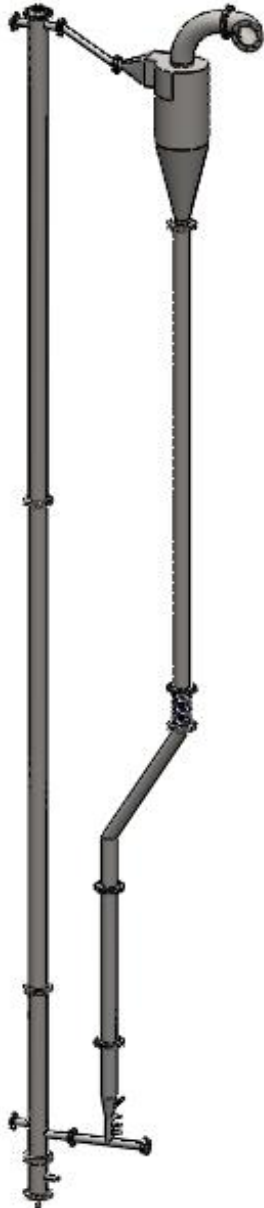




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ & ΛΕΒΗΤΩΝ



ΤΟΜΑΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Πειραματική Διερεύνηση της
Επίδρασης της Θερμοκρασίας στο
Παραγόμενο Αέριο από Αεριοποίηση
Βιομάζας σε Ρευστοποιημένη Κλίνη*

Επίβλεψη: Επίκουρος Καθηγητής κ. Καρέλλας Σωτήριος

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Ευχαριστίες

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Καρέλλα Σωτήριο για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Η ενασχόληση μου με την πειραματική εγκατάσταση και η αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη λειτουργία της, με εφοδίασαν με εμπειρία και γνώσεις που σπάνια κατακτώνται σε προπτυχιακό επίπεδο.

Ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες Ε.Μ.Π. Χριστοδούλου Χρήστο και Κουτσούμπα Εφηγιάννα, καθώς και τον υπεύθυνο του πειράματος Δρ. Πανόπουλο Κυριάκο, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν και την άριστη καθοδήγηση τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες στις συναδέλφους Παπανικολάου Ευδοκία και Τομαρά Παρασκευή για την στήριξη κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας, και στους συναδέλφους Ανδρέα, Αθηνά, Βασίλη, Έκτορα, Ευδοκία, Κατερίνα, Λοΐζο και Πωλίνα για την μέχρι τώρα κοινή πορεία.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, που μου έδωσαν τη δυνατότητα να ασχοληθώ με την εκπόνηση των πειραμάτων, απερίσπαστος από άλλες υποχρεώσεις, και τους αφιερώνω το παρόν κείμενο.

Περίληψη

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας, κατά την αεριοποίηση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη. Μελετάται η μεταβολή της σύστασης του παραγόμενου αερίου και παράλληλα, προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την τάση δημιουργίας συσσωματωμάτων από την τέφρα των καυσίμων, που οδηγούν σε απορευστοποίηση της κλίνης.

Τα πειράματα έγιναν σε εγκατάσταση αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία, στις εγκαταστάσεις του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, και εντάσσονται στο πρόγραμμα *Eurobioref* της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μελετήθηκαν πέντε είδη βιομάζας παραγόμενα από ενεργειακές καλλιέργειες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1.1
1.1	Βιομάζα.....	1.1
1.1.1	Είδη βιομάζας.....	1.2
1.1.2	Σχηματισμός και συστατικά φυτικής βιομάζας	1.3
1.1.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας [3].....	1.5
1.1.4	Τεχνολογίες αξιοποίησης βιομάζας	1.5
1.1.5	Είδη βιομάζας που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αεριοποίησης ...	1.7
1.2	Αεριοποίηση.....	1.12
1.2.1	Ιστορική Αναδρομή	1.12
1.2.2	Ανάλυση διεργασίας – Χημικές αντιδράσεις.....	1.13
1.2.3	Επίδραση οξειδωτικού μέσου (αυτόθερμη–αλλόθερμη αεριοποίηση)	1.15
1.2.4	Επίδραση λόγου αέρα καύσης	1.17
1.2.5	Επίδραση θερμοκρασίας.....	1.18
1.2.6	Αέριο σύνθεσης (Syngas).....	1.19
1.2.7	Αεριοποίηση υπό πίεση	1.20
1.2.8	Πίσεις.....	1.21
1.3	Ρευστοποίηση	1.22
1.3.1	Ανάλυση της διαδικασίας ρευστοποίησης	1.23
1.3.2	Καταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης.....	1.28
1.3.3	Εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης	1.29
1.3.4	Πιέσεις σε εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης.....	1.30
1.3.5	Πλεονεκτήματα αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (CFB)	1.34
2	Πειραματική εγκατάσταση.....	2.1
2.1	Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης.....	2.1
2.1.1	Τμήμα ανόδου (Riser)	2.1
2.1.2	Ηλεκτρικές αντιστάσεις.....	2.4
2.1.3	Κυκλώνας	2.5
2.1.4	Καθοδικός σωλήνας και βαλβίδα σχήματος L.....	2.6
2.1.5	Εναλλάκτης και flare	2.8
2.1.6	Σύστημα τροφοδοσίας	2.9
2.1.7	Μετρητικές διατάξεις.....	2.10
2.1.8	Λοιπά	2.11

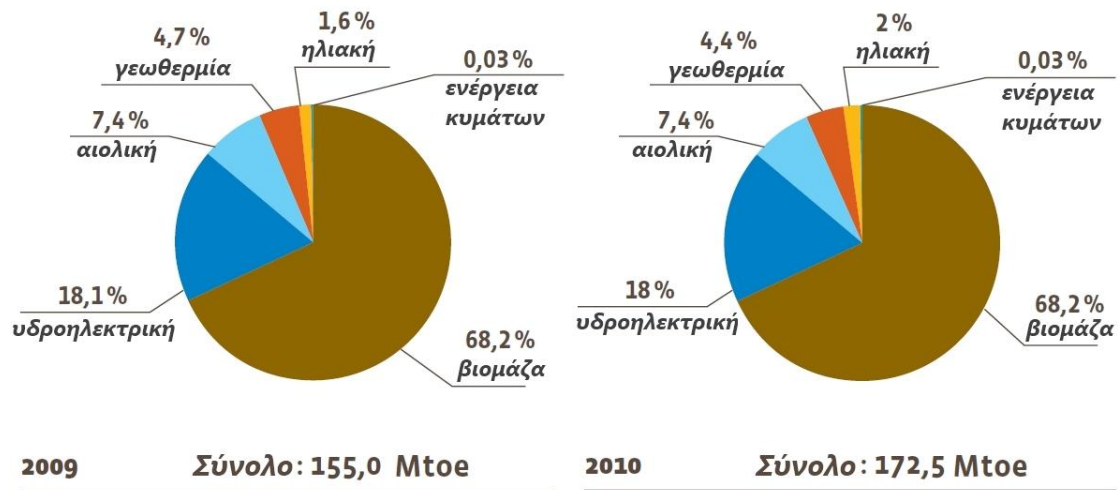
2.2	Τροποποιήσεις για την βελτιστοποίηση λειτουργίας του αντιδραστήρα	2.12
2.2.1	Σύστημα τροφοδοσίας	2.12
2.2.2	Αντιστάσεις θέρμανσης	2.14
2.2.3	Κυκλώνας και εναλλάκτης	2.15
3	Πειραματική διαδικασία	3.1
3.1	Σχεδιασμός πειράματος.....	3.1
3.1.1	Βαθμονόμηση κοχλιών τροφοδοσίας	3.4
3.1.2	Κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του αδρανούς.....	3.8
3.2	Εκτέλεση του πειράματος.....	3.9
3.2.1	Προετοιμασία εγκατάστασης	3.9
3.2.2	Κατά τη διάρκεια του πειράματος	3.10
3.2.3	Μετά το τέλος του πειράματος	3.10
3.3	Επεξεργασία των αποτελεσμάτων.....	3.11
4	Αποτελέσματα	4.1
4.1	Δοκιμές αεριοποίησης με μίσχανθο.....	4.1
4.2	Δοκιμές αεριοποίησης με γιατρόφα	4.6
4.3	Δοκιμές αεριοποίησης με αγριαγκινάρα.....	4.10
4.4	Δοκιμές αεριοποίησης με ηλίανθο	4.15
4.5	Δοκιμές αεριοποίησης με ιτιά	4.19
4.6	Συμπεράσματα - Προτάσεις	4.23
5	Βιβλιογραφία	5.25

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Βιομάζα

Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για την απόκτηση ενεργειακής αυτοδυναμίας των κρατών σε συνδυασμό με τις προβλέψεις φθίνουσας πορείας των ενεργειακών αποθεμάτων και τη διαμόρφωση οικολογικής συνείδησης σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει οδηγήσει τόσο στην υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών αυξημένης ενεργειακής απόδοσης όσο και στην τεχνολογική ανάπτυξη ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Οι κυριότερες ΑΠΕ από άποψη διαθεσιμότητας και εγκατεστημένης δυναμικότητας είναι η αιολική, η υδραυλική, η ηλιακή, η γεωθερμία και η βιομάζα [1]. Σημαντική θέση κατέχει η βιομάζα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 1.



Σχήμα 1. 1 Μερίδιο του κάθε πόρου, επί της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, για την Ευρώπη των 27 [2].

Αντίθετα από τις υπόλοιπες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε υγρό ή αέριο καύσιμο και να χρησιμοποιηθεί στις υπάρχουσες τεχνολογίες αντί του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Ακόμα, η χρήση της για παραγωγή ηλεκτρισμού μπορεί να είναι συνεχής, υπερτερώντας έτσι σε σύγκριση με την ηλιακή και αιολική ενέργεια.

Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζουμε οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας [3]. Σύμφωνα με την

Ελληνική νομοθεσία [4] η οποία υιοθέτησε πλήρως τον ορισμό από την Ευρωπαϊκή οδηγία 2001/77/ΕΚ περί αξιοποίησης πηγών για ηλεκτροπαραγωγή, ως βιομάζα ορίζεται:

« το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων που προέρχονται από τις γεωργικές, συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών, τις δασοκομικές και τις συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών αποβλήτων και αστικών λυμάτων και απορριμμάτων »

1.1.1 Είδη βιομάζας

Με βάση την προέλευση της, η βιομάζα κατηγοριοποιείται σε: βιομάζα υπολειμματικών μορφών (φυτική, ζωική ή απόβλητα) ή προερχόμενη από ενεργειακές καλλιέργειες [5,6]

Υπολειμματικές μορφές

- *Δασικής προέλευσης:* Συνίσταται στα καυσόξυλα, στα υπολείμματα καλλιέργειας των δασών, στα προϊόντα καθαρισμών για την προστασία τους από πυρκαγιές καθώς και στα υπολείμματα επεξεργασίας του ξύλου.
- *Γεωργικής προέλευσης:* Τα υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, παραγωγής, όπως π.χ. τα άχυρα, στελέχη αραβόσιτου, στελέχη βαμβακιάς, κλαδοδέματα, κλαδιά δένδρων, οι κληματίδες κ.ά. Επίσης, τα υποπροϊόντα που προέρχονται από τη μεταποίηση ή επεξεργασία των υλικών αυτών, όπως π.χ. τα ελαιοπυρηνόξυλα, υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, το πριονίδι κ.ά.
- *Ζωικής προέλευσης:* περιλαμβάνει κυρίως απόβλητα εντατικής κτηνοτροφίας από πτηνοτροφεία, χοιροστάσια, βουστάσια και σφαγεία.
- *Αστικά απόβλητα:* Το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και σκουπιδιών.

Ενεργειακές καλλιέργειες

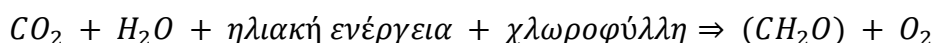
- *Ετήσιες:* σακχαρούχο ή γλυκό σόργο (*Sorghum bicolor* L. Moench), ινώδες σόργο (*Sorghum bicolor* L. Moench), κενάφ (*Hibiscus cannabinus* L.), ελαιοκράμβη (*Brassica napus* L.), βρασσική η αιθιοπία (*Brassica carinata* L. Braun) κ.ά.
- *Πολυετείς*
 1. Γεωργικές: Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus* L.), καλάμι (*Arundo donax* L.), μίσχανθος (*Miscanthus x giganteus*), switchgrass (*Panicum virgatum*) κ.ά.
 2. Δασικές: Ευκάλυπτος (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. & *E. globulus* Labill.), ψευδακακία (*Robinia pseudoacacia*) κ.ά.

Για την Ελλάδα το ενδιαφέρον εστιάζεται στα αγροτικά υπολείμματα καθώς έχει εκτιμηθεί ότι το σύνολο της άμεσα διαθέσιμης ποσότητας είναι περίπου 7.500.000 τόνοι ανά έτος. Από την αξιοποίηση τους θα εξοικονομούνται περίπου 3 Mtoe¹ αφού ένας τόνος βιομάζας ισοδυναμεί με 0,4 τόνους πετρελαίου [7].

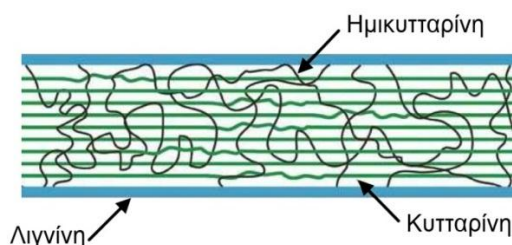
Παρ' όλα αυτά, υπολογίζεται πως η παραγωγή από ενεργειακές καλλιέργειες μπορεί να ξεπεράσει την υπολειμματική παραγωγή. Συγκριτικά με τα γεωργικά και δασικά υπολείμματα, οι καλλιέργειες αυτές έχουν το πλεονέκτημα της υψηλότερης παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς και της ευκολότερης συλλογής [6]. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στην φυτική βιομάζα από ενεργειακές καλλιέργειες.

1.1.2 Σχηματισμός και συστατικά φυτικής βιομάζας

Η βιομάζα αποτελεί μία δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Κατά αυτήν, η χλωροφύλλη των φυτών μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα καθώς και νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος [6]. Η διεργασία αυτή μπορεί να παρασταθεί σχηματικά ως εξής:



Προϊόντα της αντίδρασης είναι το οξυγόνο και το οργανικό προϊόν καρβουδρίδιο (CH_2O) το οποίο αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των σύνθετων οργανικών λιγνοκυτταρινικών συστατικών της βιομάζας. Τα συστατικά αυτά είναι η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη, και η λιγνίνη και συνολικά αποτελούν σχεδόν το 90% της δομής των φυτικών οργανισμών. Εκτός από τις ενώσεις αυτές τα είδη βιομάζας αποτελούνται σε μικρότερα ποσοστά από οργανικά εκχυλίσματα και ανόργανα συστατικά [1,6].



Σχήμα 1. 2 Σχηματική διάταξη λιγνοκυτταρινικών συστατικών [1]

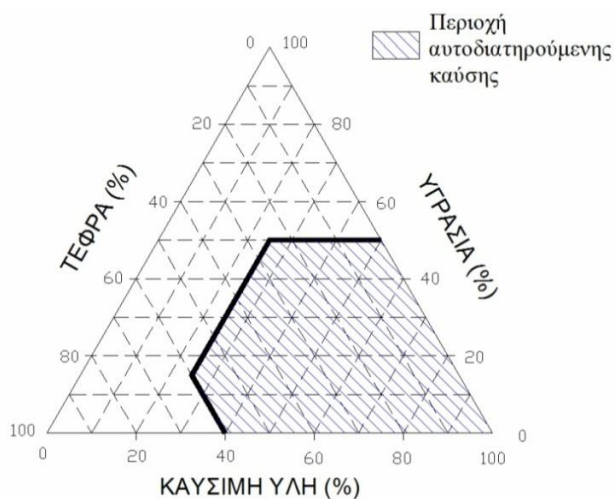
¹ toe: tons of oil equivalent – τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου

Κατά τις θερμικές διεργασίες διαχείρισης της βιομάζας, ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμπεριφορά των λιγνοκυτταρινικών συστατικών κατά τη διαδικασία θέρμανσης. Ειδικά στις διεργασίες της πυρόλυσης και της αεριοποίησης οι συνθήκες κατά τη θερμοκρασιακή διάσπαση και η σύσταση των πρωτογενών προϊόντων καθορίζουν τόσο την ποιότητα των τελικών προϊόντων όσο και την ενεργειακή απόδοση της διεργασίας.

Ανόργανα συστατικά

Τα ανόργανα συστατικά, τα οποία αναφέρονται και ως τέφρα, είναι ουσιαστικά το ανόργανο υπόλειμμα το οποίο παραμένει μετά από την πλήρη οξείδωση της φυτικής βιομάζας. Στις θερμικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας το ποσοστό και η σύσταση της τέφρας είναι ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι τόσο ως προς την επιλογή τεχνολογίας και συνθηκών διεργασίας όσο και λόγω της καταλυτικής επίδρασης στα αέρια παράγωγα κατά τα διάφορα στάδια των διεργασιών [1]. Κύρια συστατικά της τέφρας της βιομάζας είναι το κάλιο, το ασβέστιο, ο φώσφορος, το νάτριο, το πυρίτιο, ο σίδηρος, το αλουμίνιο και άλλα σε μικρότερες συγκεντρώσεις [12].

Για τον πλήρη καθορισμό των συστατικών της βιομάζας εκτελούνται δύο τύποι αναλύσεων. Η *προσεγγιστική ανάλυση (proximate analysis)* καθορίζει την υγρασία, την ποσότητα πτητικών, την τέφρα και τη δεσμευμένη ποσότητα άνθρακα και παρέχει μία ένδειξη της ποιότητας και του τύπου του καυσίμου μέσω του διαγράμματος Tanner (Σχήμα 1. 3). Η *στοιχειακή ανάλυση (ultimate analysis)* καθορίζει επακριβώς τα ποσοστά άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, θείου και αζώτου, καθιστώντας δυνατό τον υπολογισμό της θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου [11].



Σχήμα 1. 3 Διάγραμμα Tanner

1.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας [3]

Πλεονεκτήματα

- Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και δεν συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αφού η ποσότητα του αερίου που απελευθερώνεται κατά την καύση της, ισούται με την ποσότητα που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά την ανάπτυξη τους.
- Αποφυγή επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας με διοξείδιο του θείου (SO_2) που παράγεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων και συντελεί στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Η περιεκτικότητα της βιομάζας σε θείο είναι πρακτικά αμελητέα.
- Μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, που είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής καυσίμων από άλλες χώρες, με αντίστοιχη εξοικονόμηση συναλλάγματος.
- Αύξηση της απασχόληση στις αγροτικές περιοχές με τη χρήση εναλλακτικών καλλιεργειών, δημιουργία εναλλακτικών αγορών για τις παραδοσιακές καλλιέργειες (ηλιάνθος κ.ά.), και συγκράτηση του πληθυσμού στις αγροτικές περιοχές, συμβάλλοντας έτσι στην περιφερειακή ανάπτυξη της χώρας.

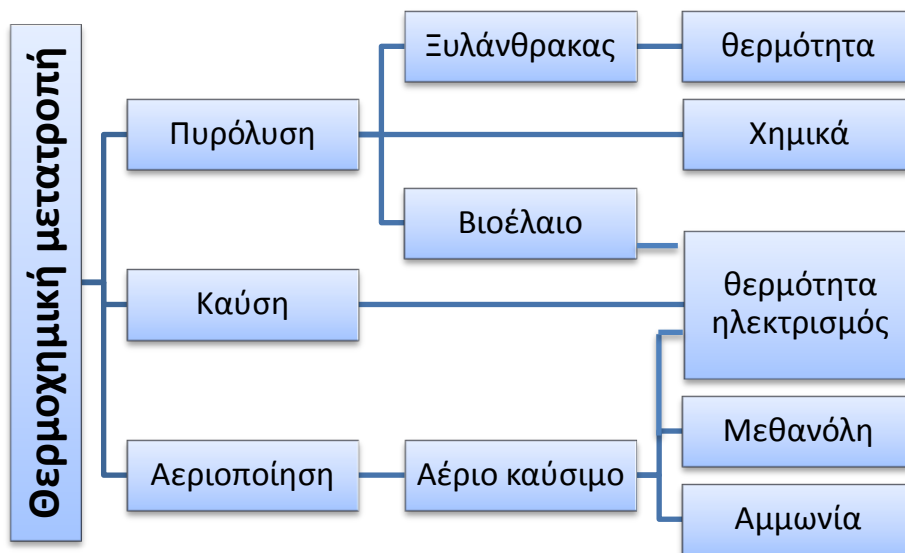
Μειονεκτήματα

- Μεγάλος όγκος και μεγάλη περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία, ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.
- Η μεγάλη διασπορά και η εποχιακή παραγωγή της βιομάζας δυσκολεύουν την συνεχή τροφοδοσία με πρώτη ύλη των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης της.
- Βάση των παραπάνω παρουσιάζονται δυσκολίες κατά τη συλλογή, μεταφορά, και αποθήκευση, που αυξάνουν το κόστος της ενεργειακής αξιοποίησης.
- Η αξιοποίηση της βιομάζας απαιτεί δαπανηρότερες εγκαταστάσεις και εξοπλισμό σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας (ορυκτά καύσιμα).

1.1.4 Τεχνολογίες αξιοποίησης βιομάζας

Η εκμετάλλευση των ενεργειακών αποθεμάτων της βιομάζας μπορεί να γίνει είτε με απ' ευθείας καύση, είτε με την μετατροπή της σε υγρά ή αέρια καύσιμα μέσω ειδικών βιοχημικών ή θερμοχημικών διεργασιών.

Οι θερμοχημικές διεργασίες είναι η καύση, αεριοποίηση και η πυρόλυση και τα παραγόμενα προϊόντα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. 4.



Σχήμα 1. 4 Θερμοχημικές διεργασίες μετατροπής βιομάζας και παραγόμενα προϊόντα

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αξιοποίησης της βιομάζας είναι η καύση σε μικρούς οικιακούς λέβητες για παραγωγή θερμότητας. Οι σύγχρονοι λέβητες παρέχουν αυτόματα τροφοδοσία καυσίμου και απαγωγή της τέφρας, καθώς και συνεχή έλεγχο της διεργασίας καύσης και της εκπομπής ρύπων [7]. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη βόρεια Ευρώπη ενώ από το έτος 2011 επιτρέπεται η εγκατάστασή τους και στη χώρα μας [8]. Απ' ευθείας καύση της βιομάζας γίνεται και σε μεγάλη κλίμακα για παραγωγή ηλεκτρισμού ή/και θερμότητας. Η μονάδα Steven's Croft στη Σκωτία, λειτουργεί από το 2009 και αποδίδει ισχύ $44MW_e$ καταναλώνοντας 480.000 τόνους βιομάζας το χρόνο [9].

Για παραγωγή ισχύος σε ενδιάμεση κλίμακα ($1 - 10MW$), προτιμάται η αεριοποίηση της βιομάζας έτσι ώστε το παραγόμενο αέριο να οδηγηθεί σε αεριοστρόβιλο ή κυψέλη καυσίμου, καθώς οι εν λόγω μηχανές εμφανίζουν τους μέγιστους βαθμούς απόδοσης για το συγκεκριμένο εύρος ισχύος [10].

Από το σύνολο των βιοχημικών διεργασιών (Σχήμα 1. 5), σημαντικότερη εφαρμογή βρίσκει η αλκοολική ζύμωση. Κατά την διεργασία αυτή, ειδικοί μικροοργανισμοί επιτυγχάνουν την ζύμωση των συστατικών της βιομάζας, με σκοπό την παραγωγή βιοαιθανόλης που χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο σε μηχανοκίνητα οχήματα.

Μέσω της αναερόβιας και αερόβιας χώνευσης, παράγονται βιοαέριο και οργανική ύλη αντίστοιχα. Οι ποσότητες βιοαερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την θέρμανση ή την ηλεκτροδότηση μικρών βιομηχανικών μονάδων, ενώ η παραγόμενη οργανική ύλη δύναται να χρησιμοποιηθεί ως βελτιωτικό εδάφους. Το παραγόμενο βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα [6,7].



Σχήμα 1. 5 Βιοχημικές διεργασίες μετατροπής της βιομάζας σε βιοκαύσιμα

1.1.5 Είδη βιομάζας που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αεριοποίησης

Γιατρόφα (Jatropha)



Εικόνα 1.1 Φύλλα και καρποί γιατρόφας

Η γιατρόφα είναι ένα γένος ανθοφόρων φυτών της οικογένειας Euphorbiaceae. Τα περισσότερα είδη της αυτοφυούν στην Αμερική, την Αφρική και την Ασία [13]. Παρουσιάζει ιδιαίτερη ανθεκτικότητα στην ξηρασία και τα παράσιτα ενώ οι σπόροι της περιέχουν 25-35% έλαιο. Το φυτό δεν είναι βρώσιμο καθώς οι σπόροι του είναι ιδιαίτερα τοξικοί. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν καταστήσει το καύσιμο ιδιαίτερα δημοφιλές για χρήση ως ενεργειακή καλλιέργεια. Υπολογίζεται ότι καλλιεργούνται ετησίως 1-2 εκατομμύρια εκτάρια ενώ μέχρι το 2015 αναμένεται η τιμή αυτή να φτάσει τα 12,8 εκατομμύρια εκτάρια [14].

Οι έρευνες επικεντρώνονται στην εξαγωγή του ελαίου από τους σπόρους του φυτού και στη θερμοχημική μετατροπή (κυρίως ταχεία πυρόλυση) των υπολειμμάτων της προηγούμενης διαδικασίας, αμφότερα για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων [15,16].

Αγριαγκινάρα (Cardoon)

Η αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus* L. ή Cardoon) ανήκει στην οικογένεια Asteraceae και μοιάζει με το σίλβο (*Cardus marianus*, κοινώς γαϊδουράγκαθο). Είναι ένα πολυετές φυτό, με ετήσιο κύκλο ανάπτυξης που μπορεί να φτάσει μέχρι και τα δύο μέτρα σε ύψος. Εντοπίζεται κυρίως στην Ισπανία, την Ιταλία τη Γαλλία και την Ελλάδα και καταφέρνει να επιβιώσει στο ζεστό και ξηρό μεσογειακό καλοκαίρι αναπτύσσοντας ένα πολύ βαθύ ριζικό σύστημα (μέχρι επτά μέτρα) και ξηραίνοντας το υπέργειο μέρος κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Αποδίδει ικανοποιητική σοδειά ακόμα και χωρίς άρδευση [17,18].



Εικόνα 1. 2 Αγριαγκινάρα και το ριζικό της σύστημα

Η αγριαγκινάρα είναι βρώσιμη και χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο πυτιάς για την παραγωγή τυριού, γλωρή ζωοτροφή για μηρυκαστικά και καλλιέργεια για αποκατάσταση εδαφών ρυπασμένων με κάδμιο ή αρσενικό. Αναφέρεται ακόμα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χαρτοπολτού και την εξαγωγή δραστικών φαρμακολογικών ουσιών [19-21].

Ως ενεργειακό φυτό παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς παράγει ελαιούχους σπόρους, παρόμοιους σε σύσταση με αυτούς του ηλίανθου, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υγρού βιοκαυσίμου[22]. Στη χώρα μας εξετάζεται η δυνατότητα μικτής καύσης αγριαγκινάρας στους υπάρχοντες λιγνιτικούς ΑΗΣ² με θετικά έως τώρα αποτελέσματα [7]. Η αεριοποίηση του συγκεκριμένου καυσίμου δεν έχει ως τώρα διερευνηθεί και τα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία αποτελούν πρωτοπορία του εργαστηρίου ατμοκινητήρων και λεβήτων του ΕΜΠ.

Μίσχανθος (*Miscanthus x giganteus*)



Εικόνα 1. 3 Μίσχανθος κατά τη συγκομιδή

² Ατμοηλεκτρικούς σταθμούς

Ο μίσχανθος είναι ένα αγρωστώδες, πολυετές φυτό που κατάγεται από τις χώρες της νοτιοανατολικής Ασίας. Το ύψος του μπορεί να φτάσει ως τα τέσσερα μέτρα και καλλιεργείται στην Ευρώπη εδώ και πολλά χρόνια ως καλλωπιστικό φυτό. Χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις σε χλωρή και ξηρή ουσία (ανάλογα με την περίοδο συγκομιδής), χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και είναι ανθεκτικό σε ασθένειες και παθογόνα. Στη χώρα μας, ο μέσος όρος ύψους της φυτείας φτάνει τα τρία μέτρα και η παραγωγή ξηρής ουσίας κυμαίνεται από 0,8 έως 3 τόνους ανά στρέμμα και έτος, ανάλογα με την άρδευση [5,23].

Οι ιδιότητες του αυτές το καθιστούν κατάλληλο για χρήση ως ενεργειακή καλλιέργεια. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πειραματικές μελέτες σχετικά με την αεριοποίηση του μίσχανθου[24,25] και ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. 1. Τα πειραματικά δεδομένα, μέχρι στιγμής, περιορίζονται στην αεριοποίηση με ατμό, με πολύ μικρή παροχή καυσίμου.

	Θερμοκρασία °C	H ₂	CO vol%	CO ₂	CH ₄	παροχή μάζας	αδρανές υλικό / καταλύτης
Michel et al. (2011) [24]	815	41.66	25.64	23.42	9.28	7.6 g/min	ολιβίνης
	860	45.61	23.98	22.57	7.84		
	880	45.89	24.98	22.04	7.71		
Khelfa et al. (2009) [25]	850	45.70	34.10	14.70	4.20	1.8 g	αιματίτης

Πίνακας 1. 1 Πειραματικά αποτελέσματα από την αλλόθερμη αεριοποίηση μίσχανθου

Ηλίανθος (Sunflower)



Εικόνα 1. 4 Άνθος Ηλίανθου

Ο ηλίανθος είναι ένα ετήσιο φυτό που ανήκει στην οικογένεια Compositae. Αποτελεί το δεύτερο σημαντικότερο ελαιοδοτικό φυτό καθώς οι σπόροι του περιέχουν 25 – 32% έλαιο και ένα στρέμμα καλλιεργήσιμης γης αποδίδει κατά μέσο όρο 150 – 300 κιλά σπόρους ανά εσοδεία. Το ηλιέλαιο χρησιμοποιείται ευρέως τόσο ως ανθρώπινη τροφή, όσο και ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ [5,26]. Έτσι παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η θερμοχημική ενεργειακή αξιοποίηση των υπολοιμάτων του φυτού μετά την εξαγωγή του ελαίου [27].

Ιτιά (Willow)

Η ιτιά είναι γένος φυτών που ανήκει στην οικογένεια Salix (Ιτεοειδών) και περιλαμβάνει 330 περίπου είδη δέντρων και θάμνων. Εντοπίζεται σε εύκρατα και ψυχρά κλίματα. Ως ενεργειακή καλλιέργεια κατατάσσεται στα δασικά φυτά μικρού περίτροπου χρόνου, τα οποία συγκομίζονται ανά μικρά χρονικά διαστήματα (κάθε 2 ή 3 χρόνια) και αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς μετά τη συγκομιδή [28,29]. Η παραγωγικότητα της σε ψυχρά κλίματα κυμαίνεται μεταξύ 2,5 με 4,5 τόνους ξηρής βιομάζας ανά εκτάριο, ανάλογα με την περιοδικότητα της συγκομιδής [30]. Παρουσιάζει χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και από οικονομικής άποψης ενδείκνυται η χρήση της ως πρώτη ύλη σε θερμοχημικές μετατροπές καθώς δεν παράγει βρώσιμους ή ελαιούχους καρπούς.



Εικόνα 1. 5 Ιτιά

1.2 Αεριοποίηση

Αεριοποίηση ονομάζεται η θερμοχημική διεργασία κατά την οποία στερεά ή υγρά ανθρακούχα καύσιμα (ορυκτά ή είδη βιομάζας), μετατρέπονται σε καύσιμο αέριο. Αυτό επιτυγχάνεται με υποστοιχειομετρική ‘καύση’, σε θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας με ελεγχόμενη παρουσία οξειδωτικού μέσου (αέρα, ατμού ή καθαρού οξυγόνου), σε ποσοστό 30-50% σε σχέση με την απαιτούμενη για τέλεια καύση στοιχειομετρική ποσότητα [31, 32]. Έτσι, τα συστατικά του αρχικού καυσίμου δεν οξειδώνονται πλήρως και το παραγόμενο αέριο (αέριο σύνθεσης ή syngas) είναι πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

1.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η μέθοδος της αεριοποίησης στερεών καυσίμων εφαρμόζεται ήδη περίπου δύο αιώνες και η ανάπτυξη και διάδοση της σχετικής τεχνολογίας συνδέεται με οικονομικά και κοινωνικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, από το 19^ο αιώνα μέχρι τις αρχές του 20^{ου}, εγκαθίστανται σε πολλές πόλεις αεριοποιητές (κυρίως άνθρακα). Το παραγόμενο αέριο διανέμεται στις βιομηχανίες και τα νοικοκυριά της περιοχής και χρησιμοποιείται για τον φωτισμό των δημόσιων χώρων με λάμπες αερίου. Η τεχνολογία αυτή παραγκωνίζεται σταδιακά, λόγω της ανάπτυξης των δικτύων ηλεκτροδότησης. Κατά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όλα τα αποθέματα βενζίνης επιτάσσονταν από τις στρατιωτικές δυνάμεις. Έτσι, για την κίνηση των πολιτών, αναπτύσσονται μικροί αεριοποιητές βιομάζας (ξύλου), συχνά εγκατεστημένοι κατ’ ευθείαν πάνω στα οχήματα. Με το τέλος του πολέμου και λόγω της αφθονίας των ορυκτών καυσίμων η τεχνολογία της αεριοποίησης δεν εμφανίζει ιδιαίτερη ζήτηση παρά μόνο κατά τις δεκαετίες του ’70 και ’80 παράλληλα με τις μεγάλες πετρελαϊκές κρίσεις. Η τεχνολογία αναπτύσσεται κυρίως στις Η.Π.Α. και αφορά την αεριοποίηση άνθρακα και βιομάζας. Με το τέλος των κρίσεων και την πτώση της τιμής του πετρελαίου οι περισσότερες από τις τότε προσπάθειες εγκαταλείπονται.

Από το τέλος της δεκαετίας του ’90 ξεκινάει μία νέα περίοδος άνθισης της συγκεκριμένης τεχνολογίας η οποία φτάνει ως τις μέρες μας. Οι λόγοι που οδηγούν σε αυτή είναι πια οικολογικοί και αφορούν στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σήμερα, η τεχνολογία της αεριοποίησης συνδέεται άμεσα με τη χρήση της βιομάζας ως καύσιμη ύλη καθώς αυτή αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [33, 34].

1.2.2 Ανάλυση διεργασίας – Χημικές αντιδράσεις

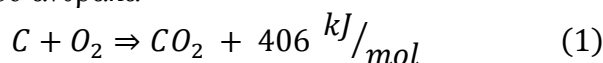
Η διεργασία περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: ξήρανση, αποπτητικοποίηση, οξείδωση και αεριοποίηση³. Η ξήρανση πραγματοποιείται με θερμοκρασίες έως 150°C και οδηγεί στη σταδιακά απομάκρυνση της υγρασίας από το καύσιμο. Με την άνοδο της θερμοκρασίας στους 250°C ξεκινά η αποπτητικοποίηση κατά την οποία απομακρύνονται από το καύσιμο όλα τα πτητικά συστατικά (κυρίως CO , CO_2 , H_2 , CH_4 και πίσσες), και παραμένει το εξανθράκωμα, το οποίο αποτελείται από στερεοποιημένο άνθρακα και ανόργανα συστατικά [1,35]. Τα στάδια της οξείδωσης και της αεριοποίησης περιγράφονται πιο αναλυτικά, μέσω των βασικών εξισώσεων που τα διέπουν.

Εδώ παρουσιάζονται οι βασικότερες χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης και βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της διεργασίας. Για καλύτερη εποπτεία χωρίζονται σε:

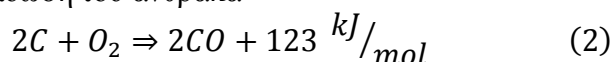
A. Αντιδράσεις οξείδωσης

Οι εξώθερμες αντιδράσεις οξείδωσης πραγματοποιούνται μεταξύ του οξειδωτικού μέσου και των καυσίμων συστατικών της βιομάζας⁴, και εκλύουν την απαιτούμενη θερμότητα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της διεργασίας σε επιθυμητά επίπεδα.

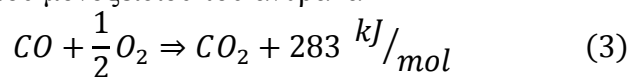
- Οξείδωση του άνθρακα



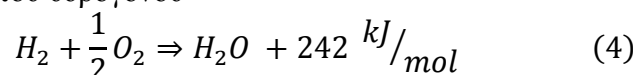
- Μερική οξείδωση του άνθρακα



- Οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα



- Οξείδωση του υδρογόνου



³ Ανάλογα με το είδος του αεριοποιητή τα στάδια αυτά μπορεί να μην είναι πλήρως διακριτά.

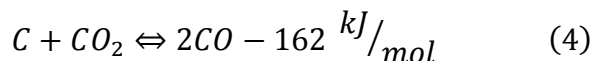
⁴ Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο κάθε στερεό καύσιμο μπορεί να αεριοποιηθεί. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην αεριοποίηση βιομάζας.

Οι αντιδράσεις οξείδωσης λαμβάνουν χώρα μέχρι την κατανάλωση όλης της ποσότητας του οξειδωτικού μέσου με αποτέλεσμα την απουσία μοριακού οξυγόνου στην τελική σύσταση του αερίου.

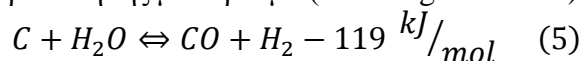
B. Αντιδράσεις αεριοποίησης

Οι αντιδράσεις αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες (>700° C) και πραγματοποιούνται ελλείψει οξυγόνου. Χωρίζονται σε ομογενείς⁵ και ετερογενείς⁶ και οι κυριότερες είναι οι εξής:

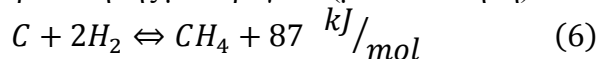
- Αντίδραση Boudouard



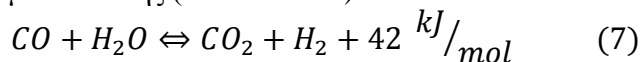
- Αντίδραση αεριοποίησης με υδρατμό (water – gas reaction)



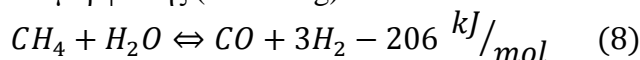
- Αντίδραση αεριοποίησης με υδρογόνο (μεθανοποίηση)



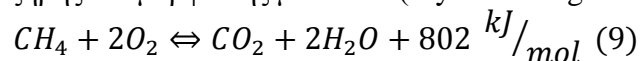
- Αντίδραση μετατόπισης (shift reaction)



- Αντίδραση αναμόρφωσης (reforming)



- Αντίδραση ξηρής αναμόρφωσης μεθανίου (dry reforming reaction)



⁵ Ομογενείς καλούνται οι αντιδράσεις στις οποίες τα αντιδρώντα βρίσκονται στην ίδια φάση. Στην περίπτωση της αεριοποίησης, είναι αυτές κατά τις οποίες αέρια μόρια προϊόντων αντιδρούν με αέρια μόρια οξειδωτικού (οξυγόνου ή ατμού).

⁶ Ετερογενείς καλούνται οι αντιδράσεις στις οποίες τα αντιδρώντα βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις. Στην περίπτωση της αεριοποίησης, είναι αυτές κατά τις οποίες αέρια μόρια αντιδρούν με τα στερεά μόρια του άνθρακα.

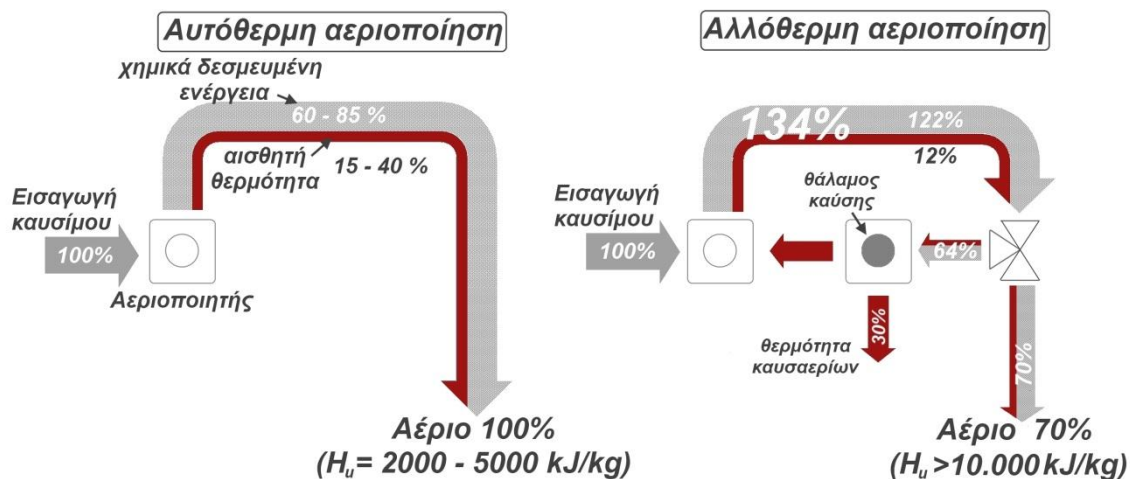
Το φαινόμενο της αεριοποίησης είναι εξαιρετικά σύνθετο και περιλαμβάνει πληθώρα αντιδρώντων και εκατοντάδες ακόμα χημικές αντιδράσεις. Πολλές προσπάθειες γίνονται για ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της διεργασίας [36]. Παρ' όλα αυτά, η παρατήρηση των πιο πάνω στοιχειωδών αντιδράσεων οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, οι αντιδράσεις (5) και (8) είναι ενδόθερμες, έτσι γίνεται κατανοητό ότι όταν το οξειδωτικό μέσο είναι ατμός, για την αεριοποίηση χρειάζεται πρόσδοση θερμότητας από εξωτερική πηγή και η διεργασία χαρακτηρίζεται ως αλλόθερμη. Ακόμα, όλες οι αντιδράσεις αεριοποίησης (4-9) είναι αμφίδρομες και η κατάσταση ισορροπίας τους εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία του αεριοποιητή όσο και από την ποσότητα των αντιδρώντων εντός αυτού. Έτσι, η σύνθεση του παραγόμενου αερίου εξαρτάται άμεσα από το είδος του οξειδωτικού μέσου, τη θερμοκρασία και το λόγο αέρα καύσης. Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί λεπτομερέστερη ανάλυση των παραπάνω.

1.2.3 Επίδραση οξειδωτικού μέσου (αυτόθερμη–αλλόθερμη αεριοποίηση)

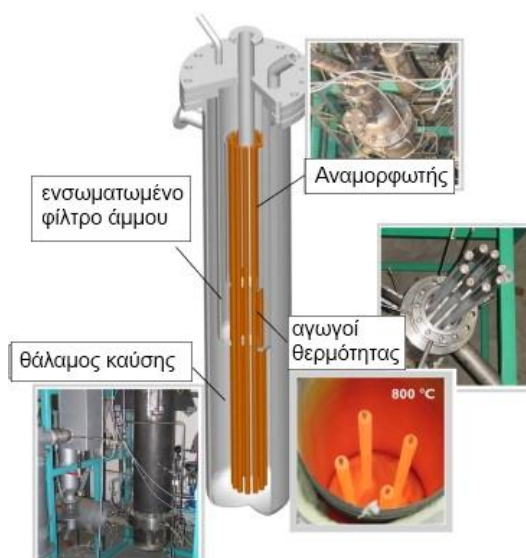
Αυτόθερμη ονομάζεται η αεριοποίηση όταν για οξειδωτικό μέσο χρησιμοποιείται αέρας ή καθαρό οξυγόνο. Σε αυτήν την περίπτωση, η απαιτούμενη θερμότητα για τη διατήρηση του φαινομένου εκλύεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις οξείδωσης της βιομάζας. Όταν χρησιμοποιείται αέρας μεγάλο ποσοστό του παραγόμενου αερίου αποτελεί το άζωτο που περιέχεται σε αυτόν, το οποίο ως αδρανές αέριο, δεν συμμετέχει στις αντιδράσεις της αεριοποίησης. Ορισμένες φορές μάλιστα, είναι επιθυμητή η παρουσία του, καθώς η μεγάλη ποσότητα του ενεργεί σαν διαχύτης θερμότητας κρατώντας σταθερή την θερμοκρασία του αντιδραστήρα [11]. Έτσι, η αεριοποίηση με αέρα δεν ενδείκνυται για παραγωγή αερίου μεγάλης θερμογόνου ικανότητας ή για συλλογή κάποιου παραγόμενου συστατικού (π.χ. υδρογόνου για παραγωγή αμμωνίας), αλλά προτιμάται για την παραγωγή αερίου που είτε καίγεται σε καυστήρες είτε καταναλώνεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστροβίλους.

Αλλόθερμη ονομάζεται η αεριοποίηση όταν για οξειδωτικό μέσο χρησιμοποιείται ατμός ή διοξείδιο του άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή, επειδή οι ενδόθερμες αντιδράσεις που επικρατούν απαιτούν σημαντικά ποσά θερμότητας, είναι απαραίτητη η πρόσδοση θερμότητας στον αντιδραστήρα από εξωτερική πηγή.



Σχήμα 1. 6 Σχηματική παράσταση αυτόθερμης και αλλόθερμης αεριοποίησης[37]

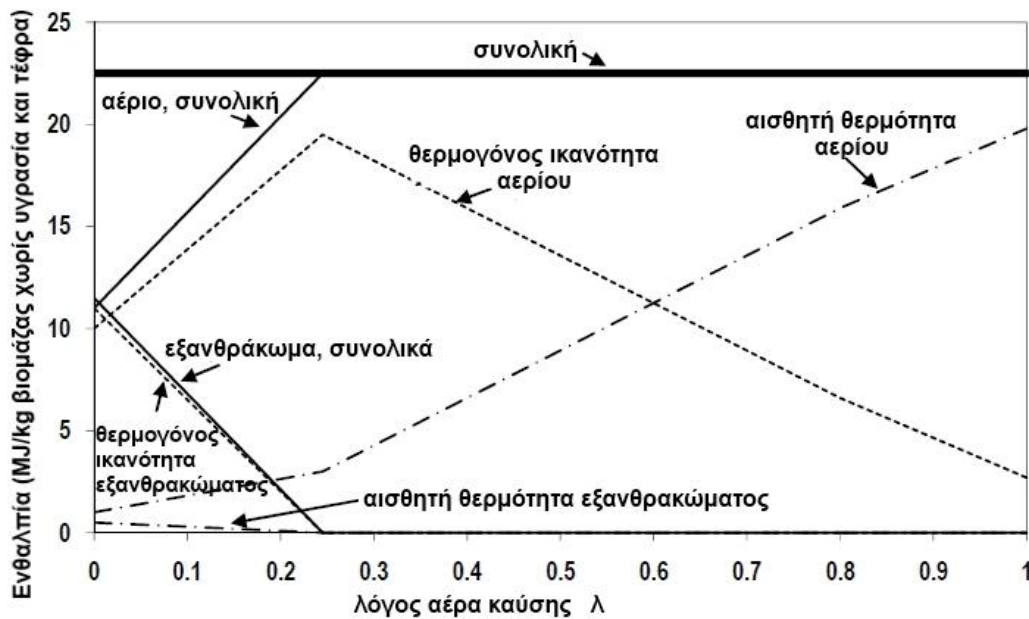
Έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν την θερμογόνο δύναμη του εξανθρακώματος ή μέρος του παραγόμενου αέριου, πλήρης καύση των οποίων εξασφαλίζει την απαιτούμενη πρόσδοση θερμότητας. Οι εγκαταστάσεις αλλόθερμης αεριοποίησης είναι έτσι πιο πολύπλοκες αφού χρειάζονται ατμοποιητή και δευτερεύον σύστημα καύσης. Όμως, το παραγόμενο αέριο έχει σαφώς μεγαλύτερη θερμογόνο ικανότητα (λόγω και της απουσίας αζώτου) και προτιμάται για την παραγωγή υδρογόνου [37]. Στο Σχήμα 1. 7 απεικονίζεται το πρότυπο BioHPR στο οποίο η απαιτούμενη θερμότητα για την αεριοποίηση προσδίδεται μέσω της αλλαγής φάσης (εξάτμισης) του υγρού που βρίσκεται εντός των αγωγών θερμότητας.



Σχήμα 1. 7 Εγκατάσταση BioHPR (Biomass Heatpipe Reformer) για αυτόθερμη αεριοποίηση[37]

1.2.4 Επίδραση λόγου αέρα καύσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αεριοποίηση αποτελεί την υποστοιχειομετρική “καύση” του καυσίμου, με το ποσοστό του οξειδωτικού να κυμαίνεται από 20~50% σε σχέση με την απαιτούμενη ποσότητα για στοιχειομετρική καύση. Η πιο συνηθισμένη τιμή είναι το 30% (δηλαδή λόγος αέρα καύσης $\lambda=0,3$). Η τιμή αυτή επιδρά σημαντικά στο παραγόμενο αέριο προϊόν αφού καθορίζει το ποσοστό του άνθρακα που θα οξειδωθεί αρχικά. Έτσι, καθορίζεται το ύψος της ζώνης καύσης στον αντιδραστήρα, η θερμοκρασία αυτής, καθώς και η σύνθεση του αερίου που περνά στη ζώνη αεριοποίησης. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και στην παραγωγή των πισσών⁷ και του εξανθρακώματος. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο Σχήμα 1. 8.

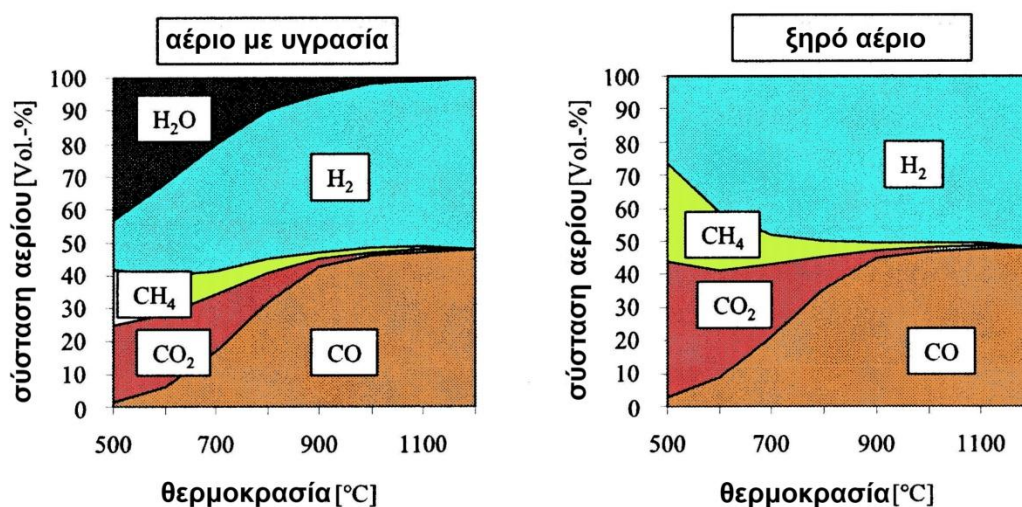


Σχήμα 1. 8 Επίδραση του λόγου αέρα καύσης στο ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου [35]

⁷ Οι πίσσες είναι προϊόν της αεριοποίησης και παρουσιάζονται σε επόμενη παράγραφο.

1.2.5 Επίδραση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία του αεριοποιητή αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη σύσταση του παραγόμενου αέριου προϊόντος. Όπως αναφέρθηκε, η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην χημική ισορροπία των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Για παράδειγμα, η αντίδραση Boudouard ($C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$) έχει ως θερμοδυναμικό όριο την θερμοκρασία των 700°C. Όσο η θερμοκρασία αυξάνει πάνω από τους 700°C, ευνοείται η ενδόθερμη αντίδραση σχηματισμού μονοξειδίου του άνθρακα [38]. Η αντίδραση αεριοποίησης με υδρατμό επίσης ευνοείται με την αύξηση της θερμοκρασίας⁸. Τελικά, με την αύξηση της θερμοκρασίας, τα ποσοστά του μονοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου στο αέριο σύνθεσης αυξάνονται. Αντίθετα, μειώνονται τα ποσοστά του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου. Η συνολική επίδραση της θερμοκρασίας στη σύσταση του παραγόμενου αέριου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. 9.

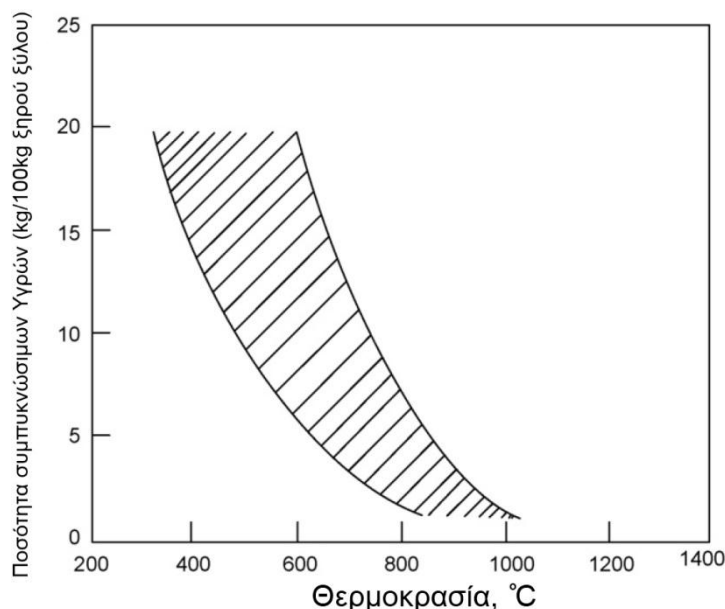


Σχήμα 1. 9 Επίδραση της θερμοκρασίας στη σύσταση του παραγόμενου αερίου [37]

Ακόμα, η αύξηση της θερμοκρασίας, ευνοεί την διάσπαση των πηκτών⁹ (Σχήμα 1. 10). Αυτό είναι απολύτως επιθυμητό, καθώς όχι μόνο μειώνει τις απαιτήσεις για καθαρισμό του αερίου, αλλά συντελεί και στην αύξηση του ποσοστού του άνθρακα που μετατρέπεται στα ζητούμενα αέρια προϊόντα.

⁸ Η ισορροπία τείνει προς το σχηματισμό μονοξειδίου και υδρογόνου

⁹ Οι πηκτές είναι προϊόν της αεριοποίησης και παρουσιάζονται σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 1. 10 Παραγωγή πίσσων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης [39]

1.2.6 Αέριο σύνθεσης (Syngas)

Κατά το σχεδιασμό μίας μονάδας αεριοποίησης, ανάλογα με τη μετέπειτα χρήση του παραγόμενου αερίου καθορίζεται και η επιθυμητή σύσταση αυτού. Η ζητούμενη σύσταση είναι αυτή που καθορίζει το είδος του αεριοποιητή, καθώς και τους λειτουργικούς παράγοντες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Το αέριο προϊόν που παράγεται μπορεί να καταταχθεί στις εξής κατηγορίες [40]:

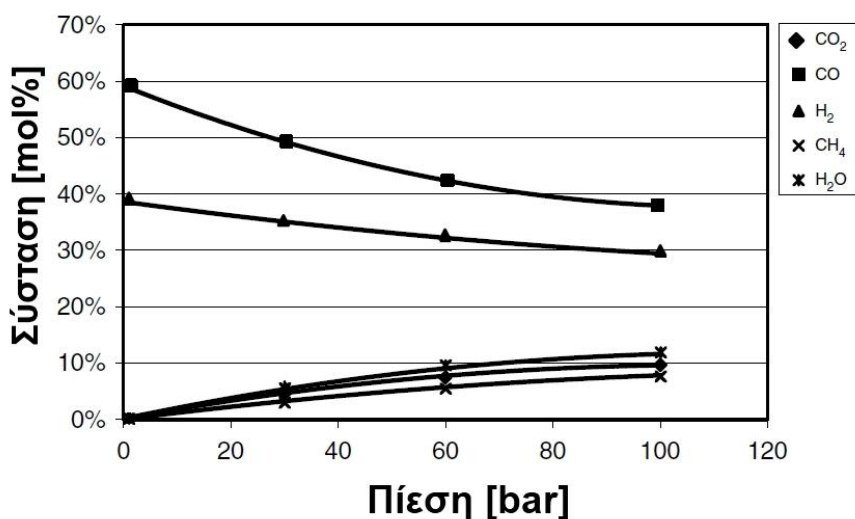
1. Χαμηλής θερμογόνου δύναμης ($3,5$ με 10 MJ/m^3) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο καύσιμο για αεριοστρόβιλο, καύσιμο σε λέβητα για παραγωγή ατμού κ.α.
2. Μέσης θερμικής αξίας (10 με 20 MJ/m^3) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο καύσιμο σε αεριοστρόβιλο, για παραγωγή υδρογόνου H_2 , για καύσιμο σε κυψέλη καυσίμου (fuel cell), για σύνθεση καυσίμου και διάφορες χημικές διεργασίες (Fisher-Tropsch).
3. Υψηλής θερμικής αξίας (20 με 35 MJ/m^3) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο καύσιμο σε αεριοστρόβιλο, για παραγωγή υδρογόνου H_2 , για καύσιμο σε κυψέλη καυσίμου και υποκατάστατο του φυσικού αερίου χωρίς κάποια διαδικασία κατεργασίας του μεθανίου.
4. Υποκατάστατα φυσικού αερίου (Substitute natural gas-SNG) (35 MJ/m^3) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή υδρογόνου και διαφόρων άλλων χημικών στοιχείων και για καύσιμο σε κυψέλη καυσίμου

Μία τυπική τιμή της θερμογόνου δύναμης του αερίου που παράγεται κατά την αεριοποίηση βιομάζας είναι $4 - 18 \text{ MJ/Nm}^3$ (χαμηλής ή μέσης θερμικής αξίας), ενώ του φυσικού αερίου (το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο) είναι $36 - 40 \text{ MJ/Nm}^3$.

1.2.7 Αεριοποίηση υπό πίεση

Η αεριοποίηση υπό πίεση παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη, γι' αυτό και οι περισσότερες σύγχρονες εγκαταστάσεις κατασκευάζονται για λειτουργία υπό πίεση που ξεκινά από τα 10bar και μπορεί να ξεπερνά τα 100bar [11]. Η συμπίεση του αερίου μειώνει τον όγκο του, άρα το μέγεθος της εγκατάστασης καθίσταται σημαντικά μικρότερο. Εξάλλου, οι μετέπειτα χρήσεις του αερίου προϊόντος (π.χ. εισαγωγή σε αεριοστρόβιλο) απαιτούν συμπίεση αυτού. Έτσι, προκύπτει και σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, αφού η συμπίεση κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης είναι σαφώς ευκολότερη από τη συμπίεση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

Η αύξηση της πίεσης, μεταβάλλει τις μερικές πιέσεις των αερίων που συμμετέχουν στις αντιδράσεις της αεριοποίησης, με αποτέλεσμα την αλλαγή της χημικής ισορροπίας αυτών. Έτσι, η σύσταση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης εξαρτάται από την πίεση λειτουργίας του αεριοποιητή. Το Σχήμα 1. 11 παρουσιάζει την μεταβολή της σύστασης λόγω της αλλαγής πίεσης για θερμοκρασία αεριοποίησης τους 1000°C.



Σχήμα 1. 11 Διακύμανση της σύστασης του αερίου ανάλογα με την πίεση (για αεριοποίηση στους 1000°C)

Συνοψίζοντας, η αεριοποίηση υπό πίεση εμφανίζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά και τη χρήση του παραγόμενου αερίου προκύπτει η βέλτιστη τιμή πίεσης λειτουργίας μίας εγκατάστασης. Για παράδειγμα, όταν το αέριο σύνθεσης πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τροφοδότηση αεριοστρόβιλου πίεσης 20bar, συμφέρει η αεριοποίηση να γίνεται σε επαρκώς μεγαλύτερη πίεση, ώστε να μην απαιτείται μετέπειτα συμπίεση του αερίου και να καλύπτονται οι απώλειες πίεσης από τον αεριοποιητή μέχρι το στρόβιλο.

1.2.8 Πίτσες

Κατά την αεριοποίηση βιομάζας, εκτός από το καύσιμο αέριο, παράγονται επίσης πίτσες και στερεά (εξανθράκωμα και τέφρα). Ως πίτσες, χαρακτηρίζονται γενικά, όλοι οι αρωματικοί και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH's) που παράγονται κατά τη διαδικασία [41]. Το Ευρωπαϊκό πρότυπο δειγματοληψίας και μέτρησης πίτσας (European CEN standard), δίνει τον ακόλουθο ορισμό [42]:

“ως πίσσα ορίζεται η οργανική ύλη με μοριακό βάρος μεγαλύτερο του βενζολίου - C_6H_6 ”

Οι πίτσες προκύπτουν στην πρωτογενή τους μορφή κατά το στάδιο της πυρόλυσης, και στη συνέχεια αντιδρούν τόσο με αέρια συστατικά όσο και με στερεά παράγωγα, προς σχηματισμό δευτερογενών και τριτογενών ενώσεων. Το σημείο συμπύκνωσης τους κυμαίνεται από 300 έως 500°C¹⁰, άρα βρίσκονται στην αέρια φάση εντός του αεριοποιητή. Με την πτώση της θερμοκρασίας συμπυκνώνονται, σχηματίζοντας ένα σκουρόχρωμο κολλώδες υγρό, χαρακτηριστικής οσμής. Αυτό οδηγεί σε προβλήματα διάβρωσης και στόμωσης των σωληνώσεων, εναλλακτών και φίλτρων της εγκατάστασης. Παρόμοια προβλήματα παρουσιάζονται και στις σωληνώσεις και βαλβίδες των μηχανών, ή στις μεμβράνες των κυψελών καυσίμου, όταν το αέριο σύνθεσης χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης και η αύξηση του συνολικού κόστους [41].

Η απομάκρυνση των πιτσών είναι δυνατή μέσω θερμικών, καταλυτικών ή φυσικών διεργασιών. Κατά την αεριοποίηση, η παραγωγή τους είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας (Σχήμα 1. 10). Με την αύξηση της θερμοκρασίας οι δεσμοί των πολυκυκλικών υδρογονανθράκων σπάνε ευκολότερα και το ποσοστό του άνθρακα του καυσίμου που μετασχηματίζεται στα ζητούμενα καύσιμα αέρια μεγιστοποιείται. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν και με χρήση κατάλληλου αδρανούς υλικού, το οποίο λειτουργεί ως καταλύτης στη διάσπαση των ανθρακικών δακτυλίων.

Τέλος, παρότι οι πίτσες είναι ανεπιθύμητες ως προϊόν της αεριοποίησης, αποτελούν ανθρακικές ενώσεις με σημαντικό ενεργειακό περιεχόμενο. Έτσι, καθίσταται δυνατή η μετέπειτα χρησιμοποίησή τους, είτε μέσω απ' ευθείας καύσης, είτε μέσω μετατροπής τους σε υγρό καύσιμο [43].

¹⁰ Το εύρος διακύμανσης οφείλεται στην ύπαρξη πλήθους ενώσεων διαφορετικού μοριακού βάρους και φυσικοχημικής συμπεριφοράς.

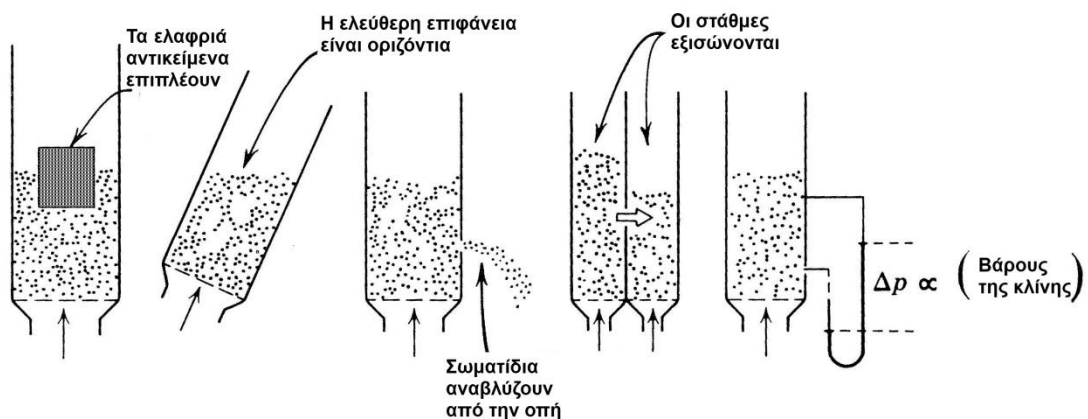


Σχήμα 1. 12 Απλοποιημένο διάγραμμα καταλυτικών δυνατοτήτων επεξεργασίας - απομάκρυνσης των πισσών από το παραγόμενο αέριο σύνθεσης [39]

1.3 Ρευστοποίηση

Ρευστοποίηση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ένα στρώμα σωματιδίων, συμπεριφέρεται ως ρευστό υψηλού ιξώδους, υπό την επίδραση ανοδικού ρεύματος αερίου ή υγρού [44]. Ρευστοποιημένη κλίνη ονομάζεται το στρώμα των σωματιδίων που ρευστοποιούνται.

Μία ρευστοποιημένη κλίνη σε πυκνή φάση μοιάζει με υγρό κατά τη διάρκεια του βρασμού. Ένα ελαφρύ αντικείμενο που βρισκόταν βυθισμένο στο στρώμα των σωματιδίων, μετά την έναρξη της ρευστοποίησης θα επιπλεύσει στην επιφάνεια της κλίνης, η οποία θα είναι οριζόντια ανεξάρτητα από την κλίση του δοχείου στο οποίο βρίσκεται. Ακόμα, δύο συνδεδεμένες κλίνες θα έχουν συνεπίπεδες ελεύθερες επιφάνειες όπως δύο συγκοινωνούντα δοχεία, ενώ η πίεση της κλίνης είναι αντιστρόφως ανάλογη του ύψους της, όπως η υδροστατική πίεση μιας δεξαμενής με υγρό. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. 13 [45].



Σχήμα 1. 13 Συμπεριφορά ρευστοποιημένων κλινών

Οι ρευστοποιημένες κλίνες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συνδυάζουν επιθυμητές ιδιότητες των ρευστών και των στερεών. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της συμπεριφοράς ως ρευστού, επιτυγχάνεται έντονη ανάμειξη όλων των συστατικών της κλίνης καθώς και βέλτιστη διάχυση μάζας και θερμότητας. Έτσι κατά την αεριοποίηση δημιουργείται ομοιόμορφο θερμοκρασιακό προφίλ, χωρίς ζώνες υψηλής θερμοκρασίας. Από την άλλη μεριά, η ύπαρξη των στερεών σωματιδίων, εξασφαλίζει έντονη μεταφορά θερμότητας που επιταχύνει την εκτελούμενη διαδικασία.

Ρευστοποιημένες κλίνες στερεών σωματιδίων – αερίου, εκτός από την αεριοποίηση βιομάζας, χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία για εκτέλεση χημικών διεργασιών (καταλυτικές χημικές αντιδράσεις), φυσικών διεργασιών (ανάμειξη, θέρμανση ή ξήρανση των σωματιδίων), μεταλλουργικών διεργασιών (φρύξη, εναλλαγή θερμότητας) και για τη μεταφορά στερεών [46].

1.3.1 Ανάλυση της διαδικασίας ρευστοποίησης

Τελική ταχύτητα σωματιδίου

Θεωρούμε μοναδικό σφαιρικό σωματίδιο εντός εγκατάστασης ρευστοποίησης με αέρα. Στο σωματίδιο επιδρούν οι δυνάμεις του βάρους του, της άνωσης που δέχεται από τον αέρα και της οπισθέλκουσας δύναμης λόγω της ροής ρευστού γύρω από αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 14.

$$\text{δύναμη βαρύτητας: } F_g = m g \quad (10)$$

$$\text{άνωση: } F_b = \rho_g g V = \frac{\rho_g g m}{\rho_\sigma} \quad (11)$$

$$\text{οπισθέλκουσα: } F_D = C_D \frac{\rho_g u_z^2}{2} A \quad (12)$$

Όπου:

m η μάζα του σώματος

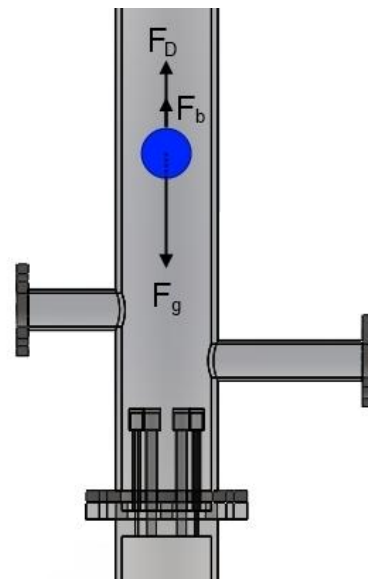
g η επιτάχυνση της βαρύτητας

ρ_g, ρ_σ η πυκνότητα του αέρα και του σώματος
αντίστοιχα

C_D ο συντελεστής οπισθέλκουσας

u_z^2 η σχετική ταχύτητα σώματος – αερίου

A η μετωπική επιφάνεια του σώματος



Σχήμα 1. 14 Σωματίδιο μέσα σε εγκατάσταση ρευστοποίησης

Όπως παρατηρούμε, οι δυνάμεις του βάρους και της άνωσης είναι σταθερές και ανάλογες της μάζας του σωματιδίου¹¹, ενώ η οπισθέλκουσα δύναμη είναι ανάλογη του τετραγώνου της σχετικής ταχύτητας των σωμάτων. Ανάλογα λοιπόν με την ταχύτητα του αερίου, η συνισταμένη των δυνάμεων μπορεί να είναι προς τα θετικά ή τα αρνητικά του κατακόρυφου άξονα και το σώμα μπορεί να κινηθεί προς την κορυφή ή τη βάση της κλίνης αντίστοιχα.

Ονομάζουμε *τελική ταχύτητα σωματιδίου* u_t , την οριακή εκείνη ταχύτητα του αέρα, για την οποία η συνισταμένη των δυνάμεων στο σώμα θα είναι μηδενική και με βάση το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα εάν αφήσουμε το σώμα μέσα στην κλίνη θα αιωρείται σε σταθερή θέση. Η λύση της εξίσωσης δίνει:

$$F_g - F_b - F_D = 0 \Rightarrow$$

$$m g - \frac{\rho_g g m}{\rho_\sigma} - C_D \frac{\rho_g u_t^2 m}{2} A = 0 \Rightarrow$$

$$u_t = \sqrt{\frac{2 g (\rho_\sigma - \rho_g) m}{C_D A \rho_g \rho_\sigma}} \quad (13)$$

Εάν η μάζα και η πυκνότητα εκφραστούν ως προς τη διάμετρο του σωματιδίου η σχέση γίνεται:

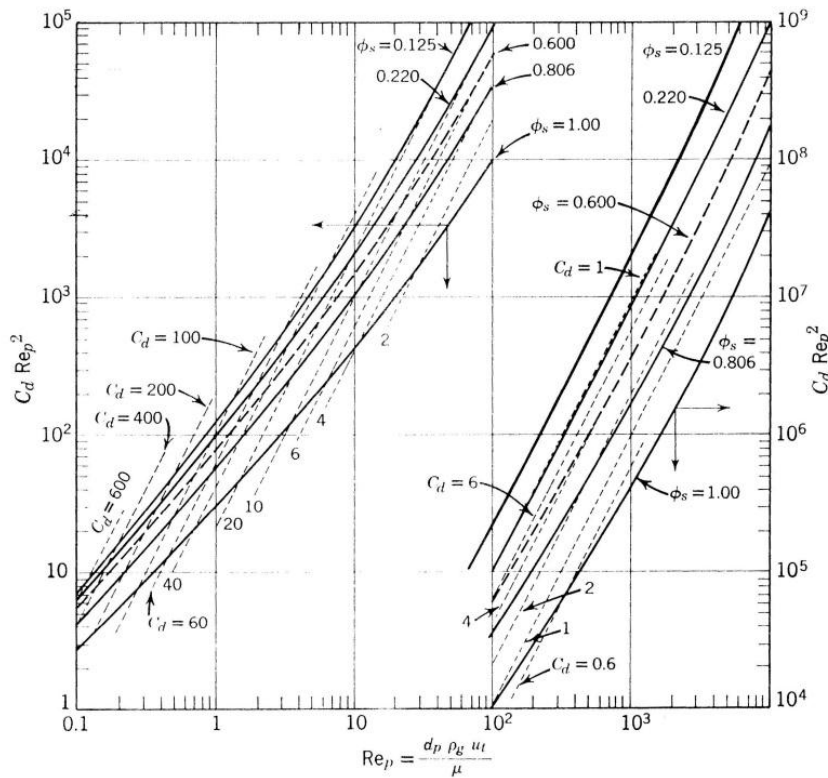
$$u_t = \sqrt{\frac{g (\rho_\sigma - \rho_g) d_\sigma}{43 C_D \rho_g}} \quad (14)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι στον τύπο της οπισθέλκουσας ο όρος u_z αναφέρεται στην σχετική ταχύτητα μεταξύ σώματος και ρευστού. Όμως, η u_t αναφέρεται ως ταχύτητα του αερίου αφού το σώμα θεωρήθηκε ακίνητο¹².

Ο συντελεστής Reynolds της ροής δίνεται από τη σχέση $Re = \frac{d_\sigma \rho_g u_t}{\mu}$, και από την τιμή του καθορίζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_d . Για τον καθορισμό τους έχουν αναπτυχθεί πολλές εμπειρικές σχέσεις. Στο Σχήμα 1. 15 παρουσιάζεται διάγραμμα υπολογισμού της τελικής ταχύτητας για σφαιρικά και μη σωματίδια.

¹¹ Θεωρώντας ότι δεν μεταβάλλεται η θερμοκρασία και η πίεση, άρα η πυκνότητα του αέρα παραμένει σταθερή.

¹² Εάν θεωρήσουμε ότι το σώμα κάνει ελεύθερη πτώση και ο αέρας παραμένει στάσιμος, η σχετική ταχύτητα αέρα-σώματος είναι ακριβώς ίδια όπως στο παράδειγμα. Τότε θα αναφερόταν η ταχύτητα του σωματιδίου ως τελική ταχύτητα αφού η ταχύτητα του αέρα θα ήταν μηδενική.



Σχήμα 1. 15 Διάγραμμα υπολογισμού της τελικής ταχύτητας σωματιδίων συναρτήσει του αριθμού Reynolds και του συντελεστή οπισθέλκουσας

Πορώδες κλίνης και επιφανειακή ταχύτητα

Στην ανάλυση που προηγήθηκε ο υπολογισμός της ταχύτητας του αέρα γίνεται από την παροχή όγκου αυτού και τη διατομή του ανοδικού σωλήνα. Εύκολα επίσης υπολογίζεται και η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού λόγω της στένωσης της διατομής στη θέση του σωματιδίου. Εάν όμως το σωματίδιο αντικατασταθεί από στρώμα σωματιδίων, ο αέρας διαχέεται μέσα από τα διάκενα μεταξύ αυτών και έτσι ο υπολογισμός της πραγματικής του ταχύτητας εντός της κλίνης δεν είναι εφικτός.

Για την βέλτιστη προσέγγιση των ζητούμενων τιμών πρέπει να είναι γνωστή η τιμή του πορώδους του υλικού. Ως πορώδες¹³, ε , ενός στρώματος σωματιδίων ορίζεται το κλάσμα του όγκου του στρώματος το οποίο είναι ελεύθερο σωματιδίων. Δηλαδή:

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad (15)$$

¹³ Στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως κλάσμα κενού (voidage ή void fraction) $\varepsilon = \frac{\text{όγκος αέρα}}{\text{συνολικός όγκος}}$

Όπου V_s είναι ο όγκος των στερεών που περιλαμβάνονται στον ολικό όγκο V του σώματος. Το πορώδες προσδιορίζεται πειραματικά, μετρώντας τον όγκο υγρού που απαιτείται για την πλήρωση των διακένων ενός συγκεκριμένου όγκου σωματιδίων [48].

Με γνωστή την τιμή του πορώδους ορίζεται η *μέση ταχύτητα ροής* διαμέσου στρώματος σωματιδίων ως:

$$u = \frac{\dot{V}}{A - A_s} = \frac{\dot{V}}{\varepsilon A} \quad (16)$$

και η *επιφανειακή ταχύτητα* u_φ ως η ταχύτητα του ρευστού λίγο πριν συναντήσει το στρώμα των σωματιδίων [46]:

$$u_\varphi = \frac{\dot{V}}{A} = \varepsilon u \quad (17)$$

Σε όλους τους υπολογισμούς για τον καθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας μίας εγκατάστασης ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιείται η επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού και ο δείκτης φ θα παραλείπεται.

Ορίζεται επίσης, η *ισοδύναμη διάμετρος* σωματιδίου d_p ως η διάμετρος σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με το σωματίδιο και η *σφαιρικότητα* των σωματιδίων φ_s ως ο λόγος της επιφάνειας σφαίρας διαμέτρου d_p προς την πραγματική επιφάνεια του σωματιδίου.

$$\varphi_s = \left(\frac{\text{επιφάνεια σφαίρας}}{\text{επιφάνεια σωματιδίου}} \right)_{\text{του ίδιου όγκου}} \quad (18)$$

Πτώση πίεσης σε σταθερή κλίση

Η ροή ρευστών διαμέσου ενός στρώματος σωματιδίων συνεπάγεται σημαντική πτώση πίεσης, η οποία εξαρτάται από το είδος της ροής και το πορώδες του στρώματος. Αν και έχει σημειωθεί πρόοδος στη συσχέτιση της ολικής πτώσης πίεσης, Δp , διαμέσου στρώματος στερεών με την οπισθέλκουσα δύναμη των ανεξάρτητων σωματιδίων, οι πιο κοινές μέθοδοι συσχετισμού βασίζονται σε υπολογισμούς της ολικής οπισθέλκουσας, F_D , επί των τοιχωμάτων των ελικοειδών καναλιών διαμέσου του στρώματος των σωματιδίων [46].

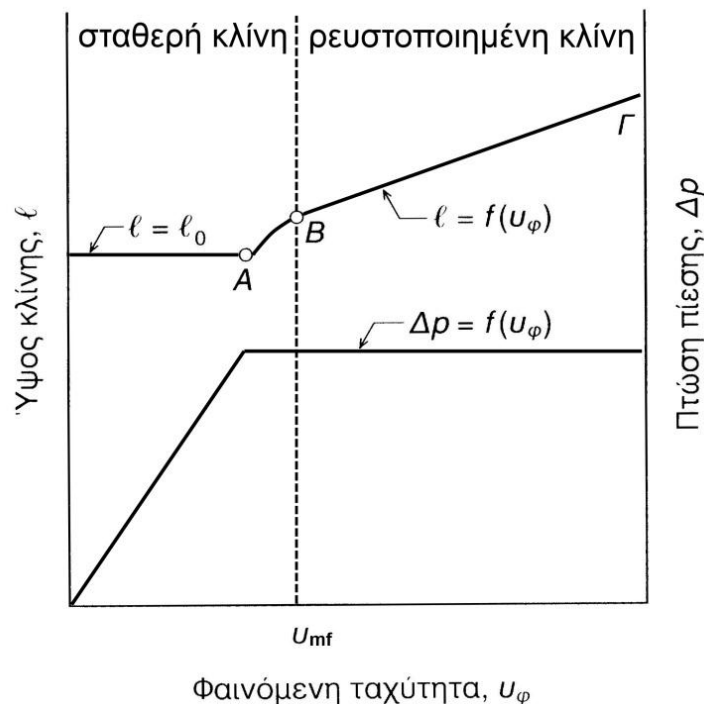
Η πιο διαδεδομένη έκφραση υπολογισμού της πτώσης πίεσης, δόθηκε το 1952 από τον Τούρκο χημικό μηχανικό Sabri Ergun και είναι γνωστή ως *εξίσωση του Ergun* [45]:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu u}{(\varphi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho_g u^2}{\varphi_s d_p} \quad (19)$$

Όπου η ταχύτητα u είναι η επιφανειακή ταχύτητα και ο δείκτης m στο πορώδες του υλικού αναφέρεται σε σταθερή κλίνη. Η εξίσωση του Ergun χρησιμοποιείται ευρέως για υπολογισμούς παραμέτρων σε σταθερές και ρευστοποιημένες κλίνες και αποτελεί τη βάση για τη σύγκριση όλων των νέων υπολογιστικών και πειραματικών εκφράσεων για την πτώση πίεσης [49].

Μηχανισμός ρευστοποίησης

Θεωρούμε την εγκατάσταση του Σχήμα 1. 14 στην οποία τώρα περιέχεται στρώμα ακίνητων στερεών σωματιδίων, μέσης διαμέτρου \bar{d}_e , το οποίο έχει ύψος l_0 . Αέρας διοχετεύεται στον πυθμένα του δοχείου με μικρή ταχύτητα και ρέει προς τα πάνω διαμέσου της κλίνης, χωρίς να προκαλεί οποιαδήποτε κίνηση σωματιδίου. Η πτώση πίεσης του αέρα δίνεται από την εξίσωση του Ergun και εξαρτάται από την ταχύτητα του και το πορώδες το οποίο παραμένει σταθερό.



Σχήμα 1. 16 Πτώση πίεσης και ύψος κλίνης ανάλογα με την επιφανειακή ταχύτητα του αερίου

Για κάποια τιμή της ταχύτητας, η πτώση πίεσης αντισταθμίζει το βάρος των σωματιδίων της κλίνης και περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας προκαλεί κίνηση των σωματιδίων (σημείο A). Μερικές φορές η κλίνη διαστέλλεται ελαφρώς με τα σωματίδια ακόμα σε επαφή. Η μικρή αύξηση του πορώδους της κλίνης επιβραδύνει το ρυθμό αύξησης της πτώσης πίεσης (τμήμα AB). Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας, τα σωματίδια διαχωρίζονται και αρχίζει η αληθής ρευστοποίηση. Η επιφανειακή ταχύτητα

του αέρα που αντιστοιχεί στο σημείο Β ονομάζεται *ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης*, u_{mf} , της κλίνης. Για ταχύτητες $u > u_{mf}$, όλα τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα στο σύστημα κινούμενα κατά τυχαίες διευθύνσεις σαν να ήταν σωματίδια ρευστού. Το ύψος της κλίνης συνεχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού, αλλά η πτώση πίεσης κατά μήκος του στρώματος παραμένει πρακτικά σταθερή. Όταν η επιφανειακή ταχύτητα αυξηθεί σημαντικά, η πραγματική ταχύτητα εντός της κλίνης ξεπερνά την τελική ταχύτητα των σωματιδίων, τα οποία συμπαρασύρονται από το ρευστό [46].

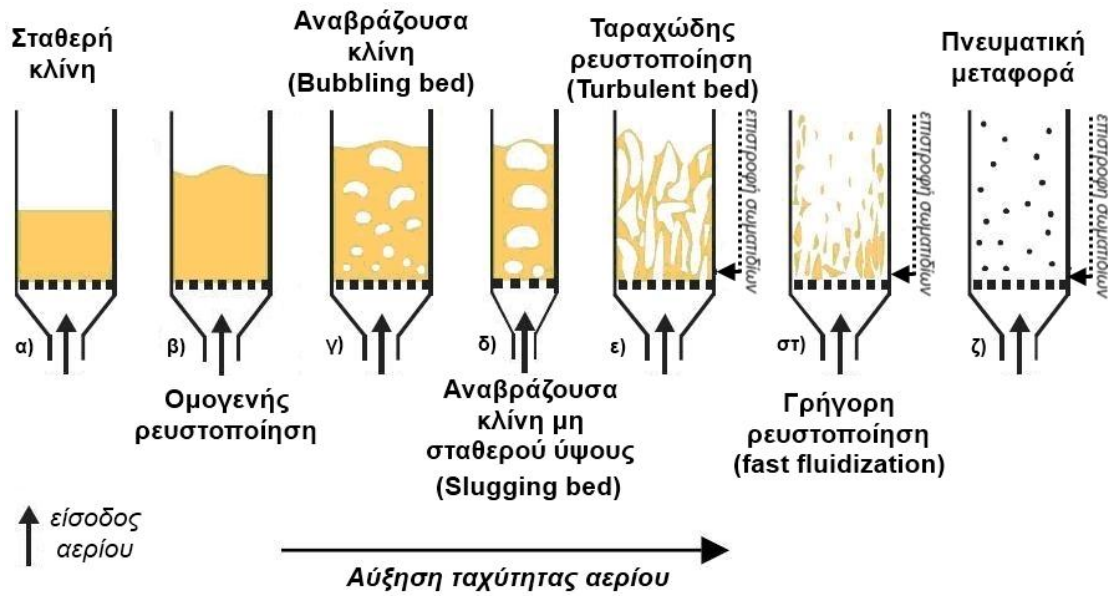
1.3.2 Καταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης

Μετά την αύξηση της ταχύτητας πάνω από την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης u_{mf} , η κατάσταση της κλίνης εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρευστού και των σωματιδίων.

Κατά τη ροή υγρών διαμέσου στρωμάτων στερεών σωματιδίων παρατηρείται ομοιόμορφη ρευστοποίηση, κατά την οποία η πυκνότητα της κλίνης δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, ενώ η διαστολή της κλίνης αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα. Ομοιόμορφη ρευστοποίηση με αέριο, μπορεί να επιτευχθεί μόνο για χαμηλές ταχύτητες και πολύ μικρά σωματίδια (κατηγορία Geldart A, Παράρτημα Π1) (Σχήμα 1. 17 β).

Γενικά, κατά τη ρευστοποίηση με αέρια η κλίση δεν παρουσιάζει τόσο ευσταθή συμπεριφορά. Σε συνθήκες καλής ρευστοποίησης, η μεγαλύτερη ποσότητα αερίου διέρχεται σε μορφή φυσαλίδων οι οποίες συμπεριφέρονται σχεδόν όμοια με φυσαλίδες αέρα σε νερό (Σχήμα 1. 17 γ). Εάν όμως ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο της κλίνης είναι μεγάλος, τότε οι φυσαλίδες τείνουν να συνενωθούν και να καταλάβουν ολόκληρη τη διατομή του δοχείου. Το φαινόμενο αυτό είναι ανεπιθύμητο καθώς προκαλεί έντονη παράσυρση των σωματιδίων και διακυμάνσεις της πίεσης εντός της κλίνης (Σχήμα 1. 17 δ).

Όταν η πραγματική ταχύτητα του αερίου ξεπεράσει την τελική ταχύτητα των σωματιδίων ξεκινά η παράσυρση των σωματιδίων (Σχήμα 1. 17 ε,στ,ζ). Το φαινόμενο αυτό είναι επιθυμητό αφού με εγκατάσταση μηχανολογικών διατάξεων διαχωρισμού των σωματιδίων από το αέριο, καθίσταται δυνατή η επιστροφή τους στην κλίση. Μια τέτοια εγκατάσταση ονομάζεται *ρευστοποιημένη κλίση με ανακυκλοφορία*.



Σχήμα 1. 17 Καταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης

1.3.3 Εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.3.1, η έναρξη της ρευστοποίησης επιτυγχάνεται όταν η πτώση πίεσης της ροής διαμέσου της κλίνης είναι ίση με τη συνισταμένη του βάρους των σωματιδίων και της άνωσης, ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας της εγκάρσιας διατομής της κλίνης[46]. Ισοδύναμα, είναι η επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού τη στιγμή που η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη που ασκείται στα σωματίδια από το ρευστό, εξισώνεται με τη συνισταμένη του βάρους και της άνωσης των σωματιδίων[45]. Και οι δύο εκφράσεις καταλήγουν στην εξής σχέση:

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) g \quad (20)$$

Όπου ε_{mf} και L_{mf} , είναι οι τιμές του πορώδους και του ύψους της κλίνης τη στιγμή της έναρξης της ρευστοποίησης αντίστοιχα.

Από την εξίσωση των σχέσεων (19) και (20) προκύπτει:

$$\frac{1,75}{\varphi_s \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varphi_s \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (21)$$

Η τιμή του πορώδους ε_{mf} είναι λίγο μεγαλύτερη από την τιμή ε_m λόγω της αύξησης του ύψους της κλίνης. Στον Πίνακα 1. 2 παρουσιάζονται τιμές του πορώδους που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις.

Σωματίδια	Μέγεθος (mm)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
αιχμηρή άμμος, $\phi_s = 0.67$	-	0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
σφαιρική άμμος, $\phi_s = 0.86$	-	0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	-
μικτή άμμος	-	-	0.42	0.42	0.41	-	-
σκόνη άνθρακα και γυαλιού	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	-
σκόνη ανθρακίτη, $\phi_s = 0.63$	-	0.62	0.61	0.60	0.56	0.53	0.51
ενεργός άνθρακας	0.74	0.72	0.71	0.69	-	-	-
ανθρακοπυρίτιο	-	0.61	0.59	0.56	0.56	-	-

Πίνακας 1. 2 Τιμές πορώδους κατά την έναρξη της ρευστοποίησης για διάφορα υλικά [45]

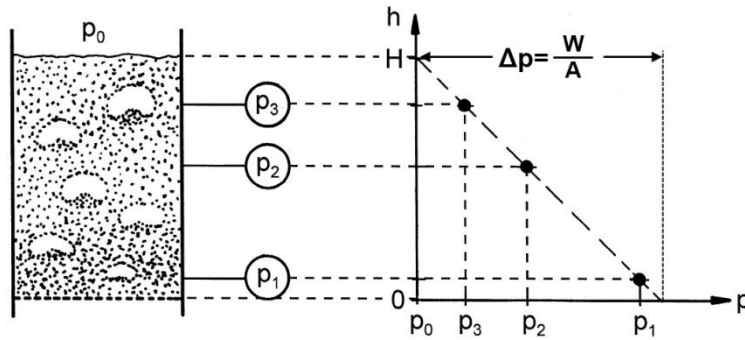
Στον Πίνακα 1. 3 παρουσιάζεται η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης ανάλογα με την διάμετρο των σωματιδίων όπως υπολογίστηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων αεριοποίησης.

d_p (μm)	U_{mf} (m/s)
100	0.0145
200	0.0577
300	0.1262
400	0.2136
500	0.3254
600	0.4131

Πίνακας 1. 3 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης ανάλογα με τη διάμετρο σωματιδίων

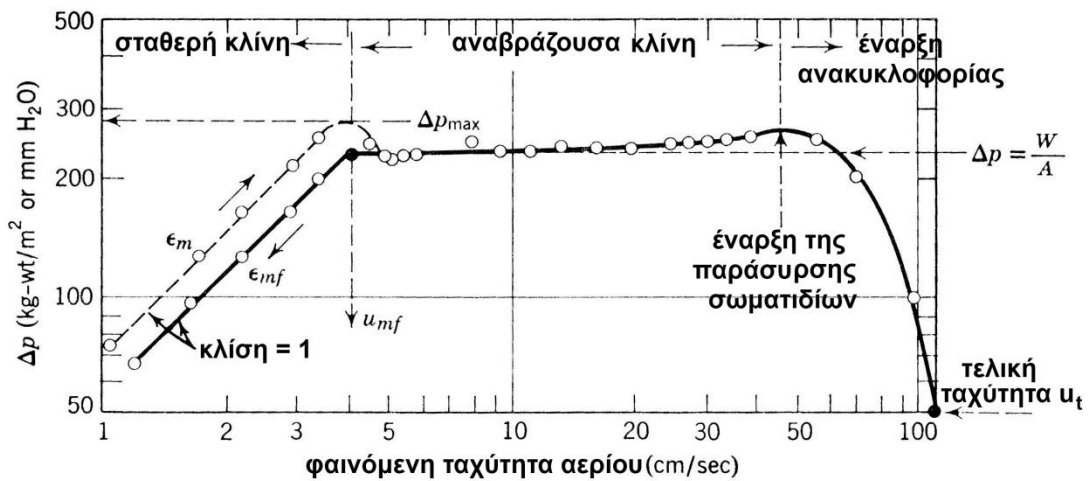
1.3.4 Πιέσεις σε εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης

Η γνώση της κατανομής των πιέσεων σε μία εγκατάσταση αποτελεί σημαντικό παράγοντα καθώς φανερώνει την κατάσταση ρευστοποίησης που επικρατεί εντός της κλίνης. Οι μετρητές πίεσης τοποθετούνται καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. 18. Ταυτόχρονη αύξηση των πιέσεων όλης της εγκατάστασης υποδηλώνει στόμωση στις σωληνώσεις εξόδου του αερίου.



Σχήμα 1. 18 Μετρητές πίεσης σε εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης

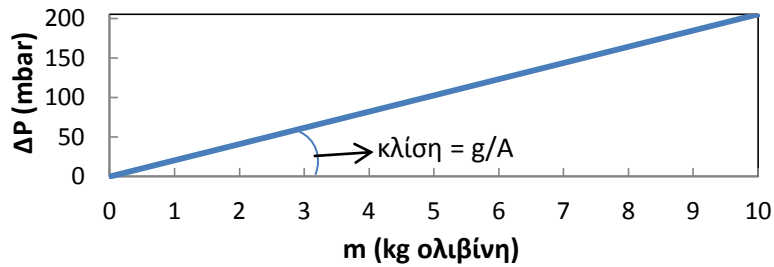
Στο Σχήμα 1. 19 παρουσιάζεται η συνολική πτώση πίεσης στον ανοδικό σωλήνα πειραματικής εγκατάστασης ανάλογα με την επιφανειακή ταχύτητα του αέρα. Το πρώτο τμήμα της καμπύλης συμφωνεί με την εξίσωση του Ergun όπως επεξηγήθηκε στην παράγραφο 1.3.1 και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω καθώς αποτυπώνει τη λειτουργία σταθερών κλινών.



Σχήμα 1. 19 Πτώση πίεσης ανάλογα με την επιφανειακή ταχύτητα του αερίου [47]

Το δεύτερο τμήμα της καμπύλης αποτυπώνει την κατάσταση αναβράζουσας κλίνης. Είναι οριζόντιο καθώς η πτώση πίεσης είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας και διατηρεί την τιμή που υπολογίζεται από την εξίσωση (21) για την έναρξη της ρευστοποίησης.

Κατά τη λειτουργία μιας εγκατάστασης η τιμή αυτή αποτελεί ένδειξη για την ποσότητα του υλικού που βρίσκεται εντός της κλίνης. Στο Διάγραμμα 1. 1 φαίνεται η αναμενόμενη πτώση πίεσης ανάλογα με τη μάζα του αδρανούς υλικού όπως υπολογίστηκε για την πειραματική εγκατάσταση στο Πικέρμι, όπου έγιναν τα πειράματα αεριοποίησης για την παρούσα εργασία.



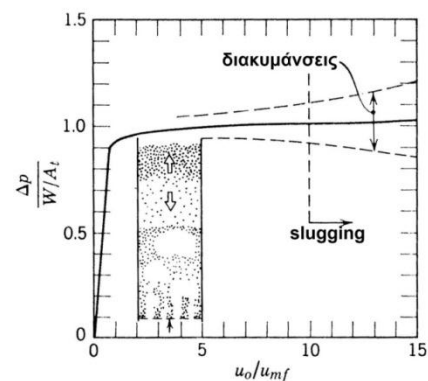
Διάγραμμα 1. 1 Αναμενόμενη πτώση πίεσης ανάλογα με τη μάζα των σωματιδίων

Πρέπει να αναφερθεί ότι στην πράξη, όταν η αεριοποίηση γίνεται με αέρα, η επίδραση της άνωσης αμελείται καθώς ο λόγος ρ_g/ρ_s είναι σημαντικά μικρότερος της μονάδας.

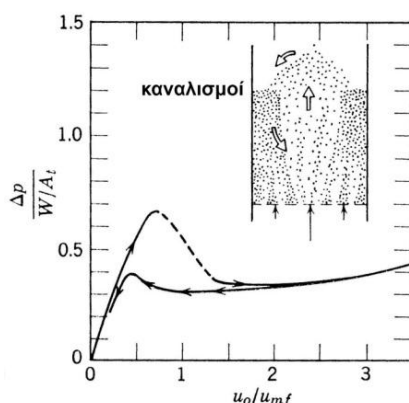
Σταδιακή μείωση της πτώσης πίεσης κατά τη λειτουργία, σημαίνει ότι σωματίδια του υλικού συμπαρασύρονται από το αέριο και η συνολική του μάζα σταδιακά μειώνεται.

Ανεπιθύμητες καταστάσεις

Η προβολή της πτώσης πίεσης μιας εγκατάστασης σε συνάρτηση του χρόνου, παρουσιάζει διακυμάνσεις που αποτυπώνουν την ανομοιόμορφη κατάσταση ρευστοποίησης και το σχηματισμό φυσαλίδων. Μεγάλο εύρος διακυμάνσεων υποδηλώνει την εμφάνιση του φαινομένου του slugging.



Σχήμα 1. 20 slugging



Σχήμα 1. 21 Καναλισμοί

Καταγραφή μικρότερης τιμής της πτώσης πίεσης από την αναμενόμενη υποδηλώνει ότι το αέριο δεν ρευστοποιεί το σύνολο του υλικού αλλά διέρχεται μέσα από καναλισμούς αλληλεπιδρώντας μόνο με ένα μέρος των σωματιδίων. Η εμφάνιση του φαινομένου κατά τη διάρκεια πειραμάτων αεριοποίησης συνεπάγεται τον τερματισμό της διαδικασίας. Παρατηρείται όταν η θερμοκρασία της κλίνης ξεπεράσει το σημείο τήξης της τέφρας του καυσίμου, η οποία τότε υγροποιείται και δημιουργεί συσσωματώματα

με τους κόκκους του αδρανούς υλικού. Όσο η διάμετρος αυτών αυξάνεται, η ρευστοποίηση τους καθίσταται αδύνατη και η κλίνη απορευστοποιείται.

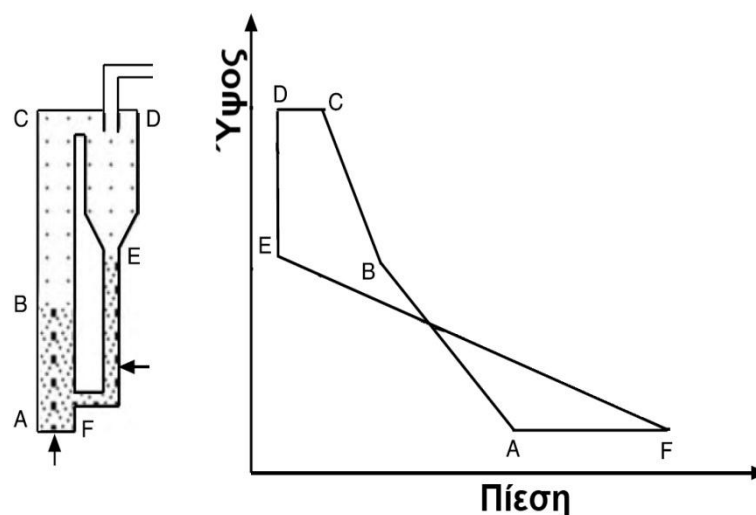
Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας

Όταν η πραγματική ταχύτητα του αέρα ξεπεράσει την τελική ταχύτητα των σωματιδίων, ξεκινά η παράσυρση αυτών και η κλίνη περνά στη φάση της ανακυκλοφορίας. Η συνολική μάζα του υλικού ανακατανέμεται στο σύνολο της εγκατάστασης με αποτέλεσμα την μείωση της πτώσης πίεσης εντός του ανοδικού σωλήνα όπως φαίνεται στο τρίτο μέρος της καμπύλης στο Σχήμα 1. 19. Τα σωματίδια που διαφεύγουν, διαχωρίζονται από το εξερχόμενο αέριο διερχόμενα από κυκλωνικό διαχωριστή και επιστρέφουν στην κλίνη μέσω καθοδικού σωλήνα και κατάλληλης ένωσης αυτού με το riser.

Το προφίλ πιέσεων που συναντά ένα σωματίδιο κατά την ανακυκλοφορία δεν μπορεί να παρουσιάζει ασυνέχειες. Ακόμα, στη βάση του καθοδικού σωλήνα η πίεση πρέπει να αποκτά τη μέγιστη τιμή της έτσι ώστε να αποφεύγεται η ροή του αερίου μέσω αυτού. Κατά την ομαλή λειτουργία σε κατάσταση ανακυκλοφορίας η ισοροπία των πιέσεων κατά μήκος του κλειστού βρόχου κίνησης των σωματιδίων πρέπει να ακολουθεί τη σχέση:

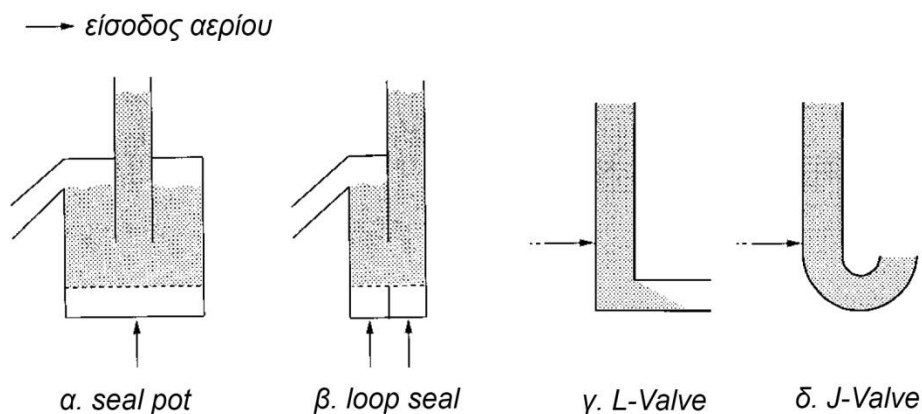
$$\Delta P_{FA} + \Delta P_{AB} + \Delta P_{BC} + \Delta P_{CD} = \Delta P_{DE} + \Delta P_{EF} \quad (22)$$

Όπου οι δείκτες A, B, C, D, E, F αναφέρονται στο Σχήμα 1. 22



Σχήμα 1. 22 Προφίλ πιέσεων κατά τη λειτουργία ρευστοποιημένης κλίνης σε φάση ανακυκλοφορίας

Για την επίτευξη των παραπάνω, η σύνδεση ανοδικού και καθοδικού σωλήνα γίνεται μέσω μη μηχανικών βαλβίδων που επιτρέπουν το σχηματισμό σταθερής κλίνης σωματιδίων. Οι πιο διαδεδομένες είναι αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. 23.



Σχήμα 1. 23 Οι πιο διαδεδομένες μη μηχανικές βαλβίδες [52]

Οι διατάξεις αυτές είναι οι πλέον αξιόπιστες λόγω της απουσίας κινητών στελεχών, με αποτέλεσμα να προτιμούνται σε εγκαταστάσεις όπου εμφανίζονται μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες. Επίσης, η απλή κατασκευή τους τις καθιστά ιδιαίτερα οικονομικές [53].

1.3.5 Πλεονεκτήματα αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (Circulating Fluidized Bed - CFB)

Η αεριοποίηση σε εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας εμφανίζει σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με την αεριοποίηση σε αναβράζουσες κλίνες, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω [51].

1. Η υψηλή σχετική ταχύτητα¹⁴ αερίου – στερεών εξασφαλίζει καλή ανάμιξη και εξαιρετική μεταφορά θερμότητας και μάζας.
2. Μία CFB μπορεί να επεξεργαστεί ευρύτερο φάσμα σωματιδίων αφού χάρη στην ανακυκλοφορία δεν παρατηρείται το φαινόμενο της σταδιακής απώλειας υλικού λόγω παράσυρσης. Έτσι:
 - Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του αδρανούς υλικού μπορεί να παρουσιάζει μεγάλο εύρος καθώς τα μικρότερα σωματίδια θα

¹⁴ Slip velocity – ταχύτητα ολίσθησης

ανακυκλοφορούν ενώ τα πιο μεγάλα θα παλινδρομούν καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα

- Η παροχή του αερίου μπορεί να αυξομειώνεται εντός ορίων χωρίς επίδραση στην κατάσταση της κλίνης
 - Μία CFB λειτουργεί με σχετικά μικρά σωματίδια ($\approx 400\mu\text{m}$) τα οποία μεγιστοποιούν την επιφάνεια επαφής μεταξύ στερεών και αερίων και ευνοούν τις αντιδράσεις της αεριοποίησης
 - Το σχήμα και μέγεθος του εισαγόμενου καυσίμου υπόκειται σε λιγότερους περιορισμούς απ' ό τι στις αναβράζουσες και σταθερές κλίνες.
3. Μία κλίση ανακυκλοφορίας λειτουργεί με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου ($4 - 7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) σε σχέση με μία αναβράζουσα κλίση ($1 - 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Έτσι για δεδομένο μέγεθος αποδίδει πολλαπλάσια ποσά ενέργειας. Ανάλογα, για δεδομένη απαίτηση ισχύος μία CFB έχει μικρότερο μέγεθος.
 4. Η απουσία φυσαλίδων αυξάνει την επιφάνεια επαφής μεταξύ στερεών και αερίων και το χρόνο παραμονής των αντιδρώντων εντός της κλίνης
 5. Η συνεχής ανακυκλοφορία των πυρακτωμένων σωματιδίων εξασφαλίζει έντονο ρυθμό θέρμανσης που βοηθά στη μείωση των παραγόμενων πιεσών (μέσω θερμικής διάσπασης)

2

Πειραματική εγκατάσταση

Η πειραματική εγκατάσταση αεριοποίησης είναι μία ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας με οξειδωτικό μέσο αέρα, ισχύος 100kWth. Η κατασκευή και λειτουργία της γίνεται με συνεργασία των παρακάτω φορέων: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η χρηματοδότηση του έργου γίνεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του προγράμματος Eurobioref. Στεγάζεται στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις του ΚΑΠΕ στο Πικέρμι.

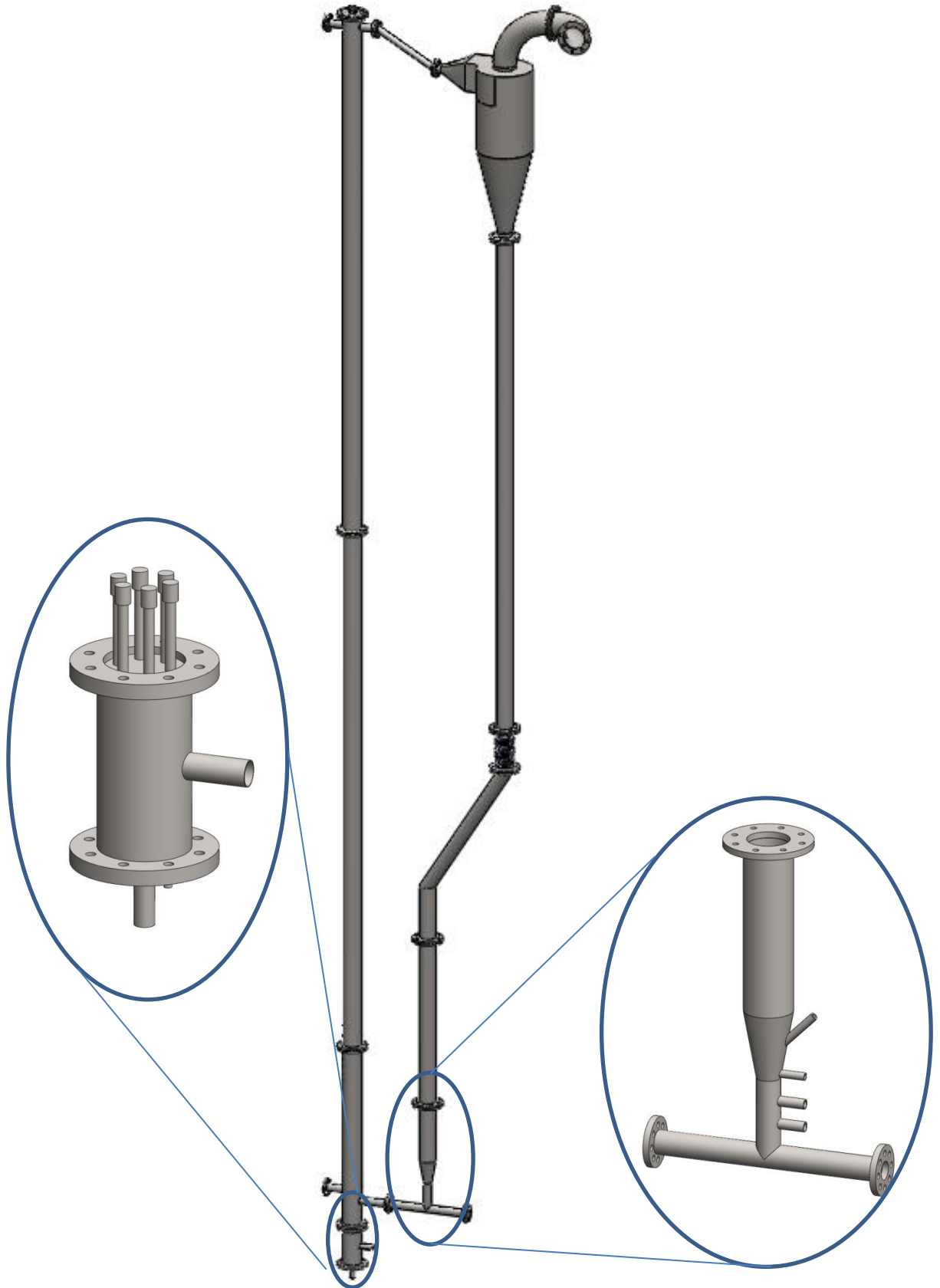
2.1 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης

2.1.1 Τμήμα ανόδου (Riser)

Το τμήμα ανόδου αποτελεί το κύριο μέρος του αντιδραστήρα αφού στο εσωτερικό του λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αεριοποίησης σε συνθήκες ρευστοποίησης. Αποτελείται από ανοξείδωτο χαλύβδινο σωλήνα AISI 316L, ύψους 5,85 μέτρων με εσωτερική διάμετρο 78mm και πάχος τοιχώματος 5,49mm. Στο κάτω άκρο του συνδέεται ο διασκορπιστήρας αέρα ενώ το πάνω άκρο στεγανοποιείται από τυφλή φλάντζα, με βάνα για την εισαγωγή του αδρανούς υλικού και ειδικά ακροφύσια (φωλιές) για τοποθέτηση μετρητικών οργάνων. Στη βάση του διαθέτει ακροφύσια για την είσοδο της βιομάζας και τη σύνδεση του τμήματος ανακυκλοφορίας ενώ στην κορυφή, διαθέτει ακροφύσιο για την σύνδεση με τον κυκλώνα της εγκατάστασης Εικόνα 2. 1.

Ο ανοδικός σωλήνας στηρίζεται στο ικρίωμα της εγκατάστασης από το επάνω μέρος του (κρεμαστός) με δύο ντίζες που συνδέονται σε ειδικές προεξοχές του. Η συγκεκριμένη στήριξη ενός σημείου, επιλέχθηκε για να υπάρχει ένα ελεύθερο άκρο, έτσι ώστε ο αγωγός να μπορεί να επιμηκύνεται λόγω διαστολών κατά τη θέρμανση του. Πάκτωση σε δύο ή περισσότερα σημεία θα οδηγούσε σε λυγισμό και αστοχία της εγκατάστασης. Ακόμα, το τμήμα ανόδου δεν είναι ενιαίο αλλά αποτελείται από τρία κομμάτια μήκους 850mm, 2500mm και 2500mm συνδεδεμένα με φλάντζες οκτώ οπών, έτσι ώστε σε πιθανή αστοχία του υλικού να μην είναι αναγκαία η αντικατάσταση όλου του τμήματος.

Ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο του ανοδικού σωλήνα είναι ιδιαίτερα μεγάλος καθώς η εγκατάσταση είναι σχεδιασμένη για λειτουργία σε κατάσταση γρήγορης ρευστοποίησης (fast bed). Έτσι επιτυγχάνεται ικανοποιητικός χρόνος παραμονής (residence time) του αερίου εντός της κλίνης.



Εικόνα 2. 1 Τρισδιάστατη απεικόνιση του αεριοποιητή της πειραματικής εγκατάστασης. Σε μεγέθυνση παρουσιάζονται ο διασκορπιστήρας (αριστερά) και η βαλβίδα σχήματος L (δεξιά).

*Τα σχέδια της εγκατάστασης έγιναν σε SolidWorks 2012 από τον συγγραφέα



Εικόνα 2. 2 Φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης

2.1.2 Ηλεκτρικές αντιστάσεις

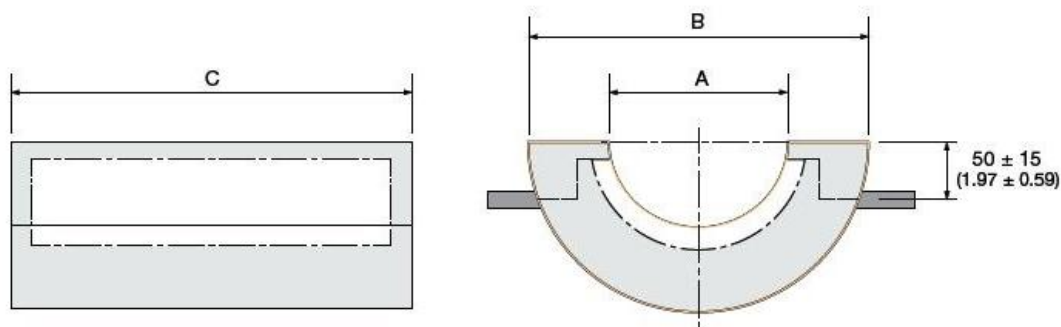
Όπως έχει αναφερθεί, οι εγκαταστάσεις αεριοποίησης με αέρα, αποτελούν αυτόθερμα συστήματα και η θερμοκρασία τους καθορίζεται κυρίως από την παροχή καυσίμου και το λόγο αέρα καύσης. Όμως, για την μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στη σύσταση του παραγόμενου αερίου, που αποτελεί το σκοπό της παρούσας εργασίας, επιβάλλεται ο καθορισμός της θερμοκρασίας του συστήματος να είναι ανεξάρτητος από τους υπόλοιπους παράγοντες του πειράματος.

Για το λόγο αυτό, κατά μήκος του ανοδικού σωλήνα, τοποθετήθηκαν ηλεκτρικές αντιστάσεις, που λειτουργούν ως εξωτερική πηγή θερμότητας και μπορούν να καθορίσουν τη θερμοκρασία του συστήματος ανεξάρτητα από τις διεργασίες εντός αυτού.

Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν, είναι εστίες θέρμανσης μέσω ακτινοβολίας. Τα μοντέλα που τοποθετήθηκαν ανήκουν στην κατηγορία FIBROTHAL, της εταιρείας KANTHAL. Αποτελούνται από μεταλλικά στοιχεία θερμάνσεως ενσωματωμένα σε κεραμική μόνωση, η οποία καθορίζει και το σχήμα της αντίστασης. Η επιλογή τους έγινε λόγω της εύκολης εγκατάστασης και της αυξημένης μόνωσης που παρέχουν [54]. Χρησιμοποιήθηκαν τα ημικυλινδρικά μοντέλα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Όνομασία	Κωδικός	A(mm)	B(mm)	C(mm)	Ισχύς (W)	Volt (V)
HAS 150/250/57,5	DF830280	150	300	250	950	57.5
HAS 150/300/57,5	DF830284	150	300	300	1150	57.5
HAS 150/500/115	DF830288	150	300	500	1900	115

Πίνακας 2.1 Μοντέλα αντιστάσεων τύπου KANTHAL που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση



Σχήμα 2. 1 Διαστάσεις ημικυλινδρικών αντιστάσεων KANTHAL

Για τη θέρμανση μικρότερων ή μη κυλινδρικών κομματιών της κλίνης, χρησιμοποιήθηκαν νηματοειδείς αντιστάσεις, θέρμανσης δι' αγωγής, της εταιρείας

HORST. Οι αντιστάσεις αυτές καταργήθηκαν αργότερα για λόγους που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.2.2 της παρούσας εργασίας.

Τέλος, η μόνωση της εγκατάστασης έγινε με εύκαμπτα φύλλα κεραμοβάμβακα πάχους 10cm, κατασκευασμένου από fiberfrax πυρίμαχες κεραμικές ίνες, με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας στους 1250°C και θερμοκρασίας τήξης στους 1760°C. Εξωτερικά αυτού, τοποθετήθηκε επιπλέον λεπτότερο στρώμα πετροβάμβακα, με ειδική επίστρωση αλουμινίου για προστασία.

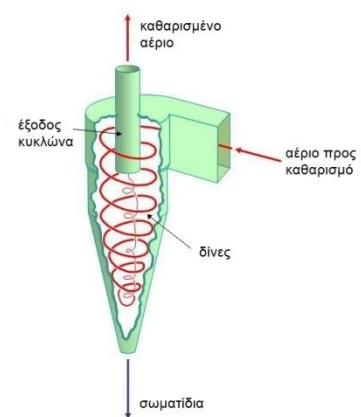


Εικόνα 2. 3 Ένωση riser και L-Valve

2.1.3 Κυκλώνας

Κατά τη λειτουργία της ρευστοποιημένης κλίνης σε κατάσταση ανακυκλοφορίας, απαιτείται ο διαχωρισμός των σωματιδίων του αδρανούς και του άκαυστου άνθρακα (εξανθρακώματος) από το παραγόμενο αέριο, ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή τους στον ανοδικό σωλήνα. Αυτό επιτυγχάνεται με τοποθέτηση κατάλληλου κυκλώνα, ακριβώς μετά την έξοδο του αερίου από τον ανοδικό σωλήνα.

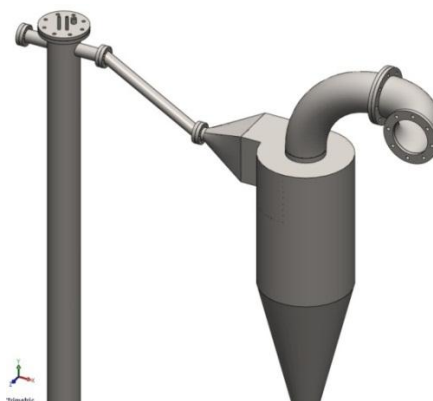
Ο κυκλώνας είναι απλή αλλά πολύ βασική μηχανολογική κατασκευή, χωρίς κινούμενα μέρη, όπου τα απαέρια αναγκάζονται, λόγω κατάλληλης διαμόρφωσης της εισόδου, να περιστραφούν σε



Σχήμα 2. 2 Αρχή λειτουργίας κυκλώνα

κυκλική τροχιά. Κατά την περιστροφή, η ταχύτητα εισόδου των αερίων μετασχηματίζεται σε ένα στρόβιλο στον οποίο οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται ενεργούν πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και τα οδηγούν στα τοιχώματα του κυλίνδρου, όπου προσκρούουν και πέφτουν στη χοάνη συλλογής [55]. Στις ρευστοποιημένες κλίνες, η χοάνη συλλογής αντικαθίσταται από τον καθοδικό σωλήνα, ο οποίος οδηγεί τα σωματίδια και πάλι στον ανοδικό σωλήνα μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης.

Η σύνδεση του ανοδικού σωλήνα με τον κυκλώνα έγινε με σωλήνα υπό κλίση 30° , έτσι ώστε η ροή των σωματιδίων να διευκολύνεται και για μικρές ταχύτητες του αερίου, και να αποφεύγεται η στόμωση στο συγκεκριμένο σημείο.



Εικόνα 2. 4 Σύνδεση του ανοδικού σωλήνα με τον κυκλώνα

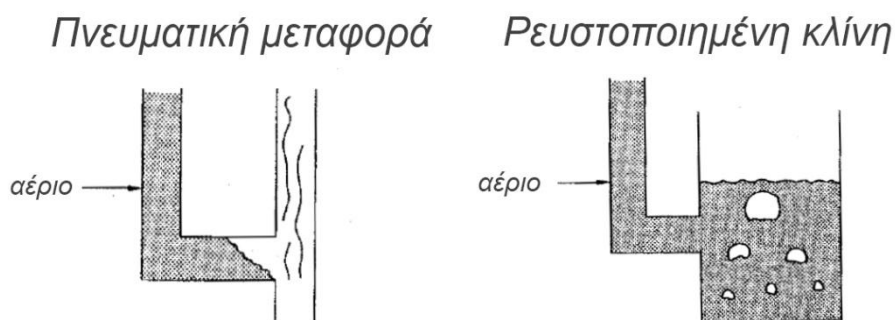
2.1.4 Καθοδικός σωλήνας και βαλβίδα σχήματος L

Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.3.4, για την επιστροφή των σωματιδίων στον ανοδικό σωλήνα χρησιμοποιούνται ειδικές μη μηχανικές διατάξεις που καθιστούν δυνατή την απαιτούμενη αύξηση πίεσης στο σημείο ένωσης του βρόχου ανακυκλοφορίας. Στην πειραματική εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε βαλβίδα σχήματος L η οποία είναι πιο οικονομική από την Loop-seal αλλά απολύτως συμβατή με την κλάση των σωματιδίων Geldart B που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση των πειραμάτων.

Το συνολικό ύψος του καθοδικού σωλήνα (downcomer) είναι 4,3m και αποτελείται από τέσσερα τμήματα για την ευκολότερη τοποθέτηση του. Ένα από αυτά είναι κατασκευασμένο υπό κλίση καθώς καθορίζει το επιθυμητό μήκος του οριζοντίου τμήματος σύνδεσης της L-Valve με τον ανοδικό σωλήνα, όπως θα εξηγηθεί στη

συνέχεια. Διαθέτει επίσης διαστολικό¹⁵ καθώς συνδέεται στη βάση και την κορυφή του ανοδικού σωλήνα και πρέπει να μπορεί να ακολουθεί τις μεταβολές του ύψους του κατά τη θέρμανση. Το εξάρτημα αυτό είναι απαραίτητο καθώς το μήκος, η διάμετρος, και η θερμοκρασία των δύο σωλήνων κατά την εκτέλεση του πειράματος δεν είναι ίδια και δεν εμφανίζουν τις ίδιες διαστολές.

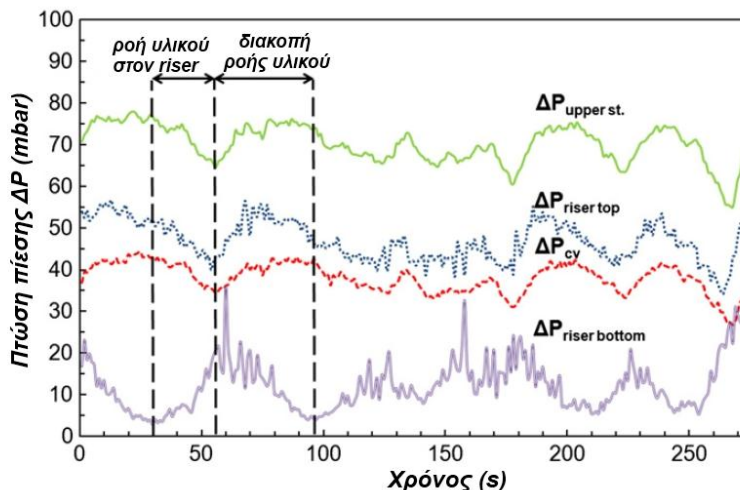
Η κατάλληλη σχεδίαση της βαλβίδας σχήματος L επιτρέπει την δημιουργία σταθερής κλίνης στο οριζόντιο κομμάτι της και καθ' ύψος του καθοδικού σωλήνα, η οποία εξισορροπεί τις πιέσεις στη σύνδεση του βρόχου (Σχήμα 2. 3).



Σχήμα 2. 3 Βαλβίδα σχήματος L

Το οριζόντιο κομμάτι πρέπει να έχει μήκος $2 - 8 D_{L-valve}$ για να είναι δυνατή η ανακυκλοφορία των σωματιδίων. Η βαλβίδα διαθέτει ειδικό ακροφύσιο για την εισαγωγή αερίου από όπου εισάγεται άζωτο σε ταχύτητες όχι πολύ μεγαλύτερες της U_{mf} ($U_{mf} < U < 3 U_{mf}$), που διευκολύνει τη ροή των σωματιδίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα αυτή είναι επιφανειακή ταχύτητα υπολογιζόμενη από τη διάμετρο της L-Valve και είναι πολύ μικρότερη από την παροχή αέρα στον ανοδικό σωλήνα. Στην πειραματική εγκατάσταση η παροχή ρυθμιζόταν στα $15 - 20 \frac{NL}{min}$ ανάλογα με το ρυθμό ανακυκλοφορίας. Η L-Valve διαθέτει επίσης μετρητή πίεσης η τιμή του οποίου φανερώνει τη μάζα των σωματιδίων που βρίσκονται εκείνη τη στιγμή εντός της βαλβίδας και κατά συνέπεια το ρυθμό ανακυκλοφορίας εντός της κλίνης (σε σύγκριση με την τιμή της πίεσης στη βάση του ανοδικού σωλήνα). Αύξηση της πίεσης στην βαλβίδα και ταυτόχρονη μείωση στη βάση του riser υποδηλώνει ότι το αδρανές υλικό δεν ανακυκλοφορεί αλλά συσσωρεύεται στον καθοδικό σωλήνα.

¹⁵ Ειδική κατασκευή με πτυχώσεις οι οποίες επιτρέπουν τη μεταβολή του μήκους του εξαρτήματος χωρίς να προκαλείται αστοχία του υλικού.



Σχήμα 2. 4 Στόμωση του οριζοντίου τμήματος της L-Valve και στιγμιαία διακοπή ανακυκλοφορίας – Προφίλ πιέσεων [57]

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την στιγμιαία αύξηση της ροής αζώτου στην L-Valve. Όταν οι πιέσεις εξισορροπηθούν η ροή επαναφέρεται στην αρχική της τιμή. Οι τιμές των πιέσεων παρακολουθούνται μέσω του συστήματος καταγραφής συνεχώς καθώς διακοπή της ανακυκλοφορίας συνεπάγεται ακαριαία αύξηση της θερμοκρασίας στη βάση του ανοδικού σωλήνα όπου εισέρχεται η βιομάζα.

2.1.5 Εναλλάκτης και flare

Το παραγόμενο αέριο, μετά την έξοδο του από τον κυκλώνα, οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας αέρα-νερού. Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης περνάει μέσα από 19 αγωγούς διαμέτρου 65mm, ενώ εξωτερικά των σωληνώσεων διέρχεται το ψυκτικό μέσο (νερό). Έτσι η θερμοκρασία του αερίου πέφτει κάτω από τους 400°C, σημείο συμπύκνωσης των πισσών. Οι πίσες κατά την υγροποίηση τους κατακάθονται στον κωνικό πυθμένα του εναλλάκτη από όπου απομακρύνονται χειρονακτικά μέσω σφαιρικής βάνας. Η απομάκρυνση όσο το δυνατόν περισσότερων πισσών είναι απαραίτητη για τους εξής λόγους:

- Μείωση του φορτίου ρυπαντών που πρέπει να κατακρατήσουν τα φίλτρα προστασίας των μετρητικών οργάνων
- Αποφυγή στόμωσης των σωληνώσεων εξόδου του αερίου από το σύστημα. Οι σωληνώσεις αυτές ακολουθούν μεγάλη διαδρομή, μέρος της οποίας σε εξωτερικό χώρο. Έτσι, είναι ασύμφορο να θερμαίνονται ή να μονωθούν και δεν μπορεί να αποφευχθεί η υγροποίηση των πισσών στο εσωτερικό τους.

Οι σωληνώσεις της εγκατάστασης, καταλήγουν σε καπνοδόχο, στη βάση της οποίας έχει τοποθετηθεί σπινθηριστής και παροχή προπανίου για έναρξη και διατήρηση ευσταθούς φλόγας αντίστοιχα. Η πλήρης καύση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης είναι

απαραίτητη για να μην διαφεύγει στην ατμόσφαιρα το μονοξείδιο του άνθρακα που περιέχεται σε αυτό και είναι επιβλαβές για τον ανθρώπινο οργανισμό.

2.1.6 Σύστημα τροφοδοσίας

Η είσοδος της πελλετοποιημένης βιομάζας στον αντιδραστήρα επιτυγχάνεται μέσω συστήματος τροφοδοσίας που αποτελείται από τέσσερα σιλό, τοποθετημένα καθ' ύψος δίπλα στον ανοδικό σωλήνα. Τα δύο πρώτα¹⁶ είναι κωνικά στο κάτω μέρος τους και καταλήγουν σε χειροκίνητες σφαιρικές βάνες. Τα επόμενα δύο, διαθέτουν τριγωνικό κάτω μέρος που καταλήγει σε κοιλίες τροφοδοσίας. Η μεταφορά του καυσίμου μεταξύ των σιλό γίνεται μέσω εύκαμπτου και διαφανούς, πλαστικού σωλήνα, με σπειροειδή συρμάτινη ενίσχυση που κυκλοφορεί ευρέως στο εμπόριο.

Τα συστήματα κοιλιών έχουν καθιερωθεί για την μεταφορά (και τροφοδοσία σε λέβητες) στερεής βιομάζας καθώς είναι απλοί στην κατασκευή, αξιόπιστοι και οικονομικοί. Ο κάτω κοιλίας (τέταρτο σιλό – εισαγωγή βιομάζας στο riser) έχει ελάχιστο όριο στροφών (≈ 50 στρ/λεπτό) και πρέπει να λειτουργεί από την προετοιμασία μέχρι και μετά το τέλος του πειράματος, έτσι ώστε να αποτρέπει την είσοδο αδρανούς υλικού στο σωλήνα τροφοδοσίας, με σκοπό την αποφυγή πυράκτωσης και στόμωσης του. Ο συγκεκριμένος κοιλίας είναι για την εκφόρτιση του καυσίμου εντός του αεριοποιητή. Η τροφοδοσία του καυσίμου προς τον αντιδραστήρα γίνεται από τον κοιλία που βρίσκεται στο 3ο σιλό. Γι' αυτό το λόγο η βαθμονόμηση εισαγωγής της βιομάζας προς την ρευστοποιημένη κλίνη, γίνεται με βάση τις στροφές του συγκεκριμένου κοιλία.

κοιλίας	μήκος	διάμετρος	βήμα
πάνω	1 m	26mm	10mm
κάτω	1,4 m	32mm	15mm

Πίνακας 2. 2 Κοιλίες εγκατάστασης

Για την κίνηση των κοιλιών τοποθετήθηκαν δύο σύγχρονοι κινητήρες¹⁷ ισχύος 1 HP, με ηλεκτρονική οδήγηση που καθιστά δυνατή τη ρύθμιση των στροφών λειτουργίας τους. Η σύνδεση τους με τους άξονες των κοιλιών επιτυγχάνεται μέσω μειωτήρων στροφών καθέτων αξόνων και ελαστικών συνδέσμων (κόπλερ).

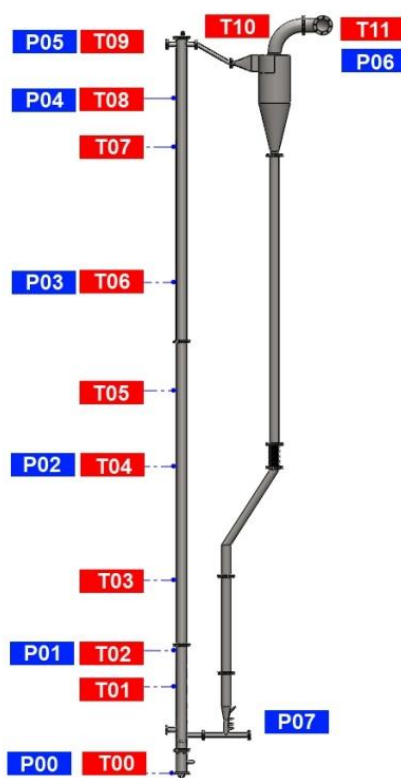
¹⁶ Ως 1^ο θα αναφέρεται το πάνω σιλό στο οποίο εισάγεται η βιομάζα και η αρίθμηση τους θα ακολουθήσει τη διαδρομή της βιομάζας. Δηλαδή τέταρτο είναι το τελευταίο σιλό που συναντά το καύσιμο πριν την είσοδο στο riser.

¹⁷ Οι σύγχρονοι κινητήρες διατηρούν σταθερή ταχύτητα περιστροφής ανεξάρτητα του φορτίου [58]

Η τοποθέτηση δύο ακόμα σιλό (1^ο και 2^ο), πάνω από τα σιλό των κοχλιών, δεν αποτελεί πλεονασμό αλλά είναι αναγκαία για τη διασφάλιση της στεγανότητας του συστήματος. Μετά την χειρονακτική πλήρωση του πρώτου σιλό με καύσιμο, οι δύο βάνες πρέπει να ανοίγουν διαδοχικά, για να αποφεύγεται η αποτόνωση των καυσαερίων από την κλίνη στον περιβάλλοντα χώρο, δια μέσου του συστήματος τροφοδοσίας.

2.1.7 Μετρητικές διατάξεις

Η καταγραφή της θερμοκρασίας του συστήματος γίνεται μέσω δώδεκα θερμοστοιχείων τύπου K με εύρος μέτρησης -200 με $1250^{\circ}C$ και ακρίβεια $\pm 5^{\circ}C$. Για την παρακολούθηση της ποιότητας της ρευστοποίησης τοποθετήθηκαν οκτώ μετρητές απόλυτης πίεσης S10 της εταιρείας WIKA με εύρος μέτρησης από 0 έως 1600 mbar .



Εικόνα 2.5 Θέσεις μετρητών πίεσης και θερμοκρασίας (P: πιεσόμετρα, T: θερμοστοιχεία)

Η ανάλυση της σύστασης του παραγόμενου προϊόντος επιτυγχάνεται μέσω αναλυτή αερίου AO2000 της εταιρείας ABB. Η ανάλυση είναι συνεχής (*online analysis*) και γίνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή του αερίου. Η συσκευή δίνει την δυνατότητα ανάλυσης συγκεκριμένων αερίων μέσω τριών ανιχνευτών που συνδέονται σε σειρά και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. 3.

ανιχνευτής	ανιχνεύσιμο αέριο	εύρος
URAS 26 IR	CO	0-3000 PPM
	CO ₂	0-25% κ.ο.
	CH ₄	0-15% κ.ο.
MAGNOS 27	O ₂	0-25% κ.ο.
CALDOS 27	H ₂	0-15% κ.ο.

Πίνακας 2. 3 Αναλυτές αερίου εγκατάστασης

2.1.8 Λοιπά

Για την εξασφάλιση της απαραίτητης για την αεριοποίηση παροχής αέρα, λειτουργεί εμβολοφόρος συμπιεστής, κινούμενος από ηλεκτροκινητήρα (σύνδεση με ιμάντα), που συμπιέζει σε ειδικό δοχείο χιλίων λίτρων, αέρα περιβάλλοντος σε πίεση 10bar. Το σύστημα είναι εγκατεστημένο σε εξωτερικό χώρο για ασφάλεια, λόγω των υψηλών πιέσεων και των μεγάλων γωνιακών ταχυτήτων που αναπτύσσονται. Ακολουθεί συνδεδεμένος σε σειρά, εντός της εγκατάστασης, χειροκίνητος ρυθμιστής πίεσης που αποτονώνει τον αέρα στα 2-3 bar ανάλογα με τη ζητούμενη παροχή. Για τη ρύθμιση της ποσότητας αέρα και αζώτου που εισέρχεται στο σύστημα, τοποθετήθηκαν τρία παροχόμετρα της εταιρείας AALBORG. Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν συνδέονται με τον υπολογιστή ελέγχου της μονάδας και εξασφαλίζουν σταθερή παροχή όγκου μέσω εσωτερικής ηλεκτροβάνας, ανεξάρτητα από της διακυμάνσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας του τροφοδοτούμενου αερίου [56].

παροχόμετρο	τροφοδοτούμενο αέριο	θέση τροφοδοσίας	εύρος (lt/min)	ακρίβεια ¹⁸
GFC67-60	αέρας	ανοδικός σωλήνας	0-500	±1,5%
GFC67-50	αέρας	σιλό τροφοδοσίας	0-300	±1,5%
GFC47-42	άζωτο	L-Valve	0-100	±1,5%

Πίνακας 2. 4 Παροχόμετρα εγκατάστασης

Ο υπολογιστής ελέγχου συγκεντρώνει όλες τις τιμές από τα όργανα καταγραφής, μέσω επτά αναλογιοψηφιακών μετατροπέων ADAM 4019+, και αντίστοιχα καθορίζει τις

¹⁸ Για παροχές στο εύρος 20-100% της ονομαστικής τιμής. Για μικρότερες παροχές η ακρίβεια μειώνεται στο ±3%

τιμές των παροχομέτρων μέσω δύο ψηφιοαναλογικών μετατροπέων ADAM 4024. Ο χειρισμός του συστήματος καθίσταται δυνατός από H/Y μέσω του προγράμματος καταγραφής δεδομένων DASYLAB.

2.2 Τροποποιήσεις για την βελτιστοποίηση λειτουργίας του αντιδραστήρα

Μετά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης και την περαίωση των πρώτων δοκιμαστικών πειραμάτων, κρίθηκε απαραίτητο να γίνουν ορισμένες βελτιωτικές αλλαγές.

2.2.1 Σύστημα τροφοδοσίας

Σημαντικές αλλαγές έγιναν στο σύστημα τροφοδοσίας της βιομάζας. Ο ηλεκτροκινητήρας του κοχλία εκφόρτισης είχε σχεδιασθεί ώστε να είναι πακτωμένος στο ικρίωμα της εγκατάστασης. Αυτό αποτέλεσε πρόβλημα λόγω των διαστολών του riser κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Όπως αναλύεται στην παράγραφο 2.1.1, ο ανοδικός σωλήνας είναι πακτωμένος στο ανώτερο σημείο του και η μεταβολή του μήκους του λόγω διαστολών εμφανίζεται στη βάση του.

Έτσι στο σύστημα τροφοδοσίας έπρεπε να δοθεί ένας βαθμός ελευθερίας κατά τον άξονα του riser ώστε να μπορεί να ακολουθεί τις μεταβολές του μήκους του κατά τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Η λύση που δόθηκε αρχικά ήταν η κατάργηση της σταθερής βάσης και τοποθέτηση μιας ρυθμιζόμενης βάσης στήριξης στον κινητήρα του κοχλία. Το πρόβλημα έτσι αντιμετωπίστηκε, αλλά η ρύθμιση του ύψους της βάσης ήταν αρκετά χρονοβόρα καθώς απαιτούσε χαλάρωση δύο κοχλιών σύσφιξης. Έτσι η σχεδίαση βελτιώθηκε περαιτέρω στηρίζοντας μόνιμα τον κινητήρα πάνω στο σύστημα και αλλάζοντας τη θέση της βάσης, προσαρτώντας παράλληλα σε αυτήν ένα γρύλο του εμπορίου, ο οποίος δίνει την δυνατότητα εύκολης και γρήγορης προσαρμογής του ύψους (Εικόνα 2. 6 - Εικόνα 2. 7).



Εικόνα 2. 6 Αρχικός (αριστερά) και ημιτελής σχεδιασμός στήριξης του συστήματος τροφοδοσίας

Ακόμα, αλλάχτηκε η θέση των ένσφαιρων τριβέων¹⁹ στήριξης του άξονα του κοχλία, για βελτίωση της στεγανότητας του συστήματος. Η ένωση του στρεφόμενου άξονα του κοχλία με το σταθερό σωλήνα εισαγωγής της βιομάζας επιτυγχάνεται με κουζινέτο, το οποίο διαθέτει ειδική εσοχή για τοποθέτηση δακτυλίου στεγανοποίησης (τσιμούχας). Η στήριξη του άξονα διασφαλίζεται μέσω δύο ρουλεμάν στηριγμένων στη βάση του συστήματος. Οι φορτίσεις του άξονα προέρχονται από το άλλο άκρο του κοχλία που στρέφεται και μεταφέρει τη βιομάζα εντός της κλίνης.

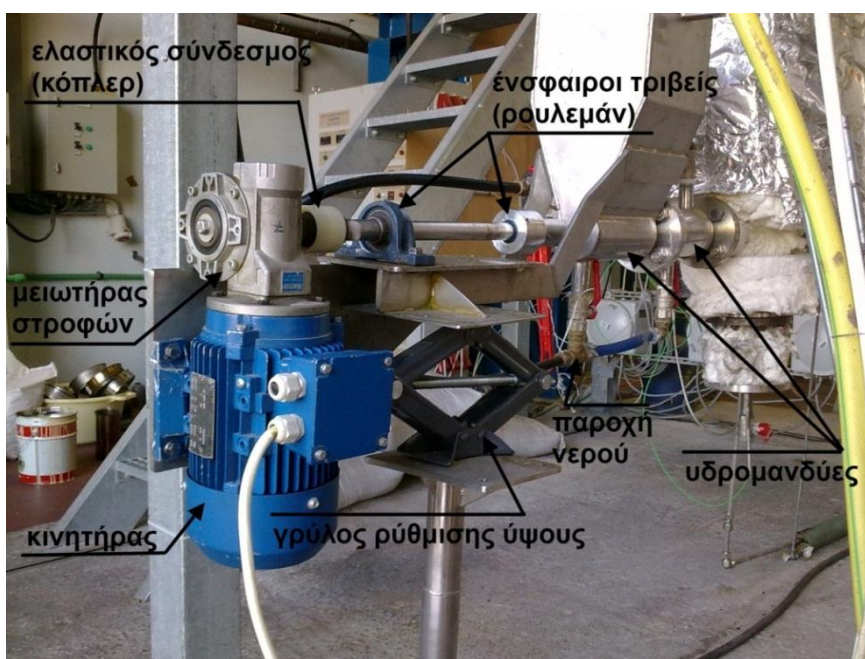
Τα ρουλεμάν στήριξης βρίσκονταν εξωτερικά του κουζινέτου και έτσι η τσιμούχα παραλάμβανε όλες τις δονήσεις από την λειτουργία του κοχλία, με αποτέλεσμα τη γρήγορη φθορά της. Έτσι, το ένα ρουλεμάν τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του κουζινέτου, δίπλα στον δακτύλιο στεγανοποίησης και βελτίωσε σημαντικά τη διάρκεια ζωής του.

Η τελευταία αλλαγή που συντελέστηκε στο σύστημα τροφοδοσίας ήταν η τοποθέτηση δύο υδρομανδύων (water jacket) εξωτερικά του σωλήνα του κοχλία εκφόρτισης, για να αποτραπεί η πυρόλυση του καυσίμου μέσα στο σιλό εξαιτίας της θέρμανσης του δι' αγωγής από τον riser. Αυτό προφανώς είναι ανεπιθύμητο καθώς αλλάζουν τα χαρακτηριστικά του πειράματος, μιας και η βιομάζα εισέρχεται στον αεριοποιητή αφού πρώτα έχει πυρολυθεί. Έτσι, η συνεχής ροή νερού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω από το σωλήνα αποτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας του. Οι υδρομανδύες λειτουργούν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και το νερό κυκλοφορεί

¹⁹ ρουλεμάν

σε κλειστό κύκλωμα που καταλήγει σε μεγάλη υπόγεια δεξαμενή του κτιρίου, για αποφυγή σπατάλης.

Ακόμη, τοποθετήθηκε στο σιλό μια ρυθμιζόμενη παροχή αέρα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε στο σύστημα τροφοδοσίας τεχνητή υπερπίεση ίση με αυτή που επικρατεί στη βάση του riser, εμποδίζοντας τα θερμά καυσαέρια από την κλίνη να εισέλθουν στο σύστημα τροφοδοσίας. Το πλεονέκτημα είναι διπλό. Αφ' ενός, αποφεύγεται η θέρμανση του συστήματος από θερμά καυσαέρια. Αφ' εταίρου, εμποδίζει την είσοδο αδρανούς υλικού (ολιβίνη ή χαλαζιακής άμμου) στο σιλό.



Εικόνα 2. 7 Τελική σχεδίαση συστήματος τροφοδοσίας

2.2.2 Αντιστάσεις θέρμανσης

Η δεύτερη σημαντική τροποποίηση έγκειται στην αλλαγή των αντιστάσεων HORST από αντιστάσεις KANTHAL. Η αλλαγή ήταν απαραίτητη για την ασφάλεια των πειραματιστών και την προστασία της εγκατάστασης. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου στις αντιστάσεις HORST που αποδείχτηκε ικανό να τρυπήσει την εγκατάσταση. Στην Εικόνα 2. 8 παρουσιάζεται η οπή που δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια πειράματος. Το κάτω μέρος του ανοδικού σωλήνα επανακατασκευάστηκε.

Παρ' ότι η εγκατάσταση είναι σταθερή, κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης δονείται λόγω των έντονων αναπηδήσεων του αδρανούς υλικού εντός του ανοδικού σωλήνα. Σε συνδυασμό με τις έντονες διαστολές που υφίσταται κατά την θέρμανση, προκλήθηκε με την πάροδο του χρόνου, αποσταθεροποίηση του νήματος και φθορά της μόνωσής της

Τροποποιήσεις για την βελτιστοποίηση λειτουργίας του αντιδραστήρα 2.15

αντίδρασης HORST που βρισκόταν στη βάση του riser. Έτσι οι σπείρες της αντίστασης βρέθηκαν τόσο κοντά ώστε να εμφανιστεί ηλεκτρικό τόξο μεταξύ τους, παρόμοιο με αυτό που δημιουργείται τεχνητά κατά τη διάρκεια της ηλεκτροσυγκόλλησης. Το μέταλλο στο σημείο αυτό καταστράφηκε και το κάτω κομμάτι του ανοδικού σωλήνα αλλάχτηκε.



Εικόνα 2. 8 Διάβρωση του χαλύβδινου σωλήνα από το ηλεκτρικό τόξο που δημιούργησε η αντίσταση HORST στη βάση του ανοδικού σωλήνα

Για την αποφυγή επανάληψης του φαινομένου κρίθηκε και απαραίτητη η αλλαγή των αντιστάσεων HORST από αντιστάσεις KANTHAL που δεν παρουσιάζουν παρόμοια προβλήματα. Επιπρόσθετα, τοποθετήθηκε ειδικό ρελέ διαρροής στις παροχές ρεύματος όλων των αντιστάσεων.

2.2.3 Κυκλώνας και εναλλάκτης

Τέλος χρειάστηκαν ορισμένες αλλαγές οι οποίες κρίθηκαν αναγκαίες λόγω του μεγάλου φορτίου ρυπαντών (πισσών και σωματιδίων) που παρατηρήθηκαν στις σωληνώσεις εξόδου του καυσαερίου προς το περιβάλλον μετά τα πρώτα πειράματα.

Ο κυκλώνας της εγκατάστασης είναι σχεδιασμένος για να ανακυκλοφορεί σωματίδια μεγαλύτερα από 200 μ m. Στις σωληνώσεις παρατηρήθηκε η ύπαρξη σωματιδίων άκαυστου άνθρακα (char) με μικρότερη διάμετρο. Έτσι τοποθετήθηκε εν σειρά μικρότερος κυκλώνας για κατακράτηση των σωματιδίων αυτών. Με αυτόν τον τρόπο μειώθηκε το σωματιδιακό φορτίο στα καυσαέρια και η συστηματική καταγραφή

της μάζας του άκαυστου άνθρακα που κατακρατούσε ο δεύτερος κυκλώνας βοήθησε στον ακριβέστερο υπολογισμό του ισοζυγίου του άνθρακα των πειραμάτων.

Όσον αφορά τις πίσσεις που συμπυκνώνονταν στους σωλήνες εξόδου, παρατηρήθηκε ότι ο εναλλάκτης της εγκατάστασης ήταν υποδιαστασιολογημένος και ανεπαρκής. Οι διάυλοι απ' όπου περνούσε το καυσαέριο, διαμέτρου 20mm, έφραζαν σε σύντομο χρονικό διάστημα από τις στερεοποιημένες πίσσεις. Έτσι ο εναλλάκτης αντικαταστάθηκε από άλλον πανομοιότυπης λειτουργίας, μεγαλύτερου μεγέθους και με μεγαλύτερους διαύλους. Η νέα διάμετρος των διαύλων είναι 65mm, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.1.5.

Προφανώς, ο καινούργιος εναλλάκτης ανοίγεται και καθαρίζεται συστηματικά αλλά δεν παρατηρείται στόμωση των σωληνώσεων του, ακόμα και με μικρότερη συχνότητα καθαρισμού σε σχέση με τον αρχικό.



Εικόνα 2. 9 Ο εναλλάκτης εγκατάστασης κατά το άνοιγμα για καθαρισμό

Τέλος, το σημείο δειγματοληψίας του αερίου (προς τα όργανα *ABB*) μεταφέρθηκε σε σημείο της σωληνώσης μετά το νέο εναλλάκτη, έτσι ώστε το αέριο να είναι όσο το δυνατόν απαλλαγμένο από πίσσεις. Αυτό βελτίωσε την αποτελεσματικότητα και τη διάρκεια ζωής των φίλτρων που προηγούνται των οργάνων καταγραφής.

3

Πειραματική διαδικασία

3.1 Σχεδιασμός πειράματος

Για τη σωστή διεκπεραίωση κάθε πειράματος και τη διεξαγωγή ορθών και ασφαλών συμπερασμάτων είναι απαραίτητος ο προκαθορισμός ενός συνόλου παραμέτρων που επηρεάζουν την διεργασία της αεριοποίησης σε συνθήκες ρευστοποίησης και καθορίζουν τη σύσταση του παραγόμενου αερίου.

Ορισμένες από τις παραμέτρους αυτές είναι αμετάβλητες (π.χ. κατασκευαστικές), ενώ άλλες διατηρήθηκαν σταθερές (π.χ. $\lambda=0,3$), για την συγκρισιμότητα αποτελεσμάτων από το σύνολο των πειραμάτων. Για καλύτερη εποπτεία τα μεγέθη αυτά καθώς και οι αλληλεξαρτήσεις τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. 1²⁰.

Όλες οι παράμετροι του σχήματος 3.1 έχουν παρουσιασθεί και αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Η μόνη παράμετρος που μένει να διευκρινιστεί είναι η εύρεση της απαιτούμενης ποσότητας αέρα για στοιχειομετρική καύση του καυσίμου, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\text{αέρα}_{\text{στοιχ}} = \left[\frac{C_{a,r}}{12} + \frac{H_{a,r}}{4} + \frac{N_{a,r}}{28} + \frac{S_{a,r}}{32} - \frac{O_{a,r}}{32} \right] * \dot{M}_f * \frac{100}{21} * 22.4 * \frac{1000}{60} \quad (23)$$

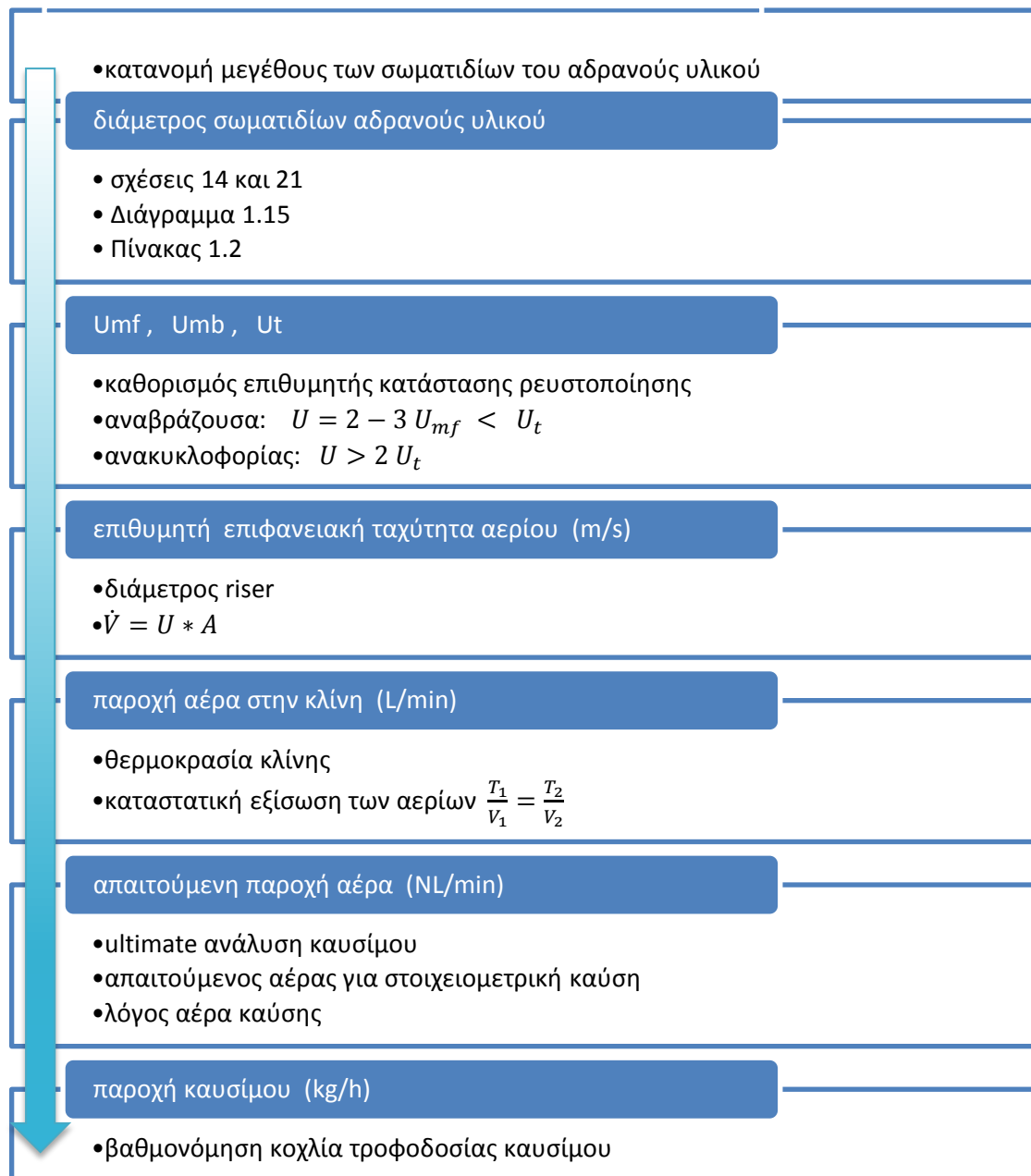
Από την τιμή της εξίσωσης προκύπτει, μέσω του λόγου αέρα καύσης λ , η ποσότητα αέρα που εισέρχεται στην κλίνη. Τα C, H, N, S, O είναι τα ποσοστά του κάθε στοιχείου στο καύσιμο όπως δίνονται από την ultimate ανάλυση. Η παροχή του καυσίμου εισάγεται στην εξίσωση σε kg/h και η ποσότητα αέρα υπολογίζεται σε NL/min .

Οι αναλύσεις των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν έγιναν από το ΙΤΕΣΚ και το ΚΑΠΕ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. 1.

²⁰ Κάθε παράμετρος εντός των μπλε πλαισίων, καθορίζει την επόμενη μέσω των σχέσεων και παραμέτρων που βρίσκονται στις κουκίδες μεταξύ τους.

	Αγριαγκινάρα	Ιπιά	Γιατρόφα	Ηλίανθος	Μίσχανθος
	%	%	%	%	%
Προσεγγιστική ανάλυση (%wt, ar)					
Συνολική υγρασία	13.20	8.29	6.17	8.10	8.28
Τέφρα	15.38	2.14	8.20	8.24	2.94
Πτητικά	64.99	76.98	72.80	70.57	76.79
Δεσμευμένη ποσότητα άνθρακα	6.43	12.60	12.83	13.09	12.00
LHV (Kcal/Kgr)	3151	4165	4115	3748	4121
LHV (MJ/kg)	13.18	17.43	17.22	15.68	17.24
Προσεγγιστική ανάλυση (%wt, db)					
Κρυσταλλική υγρασία (TGA)	3.13	3.57	2.41	2.58	3.37
Τέφρα (TGA)	17.72	2.33	8.74	8.97	3.20
Πτητικά (TGA)	74.87	83.93	77.59	76.79	83.72
Δεσμευμένη ποσότητα άνθρακα	7.41	13.74	13.67	14.24	13.08
HHV (MJ/kg)	16.72	20.55	19.90	18.52	20.35
LHV (MJ/Kg)	15.19	19.00	18.35	17.06	18.80
HHV (Kcal/kg) - calorimeter	3995.00	4911.60	4756.00	4427.20	4863.80
HHVMilne (MJ/kg)	17.30	20.00	20.86	18.92	19.63
Στοιχειακή ανάλυση (% wt, db)					
C	42.69	49.78	49.18	47.00	48.73
H	5.30	6.08	6.36	5.71	6.10
N	2.23	0.27	5.76	2.34	0.34
S	0.45	0.15	0.40	0.31	0.14
Cl	0.29	0.06	0.20	0.19	0.10
O	31.32	41.33	29.36	35.48	41.39
Στοιχειακή ανάλυση (% wt, daf)					
C	51.88	0.28	5.90	2.40	0.35
H	6.44	50.97	50.35	48.12	49.89
N	2.71	0.15	0.41	0.32	0.14
S	0.55	6.23	6.51	5.85	6.25
Cl	0.35	0.06	0.20	0.19	0.10
O	38.07	42.32	30.06	36.33	42.38

Πίνακας 3. 1 Χημική ανάλυση των χρησιμοποιηθέντων καυσίμων



Σχήμα 3. 1 Αλληλεξάρτηση των παραμέτρων που καθορίζουν τα πειράματα αεριοποίησης

Με βάση τα παραπάνω, για κάθε πείραμα απαιτείται βαθμονόμηση των κοχλιών τροφοδοσίας του καυσίμου, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η εισαγωγή συγκεκριμένης ποσότητας βιομάζας. Ακόμα, είναι αναγκαίος, ο ακριβής καθορισμός της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων του αδρανούς υλικού που θα εισαχθεί στην κλίνη.

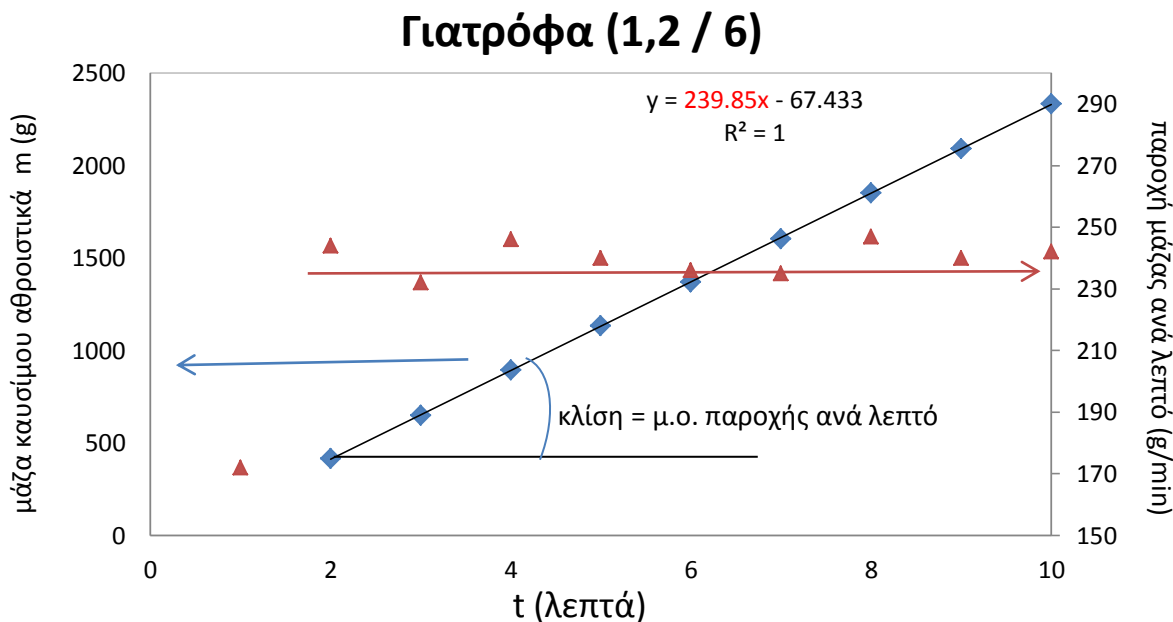
3.1.1 Βαθμονόμηση κοχλιών τροφοδοσίας

Όπως έχει αναφερθεί, η βιομάζα τροφοδοτείται στην κλίνη μέσω συστήματος κοχλιών τροφοδοσίας. Η γωνιακή ταχύτητα του πρώτου (επάνω) κοχλία καθορίζει την ποσότητα βιομάζας που εισέρχεται στο σύστημα. Οι ταχύτητες του κινητήρα ελέγχονται από ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης με αναλογικό ροοστάτη 10 στροφών (3600°).

Όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατεργασμένα σε μορφή πελλέτας. Όμως, χαρακτηριστικά όπως το μήκος, η διάμετρος, η σκληρότητα, η ψαθυρότητα και η υγρασία των πελλετών είναι διαφορετικά για κάθε καύσιμο. Έτσι για τις ίδιες στροφές του κινητήρα παρατηρείται διαφορετική παροχή ανά καύσιμο. Για το λόγο αυτό είναι υποχρεωτική η βαθμονόμηση του κοχλία πριν από κάθε πείραμα (ακόμα και για πειράματα με καύσιμο για το οποίο ο κοχλίας έχει βαθμονομηθεί και παλαιότερα).

Η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι η εξής :

Αφαίρεση του διασκορπιστή έτσι ώστε το κάτω μέρος του riser να είναι ανοιχτό, και τοποθέτηση κάτω από αυτόν, ζυγού με προσαρτημένο δοχείο. Με την έναρξη περιστροφής των κοχλιών η βιομάζα που εισέρχεται στο σύστημα πέφτει βαρυντικά μέσα στο δοχείο του ζυγού. Για διάστημα 10 λεπτών καταγράφονται οι τιμές του ζυγού ανά λεπτό (10 μετρήσεις). Προκύπτει έτσι το επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 3. 1 Βαθμονόμηση κοχλία τροφοδοσίας για τις πελλέτες γιατρόφας

Οι μπλε τιμές είναι οι τιμές που καταγράφηκαν. Οι κόκκινες προκύπτουν από την αφαίρεση κάθε τιμής από την επόμενη και αντιπροσωπεύουν την παροχή ανά λεπτό. Η επικεφαλίδα του διαγράμματος φανερώνει το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε και τις ενδείξεις των ροοστατών (1,20 πάνω, 6 κάτω).

Για την επικύρωση της μέτρησης πρέπει όλες οι κόκκινες τιμές να είναι σχετικά όμοιες ($\pm 5\%$ από τη μέση τιμή) έτσι ώστε η αθροιστική καμπύλη να προσεγγίζει ευθεία γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία του κοχλία ήταν ομαλή και στη μέτρηση δεν υπεισέρχεται κάποιο τυχαίο σφάλμα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 3. 2. Στις δύο τελευταίες στήλες αποτυπώνεται η απόλυτη και ποσοστιαία απόκλιση κάθε μέτρησης από τη μέση τιμή. Στην τελευταία γραμμή φαίνεται η μέση τιμή και η απόλυτη και ποσοστιαία τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

<i>t</i> (min)	<i>g</i>	<i>g/min</i>	διαφορά από τη μέση τιμή	% από τη μέση τιμή
1	172	172	68.22	28.40%
2	416	244	3.78	1.57%
3	648	232	8.22	3.42%
4	894	246	5.78	2.41%
5	1134	240	0.22	0.09%
6	1370	236	4.22	1.76%
7	1605	235	5.22	2.17%
8	1852	247	6.78	2.82%
9	2092	240	0.22	0.09%
10	2334	242	1.78	0.74%
	g/min (average)	240.22	4.83	2.01%

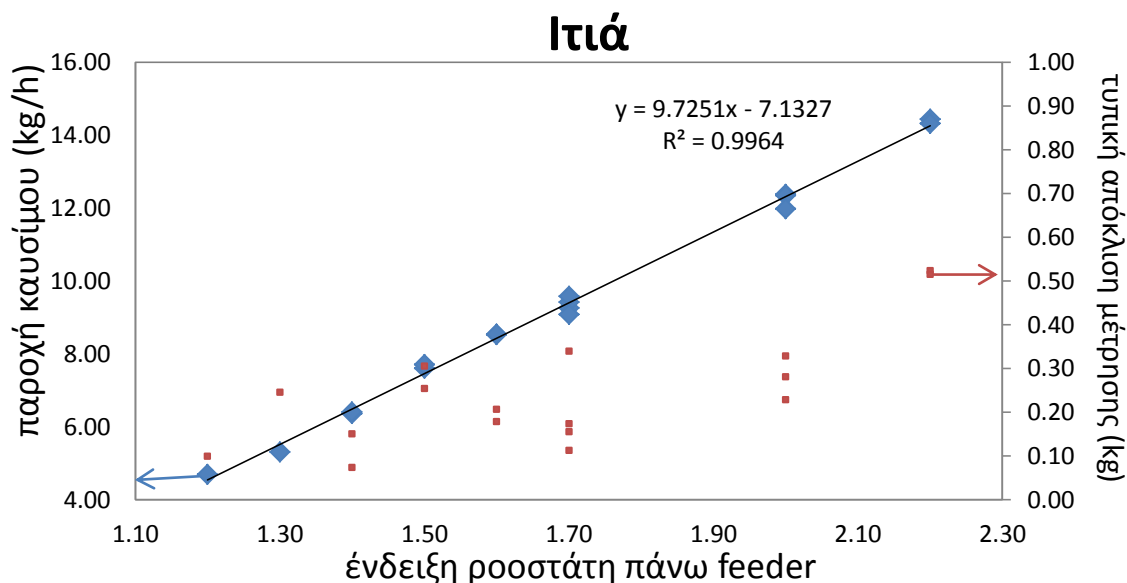
Πίνακας 3. 2 Μετρήσεις κατά την βαθμονόμηση του κοχλία τροφοδοσίας

Παρατηρείται σημαντική απόκλιση της πρώτης μέτρησης από τη μέση τιμή του συνόλου (πρώτη γραμμή του Πίνακα 3. 1, με κόκκινα γράμματα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονομέτρηση ξεκινά ταυτόχρονα με την έναρξη του κινητήρα. Η είσοδος της πρώτης πελλέτας στο ζυγό μέτρησης εμφανίζει καθυστέρηση μερικών δευτερολέπτων μέχρι να διανυθεί η διαδρομή από των επάνω κοχλία μέχρι τη θέση μέτρησης, μέσω του κοχλία εκφόρτισης. Για το λόγο αυτό η τιμή της πρώτης μέτρησης δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς. Εναλλακτικά, μπορεί το σύστημα να τίθεται σε λειτουργία λίγο πριν την έναρξη της χρονομέτρησης. Στην ανωμαλία αυτή οφείλεται και η μορφή της γραμμής τάσης στο Διάγραμμα 3. 1. Για ορθή τιμή πρώτης μέτρησης η καμπύλη θα έπρεπε να ακολουθεί την μορφή $y = ax$. Αμελώντας την συγκεκριμένη τιμή και τον παράγοντα $+b$ ($y = ax + b$) που προκύπτει λόγω αυτής, η κλίση της καμπύλης φανερώνει την μέση τιμή παροχής ανά λεπτό.

Για την επίτευξη καλύτερου επιπέδου εμπιστοσύνης η μέτρηση για την ίδια ταχύτητα του κινητήρα (ίδια ένδειξη ροοστάτη) επαναλαμβάνεται περισσότερες από μία φορές.

Στη συνέχεια η ταχύτητα του κινητήρα αλλάζει με σκοπό την επίτευξη της ζητούμενης παροχής που έχει καθοριστεί από την διαδικασία της προηγούμενης παραγράφου.

Με την προβολή όλων των δοκιμών σε κοινό διάγραμμα προκύπτει καμπύλη συσχέτισης μεταξύ της ένδειξης του ροοστάτη και της παροχής μάζας του καυσίμου. Η γραμμικότητα της καμπύλης, αποτελεί άλλη μία ένδειξη της ορθότητας των μετρήσεων.



Διάγραμμα 3. 2

Στον Πίνακα 3. 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη βαθμονόμηση των κοχλιών για τις πελλέτες της ιτιάς και συνθέτουν το Διάγραμμα 3. 2. Στην πέμπτη στήλη (Πίνακας 3. 3) έχει γίνει αναγωγή της παροχής ανά ώρα και στην όγδοη στήλη έχουν προστεθεί οι τιμές παροχής αέρα που αντιστοιχούν στις δεδομένες παροχές καυσίμου. Η αναγωγή της παροχής αέρα σε κανονικά λίτρα ανά λεπτό γίνεται για καλύτερη εποπτεία κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς σε αυτές τις μονάδες είναι βαθμονομημένα τα παροχόμετρα της εγκατάστασης. Ομοίως, η παροχή καυσίμου ανάγεται σε κιλά ανά ώρα για να είναι εύκολος ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου που εισάγεται χειρωνακτικά στο πρώτο σιλό ανά ώρα. Με κίτρινο χρώμα είναι επισημασμένες οι τιμές που αντιστοιχούν σε αναβράζουσα κατάσταση κλίνης ενώ με καφέ οι τιμές που αντιστοιχούν σε κατάσταση ανακυκλοφορίας σύμφωνα με τις ταχύτητες U_{mf} και U_t που προκύπτουν για κάθε κοκκομετρία του αδρανούς υλικού.

Ακόμα, κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός της διακύμανσης της πραγματικής τιμής του λόγου αέρα καύσης που επιτυγχάνεται κατά την πειραματική διαδικασία, λόγω της διακύμανσης της παροχής καυσίμου. Θεωρήθηκε αυξομείωση της παροχής κατά την τυπική απόκλιση των μετρήσεων και υπολογίστηκε ο αντίστοιχα απαιτούμενος αέρας για στοιχειομετρική καύση της μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Ο λόγος του αέρα εισαγωγής προς τις υπολογισθέντες τιμές δίνει το εύρος της πραγματικής τιμής του λ που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις τέσσερις τελευταίες στήλες του Πίνακα 3. 3. Παρατηρείται μεταβολή της τιμής από 0,29 έως 0,31 το οποίο είναι ικανοποιητική τιμή σε σχέση με το μεγάλο μέγεθος της πειραματικής εγκατάστασης.

feeder		average (g/min)	st.dev (g)	1 hour (kg)	st.dev (kg)	airmass stoichiometric (από το μ.ο.)	total airflow (από το μ.ο.) NL/min
πάνω	κάτω						
2.20	6.00	240.50	8.71	14.43	0.52	1033.080	309.924
2.20	6.00	238.50	8.57	14.31	0.51	1024.489	307.347
2.00	6.00	206.20	3.79	12.37	0.23	885.743	265.723
2.00	6.00	205.67	4.68	12.34	0.28	883.453	265.036
2.00	6.00	199.67	5.46	11.98	0.33	857.680	257.304
1.70	6.00	154.17	5.64	9.25	0.34	662.232	198.670
1.70	6.00	157.00	1.87	9.42	0.11	674.401	202.320
1.70	6.00	159.50	2.88	9.57	0.17	685.140	205.542
1.70	6.00	151.33	2.59	9.08	0.16	650.046	195.014
1.60	6.00	142.00	2.97	8.52	0.18	609.968	182.990
1.60	6.00	142.17	3.43	8.53	0.21	610.686	183.206
1.50	6.00	126.67	4.23	7.60	0.25	544.105	163.231
1.50	6.00	128.33	5.08	7.70	0.30	551.261	165.378
1.40	6.00	106.00	2.49	6.36	0.15	455.328	136.599
1.40	6.00	106.67	1.21	6.40	0.07	458.194	137.458
1.30	6.00	88.33	4.08	5.30	0.24	379.439	113.832
1.20	6.00	78.20	1.64	4.69	0.10	335.912	100.774

διακύμανση πραγματικής τιμής του λ			
Air.stoichiometric (μ.ο. + st.dev)	λ (m+st.dev)	Air.stoichiometric (μ.ο. - st.dev)	λ (m-st.dev)
1070.494	0.290	995.666	0.311
1061.302	0.290	987.676	0.311
902.023	0.295	869.462	0.306
903.556	0.293	863.350	0.307
881.133	0.292	834.226	0.308
686.459	0.289	638.005	0.311
682.434	0.296	666.369	0.304
697.512	0.295	672.769	0.306
661.171	0.295	638.920	0.305
622.726	0.294	597.210	0.306
625.419	0.293	595.952	0.307
562.275	0.290	525.934	0.310
573.082	0.289	529.440	0.312
466.024	0.293	444.632	0.307
463.391	0.297	452.996	0.303
396.965	0.287	361.913	0.315
342.957	0.294	328.867	0.306

Πίνακας 3. 3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης κοχλίας

3.1.2 Κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του αδρανούς

Κατά την λειτουργία μιας ρευστοποιημένης κλίνης, η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων²¹ του αδρανούς υλικού είναι ο παράγοντας που καθορίζει την επιθυμητή ταχύτητα αερίου εντός του ανοδικού σωλήνα. Γενικά, είναι απαραίτητη σε διάφορους τεχνολογικούς τομείς καθώς φανερώνει μηχανικές και χημικές ιδιότητες των υλικών. Έτσι έχουν αναπτυχθεί και τυποποιηθεί αρκετές μέθοδοι μέτρησης της [59].

Για την προετοιμασία του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα (sieve analysis). Για την εκτέλεση της μεθόδου χρησιμοποιούνται ειδικά πιστοποιημένα κόσκινα με συγκεκριμένο μέγεθος διακένων. Τα κόσκινα τοποθετούνται σε στήλη πάνω σε ηλεκτρικό τάρακτρο.

Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα από το αδρανές υλικό που πρόκειται να εισαχθεί στην κλίνη, ζυγίζεται και τοποθετείται στο επάνω κόσκινο, το οποίο έχει τις μεγαλύτερες οπές. Μετά την τοποθέτηση καπακιού που στεγανοποιεί και συγκρατεί τη στήλη με ειδικούς μάντες, τίθεται σε λειτουργία το τάρακτρο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (10 λεπτά). Κάθε κόσκινο της στήλης, έχει μικρότερα ανοίγματα από το ακριβώς από πάνω του, έως τη βάση της στήλης όπου τοποθετείται πιάτο συλλογής. Όσο μικρότερα τα σωματίδια του αδρανούς τόσο χαμηλότερα θα συγκρατηθούν στη στήλη των κοσκίνων. Όταν η δόνηση από το τάρακτρο ολοκληρωθεί, ζυγίζεται η ποσότητα υλικού που έχει παραμείνει σε κάθε κόσκινο. Για τα σωματίδια αυτά γνωρίζουμε ότι έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από τα διάκενα του κοσκίνου στο οποίο συγκρατήθηκαν και μικρότερη από τα διάκενα του αμέσως προηγούμενου (επάνω). Έτσι, όσο περισσότερα κόσκινα τοποθετηθούν τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται. Μετά το ζύγισμα όλων των κοσκίνων καταλήγουμε στους πιο κάτω πίνακες.

ΗΛΙΑΝΘΟΣ 7/12/2011						
(μm) διάμετρος οπών	gr	άδειο κόσκινο	κόσκινο με υλικό	υλικό (διαφορά)	ολιβίνης	
πιάτο συλλογής		434.32	435.53	1.21	<125 μm	2.33%
125		375.74	378.04	2.3	125 - 280 μm	4.42%
280		399.55	417.65	18.1	280 - 355 μm	34.79%
355		400.28	429.73	29.45	355 - 500 μm	56.61%
500		412.89	413.85	0.96	> 500 μm	1.85%

Πίνακας 3. 4 Κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του αδρανούς με την μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα

²¹ Particle size distribution

Οι επικεφαλίδες του Πίνακα 3. 4 αναφέρονται στο πείραμα για το οποίο έγινε η κατανομή του μεγέθους σωματιδίων και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές (ολιβίνης). Στην τελευταία στήλη έχει γίνει αναγωγή του δείγματος σε εκατοστιαία βάση. Οι τιμές αυτές εισάγονται στις εξισώσεις για την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης και της οριακής ταχύτητας.

3.2 Εκτέλεση του πειράματος

Η ημέρα εκτέλεσης του πειράματος ξεκινά με την προετοιμασία και προθέρμανση του αεριοποιητή. Κατά τη διάρκεια του πειράματος εκτελούνται συνεχείς έλεγχοι λειτουργίας ενώ ορισμένες ενέργειες απαιτούνται και μετά τη λήξη της διαδικασίας.

3.2.1 Προετοιμασία εγκατάστασης

Η πρώτη ενέργεια που εκτελείται είναι η πλήρωση του ανοδικού σωλήνα με αδρανές υλικό το οποίο έχει ζυγιστεί και κοκκομετρηθεί κατά το σχεδιασμό του πειράματος. Η εισαγωγή του υλικού γίνεται από την κορυφή του riser²², με τον κάτω κοχλία πάντα σε λειτουργία, έτσι ώστε να εμποδίζεται η είσοδος του αδρανούς υλικού στο σύστημα τροφοδοσίας. Η διαδικασία πρέπει να προηγείται της θέρμανσης του συστήματος, καθώς με υψηλή θερμοκρασία εντός της κλίνης, παρατηρούνται εκτονώσεις του αέρα μέσω της βάνας εισαγωγής. Κάτι τέτοιο είναι προφανώς ανεπιθύμητο, αφ' ενός για την ασφάλεια των πειραματιστών και αφετέρου γιατί χάνεται ποσότητα αδρανούς που δεν μπορεί να υπολογιστεί.

Στη συνέχεια, ενεργοποιούνται οι αντιστάσεις για την προθέρμανση της κλίνης, στη θερμοκρασία των 100-150°C. Το σύστημα πρέπει να παραμείνει σε αυτή την κατάσταση για ένα χρονικό διάστημα τουλάχιστον 20 λεπτών, έτσι ώστε να θερμανθούν ήπια οι μονώσεις και οι μεταλλικές επιφάνειες και να αποβάλουν σταδιακά την υγρασία τους. Έντονη θέρμανση (π.χ. Set point των αντιστάσεων κατευθείαν στους 700° C), θα μπορούσε να επιφέρει ακαριαία εξάτμιση όλης της υγρασίας και πλήρωση του διακένου μεταξύ αντιστάσεων και μετάλλου με ατμό. Σε τοπικά μεγάλη συγκέντρωση, ο ατμός, θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν γέφυρα μεταξύ των επιφανειών με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών εκκενώσεων.

Έντονη εξάτμιση ιδιαίτερα ορατή και με γυμνό μάτι (ξεκάπνισμα), παρουσιάζεται μετά την αλλαγή μόνωσης κάποιου τμήματος της εγκατάστασης, κατά την πρώτη θέρμανση του νέου κομματιού.

Μετά την πάροδο του χρόνου προθέρμανσης, οι επιθυμητές θερμοκρασίες (set points) των αντιστάσεων αυξάνονται σταδιακά, για αποφυγή απότομων διαστολών, μέχρι την επιθυμητή

²² Η από την βάνα του καθοδικού σωλήνα

τιμή. Παράλληλα, ξεκινά η εισαγωγή αέρα στην κλίνη, ο οποίος θερμαίνεται περνώντας από τον ανοδικό σωλήνα και μεταφέρει την θερμότητα σε όλη την εγκατάσταση. Επιτυγχάνεται έτσι, πιο αργή αλλά ομοιόμορφη θέρμανση του συστήματος που είναι απαραίτητη για την εκκίνηση του πειράματος.

Κατά την διάρκεια της θέρμανσης γίνονται έλεγχοι διαρροών σε όλες τις ενώσεις του αντιδραστήρα. Έλεγχοι διαρροών γίνονται και κατά τον καθαρισμό και προετοιμασία της κλίνης. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι ενώσεις κομματιών που αφαιρούνται για καθαρισμό και επανατοποθετούνται, είναι στεγανές κατά τον καθαρισμό αλλά εμφανίζουν διαρροές μετά την θέρμανση της εγκατάστασης. Αυτό οφείλεται εν μέρει στη μείωση της πυκνότητας του αέρα κατά τη θέρμανση, αλλά κυριότερα στη διαστολή των κοχλιών σύσφιξης λόγω υψηλής θερμοκρασίας.

3.2.2 Κατά τη διάρκεια του πειράματος

Με την έναρξη του κοχλία τροφοδοσίας και την είσοδο του καυσίμου στον αντιδραστήρα, ξεκινά η αεριοποίηση και κατά συνέπεια η πειραματική διαδικασία.

Οι εργασίες που απαιτούνται, είναι η περιοδική συλλογή δειγμάτων υλικού από το σιλό του μικρού κυκλώνα, η απομάκρυνση των συμπυκνωμάτων από τη χοάνη του εναλλάκτη και η χειρωνακτική πλήρωση με καύσιμο στο σιλό αποθήκευσης (2^{ος} όροφος). Η περιοδικότητα των παραπάνω καθορίζεται από την παροχή του καυσίμου.

Εξίσου σημαντικός είναι και ο έλεγχος της εγκατάστασης που πρέπει να είναι συνεχής και ενδεδειγμένη. Αφενός για να εντοπιστεί και να αντιμετωπιστεί άμεσα κάποιο πρόβλημα που μπορεί να προκύψει και να είναι επιζήμιο για την εγκατάσταση ή την ασφάλεια των πειραματιστών (π.χ. ηλεκτρικό τόξο ή διαρροή αερίου). Αφετέρου, για τη σωστή λειτουργία όλων των συστημάτων της κλίνης και την αποφυγή προβλημάτων που μπορεί να αλλοιώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Για την εκτέλεση σωστού ελέγχου της εγκατάστασης, γρήγορα και χωρίς περιθώριο παράβλεψης κάποιας παραμέτρου, τα σημεία που πρέπει να ελέγχονται καταγράφηκαν σε φύλλο ελέγχου το οποίο επισυνάπτεται στο παράρτημα Π2.

3.2.3 Μετά το τέλος του πειράματος

Μετά τη λήξη της πειραματικής διαδικασίας γίνονται συγκεκριμένες ενέργειες με σκοπό την εξαγωγή πρόσθετων συμπερασμάτων και την προστασία της εγκατάστασης.

Αφού διακοπεί η παροχή καυσίμου σταματά η καταγραφή τιμών από τον υπολογιστή της μονάδας και η παροχή αερίου του ανοδικού σωλήνα συνδέεται με συστοιχία φιαλών αζώτου. Η εγκατάσταση τροφοδοτείται με άζωτο με σκοπό την άμεση ψύξη της, έτσι ώστε να σταματήσουν οι χημικές διεργασίες καύσης και αεριοποίησης και να συλλεχθούν δείγματα από το υλικό εντός του ανοδικού σωλήνα που θα φανερώσουν την ακριβή κατάσταση που επικρατούσε κατά τον τερματισμό του πειράματος. Η χρήση αζώτου κρίνεται απαραίτητη

καθώς εάν η ψύξη γινόταν με αέρα η οξειδωση των συστατικών της κλίνης θα συνεχιζόταν για αρκετή ώρα μέχρι την πτώση της θερμοκρασίας.

Ακόμα, η ψύξη της εγκατάστασης επιβάλλεται να γίνει άμεσα έτσι ώστε ο ανοδικός σωλήνας να επανέλθει στο αρχικό του ύψος και η βάση στήριξης του συστήματος τροφοδοσίας να ρυθμιστεί κατάλληλα πριν την αποχώρηση του τελευταίου πειραματιστή.

3.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Μετά το τέλος του πειράματος τα αποτελέσματα εισάγονται σε υπολογιστικά φύλλα του *Microsoft EXCEL* με σκοπό την ανάλυση τους και την εξαγωγή συγκεντρωτικών πινάκων αποτελεσμάτων. Από το πρόγραμμα καταγραφής *DasyLab* ανακτούνται τα εξής αρχεία εξόδου:

1. *GAS ANALYSIS.ASC*: Περιέχει τις κατ' όγκο περιεκτικότητες του παραγόμενου αερίου, σε CO , CO_2 , H_2 , CH_4 και O_2 , όπως καταγράφονται από τους αναλυτές αερίου της εταιρείας *ABB*. Η καταγραφή μηδενικής ποσότητας οξυγόνου αποτελεί ποιοτικό δείκτη για σωστή αεριοποίηση.
2. *TEMPERATURE.ASC*: Περιέχει τις καταγραφόμενες θερμοκρασίες από τα δώδεκα θερμοστοιχεία της εγκατάστασης.
3. *PRESSURE FB.ASC*: Περιέχει τις τιμές πίεσης της εγκατάστασης όπως καταγράφονται από τα οχτώ διαθέσιμα όργανα.
4. *MASS FLOW.ASC*: Περιέχει τις τιμές παροχής αέρα και αζώτου από τα παροχόμετρα της εγκατάστασης.

Όλα τα δεδομένα προβάλλονται σε συγκεντρωτικά διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου όπως φαίνεται στο Παράρτημα Π3. Από αυτά εκτιμώνται τα διαστήματα κατά τα οποία επιτεύχθηκαν σταθερές πειραματικές συνθήκες για ικανό χρονικό διάστημα, ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα αναφορικά με τη σύσταση του παραγόμενου αερίου. Για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στη σύσταση του αερίου σύνθεσης πρέπει να επιτευχθεί σταθεροποίηση του θερμοκρασιακού προφίλ για τουλάχιστον μία ώρα λειτουργίας της εγκατάστασης.

Ακόμα, κατασκευάζονται διαγράμματα ποσοστιαίας μετατροπής του συνολικού διαθέσιμου άνθρακα σε αέρια προϊόντα (carbon conversion efficiency, CCE%). Η εισερχόμενη με το καύσιμο ποσότητα άνθρακα ανάγεται σε γραμμομόρια (moles) μέσω της παροχής καυσίμου, της χημικής σύστασης αυτού και του μοριακού βάρους του άνθρακα. Αντίστοιχα, η γραμμομοριακή ποσότητα άνθρακα στο αέριο σύνθεσης υπολογίζεται από τις περιεκτικότητες αυτού σε ανθρακούχα αέρια (CO , CO_2 , CH_4) και τα μοριακά βάρη των αερίων. Για καλύτερη εποπτεία του φαινομένου, υπολογίζεται προσεγγιστικά και η ποσότητα άνθρακα που κατακρατείται από τους κυκλώνες, με βάση την ποσότητα των δειγμάτων που συλλέγονται κατά την εκτέλεση του πειράματος. Παρόμοια υπολογίζεται και ο δείκτης CGE% (Cold Gas Efficiency) που παρουσιάζεται στους συγκεντρωτικούς πίνακες (test matrix) του κάθε καυσίμου. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του εισαγόμενου καυσίμου και του παραγόμενου αερίου ως εξής [60]:

$$CGE\% = \left[\frac{LHV_{\text{αερίου}} \cdot \Phi_{\text{αερίου}}}{LHV_{\text{ξηρ.καυσ.}} \cdot \Phi_{\text{ξηρ.καυσ.}}} \right] * 100\%$$

Όπου Φ_i είναι η αντίστοιχη παροχή (μετρούμενη πάντα στις ίδιες μονάδες για τη βιομάζα και το αέριο).

Τέλος, η ποσότητα παραγόμενου αερίου που παρουσιάζεται στους συγκεντρωτικούς πίνακες αναφέρεται στο καίόμενο μίγμα του αερίου ($CH_4 + CO + H_2$) γι' αυτό και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Δοκιμές αεριοποίησης με μίσχανθο.

Ο μίσχανθος είναι ένας φυτικός οργανισμός με ταχεία ανάπτυξη, ιδανικός για να καλλιεργηθεί ως ενεργειακό φυτό. Το μήκος των πελλετών που χρησιμοποιήθηκαν είναι 6 – 8 mm. Η περιεκτικότητά του σε τέφρα είναι 3,20% κ. β. σε ξηρή βάση, και είναι η χαμηλότερη, μετά την ιτιά, συγκριτικά με τα υπόλοιπα καύσιμα. Η απορευστοποίηση της κλίνης κατά την αεριοποίηση του συγκεκριμένου καυσίμου παρατηρήθηκε στους 850°C.

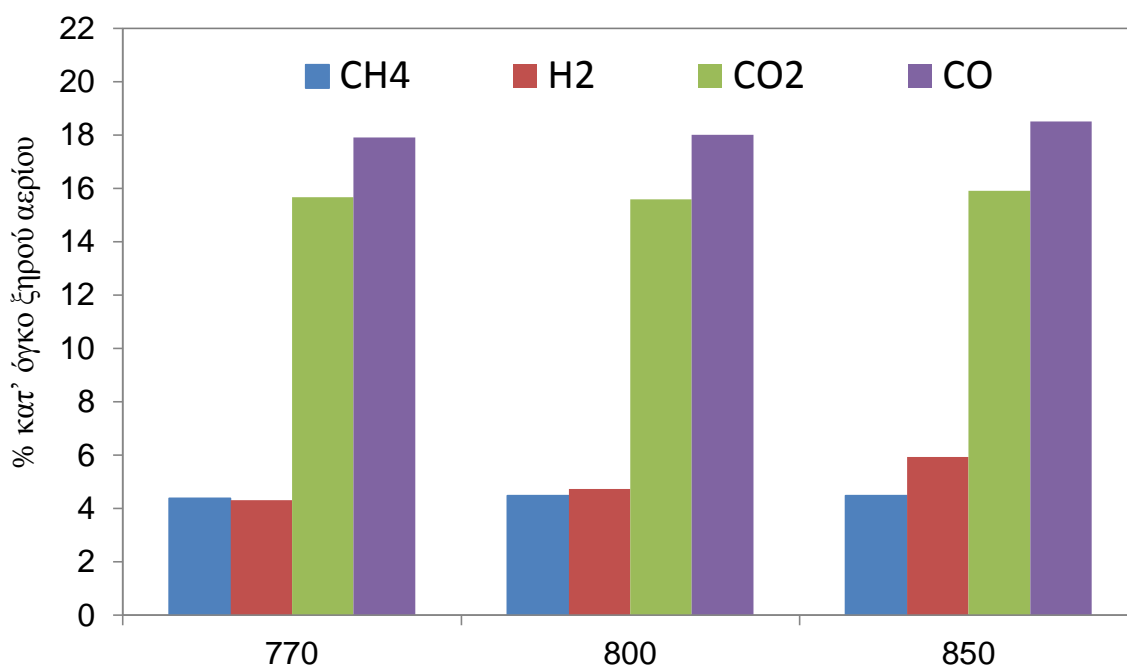
Στον Πίνακα 4. 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές συνθήκες του πειράματος αεριοποίησης για το συγκεκριμένο καύσιμο. Όλες οι δοκιμές αεριοποίησης έγιναν με αδρανές υλικό τη χαλαζιακή άμμο, ενώ ο λόγος αέρα καύσης διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με $\lambda = 0,3$. Η τροφοδοσία σε πελλέτες μίσχανθου ήταν 4,5 kg/h.

Η ελάχιστη θερμογόνος ικανότητα του αερίου σύνθεσης προκύπτει από τον υπολογισμό της θερμογόνου ικανότητας των CH₄, H₂, CO κατά DIN 51350 [LHV].

Κατάσταση	1	2	3
Θερμοκρασία [°C]	770(±10)	800(±10)	850(±10)
Παροχή μάζας καυσίμου [kg/h]	4.5	4.5	4.5
Μάζα αδρανούς υλικού [kg]	4kg Χαλαζιακή άμμος	4kg Χαλαζιακή άμμος	4kg Χαλαζιακή άμμος
Λόγος αέρα καύσης	0.3	0.3	0.3
Κατάσταση ρευστοποίησης	Αναβράζουσα U/U _{mf} =2.5 U/U _t =0.4	Αναβράζουσα U/U _{mf} =2.7 U/U _t =0.41	Αναβράζουσα U/U _{mf} =2.75 U/U _t =0.42
Παροχή αέρα [Nm ³ /h]	5.7	5.7	5.7
Παραγόμενο αέριο [Nm ³ /h]	8.05	8.054	8.07
LHV [MJ/Nm ³]	4.3	4.39	4.58
CGE [%]	76.61	79.16	82.49
Διάρκεια σταθερής κατάστασης (λεπτά)	80	90	65

Πίνακας 4. 1 Συνθήκες πειράματος της αεριοποίησης μίσχανθου

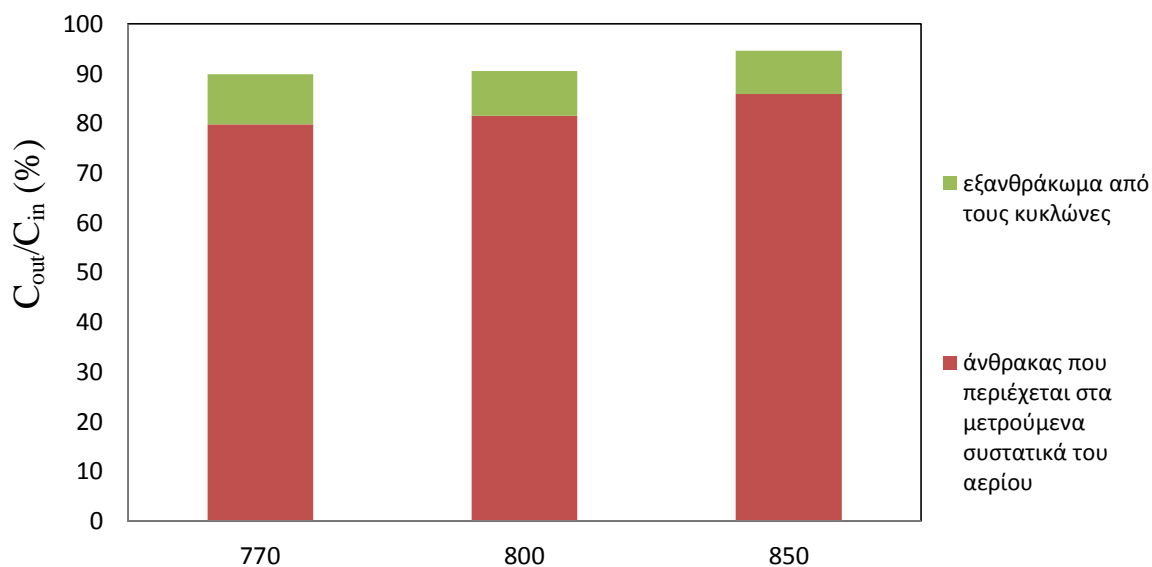
Στο Διάγραμμα 4. 1 συνοψίζονται οι μέσες τιμές των βασικών συστατικών του αερίου σύνθεσης, για τις τρεις καταστάσεις αεριοποίησης. Οι τιμές συγκέντρωσης των βασικών αερίων, με εξαίρεση αυτή του μεθανίου, συνάδουν με τις αναμενόμενες από την βιβλιογραφία (βλ. Σχήμα 1. 9). Το μεθάνιο έχει σχεδόν σταθερή τιμή συγκέντρωσης, η οποία ανεπαίσθητα αλλά σταδιακά αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία, από 4.4% κατ' όγκο ξηρού αερίου²³ στους 770°C σε 4.5% κ. ο. ξ στους 850°C. Η συγκέντρωση του υδρογόνου παρουσιάζει σημαντικότερη αύξηση από αυτή του μεθανίου και κυμαίνεται από 4,3% κ. ο. ξ στους 770°C σε 5,9% κ. ο. ξ στους 850°C. Το μονοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζει αξιοσημείωτη αύξηση ανάλογα με τις θερμοκρασίες αεριοποίησης και κυμαίνεται από 17,9% κ. ο. ξ στους 770°C σε 18,5% κ. ο. ξ στους 850°C.



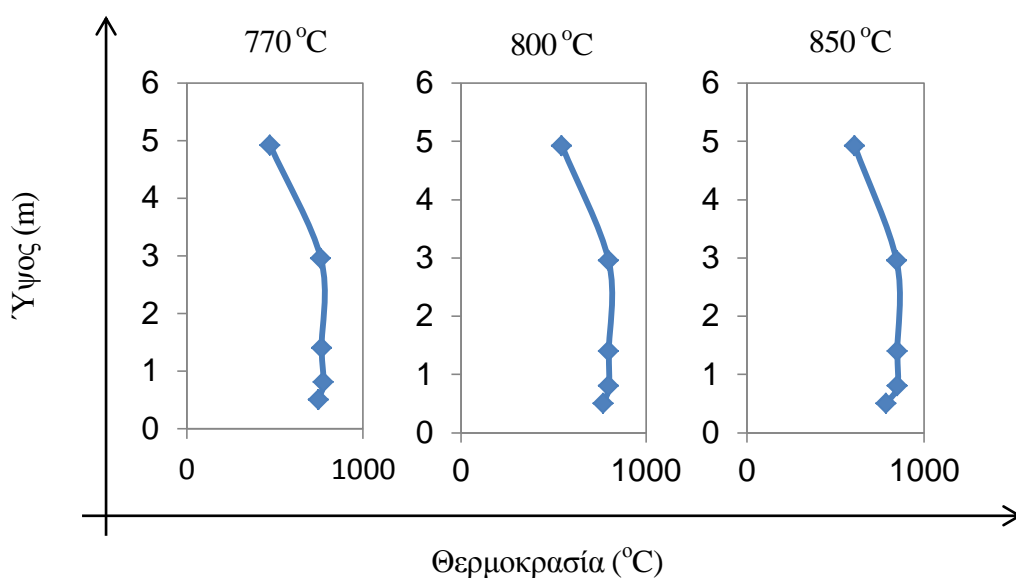
Διάγραμμα 4. 1 Σύσταση παραγόμενου αερίου κατ' όγκο σε ξηρή βάση για την αεριοποίηση με μίσχανθο ανάλογα με τις σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες

Από τα συγκεντρωθέντα δείγματα και την ανάλυση των αερίων προκύπτει το Διάγραμμα 4. 2 που αποτυπώνει την ποσοστιαία μετατροπή του άνθρακα. Στο Διάγραμμα 4. 3 παρουσιάζονται τα θερμοκρασιακά προφίλ που επετεύχθησαν κατά μήκος του ανοδικού σωλήνα.

²³ Εφεξής θα γράφεται κ.ο.ξ

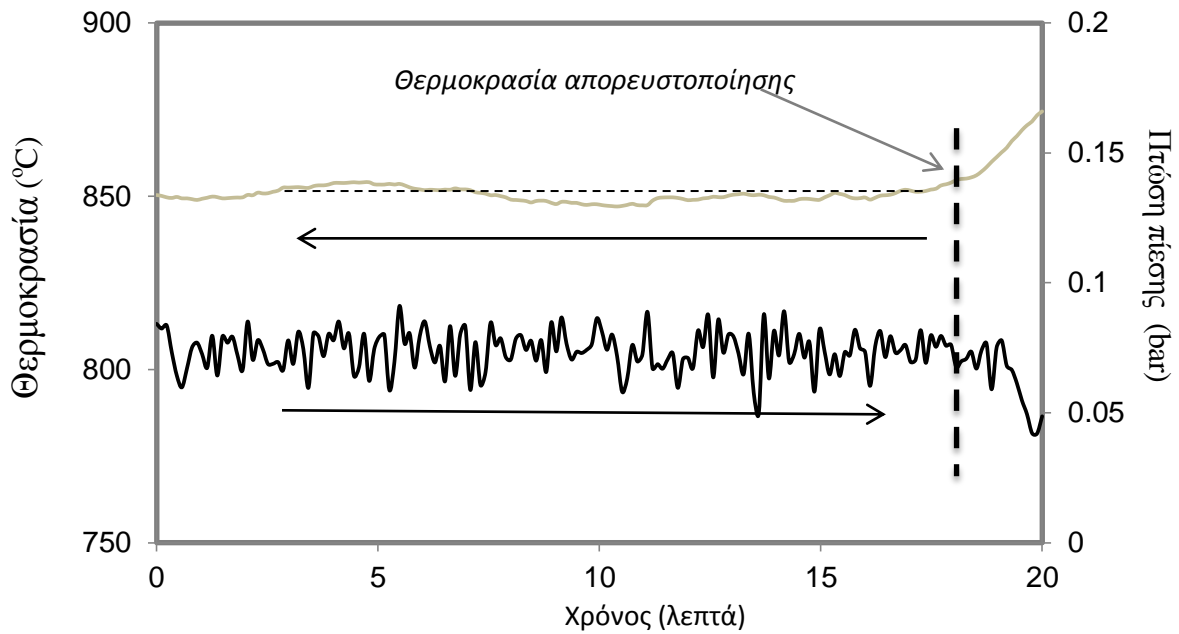


Διάγραμμα 4.2 Ποσοστιαία μετατροπή του άνθρακα



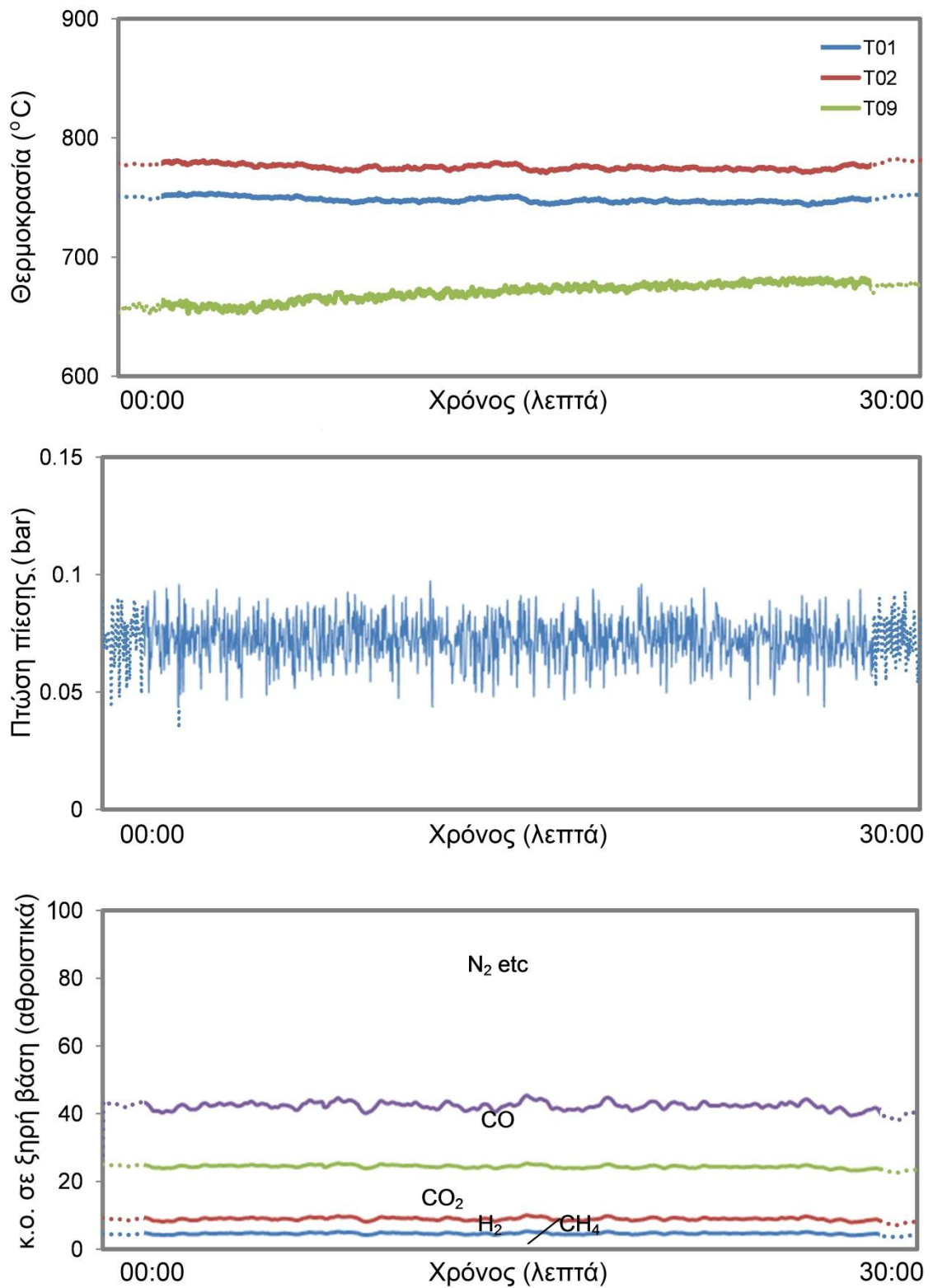
Διάγραμμα 4.3 Θερμοκρασιακά προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα

Στο Διάγραμμα 4.4, απεικονίζεται η κατάσταση απορευστοποίησης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας κυρίως κοντά στο σημείο εισόδου της βιομάζας, καθώς και τη μείωση της πτώσης πίεσης στον ανοδικό σωλήνα. Μετά την απορευστοποίηση, η εγκατάσταση τροφοδοτήθηκε με άζωτο, ψύχθηκε, και το αδρανές υλικό συλλέχθηκε και κοσκινίστηκε ώστε να προσδιοριστεί η νέα κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του. Συλλέχθηκαν επίσης δείγματα των συσσωματωμάτων για ανάλυση.



Διάγραμμα 4. 4 Τα τελευταία είκοσι λεπτά λειτουργίας της εγκατάστασης πριν την απορυστοποίηση.

Στο Διάγραμμα 4. 5 αποτυπώνεται ενδεικτικό μέρος των αποτελεσμάτων όπως καταγράφονταν από το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων της εγκατάστασης. Παρουσιάζονται η θερμοκρασία, η πίεση πίεσης στον ανοδικό σωλήνα και η περιεκτικότητα του παραγόμενου αερίου σε μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και άζωτο με λοιπά αέρια.



Διάγραμμα 4. 5 Θερμοκρασία, πτώση πίεσης και σύσταση του παραγόμενου αερίου για την πρώτη θερμοκρασιακή κατάσταση.

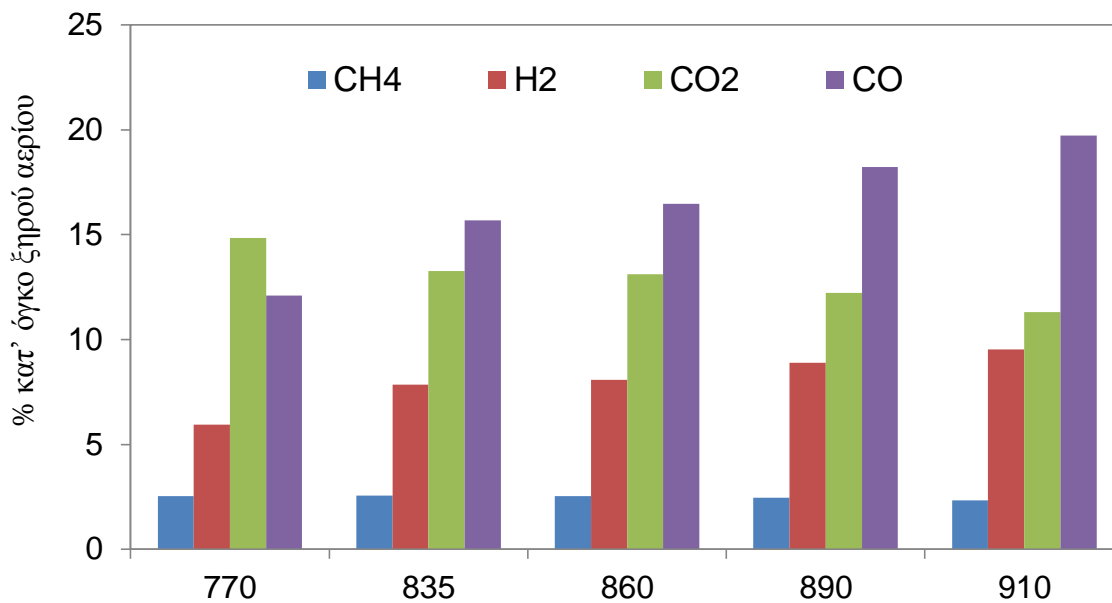
4.2 Δοκιμές αεριοποίησης με γιατρόφα

Η γιατρόφα είναι μία εν δυνάμει ενεργειακή καλλιέργεια, χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα ελαίου στο σπόρο της και στην ανθεκτικότητά της στην ξηρασία. Το μήκος των πελλετών που χρησιμοποιήθηκαν κυμαίνεται από 4 έως 6mm. Η περιεκτικότητα της σε τέφρα είναι 8.74% κ.β. σε ξηρή σύσταση, αρκετά υψηλή μεν, χαμηλότερη όμως από αυτή της αγριαγκινάρας.

Στον Πίνακα 4. 2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες του πειράματος για την αεριοποίηση της γιατρόφας. Όλες οι δοκιμές αεριοποίησης ήταν μέσης διάρκειας σε διαφορετικές θερμοκρασίες και έγιναν με αδρανές υλικό τη χαλαζιακή άμμο, ενώ ο λόγος αέρα καύσης διατηρήθηκε στο 0,3. Η τροφοδοσία του καυσίμου ήταν 3,69 kg/h που συνεπάγεται ότι η εγκατάσταση λειτουργούσε σε συνθήκες αναβράζουσας κλίνης.

<i>Κατάσταση</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Θερμοκρασία [°C]</i>	770(±10)	835(±10)	860(±10)	890(±10)	910(±10)
<i>Παροχή μάζας καυσίμου [kg/h]</i>	3.69	3.69	3.69	3.69	3.69
<i>Μάζα αδρανούς υλικού [kg]</i>	3.6kg Χαλαζιακή άμμος	3.6kg Χαλαζιακή άμμος	3.6kg Χαλαζιακή άμμος	3.6kg Χαλαζιακή άμμος	3.6kg Χαλαζιακή άμμος
<i>Λόγος αέρα καύσης</i>	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Κατάσταση ρευστοποίησης</i>	U/Umf=2.4 U/Ut=0.37	U/Umf=2.5 U/Ut=0.39	U/Umf=2.65 U/Ut=0.4	U/Umf=2.7 U/Ut=0.43	U/Umf=2.8 U/Ut=0.43
<i>Παροχή αέρα [Nm³/h]</i>	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
<i>Παραγόμενο αέριο [Nm³/h]</i>	6.5	7.58	7.6	7.6	7.8
<i>LHV [MJ/Nm³]</i>	3.08	3.74	3.85	4.14	4.36
<i>CGE [%]</i>	52.09	63.35	65.76	70.66	74.29
<i>Διάρκεια σταθερής κατάστασης [λεπτά]</i>	90	65	60	60	40

Πίνακας 4. 2 Συνθήκες πειράματος της αεριοποίησης γιατρόφας

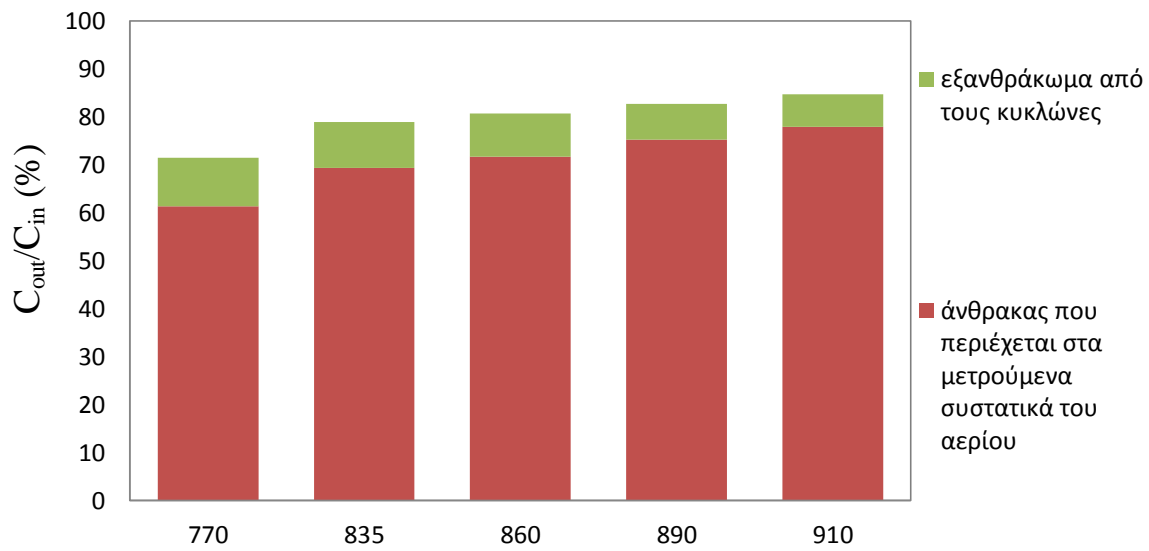


Διάγραμμα 4. 6 Σύσταση παραγόμενου αερίου κατ' όγκο σε ξηρή βάση για την αεριοποίηση με γιατρόφα ανάλογα με τις σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες

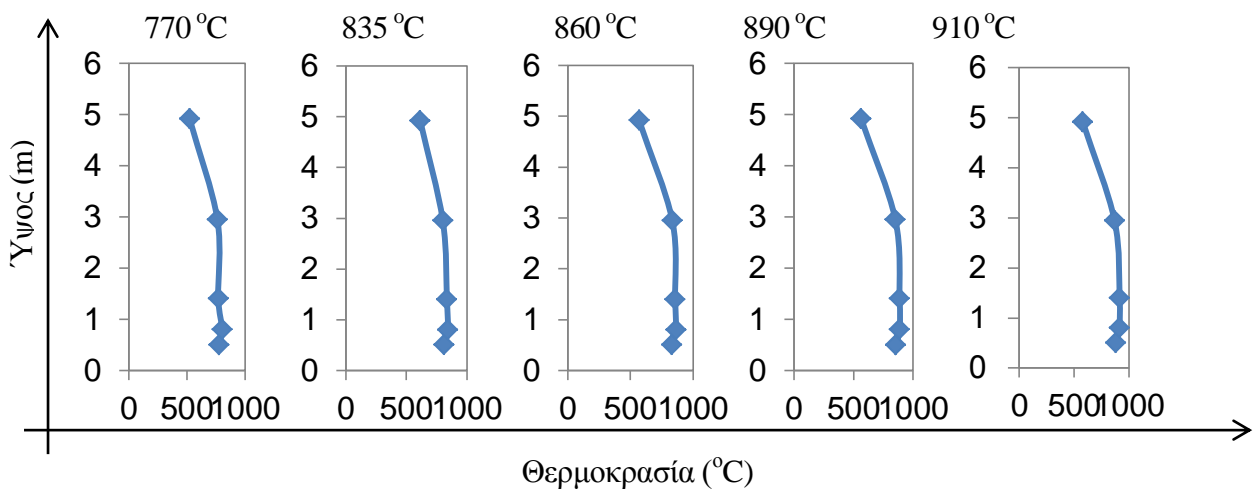
Στο Διάγραμμα 4. 6 συνοψίζονται οι μέσες τιμές των βασικών συστατικών του αερίου σύνθεσης, όπως καταγράφηκαν για τις πέντε σταθερές καταστάσεις που επιτεύχθηκαν. Το μεθάνιο παρέμεινε σε σχεδόν σταθερές τιμές, ελαφρώς μειούμενες κατά την άνοδο της θερμοκρασίας και κυμαινόμενες από 2,5% κ.ο.ξ αερίου στους 770°C μέχρι 2,3% κ.ο.ξ στους 910°C. Η συγκέντρωση του υδρογόνου παρουσιάζει αύξηση από 5,9% κ.ο.ξ στους 770°C μέχρι 9,5% κ.ο.ξ στους 910°C. Η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζει ανοδική τάση ανάλογη με τη θερμοκρασία αεριοποίησης και κυμαίνεται από 12,1% κ.ο.ξ στους 770°C μέχρι 19,1% κ.ο.ξ στους 910°C. Η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα μειώνεται σημαντικά με την άνοδο της θερμοκρασίας, γιατί η αντίδραση Boudouard (εξίσωση 4) είναι ενδοθερμική, και άρα στις υψηλές θερμοκρασίες ευνοούνται τα προϊόντα αυτής (2CO).

Το Διάγραμμα 4. 7 δείχνει το ποσοστό του εξανθρακώματος που δεν αντέδρασε, σε σχέση με το ποσοστό του άνθρακα που μετατράπηκε σε CO, CO₂ και CH₄. Όπως φαίνεται το ποσοστό του άνθρακα που αντιδρά αυξάνεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Στο Διάγραμμα 4. 8 φαίνονται οι θερμοκρασίες για τις πέντε συνθήκες αεριοποίησης που εξετάστηκαν, οι οποίες έχουν πανομοιότυπη μορφή.

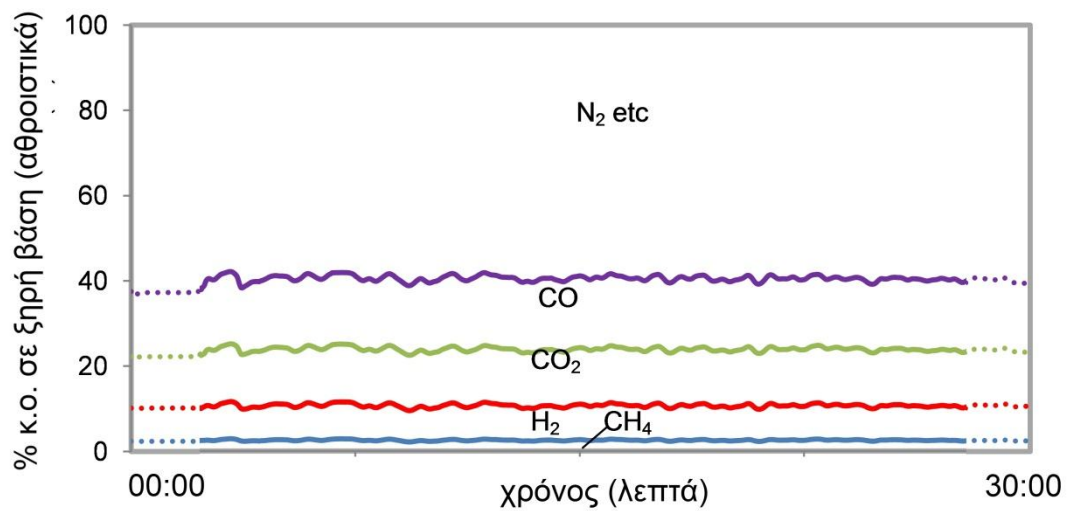
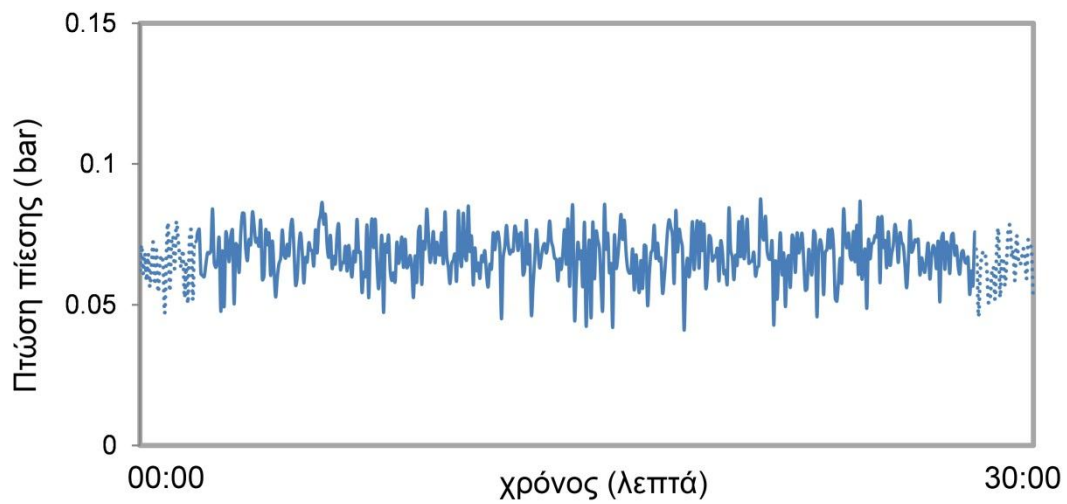
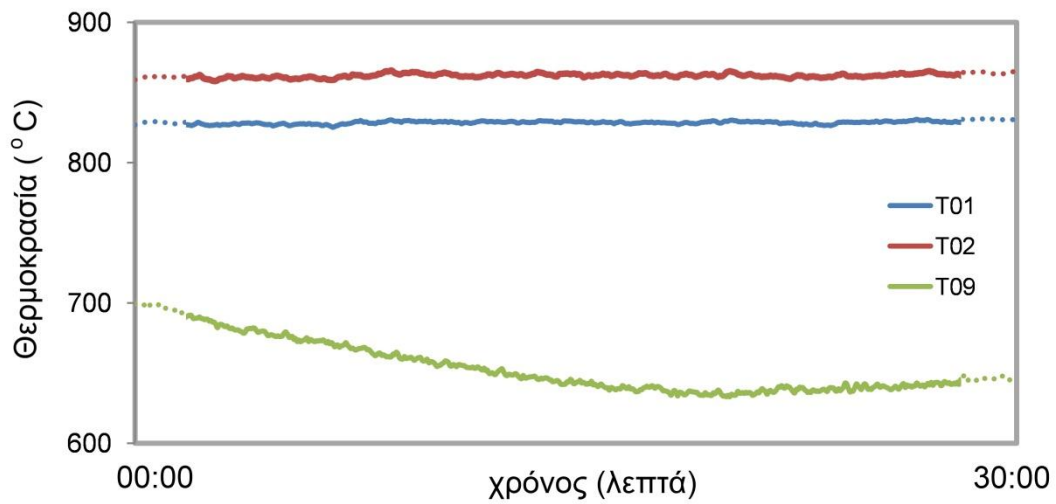
Στο Διάγραμμα 4. 9 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της αεριοποίησης, και δείχνουν τη διαφορά πίεσης ΔP, τη σύσταση του αερίου και τη θερμοκρασία εντός της κλίνης συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 4. 7 Ποσοστιαία μετατροπή του άνθρακα



Διάγραμμα 4. 8 Θερμοκρασιακά προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα



Διάγραμμα 4. 9 Θερμοκρασία, πτώση πίεσης και σύσταση του παραγόμενου αερίου για την τρίτη θερμοκρασιακή κατάσταση.

4.3 Δοκιμές αεριοποίησης με αγριαγκινάρα

Η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα της αγριαγκινάρας έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με άλλες βοτανοειδείς βιομάζες, όπως το άχυρο, κερδίζει όμως έδαφος ως εναλλακτικό “υλικό” ενεργειακής καλλιέργειας στις περιοχές της Μεσογείου. Όσον αφορά τη χρήση της αγριαγκινάρας ως στερεό καύσιμο, προτιμάται η καύση της με άνθρακα, αν και η υψηλή περιεκτικότητα σε χλώριο και ιχνοστοιχεία μετάλλων αξιολογείται ως ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του υλικού.

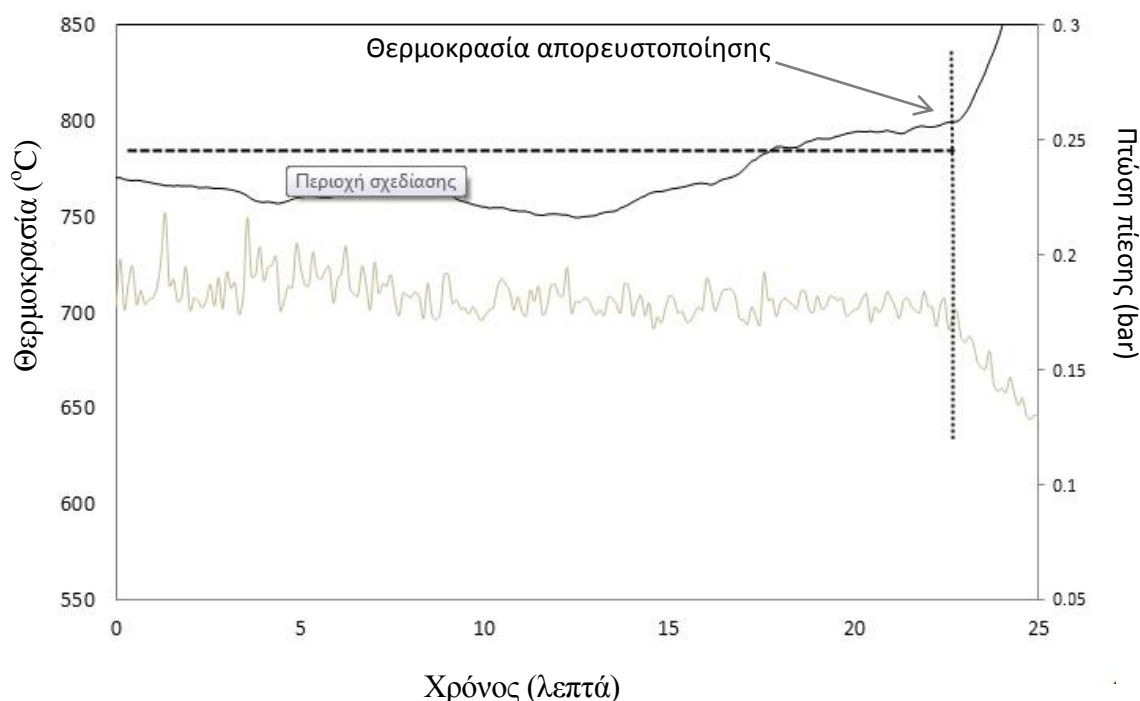
Η αγριαγκινάρα που χρησιμοποιήθηκε, καλλιεργείται και πελλετοποιείται στην Ελλάδα. Εξαιτίας της υψηλής της περιεκτικότητας σε τέφρα, παρουσιάστηκε έντονα το φαινόμενο της απορευστοποίησης της κλίνης, λόγω της δημιουργίας συσσωματωμάτων τηγμένης τέφρας με σωματίδια αδρανούς υλικού. Έτσι το συγκεκριμένο καύσιμο χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλο για τη διαδικασία αεριοποίησης.

Η πειραματική διαδικασία για την αγριαγκινάρα περιλαμβάνει δύο σερτ πειραμάτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. 3.

Κατάσταση	1	2
Θερμοκρασία [$^{\circ}\text{C}$]	750(\pm 10)	780 (\pm 10)
Παροχή μάζας καυσίμου [kg/h]	11	11
Μάζα αδρανούς υλικού [kg]	7,5kg ολιβίνης	7,5kg ολιβίνης
Λόγος αέρα καύσης	0.3	0.3
Κατάσταση ρευστοποίησης	Slugging U/Umf=9,6 U/Ut=1,8	Slugging U/Umf=9,65 U/Ut=1,84
Παροχή αέρα [Nm ³ /h]	13,2	13,2
Παραγόμενο αέριο [Nm ³ /h]	18,2	18,7
LHV [MJ/Nm ³]	4.81	4,61
CGE [%]	77,29	61,44
Διάρκεια σταθερής κατάστασης [λεπτά]	60	50

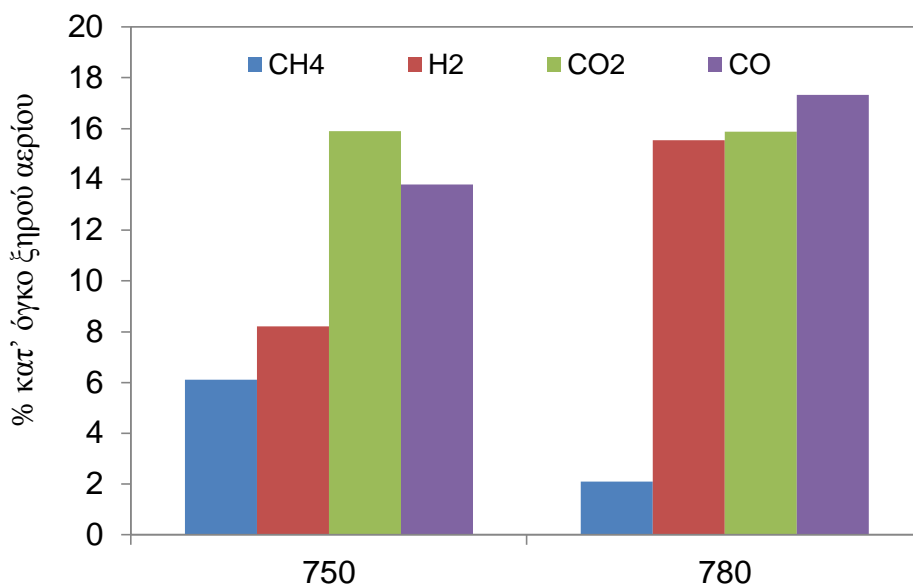
Πίνακας 4. 3 Συνθήκες πειράματος της αεριοποίησης αγριαγκινάρας

Το πρώτο πείραμα καταγράφεται στη δεύτερη στήλη και γίνεται στους 780°C. Στο Διάγραμμα 4. 10, παρουσιάζονται τα τελευταία 25 λεπτά του πειράματος, πριν την απορυστοποίηση της κλίνης. Το δεύτερο πείραμα καταγράφεται στη στήλη 1 και γίνεται στους 750°C. Η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά χαμηλή για τη διαδικασία της αεριοποίησης και κανένα άλλο καύσιμο δεν δοκιμάστηκε σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. Παρ' όλα αυτά, δημιουργήθηκαν συσσωματώματα και το πείραμα διακόπηκε λόγω απορυστοποίησης της κλίνης.



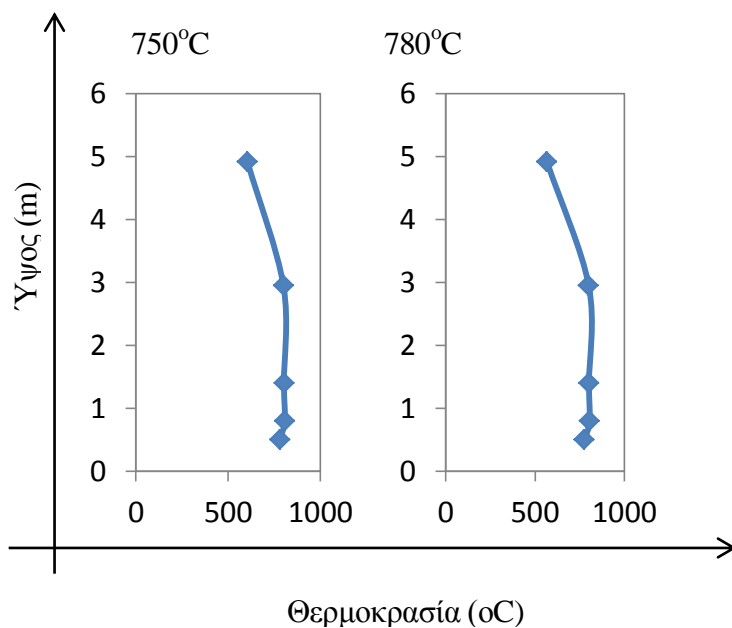
Διάγραμμα 4. 10 Λειτουργία της εγκατάστασης πριν την απορυστοποίηση.

. Στο Διάγραμμα 4. 11 παρουσιάζεται η σύσταση του παραγόμενου αερίου από την αεριοποίηση της αγριαγκινάρας και για τις δύο πειραματικές διαδικασίες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται το μονοξείδιο του άνθρακα ενώ μειώνεται το διοξείδιο. Πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της δεύτερης πειραματικής κατάστασης παρουσιάστηκε μεγάλη αύξηση του υδρογόνου: η περιεκτικότητα ήταν 15,5% κ.ο.ξ, και αυτή είναι η μεγαλύτερη τιμή που έχει σημειωθεί για όλα τα καύσιμα που έχουν εξεταστεί. Η χαμηλή θερμογόνος ικανότητα και η CGE% του αερίου σύνθεσης που παράγεται από την αγριαγκινάρα, σύμφωνα με τη μέση σύσταση του αερίου φαίνεται στον Πίνακα 4. 3. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο και η ταυτόχρονη υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές θερμογόνου ικανότητας και άρα σε χαμηλότερη CGE% στο δεύτερο πείραμα.



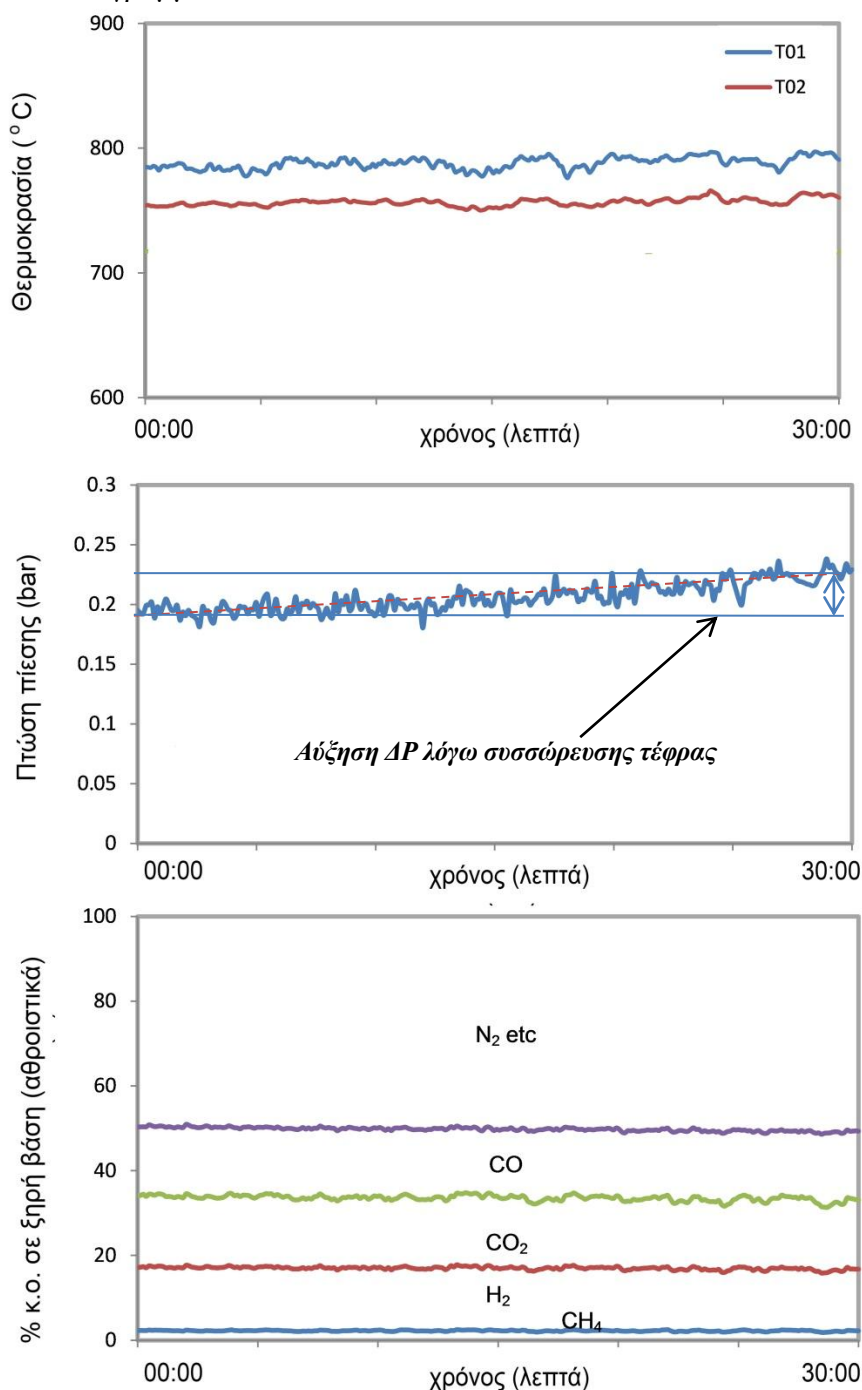
Διάγραμμα 4. 11 Σύσταση παραγόμενου αερίου κατ' όγκο σε ξηρή βάση για την αεριοποίηση με αγριαγκινάρα ανάλογα με τις σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες

Στο Διάγραμμα 4. 12 φαίνονται οι διαφορετικές θερμοκρασίες στον αεριοποιητή για τις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται. Όλο το σύστημα προθερμαίνεται και το ομαλό προφίλ των θερμοκρασιών επιτυγχάνεται πριν την διοχέτευση του καυσίμου. Η δημιουργία συσσωματωμάτων και η απορευστοποίηση της κλίνης χαλάνε την αρχική ομοιομορφία των θερμοκρασιών.



Διάγραμμα 4. 12 Θερμοκρασιακά προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα

Η θερμοκρασία, η πίεση και η σύσταση του αερίου για το δεύτερο πείραμα φαίνονται στο Διάγραμμα 4. 13.



Διάγραμμα 4. 13 Θερμοκρασία, πτώση πίεσης και σύσταση του παραγόμενου αερίου για την δεύτερη θερμοκρασιακή κατάσταση.

Η αύξηση της πτώσης πίεσης είναι αναμενόμενη λόγω της έντονης συσσώρευσης τέφρας. Η παρατηρούμενη τιμή συνάδει με την αναμενόμενη αφού $11 \frac{kg}{h} * \frac{15.38}{100} * 0.5h = 0.8456 kg$ τέφρας ανά μισή ώρα. Η ποσότητα αυτή οδηγεί σε αύξηση της πτώσης πίεσης κατά 17,37mbar όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 1. 1.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται το δείγμα υλικού που συλλέχθηκε μετά το πείραμα αεριοποίησης με αγριαγκινάρα.



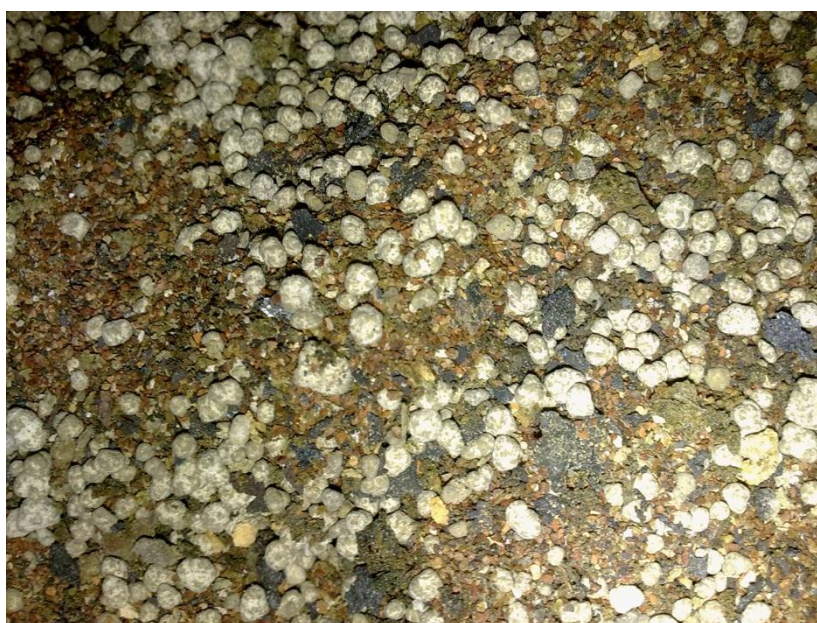
Εικόνα 4. 1 Συσσωμάτωμα τέφρας, αδρανούς υλικού και κουσίμου



Εικόνα 4. 2 Δείγμα υλικού από τον ανοδικό σωλήνα μετά την απορρευστοποίηση

Στην Εικόνα 4. 1 παρουσιάζεται το μεγαλύτερο σε μέγεθος συσσωμάτωμα που συλλέχθηκε. Το πιθανότερο ενδεχόμενο είναι ότι η δημιουργία του οφείλεται σε συνένωση πολλών συσσωματωμάτων κατά την διακοπή του πειράματος. Στην Εικόνα 4. 2 το δείγμα του υλικού που συλλέχθηκε κατηγοριοποιείται ώστε να σταλθεί για περαιτέρω ανάλυση στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Έρευνας Στερεών Καυσίμων.

Στην Εικόνα 4. 3 φαίνεται το δείγμα του υλικού σε μεγέθυνση. Ξεχωρίζουν οι λευκές σφαίρες (συσσωματώματα) διαμέτρου 1 – 4 mm και το αδρανές υλικό (καφέ χρώμα) που παρέμεινε ανέπαφο.



Εικόνα 4. 3 Συσσωματώματα τέφρας, αδρανούς υλικού και καυσίμου πλούσια σε ασβέστιο.

4.4 Δοκιμές αεριοποίησης με ηλίανθο

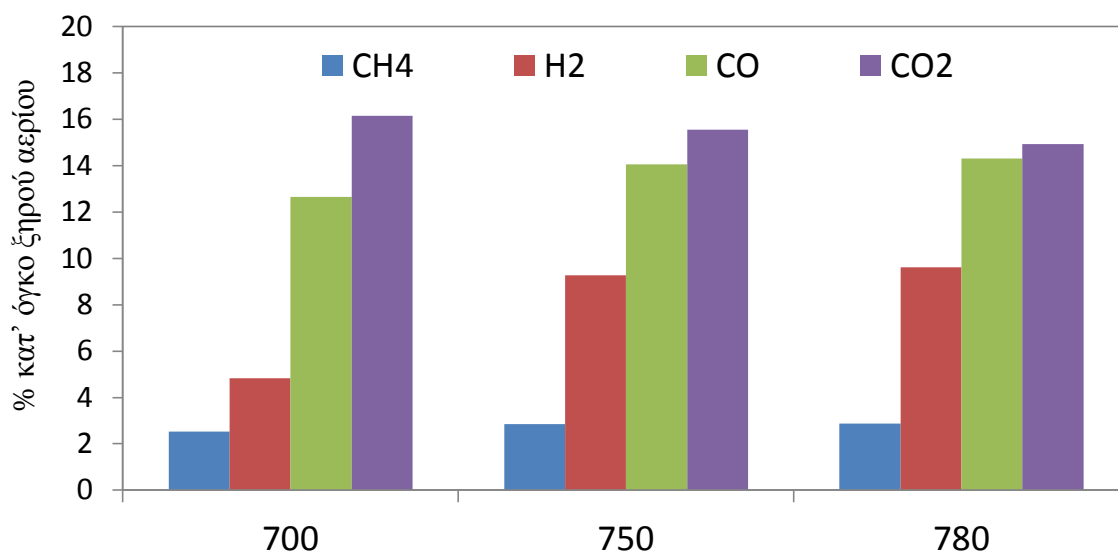
Ο ηλίανθος που χρησιμοποιήθηκε, καλλιεργήθηκε και πελλετοποιήθηκε στη χώρα μας από Έλληνα παραγωγό βιοκαυσίμων. Αποτελείται από υπολείμματα σπόρων ηλίανθου που χρησιμοποιήθηκαν για παραγωγή βιοντίζελ και το μήκος των πελλετών κυμαίνεται από 4 έως 6mm. Η περιεκτικότητά του σε τέφρα είναι αρκετά μεγάλη και φθάνει το 8,97% κ.ο. σε ξηρή βάση.

Στον Πίνακα 4. 4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες του πειράματος αεριοποίησης που περιλαμβάνουν σύντομης χρονικής διάρκειας διαδικασίες σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η συνθήκη 3 περιγράφεται διεξοδικά. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ολιβίνης ως αδρανές υλικό, ενώ ο λόγος αέρα καύσης διατηρήθηκε στο $\lambda = 0,3$. Η τροφοδοσία με πελλέτες ηλίανθου ήταν 11,4 kg/h.

<i>Κατάσταση</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Θερμοκρασία [°C]</i>	700(±10)	750(±10)	780(±10)
<i>Παροχή μάζας κανσίμου [kg/h]</i>	11.4	11.4	11.4
<i>Μάζα αδρανούς υλικού [kg]</i>	7.5kg ολιβίνης	7.5kg ολιβίνης	7.5kg ολιβίνης
<i>Λόγος αέρα καύσης</i>	0.3	0.3	0.3
<i>Κατάσταση ρευστοποίησης</i>	U/Umf=7.8 U/Ut=1.6	U/Umf=8.35 U/Ut=1.71	U/Umf=8.69 U/Ut=1.78
<i>Παροχή αέρα [Nm³/h]</i>	10.8	10.8	10.8
<i>Παραγόμενο αέριο [Nm³/h]</i>	14.8	14.81	14.86
<i>LHV [MJ/Nm³]</i>	3.79	5.36	5.41
<i>CGE [%]</i>	60.3	64.76	69.26
<i>Διάρκεια σταθερής κατάστασης (λεπτά)</i>	60	40	40

Πίνακας 4. 4 Συνθήκες πειράματος της αεριοποίησης ηλίανθου

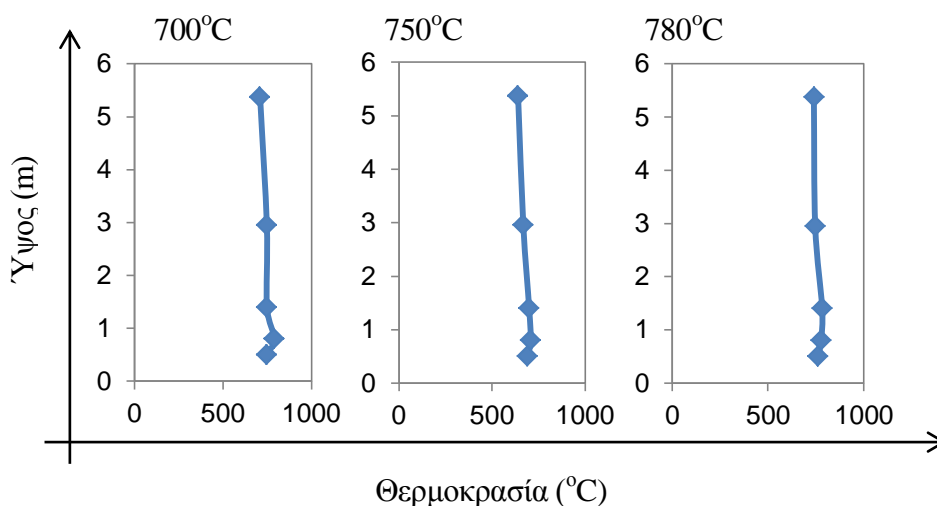
Στο Διάγραμμα 4. 14 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές CO, CO₂, H₂ και CH₄ για τις τρεις περιπτώσεις αεριοποίησης με τη χρήση ηλίανθου. Το μεθάνιο έχει σχεδόν σταθερή τιμή συγκέντρωσης, η οποία σταδιακά μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, από 3.4% κ.ο.ξ στους 700°C σε 2.86% κ.ο.ξ στους 780°C. Η περιεκτικότητα σε υδρογόνο παρουσιάζει αξιοσημείωτη αύξηση και κυμαίνεται από 4,7% κ.ο.ξ στους 700°C σε 9,6% κ.ο.ξ στους 780°C. Το μονοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζει αυξανόμενες τιμές ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης και κυμαίνεται από 12,64% κ.ο.ξ στους 700°C σε 14,3% κ.ο.ξ στους 780°C. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται απότομα με την αύξηση της θερμοκρασίας, από 16,15% κ.ο.ξ στους 700°C σε 14,3% κ.ο.ξ στους 780°C.



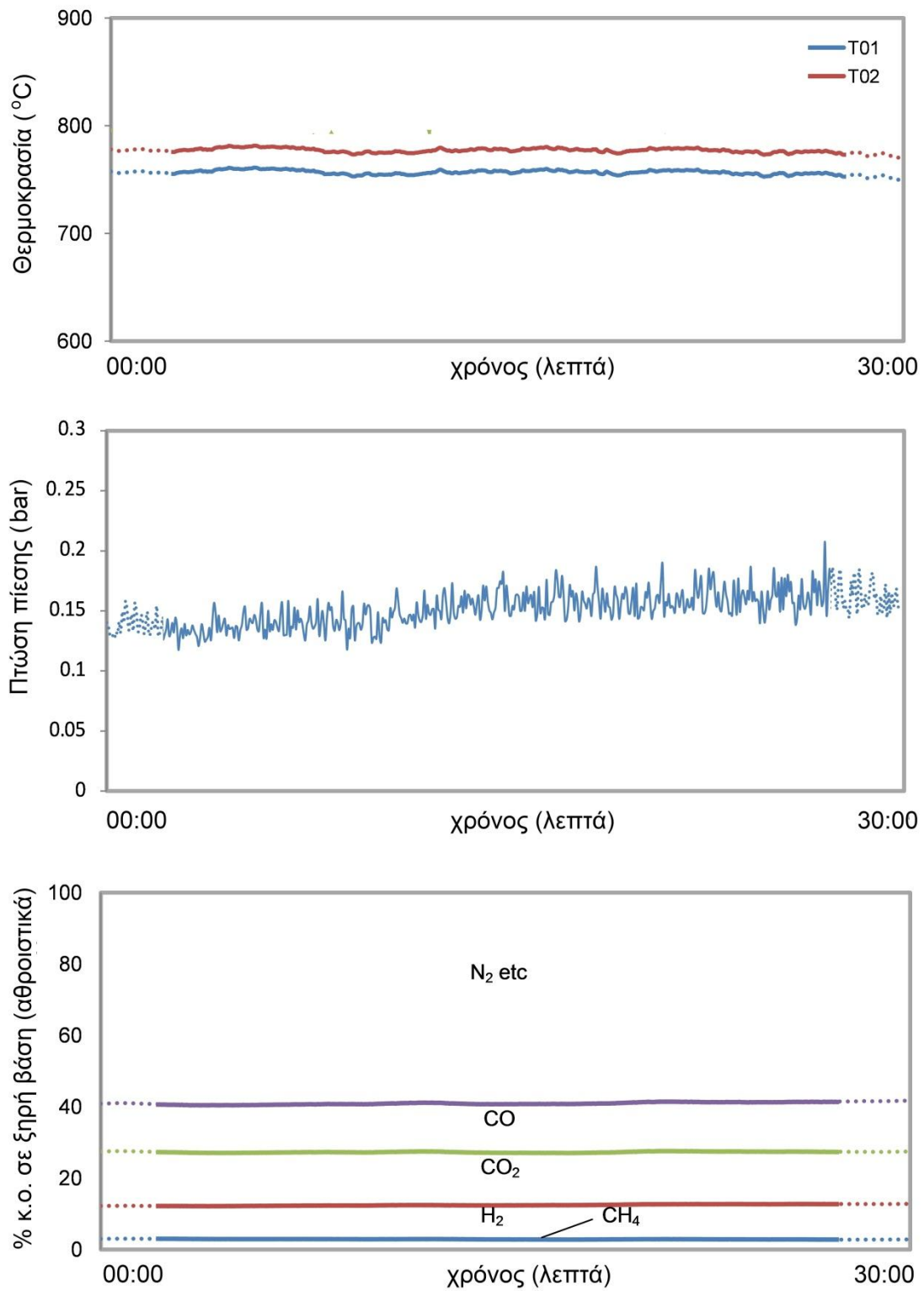
Διάγραμμα 4. 14 Σύσταση παραγόμενου αερίου κατ' όγκο σε ξηρή βάση για την αεριοποίηση με ηλιάνθο ανάλογα με τις σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες

Στο Διάγραμμα 4. 15 παρουσιάζονται οι τιμές θερμοκρασίας που εμφανίστηκαν στον αεριοποιητή, για τις τρεις συνθήκες αεριοποίησης που ερευνήθηκαν, οι οποίες παρουσίασαν ομοιομορφία στον ανοδικό σωλήνα.

Στο Διάγραμμα 4. 16 παρουσιάζονται τα στοιχεία για το τρίτο πείραμα αεριοποίησης του ηλιάνθου (θερμοκρασίες στον ανοδικό σωλήνα, περιεκτικότητες σε CO, CO₂, H₂ και CH₄) και η πτώση πίεσης κατά μήκος της ρευστοποιημένης κλίνης. Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε σε κατάσταση ανακυκλοφορίας, άρα εξασφαλίζεται υψηλός βαθμός απόδοσης στη μετατροπή του άνθρακα και επαρκής χρόνος παραμονής εντός της κλίνης ώστε τα στερεά υλικά να ολοκληρώσουν τις αντιδράσεις.



Διάγραμμα 4. 15 Θερμοκρασιακά προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα



Διάγραμμα 4. 16 Θερμοκρασία, πτώση πίεσης και σύσταση του παραγόμενου αερίου για την τρίτη θερμοκρασιακή κατάσταση

4.5 Δοκιμές αεριοποίησης με ιτιά

Η ιτιά είναι μια κοινή ξυλώδης βιομάζα, που κρίνεται εξαιρετική για ενεργειακή καλλιέργεια, λόγω της απουσίας θείου και της σχετικά χαμηλής περιεκτικότητας της σε τέφρα. Οι πελλέτες του συγκεκριμένου καυσίμου προήλθαν από την Πολωνία, σε συνεργασία με το *University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, μέσω του προγράμματος Eurobioref.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στις πελλέτες της ιτιάς δείχνουν μια σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία σε σύγκριση με άλλα καύσιμα – τη δεύτερη υψηλότερη μετά την αγριαγκινάρα. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε τέφρα, με την ιτιά δεν παρουσιάζεται συσσωμάτωση άρα ούτε φαινόμενα απορευστοποίησης, ακόμα και όταν επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες αεριοποίησης. *Αυτό καθιστά την ιτιά ένα εξαιρετικά πολύτιμο καύσιμο, κατάλληλο για τις διαδικασίες αεριοποίησης.*

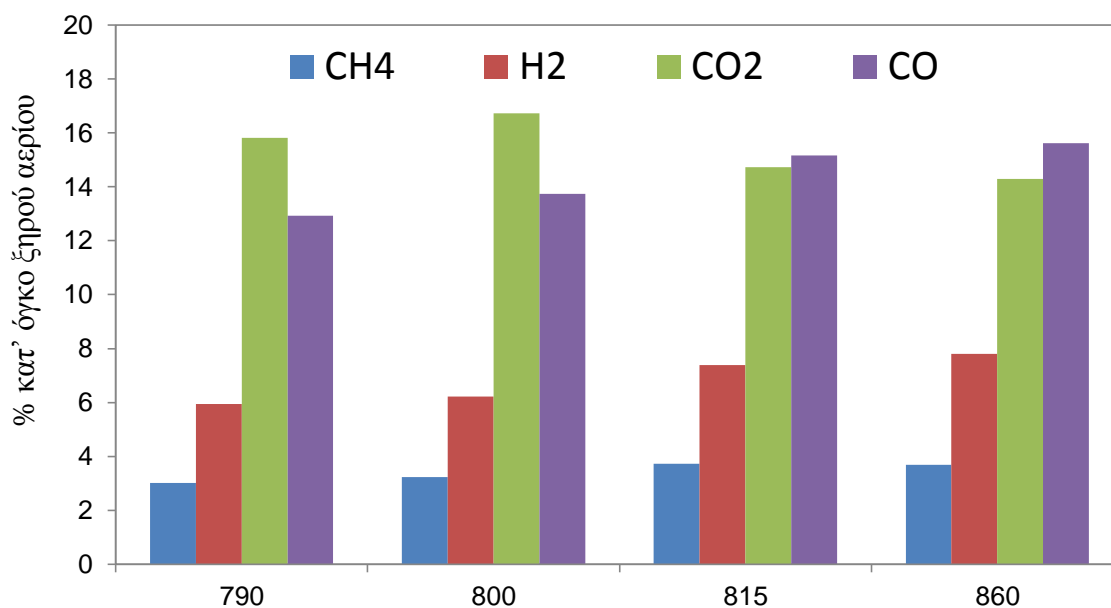
Επιπλέον, οι πελλέτες της ιτιάς και του μίσχανθου παρουσιάζουν τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο. Χάρη σε αυτές τις ιδιότητες, η ιτιά έχει επιλεχθεί για τα πειράματα αεριοποίησης μεγάλης διάρκειας, και έτσι έχουν έρθει σε πέρας πειράματα με χρονική διάρκεια πάνω από 70 ώρες χωρίς να σημειωθούν προβλήματα. Σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα δεν υπήρξε καμία ασυνέχεια, εκτός βέβαια από μικρές παύσεις για τον καθαρισμό των φίλτρων ή την αλλαγή των δοχείων δειγματοληψίας. Οι πειραματικές διαδικασίες για την αεριοποίηση της ιτιάς δίνονται στον Πίνακα 4. 5.

Στο Διάγραμμα 4. 17 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των CO, CO₂, H₂ και CH₄ για τις τέσσερις καταστάσεις αεριοποίησης της ιτιάς. Το μεθάνιο παρέμεινε σε σχεδόν σταθερές τιμές, ελαφρώς μειούμενες κατά την άνοδο της θερμοκρασίας και κυμαινόμενες από 3,4% κ.ο.ξ στους 790°C μέχρι 2,86% κ.ο.ξ στους 860°C. Το υδρογόνο είχε επίσης πολύ σταθερές τιμές: 6,2% κ.ο.ξ και στους 790°C και στους 860°C. Η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζει ελαφρώς ανοδική τάση ανάλογα με τη θερμοκρασία αεριοποίησης και κυμαίνεται από 14,9% κ.ο.ξ στους 790°C μέχρι 15,3% κ.ο.ξ στους 860°C. Η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα μειώνεται ελάχιστα με την άνοδο της θερμοκρασίας από 16,9% κ.ο.ξ στους 700°C μέχρι 16,3% κ.ο.ξ στους 780°C.

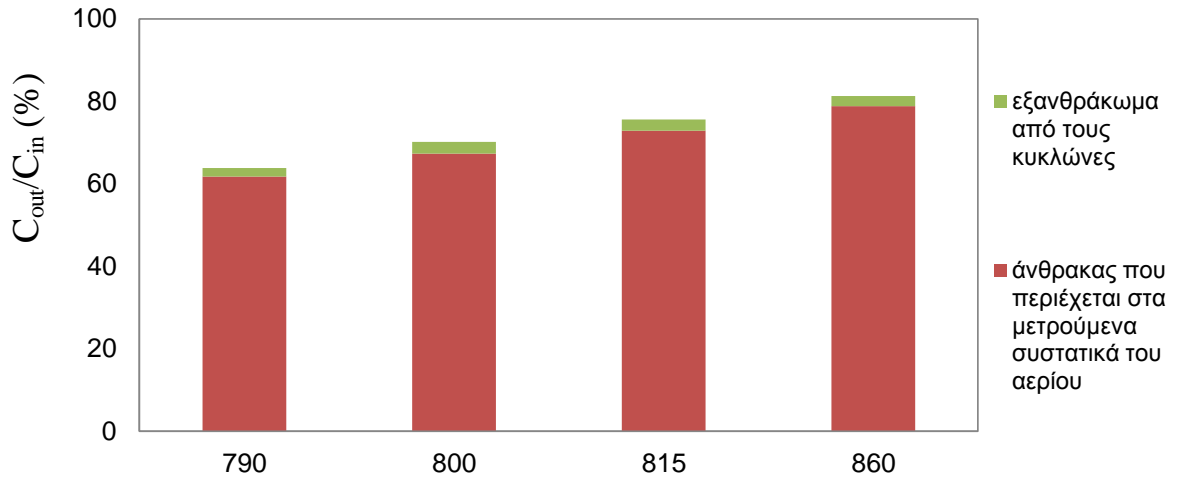
Το Διάγραμμα 4. 18 δείχνει το ποσοστό του εξανθρακώματος που δεν αντέδρασε, σε σχέση με το ποσοστό εκείνο που αντέδρασε και μετατράπηκε σε CO, CO₂ και CH₄. Είναι πολύ πιθανό, στις τρεις πρώτες πειραματικές διαδικασίες να υπερεκτιμήθηκε η πραγματική τιμή τροφοδοσίας του καυσίμου, γιατί στα αποτελέσματα μετρήθηκε πολύ μικρό CGE% και υψηλά ποσοστά CO₂ στο παραγόμενο αέριο, το οποίο δε μπορεί να εξηγηθεί διαφορετικά. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, στο τέταρτο πείραμα έχουμε καλύτερα ποσοστά άνθρακα ο οποίος αντιδρά, και αυτό επειδή η διαδικασία αεριοποίησης έγινε σε συνθήκες γρήγορης ρευστοποίησης. Υπάρχει έτσι η δυνατότητα για το εξανθράκωμα που δεν αντέδρασε να ανατροφοδοτείται στον αεριοποιητή.

Κατάσταση	1	2	3	4
Θερμοκρασία [$^{\circ}$ C]	790(\pm 10)	800(\pm 10)	815(\pm 10)	860(\pm 10)
Παροχή μάζας καυσίμου [kg/h]	4.69	4.69	4.69	12
Μάζα αδρανούς υλικού [kg]	4kg Χαλαζιακή άμμος	4kg Χαλαζιακή άμμος	4kg Χαλαζιακή άμμος	4kg Χαλαζιακή άμμος
Λόγος αέρα καύσης	0.3	0.3	0.3	0.3
Κατάσταση ρευστοποίησης	U/Umf=2.53 U/Ut=0.38	U/Umf=3.18 U/Ut=0.49	U/Umf=3.22 U/Ut=0.495	U/Umf=8.4 U/Ut=1.3
Παροχή αέρα [Nm^3/h]	6	6	6	16.8
Παραγόμενο αέριο [Nm^3/h]	8.5	8.65	8.72	21.77
LHV [MJ/Nm^3]	3.36	3.57	4.05	3.96
CGE [%]	50.2	84.4	55.33	66.73
Διάρκεια σταθερής κατάστασης (ώρες)	5	4	2	2

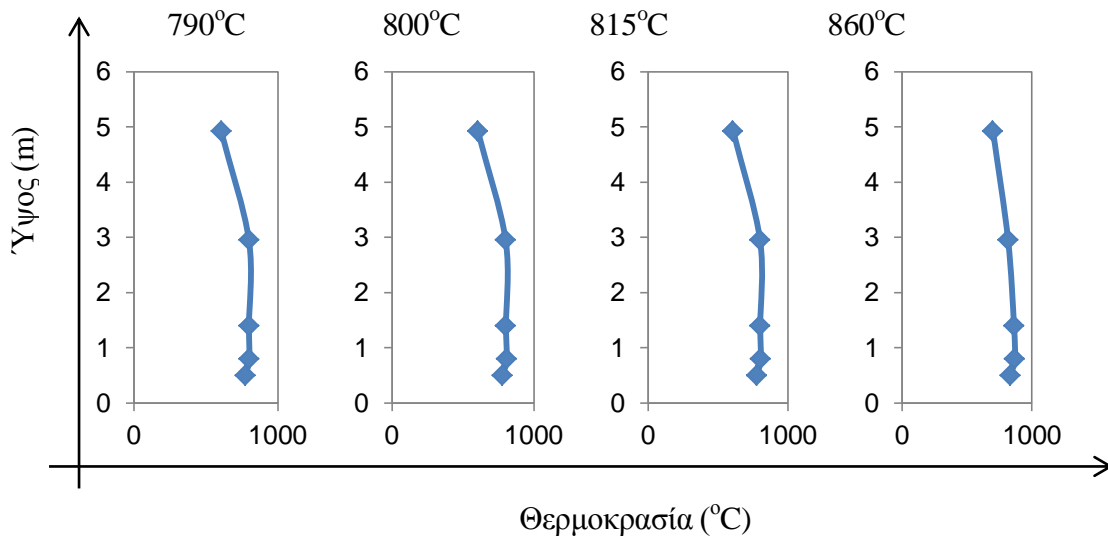
Πίνακας 4. 5 Συνθήκες πειράματος της αεριοποίησης ιτιάς



Διάγραμμα 4. 17 Σύσταση παραγόμενου αερίου κατ' όγκο σε ξηρή βάση για την αεριοποίηση με ιτιά ανάλογα με τις σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες

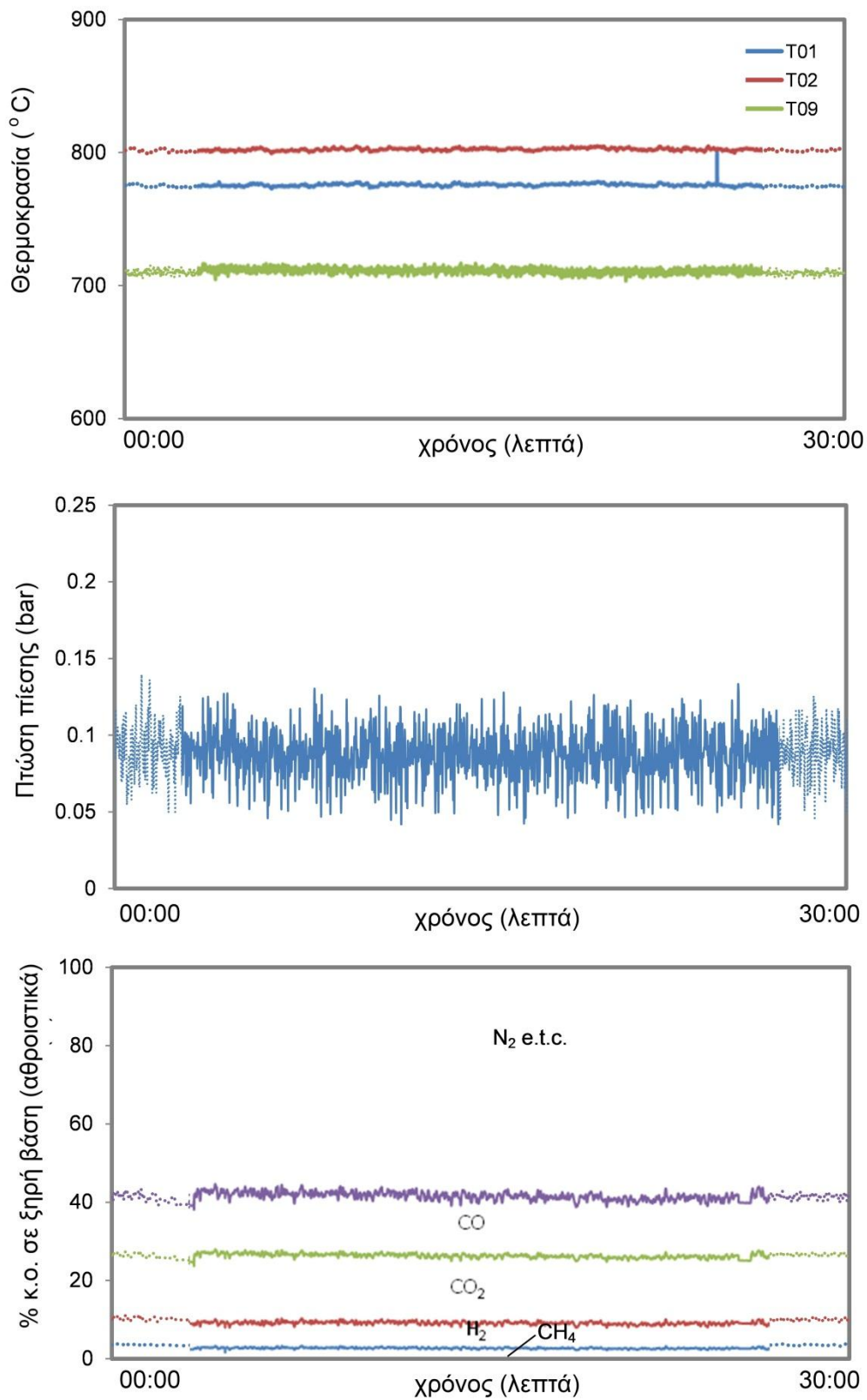


Διάγραμμα 4. 18 Ποσοστιαία μετατροπή του άνθρακα



Διάγραμμα 4. 19 Θερμοκρασιακά προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα

Στο Διάγραμμα 4. 19 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που επιτεύχθηκαν εντός του αεριοποιητή για τις τέσσερις σταθερές καταστάσεις. Παρατηρείται ότι με την αύξηση των παροχών καυσίμου και αέρα κατά την τέταρτη κατάσταση (860°C), η κλίση της θερμοκρασίας καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα ομαλοποιείται, λόγω της εντονότερης μεταφοράς θερμότητας.



Διάγραμμα 4. 20 Θερμοκρασία, πτώση πίεσης και σύσταση του παραγόμενου αερίου για την δεύτερη θερμοκρασιακή κατάσταση

4.6 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Καύσιμο	Τάση συσσωμάτωσης	Σχόλια
Μίσχανθος	●●●	Παρατηρήθηκε απορευστοποίηση της κλίνης στους 890°C
Γιατρόφα		Το παραγόμενο αέριο εμφάνισε υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Συνιστάται για αεριοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη
Αγριαγκινάρα	●●●●●	Έντονη απορευστοποίηση της κλίνης. Δεν κατέστη δυνατή η πραγματοποίηση πειραμάτων μεγάλης διάρκειας. Το καύσιμο είναι ακατάλληλο
Ιτιά		Εξαιρετικό καύσιμο για αεριοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη. Χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε πειραματικά η επίδραση της θερμοκρασίας στη σύσταση του παραγόμενου αερίου από αεριοποίηση βιομάζας. Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν συνάδουν με τα αναμενόμενα από τις υπολογιστικές μεθόδους και τα ήδη υπάρχοντα στη βιβλιογραφία.

Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης, παρατηρείται ανάλογη αύξηση στην περιεκτικότητα του αερίου σύνθεσης, σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Παράλληλα, αυξάνεται το ποσοστό άνθρακα που μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο, καθώς και η θερμογόνος δύναμη του αερίου ως συνέπεια των προηγούμενων. Το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται σημαντικά καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας ευνοούνται οι ενδόθερμες αντιδράσεις της αεριοποίησης (π.χ. αντίδραση Boudouard). Η περιεκτικότητα του παραγόμενου αερίου σε μεθάνιο παρουσιάζει τις αναμενόμενες πτωτικές τάσεις. Βέβαια, για το συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών που μελετήθηκε (750 – 900°C) η συγκέντρωση του μεθανίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή.

Τέλος, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τα είδη βιομάζας που χρησιμοποιήθηκαν. Η ιτιά, παρά τη μικρή θερμογόνο ικανότητα του παραγόμενου αερίου, μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξαιρετικό καύσιμο για χρήση σε αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης καθώς, χάρη στη μικρή περιεκτικότητα της σε τέφρα, δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της απορευστοποίησης. Ομοίως, η γιατρόφα δεν εμφάνισε φαινόμενα συσσωμάτωσης παρότι κατά την αεριοποίηση της επιτεύχθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες. Αντίθετα, η αγριαγκινάρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως καύσιμο ακατάλληλο για πρώτη ύλη σε αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης, καθώς η

υψηλή περιεκτικότητα της σε τέφρα με χαμηλό σημείο τήξης απορευστοποιεί την κλίνη σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Ο καθοδικός σωλήνας και η βαλβίδα σχήματος L είναι σχεδιασμένα με κριτήριο να επιτυγχάνεται συνεχής ανακυκλοφορία των σωματιδίων του αδρανούς υλικού κατά τη ρευστοποίηση. Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 30mm και επαρκεί για το ρυθμό ανακυκλοφορίας της εγκατάστασης. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζεται πρόβλημα κατά την είσοδο των σωματιδίων από τον κυκλώνα στον καθοδικό σωλήνα λόγω της απότομης μείωσης της διατομής. Το πρόβλημα εντοπίστηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων με ηλίανθο, όταν παρατηρήθηκε ταυτόχρονη μείωση της πίεσης στη βάση του ανοδικού σωλήνα και την L-Valve, που υποδηλώνει μείωση της μάζας αδρανούς υλικού στην εγκατάσταση. Κρούση του σημείου ένωσης κυκλώνα και downcomer, οδηγεί στην αποσυμφόρηση του σημείου από σωματίδια και επαναφορά στη σωστή λειτουργία της εγκατάστασης. Πιθανή όξυνση του προβλήματος μπορεί να οφείλεται στην δημιουργία συσσωματωμάτων από σωματίδια και υγρασία μετά το τέλος των πειραμάτων και την ψύξη της εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό τα περισσότερα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία έγιναν σε κατάσταση αναβράζουσας κλίνης. Προτείνεται η αλλαγή του καθοδικού σωλήνα με νέο, όμοιας κατασκευής αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου.

Μετά την αλλαγή του καθοδικού σωλήνα, η συνέχιση των πειραμάτων σε κατάσταση ανακυκλοφορίας θα προσφέρει αξιόλογα αποτελέσματα σχετικά με την αποδοτικότητα της κλίνης ανακυκλοφορίας, στην μετατροπή του περιεχόμενου άνθρακα στο καύσιμο. Ακόμα, πειράματα μακράς διάρκειας θα εξάγουν ασφαλέστερα συμπεράσματα σχετικά με την τάση απορευστοποίησης της κλίνης ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο.

Ακόμα, προτείνεται η δειγματοληψία αερίου σύνθεσης με σκοπό την καταμέτρηση των παραγόμενων πισσών και άλλων ρύπων κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης βιομάζας. Αυτό θα βελτιώσει την εκτίμηση σχετικά με την ποσοστιαία μετατροπή του περιεχόμενου στο καύσιμο άνθρακα και παράλληλα θα εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του αδρανούς υλικού στα παράγωγα της αεριοποίησης.

Τέλος, προτείνεται η εκπόνηση πειραμάτων με είδη βιομάζας που υπάρχουν σε αφθονία στον Ελληνικό χώρο καθώς και προσπάθεια καύσης επεξεργασμένων αστικών απορριμμάτων.

5

Βιβλιογραφία

1. Κουφοδήμος Γεώργιος. Διδακτορική διατριβή: "Καθαρισμός Αερίου Αεριοποίησης για Χρήση σε Μηχανές", 2009.
2. European Community, The State of Renewable Energies in Europe – 11th EurObserv'ER Report, Observ'Er, 2011
3. ΕΚΕΤΑ/ΙΤΕΣΚ, "Ηλεκτρονική Ενημερωτική Πλατφόρμα για Θέματα Περιβάλλοντος και Διαχείρισης Ενέργειας", www.allaboutenergy.gr/Biomaza.html
4. ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, ν.3423/2005, άρθρο 1, ΦΕΚ 304 Α'
5. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Ενεργειακές καλλιέργειες για την παραγωγή υγρών και στερεών βιοκαυσίμων στην Ελλάδα, Εκδόσεις ΚΑΠΕ, 2006
6. http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass_guide.pdf
7. Κακαράς Ε., Γραμμέλης Π., Πανόπουλος Κ., Καρέλας Σ., Αγρανιώτης Μ., Καραμπίνης Ε., Τεχνολογίες αξιοποίησης βιομάζας για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, 4η Εβδομάδα Ενέργειας, 2010
8. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, Υπουργική απόφαση Αρ. πρωτ. ΟΙΚ.: 189533
<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=C6PsDVC2RhI%3D&tabid=367&language=el-GR>
9. <http://www.eon-uk.com/generation/stevenscroft.aspx>
10. S. Karellas, J. Karl, E. Kakaras, An innovative biomass gasification process and its coupling with microturbine and fuel cell systems, Energy, Volume 33, Issue 2, February 2008, Pages 284-291
11. Christopher Higman, Maarten van der Burgt, Gasification, Elsevier, 2003
12. Karampinis E., Vamvuka D., Sfakiotakis S., Grammelis P., Itskos G., Kakaras E., Comparative study of combustion properties of five energy crops and Greek lignite, Energy&Fuels, 2011
13. <http://en.wikipedia.org/wiki/Jatropha>
14. Nicla Contran, Laura Chessa, Marcello Lubino, Davide Bellavite, Pier Paolo Roggero, Giuseppe Enne, State-of-the-art of the Jatropha curcas productive chain: From sowing to biodiesel and by-products, Industrial Crops and Products, Volume 42, March 2013, Pages 202-215

15. R. Manurung, D.A.Z. Wever, J. Wildschut, R.H. Venderbosch, H. Hidayat, J.E.G. van Dam, E.J. Leijenhurst, A.A. Broekhuis, H.J. Heeres, Valorisation of *Jatropha curcas* L. plant parts: Nut shell conversion to fast pyrolysis oil, *Food and Bioproducts Processing*, Volume 87, Issue 3, September 2009, Pages 187-196
16. Sung Won Kim, Bon Seok Koo, Jae Wook Ryu, Joon Sik Lee, Cheol Joong Kim, Dong Hyun Lee, Gyung Rok Kim, Sun Choi, Bio-oil from the pyrolysis of palm and *Jatropha* wastes in a fluidized bed, *Fuel Processing Technology*, Available online 26 May 2012
17. Luciana G. Angelini, Lucia Ceccarini, Nicoletta Nassi o Di Nasso, Enrico Bonari, Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (*Cynara cardunculus* L.) cultivars for energy use, *Biomass and Bioenergy*, Volume 33, Issue 5, May 2009, Pages 810-816
18. Anita Ierna, Rosario P. Mauro, Giovanni Mauromicale, Biomass, grain and energy yield in *Cynara cardunculus* L. as affected by fertilization, genotype and harvest time, *Biomass and Bioenergy*, Volume 36, January 2012, Pages 404-410
19. Jesús Fernández, María Dolores Curt, Pedro Luis Aguado, Industrial applications of *Cynara cardunculus* L. for energy and other uses, *Industrial Crops and Products*, Volume 24, Issue 3, November 2006, Pages 222-229
20. Mercè Llugany, Roger Miralles, Isabel Corrales, Juan Barceló, Charlotte Poschenrieder, *Cynara cardunculus* a potentially useful plant for remediation of soils polluted with cadmium or arsenic, *Journal of Geochemical Exploration*, Available online 23 June 2012
21. Elena Galán, Lourdes Cabezas, José Fernández-Salguero, Proteolysis, microbiology and sensory properties of ewes' milk cheese produced with plant coagulant from cardoon *Cynara cardunculus*, calf rennet or a mixture thereof, *International Dairy Journal*, Volume 25, Issue 2, August 2012, Pages 92-96
22. E. Portis, A. Acquadro, A.M.G. Longo, R. Mauro, G. Mauromicale, S. Lanteri, Potentiality of *Cynara cardunculus* L. as energy crop, *Journal of Biotechnology*, Volume 150, Supplement, November 2010, Pages 165-166
23. Emily A. Heaton, Frank G. Dohleman, A. Fernando Miguez, John A. Juvik, Vera Lozovaya, Jack Widholm, Olga A. Zobotina, Gregory F. Mclsaac, Mark B. David, Thomas B. Voigt, Nicholas N. Boersma, Stephen P. Long, Chapter 3 - *Miscanthus*: A Promising Biomass Crop, In: Jean-Claude Kader and Michel Delseny, Editor(s), *Advances in Botanical Research*, Academic Press, 2010, Volume 56, Pages 75-137
24. Rudy Michel, Sergio Rapagnà, Philippe Burg, Giuseppe Mazziotti di Celso, Claire Courson, Thierry Zimny, René Gruber, Steam gasification of *Miscanthus X Giganteus* with olivine as catalyst production of syngas and analysis of tars (IR, NMR and GC/MS), *Biomass and Bioenergy*, Volume 35, Issue 7, July 2011, Pages 2650-2658

25. Anissa Khelifa, Victor Sharypov, Gisèle Fingueneisel, Jean Victor Weber, Catalytic pyrolysis and gasification of Miscanthus Giganteus: Haematite (Fe₂O₃) a versatile catalyst, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 84, Issue 1, January 2009, Pages 84-88
26. <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunflower>
27. H. Haykiri-Acma, S. Yaman, S. Kucukbayrak, Gasification of biomass chars in steam–nitrogen mixture, Energy Conversion and Management, Volume 47, Issues 7–8, May 2006, Pages 1004-1013
28. <http://en.wikipedia.org/wiki/Willow>
29. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Ευθυμία Αλεξοπούλου, Βέλτιστες πρακτικές στην επιλογή ενεργειακών καλλιεργειών για τα Ελληνικά δεδομένα, Εκδόσεις ΚΑΠΕ, 2010
30. Blas Mola-Yudego, Pär Aronsson, Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden, Biomass and Bioenergy, Volume 32, Issue 9, September 2008, Pages 829-837
31. <http://www.gasification.org/>
32. <http://www.biomassenergy.gr/articles/technology/innovation/12-biomass-gasification>
33. Thomas B.Reed, Siddharta Gaur, A Survey of Biomass Gasification 2001, 2nd Edition, National Renewable Energy Laboratory, 2001
34. Arjan F. Kirkels, Geert P.J. Verbong, Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 1, January 2011, Pages 471-481
35. Ryan M. Swanson, Justinus A. Satrio, Robert C. Brown, Alexandru Platon, David Hsu, Techno-Economic Analysis of Biofuels Production Based on Gasification, NREL, 2010
36. Maria Puig-Arnabat, Joan Carles Bruno, Alberto Coronas, Review and analysis of biomass gasification models, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 9, December 2010, Pages 2841-2851
37. Sotirios Karellas, Online analysis of the composition of biogenous gases and their effect on microturbine and fuel cell systems, VDI Verlag, 2006
38. http://en.wikipedia.org/wiki/Boudouard_reaction
39. Chunshan Li, Kenzi Suzuki, Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 3, April 2009, Pages 594-604
40. John Rezaiyon, Nicholas P. Cheremisinoff, Gasification technologies- A primer for engineers and scientists, Process Safety and Environmental Protection, Volume 84, Issue 6, November 2006, Pages 476-477

41. Christoph Baumhagl, Sotirios Karellas, Tar analysis from biomass gasification by means of online fluorescence spectroscopy, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 49, Issue 7, July 2011, Pages 885-891
42. <http://www.eeci.net/>
43. Chunshan Li, Kenzi Suzuki, Resources, properties and utilization of tar, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 54, Issue 11, September 2010, Pages 905-915
44. Mel Pell, *Gas Fluidization*, Elsevier, 1990
45. Daizo Kunii, Octave Levenspiel, *Fluidization Engineering*, John Wiley & sons INC, 1969
46. Άγγελος Θ. Παπαϊωάννου, *Μηχανική των Ρευστών Τόμος II*, Β Έκδοση, Κοράλι, 2002
47. T. Shirai, *Fluidized Beds*, Kagaku-gijutsu-sha, Kanazawa, 1958
48. <http://en.wikipedia.org/wiki/Porosity>
49. Yingjuan Shao, Bing Ren, Baosheng Jin, Wenqi Zhong, Hao Hu, Xi Chen, Chunfa Sha, Experimental flow behaviors of irregular particles with silica sand in solid waste fluidized bed, *Powder Technology*, 2012
50. Joachim Werther, Measurement techniques in fluidized beds, *Powder Technology*, Volume 102, Issue 1, April 1999, Pages 15-36
51. Pradir Basu, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, Taylor & Francis, 2006
52. Wen-Ching Yang, *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel Dekker Inc, 2003
53. Geldar D., *Gas Fluidization Technology*, John Wiley & sons Ltd, 1986
54. <http://www.kanthal.com/>
55. Γιώργος Μπεργελές, Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2006
56. <http://www.aalborg.com/>
57. A. Charitos, C. Hawthorne, A.R. Bidwe, L. Korovesis, A. Schuster, G. Scheffknecht, Hydrodynamic analysis of a 10 kWth Calcium Looping Dual Fluidized Bed for post-combustion CO₂ capture, *Powder Technology*, Volume 200, Issue 3, 28 June 2010, Pages 117-127
58. Ευάγγελος Παπαδόπουλος, *Ηλεκτρομηχανικά συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2001
59. HORIBA Scientific, *A Guidebook to Particle Size Analysis*, ηλεκτρονικό: http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/PSA_Guidebook.pdf
60. Xiangmei Meng, Wiebren de Jong, Ningjie Fu, Adrian H.M. Verkooijen, Biomass gasification in a 100 kWth steam-oxygen blown circulating fluidized bed gasifier: Effects of operational

conditions on product gas distribution and tar formation, Biomass and Bioenergy, Volume 35,
Issue 7, July 2011, Pages 2910-2924

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1 Κατηγοριοποίηση σωματιδίων κατά Geldart [53]

Κατηγορία C (<20 μm για $\rho=2.500\text{kg/m}^3$)

Η φυσιολογική ρευστοποίηση των σωματιδίων αυτής της κατηγορίας είναι εξαιρετικά δύσκολη. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι οι δυνάμεις ανάμεσα στα σωματίδια (δυνάμεις βαρύτητας) είναι μεγαλύτερες από αυτές του ρευστού. Το γεγονός αυτό συμβαίνει λόγω του ότι τα σωματίδια αυτά :

- Έχουν πολύ μικρό μέγεθος, γενικά <20 μm
- Είναι αρκετά συνεκτικά
- Έχουν ισχυρές ηλεκτροστατικές φορτίσεις
- Έχουν υγρασία
- Έχουν επιφάνειες μεγάλου ιξώδους
- Είναι μαλακά
- Έχουν ακανόνιστο σχήμα

Η πτώση πίεσης σε αυτή την κατηγορία είναι πολύ μικρή. Η μίξη των σωματιδίων δεν είναι καλή , οπότε έχουμε πολύ «φτωχή» μεταφορά θερμότητας. Χαρακτηριστικά σωματίδια αυτής της κατηγορίας είναι το άμυλο , το αλεύρι και η πούδρα.

Κατηγορία A (20 μm -90 μm για $\rho=2.500\text{kg/m}^3$)

Σε αυτή την κατηγορία βρίσκονται τα υλικά που είναι εύκολο να ρευστοποιηθούν, υλικά με μικρή μέση διάμετρο και με χαμηλή πυκνότητα. Η κλίση αναπτύσσεται πολύ εύκολα σε ταχύτητες ανάμεσα σε u_{mf} και u_{mb} λόγω της μικρής συνεκτικότητας των σωματιδίων. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες έχουμε ρευστοποίηση με ελεγχόμενες φυσαλίδες μικρού μεγέθους. Το ύψος της κλίσης τότε μικραίνει. Χαρακτηριστικά σωματίδια σε αυτή την κατηγορία είναι οι FCC καταλύτες. Οι FCC καταλύτες είναι λεπτά σωματίδια εύρος πυκνότητας 0,8-0,96 g/mL. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από 10 έως 150 μm .

Κατηγορία B (90 μm -650 μm για $\rho=2.500\text{kg/m}^3$)

Οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων είναι αμελητέες και οι πρώτες φυσαλίδες αρχίζουν να διαμορφώνονται μόλις η ταχύτητα του ρευστού ξεπεράσει την u_{mf} . Η έκταση της ρευστοποίησης είναι σχετικά μικρή και μειώνεται αμέσως όταν διακοπεί η παροχή του ρευστού.

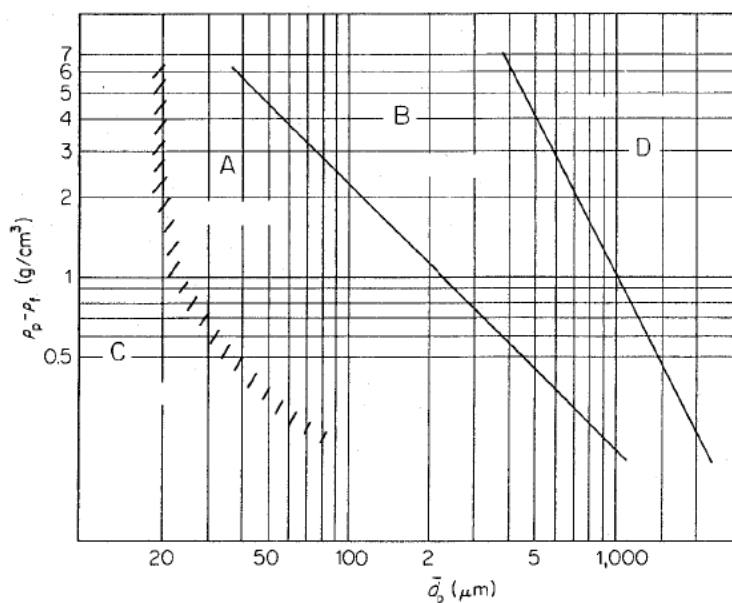
Κατηγορία D (>650 μm για $\rho=2.500\text{kg/m}^3$)

Σε αυτή την κατηγορία έχουμε μεγάλου μεγέθους σωματίδια ή μεγάλης πυκνότητας. Υπάρχει αρκετά μεγάλη δυσκολία στην ρευστοποίηση. Ειδικά αν η παροχή του ρευστού δεν είναι ομοιόμορφη παρατηρούνται μεγάλες φυσαλίδες και ταραχώδης συμπεριφορά. Χαρακτηριστικά σωματίδια αυτής της κατηγορίας είναι τα ξηρά σιτηρά και μπιζέλια, καβουρδισμένοι κόκκοι καφέ, και κάποια μεταλλεύματα.

Πίνακας Π1.1 Ιδιότητες ομάδων Geldart [51]

Κατηγορία	C	A	B	D
Σωματίδιο με $\rho_p=2500\text{kg/m}^3$	$<20\mu\text{m}$	20-90 μm	90-650 μm	$>650\mu\text{m}$
Channeling	Αυστηρή	Μικρή	Ουδέτερη	Ουδέτερη
Ανάβλωση	Καμία	Καμία	Ρηχή	Εύκολα
Διαστολή	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια
Ελάχιστη ταχύτητα δημιουργίας φουσαλίδων (U_{mf})	Καμία φουσαλίδα	$>U_{mf}$	$= U_{mf}$	$= U_{mf}$
Σχήμα φουσαλίδας	Μόνο καναλιού	Επίπεδη βάση σφαιρικό κάλυμμα	Σφαιρικό με μικρές οδοντώσεις	Σφαιρικό
Μίξη σωματιδίων	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Μίξη αερίων	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Επίπεδο κτυπήματος	Επίπεδα κτυπήματα	Αξονοσυμμετρικό	Κυρίως αξονοσυμμετρικό	Κυρίως από τα τοιχώματα
Επίδραση μεγέθους σωματιδίων στην υδροδυναμική	Άγνωστη	Σημαντική	Ελάχιστη	Άγνωστη

Το διάγραμμα που ακολουθεί μας δίνει το εύρος των τεσσάρων κατηγοριών

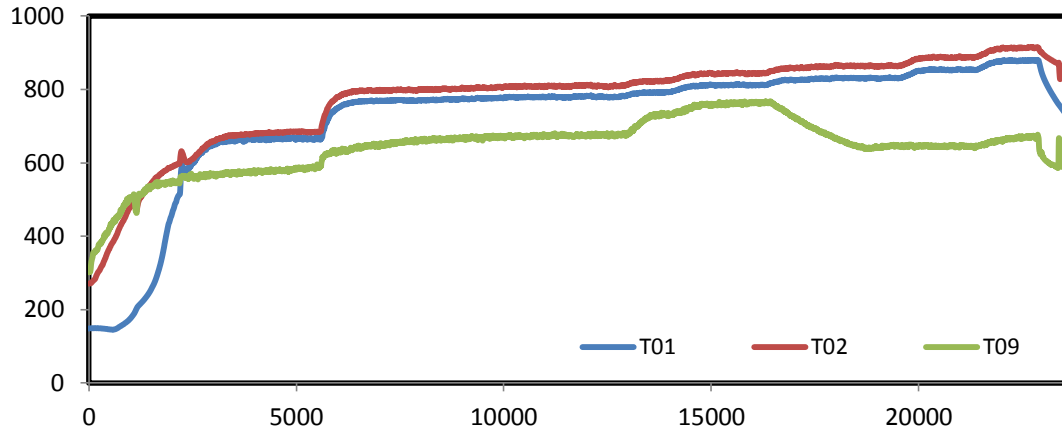


Σχήμα Π1.1 Εύρος των κατηγοριών

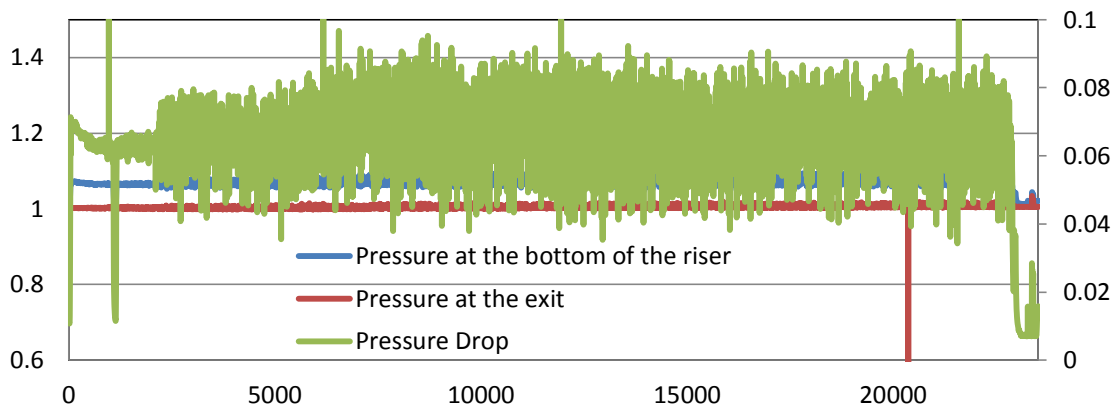
Π3

Συγκεντρωτικά διαγράμματα αρχείων εξόδου DasyLab (ενδεικτικά)

Temperature



Pressure



GAS ANALYSIS

