

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΩΝ

# ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ



ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΕΛΛΑΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

#### <u>ΣΥΝΟΨΗ</u>

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται πειραματικά η επίδραση του αρχικού αδρανούς υλικού κλίνης και της θερμοκρασίας κατά την αεριοποίηση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας. Συγκρίνεται η μεταβολή της ποιότητας του παραγόμενου αερίου σύνθεσης ως προς το αδρανές υλικό που χρησιμοποιήθηκε καθώς και σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας για τρεις βιομάζες δεύτερης γεννιάς. Ακόμα, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία αερίου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σε κάθε πείραμα αεριοποίησης με σκοπό τη μελέτη της ποσότητας πισσών που παράγεται σε κάθε περίπτωση. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας που εξετάστηκαν ήταν οι 750 °C και οι 800 °C και τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ολιβίνης, επεξεργασμένος ολιβίνης και χαλαζιακή άμμος. Τα καύσιμα που εισάχθηκαν για αεριοποίηση ήταν ξύλο ιτιάς (willow), γιατρόφα (jatropha) και ηλίανθος (sunflower).

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε εγκατάσταση ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία που εδράζεται στις εγκαταστάσεις του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) στο Πικέρμι και είναι σχεδιασμένη για παραγωγή ισχύος μέχρι 100 kW<sub>th</sub>.

#### <u>ABSTRACT</u>

In this thesis, the effect of bed material and temperature during biomass gasification in a circulating fluidized bed is experimentally investigated. Three second generation kinds of biomass were used. The effect that the bed material as well as a temperature increase has on the quality of product gas (syngas) has been compared beween the three different kinds of biomass. In addition, samplings of product gas during the experiments were realized in each gasification experiment with the purpose of checking the quantity of produced tars in each case. The operating temperatures tested were that of 750 °C and 800 °C while olivine, calcined olivine and quartz were used as bed materials. The biofuels introduced for gasification were willow, jatropha and sunflower.

The experiments were conducted at a circulating fluidized bed plant which is situated to CAPE (Centre of Renewable Sources of Energy) installations in the region of Pikermi and it is designed to produce up to  $100 \text{ kW}_{th}$  of power.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Καρέλλα Σωτήριο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της αεριοποίησης βιομάζας. Θεωρώ ότι η ενασχόλησή μου με το θέμα σε πειραματικό επίπεδο, με βοήθησε να αναπτύξω καλή προπτυχιακή γνώση στο συγκεκριμένο αντικείμενο ενώ ταυτόχρονα με τροφοδότησε με πολύτιμες και σπάνιες εμπειρίες σχετικά με τις δυσκολίες που συναντώνται στην πράξη κατά τη διεργασία της αεριοποίησης.

Ακόμα, αισθάνομαι μεγάλη τιμή που μου δόθηκε η ευκαιρία να συνεργαστώ με τον Δρ. Κ. Πανόπουλο και τον ευχαριστώ για την αρωγή του στην αναβάθμιση του γνωστικού μου επιπέδου. Ευχαριστώ επίσης, τους υποψήφιους διδάκτορες Χριστοδούλου Χρήστο και Κουτσούμπα Εφηγιάννα για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν ενώ μαζί με τους παραπάνω ευχαριστώ και τους συναδέλφους Τομαρά Δημήτρη και Γκριμέκη Δημήτρη για την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Ακόμα μεταφέρω τις ευχαριστίες μου στον φίλο Παναγιώτη Κουφό για τη συμβολή του στην λήψη των φωτογραφιών της εγκατάστασης με τις οποίες εμπλούτισα τη διπλωματική μου εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γοννείς μου και στα αδέλφια μου για την οικονομική και ψυχολογική συμπαράσταση που μου παρείχαν καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Για το λόγο αυτό, αφιερώνω το παρών σύγγραμα σε όλα τα μέλη της οικογένειάς μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΑΝΑΓΚΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.2	BIOMAZA	3
1.2.1	Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	3
1.2.2	ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	5
1.2.3	ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	8
1.3	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
2	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	12
2.1	ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	13
2.1.1	ΚΑΥΣΗ	13
2.1.2	ΠΥΡΟΛΥΣΗ	14
2.1.3	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	15
2.1.3 <b>3</b>	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ	15 . <b>17</b>
2.1.3 <b>3</b> 3.1	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	15 . <b>17</b> 17
2.1.3 <b>3</b> 3.1 3.2	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	15 <b>.17</b> 17 19
<ol> <li>2.1.3</li> <li>3</li> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.2.1</li> </ol>	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ	15 <b>17</b> 17 19 19
2.1.3 <b>3</b> 3.1 3.2 3.2.1 3.2.2	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	15 17 17 19 19 20
2.1.3 <b>3</b> 3.1 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	15 17 17 19 19 20 22
2.1.3 <b>3</b> 3.1 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.3	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΙΣΣΑΣ	15 17 17 19 19 20 22 23
2.1.3 <b>3</b> 3.1 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.3 3.4	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΙΣΣΑΣ ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΩΝ	15 17 17 19 20 22 23 25
2.1.3 <b>3</b> 3.1 3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.3 3.4 3.4.1	ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΙΣΣΑΣ ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΩΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΛΙΝΗΣ	15 17 17 19 20 22 23 25 25

4	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	.29
4.1	ΣΤΑΔΙΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	.29
4.2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	.32
4.2.1	ΚΙΝΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΡΕΥΣΤΩΝ	32
4.2.2	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ (u <sub>t</sub> )	33
4.2.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	.34
4.2.4	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (u <sub>mf</sub> )	.35
4.2.5	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ (u <sub>mb</sub> )	.37
4.3	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	.38
5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	.42
5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	.43
5.1.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	.43
5.1.2	ΑΝΟΔΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ (RISER)	.46
5.1.3	κγκλανας	.46
5.1.4	ΚΑΘΟΔΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ-ΒΑΛΒΙΔΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ L (L-valve)	.49
5.1.5	ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	.51
5.1.6	ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	52
5.1.7	ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	.53
5.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΙΣΣΩΝ	.54
5.2.1	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΤΩΝ ΠΙΣΣΩΝ	.54
5.2.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΙΣΣΩΝ	.56
5.3 Aeitc	ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ Τ ΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ	ΓΗΣ .58
5.3.1	ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΕΡΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ	58

5.3.2	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ5	9
5.3.3	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΥΚΛΩΝΑ ΣΤΟ ΛΗΠΤΗ ΠΙΣΣΩΝ	;9
5.4	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	50
5.4.1	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΛΟΓΟΥ ΑΕΡΑ-ΚΑΥΣΙΜΟΥ (λ)	50
5.4.2	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΟΧΛΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ6	1
5.4.3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ6	4
5.4.4	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ6	5
5.4.5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ	56
6	ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ6	8
6.1	ΚΑΥΣΙΜΑ6	8
6.1.1	ΞΥΛΟ ΙΤΙΑΣθ	8
6.1.2	ΓΙΑΤΡΟΦΑθ	;9
6.1.3	ΗΛΙΑΝΘΟΣ7	0'
6.1.4	ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	'1
6.2	ΑΔΡΑΝΕΣ ΥΛΙΚΟ7	2
6.2.1	ΟΛΙΒΙΝΗΣ	'2
6.2.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΣ ΟΛΙΒΙΝΗΣ7	3
6.2.3	ΧΑΛΑΖΙΑΚΗ ΑΜΜΟΣ7	5
7	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ7	7
7.1	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ7	7
7.1.1	ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ7	7
7.1.2 ΤΗΣ Κ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΡΟΦΙ ΛΙΝΗΣ	Λ 31
7.2	ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ8	3

7.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟ	DY AEPIOY
ZYNG		
8 ΕΓΚΑΊ	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΆ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ Χ ΤΑΣΤΑΣΗΣ	<sup>2</sup> ΗΣΗ ΤΗΣ 100
8.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
8.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	103
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

Συμβολισμός	Μονάδα μέτρησης	Ονομασία
F <sub>g</sub>	N(newton)	δύναμη της βαρύτητας
F <sub>D</sub>	Ν	οπισθέλκουσα δύναμη
F <sub>b</sub>	Ν	δύναμη της άνωσης
C <sub>D</sub>	αδιάστατο	συντελεστής οπισθέλκουσας
g	m²/s	επιτάχυνση της βαρύτητας
ρ <sub>g</sub>	kg/m <sup>3</sup>	πυκνότητα ρευστού
ρ <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	πυκνότητα στερεών
A	m <sup>2</sup>	μετωπική επιφάνεια σωματιδίου
Uz	m/s	σχετική ταχύτητα σωματιδίου-ρευστου
m	kg	μάζα σωματιδίου
ds	mm	διάμετρος σωματιδίου
3	αδιάστατο	πορώδες κλίνης
ε <sub>m</sub>	αδιάστατο	πορώδες σταθερής κλίνης
Vs	m <sup>3</sup>	όγκος στερεών στην κλίνη
V	m <sup>3</sup>	ολικός όγκος στρώματος της κλίνης
L	m	ύψος της κλίνης
μ	kg/m s	δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού
d <sub>p</sub>	mm	μέση διάμετρος σωματιδίων
φs	mm	σφαιρικότητα σωματιδίων
u <sub>φ</sub>	m/s	φαινόμενη ταχύτητα ρευστού
u <sub>mf</sub>	m/s	ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης
U <sub>mb</sub>	m/s	ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων
u <sub>t</sub>	m/s	τελική ταχύτητα σωματιδίου
Uf	m/s	ταχύτητα ρευστοποίησης

λ	αδιάστατο	λόγος αέρα προς την παροχή καυσίμου
m <sub>f</sub>	kg/s	παροχή μάζας καυσίμου
<b>Q</b> <sub>αέρα</sub>	Nm <sup>3</sup> /s	παροχή αέρα που εισάγεται στο πείραμα
$Q_{gas}$	Nm <sup>3</sup> /s	παροχή ρευστού/ παραγόμενο αέριο
0ΔΡ	Ра	πτώση πίεσης
T <sub>pr</sub>	К	θερμοκρασία της κλίνης
P <sub>pr</sub>	Ра	πίεση της κλίνης
A <sub>riser</sub>	m²	διατομή ανοδικού σωλήνα
U <sub>ms</sub>	m/s ελάχι	στη ταχύτητα εμφάνισης ταραχώδους ρευτοποίησης
Uc	m/s	ταχύτητα έναρξης ανακυκλοφορίας υλικού
D	mm	διάμετρος ανοδικού σωλήνα
D <sub>i</sub>	mm	μέση διάμετρος δημιουργούμενης φυσαλίδας σε
		ταραχώδη ρευστοποίηση με φυσαλίδες
CCE %	αδιάστατο	ποσοστό μετατροπής άνθρακα σε syngas
CGE %	αδιάστατο	ενεργειακός βαθμός απόδοσης
LHV	MJ/m <sup>3</sup>	κατώτερη θερμογόνος ικανότητα
K <sub>eq</sub>	αδιάστατο	σταθερά ισορροπίας των αντιδράσεων
ΔG <sup>o</sup>	kJ/mol	αριθμός Gibbs

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 ΑΝΑΓΚΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Με την πάροδο των χρόνων, είναι γεγονός, ότι η ανάγκη αύξησης της παραγωγής και χρήσης ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της παγκόσμιας κοινότητας γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Από τη στιγμή της ανακάλυψης των τεχνολογιών εκμετάλλευσής τους, τα ορυκτά καύσιμα έχουν εδραιωθεί στα βιομηχανικά κράτη ως η κύρια πηγή ενέργειας. Η ευρύτατη όμως χρήση και καύση των συμβατικών καυσίμων, όπως είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας προκαλεί σημαντική φθορά στο φυσικό περιβάλλον.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την καύση των γαιανθράκων, που είναι χημικές ενώσεις του άνθρακα με το υδρογόνο, εκλύονται αιθάλη και διοξείδιο του άνθρακα προς την ατμόσφαιρα, ενώ η καύση του πετρελαίου παράγει επιπλέον οξείδια του αζώτου, του θείου και ελευθερώνεται μόλυβδος [1]. Η αιθάλη και τα αέρια αυτά προκαλούν την αιθαλομίχλη, που συχνά λόγω των θερμοκρασιακών αναστροφών εγκλωβίζεται στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, με δυσάρεστα αποτελέσματα. Ιδιαίτερα η αιθάλη εισπνέεται αλλά και επικάθεται παντού. Όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα, με την αύξηση της ποσότητας του στην ατμόσφαιρα, αυξάνεται και η διαφορά μεταξύ της εισερχόμενης στην ατμόσφαιρα ηλιακής ακτινοβολίας και της εξερχόμενης από αυτή μετά την ανάκλασή της στη Γη [1]. Σε ότι αφορά την έκλυση των οξειδίων του θείου και του αζώτου, αυτά σχηματίζουν με τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας οξέα που με το νερό της βροχής επιστρέφουν στη γη ως όξινη βροχή, προκαλώντας μεγάλες ζημιές στα δάση του πλανήτη μας, διάβρωση και ερημοποίηση των γόνιμων εδαφών καθώς και αλλοιώσεις στη σύσταση των υπόγειων και πόσιμων νερών. Η αύξηση η οποία παρατηρείται στην έκλυση των επιβλαβών αυτών αερίων προς την ατμόσφαιρα έχει εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, κάτι που έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Τα τελευταία χρόνια η μόλυνση της γης έχει αυξηθεί σε τρομακτικό βαθμό. Σ' αυτό βοήθησε όχι μόνο η ρύπναση που προήλθε μέσω των διαφόρων παραγώγων καύσης, αλλά και από τα διάφορα ατυχήματα που έχουν συμβεί κατά τη μεταφορά πετρελαίου με πλοία, προκαλώντας ανυπολόγιστες οικολογικές καταστροφές σε θάλασσες και ακτές.

Στην εικόνα 1.1 φαίνεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ότι η έκλυση των αερίων του θερμοκηπίου προκαλεί την ανάκλαση της θερμότητας που προσδίδει ο ήλιος στη Γη με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.



ΕΙΚΟΝΑ 1.1: Φαινόμενο του θερμοκηπίου [1].

Αυτή η καταστροφή την οποία υπόκειται το παγκόσμιο οικοσύστημα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα ενεργειακά αποθέματα των συμβατικών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητα έχουν δημιουργήσει μία πιο οικολογική συνείδηση στην ενεργειακή κοινότητα των προηγμένων τεχνολογικά κρατών. Έτσι προκειμένου να μειωθούν οι ρύποι προς την ατμόσφαιρα τα ανεπτυγμένα κράτη οδηγήθηκαν στην υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο το Δεκέμβριο του 1997. Το πρωτόκολλο, το οποίο τέθηκε σε ισχύ το 2005, στόχευε στη μείωση των εκπομπών 6 αερίων κατά 5% την πενταετία 2008-2012 σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1990 [1]. Για να κινηθούν προς αυτή την κατεύθυνση τα κράτη-μέλη του πρωτοκόλλου και να διασφαλιστεί μία βιώσιμη ανάπτυξη, κρίθηκε αναγκαία η τεχνολογική ανάπτυξη και χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Οι σημαντικότερες μορφές ΑΠΕ που αξιοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ενέργειας είναι η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμία και η βιομάζα. Παρά το γεγονός ότι οι ΑΠΕ συνοδεύονται από κάποια αρνητικά στοιχεία, η ανάγκη για αυξανόμενη χρήση και αξιοποίησή τους είναι επιτακτική λόγω του ότι λαμβάνονται σε ανεξάντλητες ποσότητες από τη φύση και ότι είναι περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση της βιομάζας ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, συγκεκριμένα, στη μετατροπή της σε καύσιμη ύλη, το λεγόμενο βιοκαύσιμο.

#### **1.2 BIOMAZA**

### 1.2.1 Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Με τον όρο *βιομάζα* ορίζεται το σύνολο της ύλης που έχει οργανική (βιολογική) προέλευση, εξαιρώντας τα ορυκτά καύσιμα. Με βάση τον ορισμό αυτό, περιλαμβάνεται οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από φυτική ή ζωική ύλη, όπως φυτικές ύλες από φυτικά οικοσυστήματα ή από ενεργειακές καλλιέργειες, καθώς επίσης και τα υπολείμματα της εκμετάλλευσής τους, τα υποπροϊόντα της δασικής, γεωργικής, κτηνοτροφικής και αλιευτικής παραγωγής, αλλά και το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και απορριμμάτων [2].

Η περιεχόμενη στη βιομάζα ενέργεια είναι αποθηκευμένη στις οργανικές ενώσεις του άνθρακα, ο οποίος αποτελεί συστατικό όλων των ζωντανών οργανισμών. Όταν οι οργανισμοί αυτοί πεθαίνουν ο άνθρακας οδηγείται μέσω της σήψης στο υπέδαφος ή στην ατμόσφαιρα με τη μορφή αερίων όπως διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο [3].

Η πρωτογενής πηγή ενέργειας της βιομάζας από φυτική ύλη είναι η ηλιακή ενέργεια η οποία δεσμεύεται μέσω της φωτοσύνθεσης. Κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου φαινομένου η ηλιακή ακτινοβολία, το διοξείδιο του άνθρακα, η χλωροφύλλη και το νερό αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα την παραγωγή οξυγόνου και του οργανικού προϊόντος καρβοϋδρίδιο (CH<sub>2</sub>O), το οποίο αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των σύνθετων οργανικών συστατικών της φυτικής βιομάζας [4]. Παρακάτω παρατίθεται η χημική αντίδραση που περιγράφει την φωτοσύνθεση.

$$CO_2 + H_2O + \chi\lambda\omega\rhoo\phi \dot{\nu}\lambda\eta + \eta\lambdaι\alpha\kappa\dot{\eta}$$
 ενέργεια → (CH<sub>2</sub>O) + O<sub>2</sub> (1.1)

Η χημική ενέργεια που έχει αποθηκευτεί σε φυτά και ζώα (που τρέφονται με φυτά ή άλλα ζώα), ή στα απόβλητα που παράγουν, ονομάζεται βιοενέργεια [5]. Κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης της βιομάζας απελευθερώνεται τόσο διοξείδιο του άνθρακα, όσο απορροφήθηκε κατά τη φωτοσύνθεση του φυτού. Η βιομάζα λοιπόν, παρουσιάζει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα και θεωρείται ουδέτερο καύσιμο ως προς το CO<sub>2</sub>, καθώς οι ποσότητες CO<sub>2</sub> που παράγονται κατά την καύση της θεωρείται ότι έχουν ήδη δεσμευτεί για τη δημιουργία της. Για το λόγο αυτό, η βιομάζα συγκαταλέγεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ανακύκλωση των ποσοτήτων CO₂ ανάμεσα στο περιβάλλον και στους ζωντανούς οργανισμούς φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 2.



Εικόνα 1.2: Ανακύκλωση του άνθρακα. [6].

Εκτός από το γεγονός ότι δεν εκλύεται CO₂ προς την ατμόσφαιρα κατά την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας, η εκμετάλλευσή της έχει και άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα [2]:

- Η βιομάζα εκπέμπει αμελητέες ποσότητες θείου, οπότε η εκπομπή SO<sub>2</sub> μειώνεται αισθητά. Το SO<sub>2</sub>, όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι από τα υπεύθυνα αέρια της ύπαρξης της όξινης βροχής.
- 2. Μειώνεται η εξάρτηση από εισαγόμενες ενεργειακές πρώτες ύλες και μεγαλύτερη διαφοροποίηση των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών.
- Συμβάλλει ουσιαστικά στην υλοποίηση της αποκεντρωμένης παραγωγής, γεγονός που ευννοεί τη δημιουργία μικρών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής κοντά σε διαθέσιμες ποσότητες βιομάζας.
- Αυξάνονται οι μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, καθώς η χρήση της βιομάζας ευννοεί τεχνοοικονομικά τη δημιουργία τους.
- Δίνεται η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης αστικών απορριμμάτων, των οποίων η διάθεση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στα μεγάλα αστικά κέντρα.
- 6. Δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής νέων καθαρών τεχνολογιών καύσης στερεών καυσίμων στο ενεργειακό σύστημα της χώρας.
- Η μοναδική ΑΠΕ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη σε ένα διυλιστήριο.

Τα βασικά μειονεκτήματα της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα είναι:

 Το κόστος συλλογής και επεξεργασίας των υλικών, γεγονός που αντιμετωπίζεται με τη δημιουργία μονάδων πλησίον των παραγόμενων υλών.

- Το μικρό ενεργειακό περιεχόμενό της σε σχέση με ίση μάζα ορυκτού καυσίμου, το οποίο θα μπορούσε να αντισταθμιστεί από τα περιβαλλοντικά οφέλη της καύσης βιομάζας.
- Η αναπόφευκτη έκλυση συγκεντρώσεων CO₂ κατά τη μεταφορά και το χειρισμό της βιομάζας.

Από τα δύο πρώτα παραπάνω μειονεκτήματα συνάγεται πως, τελικά το ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας κόστος της βιομάζας είναι μεγαλύτερο από αυτό του πετρελαίου.

Μία προφανής και αρκετά αποτελεσματική λύση για τον περιορισμό των μειονεκτημάτων χρήσης βιομάζας είναι να γίνεται η αξιοποίησή της κοντά στις πηγές παραγωγής της. Επίσης, σε ότι αφορά το πρόβλημα του κόστους, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες η αξιοποίηση της βιομάζας παρουσιάζει οικονομικά οφέλη. Επιπλέον, το πρόβλημα αυτό βαθμιαία εξαλείφεται, αφ' ενός λόγω της ανόδου των τιμών του πετρελαίου, αφ' ετέρου λόγω της βελτίωσης και ανάπτυξης των τεχνολογιών αξιοποίησης της βιομάζας.

## 1.2.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Όπως προκύπτει από τον ορισμό της, η βιομάζα κατηγοριοποιείται σε διάφορα είδη ανάλογα με την προέλευσή της, ως εξής [7]:

- 1. Δασικές φυτείες (ξυλώδης βιομάζα)
- 2. Αγροτο-βιομηχανικές φυτείες (ξυλώδης βιομάζα)
- 3. Δένδρα εκτός των δασών (ξυλώδης βιομάζα)
- 4. Αγροτικές φυτείες (μη ξυλώδης βιομάζα)
- 5. Υπολείμματα αγροτικών φυτειών (μη ξυλώδης βιομάζα)
- Υπολείμματα βιομηχανικής επεξεργασίας βιομηχανικών προϊόντων (μη ξυλώδης βιομάζα)
- 7. Απόβλητα ζώων και ανθρώπων.
- 8. Ενεργειακές καλλιέργειες στις οποίες περιλαμβάνονται τόσο ορισμένα καλλιεργούμενα είδη όσο και κάποια άγρια φυτά και σκοπό έχουν την αύξηση της παραγωγής της βιομάζας. Ορισμένα παραδείγματα ενεργειακών καλλιεργειών είναι: το καλάμι, η αγριαγκινάρα, η ιτιά, η ελαιοκράμβη, ο μίσχανθος, ο ευκάλυπτος κ.α.

Τα συστατικά τα οποία συνθέτουν κατά βάση τη βιομάζα είναι λιγνοκυτταρινικά οργανικά συστατικά και πιο συγκεκριμένα αποτελείται από την κυτταρίνη, την ημικυτταρίνη και τη λιγνίνη. Σε πολύ μικρότερη κλίμακα η βιομάζα περιέχει κάποια οργανικά εκχυλίσματα και ανόργανα συστατικά [8]. Τα ανόργανα συστατικά, ή αλλιώς τέφρα, είναι το υπόλειμμα που παραμένει μετά την πλήρη οξείδωση της καύσιμης ύλης. Η σύστασή τους διαφέρει ανάλογα με το είδος της βιομάζας[9]. Παρά το γεγονός ότι αποτελούν ένα ποσοστό μικρότερο του 15% των συνολικών συστατικών της βιομάζας, τα ανόργανα συστατικά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο τόσο κατά την ανάπτυξη και διαμόρφωση του φυτού όσο και στο αποτελέσμα της παραγόμενης ενέργειας κατά την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας.

Προκειμένου να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, η βιομάζα πρέπει να μετατραπεί σε καύσιμη ύλη, το λεγόμενο *βιοκαύσιμο (biofuel)*. Ως βιοκαύσιμο ορίζεται κάθε ενεργειακός πόρος- σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφήαπό οργανικές πρώτες ύλες που προέρχονται είτε κατευθείαν από φυτά είτε έμμεσα από βιομηχανικά, εμπορικά, οικιακά και αγροτικά απόβλητα [10]. Οι τεχνολογίες από τις οποίες μπορούν να προκύψουν τα βιοκαύσιμα είναι πολλές και διαφορετικής φύσεως μεταξύ τους.

Κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα βιοκαύσιμα (που προκύπτουν από τις κατηγορίες βιομάζας), χαρακτηρίζεται από την ενέργεια που απελευθερώνει κατά την ενεργειακή αξιοποίησή του. Η ποιότητα του βιοκαυσίμου υπολογίζεται μέσω της στοιχειακής του ανάλυσης. Αυτή χωρίζεται στην προσεγγιστική ανάλυση (proximate analysis) και στην απόλυτη ανάλυση (ultimate analysis). Κατά την πρώτη καθορίζονται η υγρασία, η ποσότητα σε τέφρα, η ποσότητα πτητικών, η σταθερή ποσότητα άνθρακα και η θερμογόνος ικανότητα. Η ανάλυση αυτή παρέχει δηλαδή μία πρώτη ένδειξη της ποιότητας και του τύπου του καυσίμου. Από τη δεύτερη καθορίζονται τα ποσοστά άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, θείου, αζώτου και χλωρίου υπολογισμένα σε ξηρή βάση, δηλαδή χωρίς να ληφθεί υπόψη η υγρασία

Σε γενικές γραμμές, η στοιχειακή ανάλυση της βιομάζας, ανεξάρτητα από την προέλευσή της, χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά άνθρακα και οξυγόνου ενώ σε μικρότερη ποσότητα συναντάται το υδρογόνο και το άζωτο. Τέλος, το θείο θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι υπάρχει σε αμελητέες ποσότητες κάτι που κάνει τη διαδικασία της εκμετάλλευσης της βιομάζας περιβαλλοντικά φιλική. Είναι απόλυτα λογικό το γεγονός ότι όσο μικρότερο είναι το ποσοστό του άνθρακα στα συστατικά του βιοκαυσίμου, τόσο χειρότερη είναι η θερμική ικανότητα του καυσίμου και άρα η ενεργειακή του απόδοση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ότι η ενέργεια της βιομάζας βρίσκεται αποθηκευμένη στις οργανικές ενώσεις του άνθρακα. Από την άλλη μεριά, όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό του οξυγόνου, τόσο μεγαλύτερη είναι η παρουσία μορίων νερού στα συστατικά της βιομάζας, δηλαδή τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της υγρασίας της. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού του οξυγόνου μειώνει τη θερμική αξία του καυσίμου. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι το πιο επιθυμητό είδος βιομάζας ως προς την θερμική του αξία είναι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη δυνατή περιεκτικότητα σε άνθρακα και το χαμηλότερο δυνατό ποσοστό σε οξυγόνο.

Στοιχείο	Κατά βάρος σύσταση ( σε ξηρή βάση, χωρίς τέφρα)
Άνθρακας (C)	44-51 %
Υδρογόνο (Η)	5.5-6.7 %
Οξυγόνο (Ο)	41-50 %
Άζωτο (Ν)	0.12-0.60 %
Θείο (S)	0-0.2 %

Στον πίνακα 1.1 παρατίθεται η κατά βάρος σύσταση των στοιχείων ενός βιοκαυσίμου σε ξηρή βάση, δηλαδή απαλλαγμένο από την υγρασία και τα πτητικά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1:** Απόλυτη στοιχειακή ανάλυση (ultimate analysis) σύνθεσης αστικών απορριμάτων [10].

Εκτός από τη στοιχειακή ανάλυση, τα διάφορα είδη βιομάζας χαρακτηρίζονται και από κάποιες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Αυτές κρίνουν σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή απόδοση της βιομάζας κατά την εφαρμογή των διεργασιών αξιοποίησής της. Οι σημαντικότερες ιδιότητες σε ότι αφορά την αξιολόγηση της βιομάζας ως καύσιμη ύλη είναι η θερμογόνος δύναμη, η υγρασία που περιέχει και η τέφρα.

**Θερμογόνος δύναμη (θερμογόνος ικανότητα):** Πρόκειται για τη θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση 1 kg καυσίμου (ή  $1m^3$  αν πρόκειται για αέρια μορφή) σε αδιαβατικές συνθήκες. Ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκεται το νερό στα προϊόντα της καύσης (υγρή ή αέρια) η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε ανώτερη (HHV- Higher Heating Value) και σε κατώτερη (LHV- Lower Heating Value), λόγω δέσμευσης ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης των υδρατμών στα καυσαέρια [10]. Γενικά, οι συνήθεις τιμές θερμογόνου δύναμης βιοκαυσίμου χωρίς τέφρα και σε ξηρή βάση είναι της τάξης των 20.000 kJ/kg με απόκλιση της τάξεως του ± 15%.

Περιεκτικότητα σε υγρασία: Αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που περιλαμβάνεται στη βιομάζα. Το ποσοστό της υγρασίας που περιέχεται σε ένα βιοκαύσιμο αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο, τόσο για τον καθορισμό της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας, όσο και για την επιλογή της τεχνολογίας ενεργειακής αξιοποίησης που θα εφαρμοστεί. Για τη θερμική αξιοποίησή της η βιομάζα είναι απαραίτητο να έχει τιμές υγρασίας μικρότερες του 50%. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως προαναφέρθηκε, το υψηλό ποσοστό υγρασίας οδηγεί σε χαμηλή θερμική αξία λόγω του γεγονότος ότι καταναλίσκεται μεγαλύτερη ενέργεια για την εξάτμιση της υγρασίας. Ανάλογα με το είδος και την προέλευση της βιομάζας οι τιμές της υγρασίας κυμαίνονται από 10% (υπολείμματα καλλιέργειας δημητριακών) μέχρι και 80% (δασικά υπολείμματα- ζωικά απόβλητα) [9].

**Περιεκτικότητα σε τέφρα:** Πρόκειται για τα ανόργανα συστατικά της καύσιμης ύλης τα οποία παραμένουν ως υπόλειμμα μετά την πλήρη καύση της βιομάζας. Αποτελείται κατά κύριο λόγο από τα εξής στοιχεία: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> [9]. Ανάλογα με την καύσιμη ύλη η ποσότητα της τέφρας μπορεί να κυμανθεί από 0.5% (ξύλο) μέχρι και 30-40% (φλοιός ρυζιού). Η παρουσία της τέφρας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις διάφορες διεργασίες εκμετάλλευσης του καυσίμου καθώς είναι από τις σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του καυσίμου υπό υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά η ύπαρξη τέφρας δεν είναι επιθυμητή καθώς εκτός από το γεγομός ότι ελαττώνει την ποσότητα και ποιότητα του παραγόμενου αερίου, παράλληλα η τήξη και η συσσωμάτωσή της προκαλεί προβλήματα, όπως αποφράξεις, επικαθίσεις και λειτουργικές δυσχέρειες σε διάφορα μέρη της εγκατάστασης, με αποτέλεσμα τη διακοπή της διεργασίας για συντήρηση και καθαρισμό της.

Με τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας της βιομάζας σε υγρασία και τέφρα, με τη βοήθεια του διαγράμματος του Tanner μπορεί να καθορισθεί η διαθέσιμη καύσιμη ύλη της βιομάζας. Επιπλέον, καθορίζεται το επίπεδο διασφάλισης αυτοδιατηρούμενης καύσης, γεγονός που υποδηλώνει την καταλληλότητά της ως καύσιμη ύλη. Το διάγραμμα Tanner παρατίθεται ακολούθως.



**ΕΙΚΟΝΑ 1.3:** Διάγραμμα Tanner [9].

## 1.2.3 ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η βιομάζα που παράγεται κάθε χρόνο στον πλανήτη υπολογίζεται ότι ανέρχεται σε 172 δισεκατομμύρια τόνους ξηρού υλικού, με ενεργειακό περιεχόμενο δεκαπλάσιο της ενέργειας που καταναλίσκεται παγκοσμίως στο ίδιο διάστημα. Το τεράστιο αυτό ενεργειακό δυναμικό παραμένει κατά το μεγαλύτερο μέρος του ανεκμετάλλευτο. Μόνο το 1/7 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τη βιομάζα και αφορά κυρίως τις παραδοσιακές χρήσεις της, όπως τα καυσόξυλα [11]. Σύμφωνα με μία εκτίμηση των Ηνωμένων Εθνών, σε ένα βιώσιμο πλαίσιο, η βιομάζα έχει τη δυνατότητα, να υποστηρίξει περίπου το ήμισυ της παγκόσμιας πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας μέχρι το 2050. Είναι γεγονός ότι οι χώρες οι οποίες καταναλώνουν ενέργεια που προέρχεται από βιομάζα, σε μεγαλύτερη κλίμακα σε σχέση με τις υπόλοιπες είναι οι αναπτυσσόμενες. Έτσι, στην Αφρική το 65% της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από την εκμετάλλευση της βιομάζας, στην Ινδία το 50% και στη Λατινική Αμερική το 45%.

Στον χάρτη της εικόνας 1.4 φαίνονται οι διατιθέμενοι πόροι βιομάζας σε παγκόσμιο επίπεδο, σε ότι αφορά τις ενεργειακές καλλιέργειες, τους δασικούς πόρους και τα αστικά απόβλητα.





Σε ότι αφορά την ελληνική παραγωγή, το δυναμικό της βιομάζας από δασικά και αγροτικά υπολείμματα είναι εξαιρετικά μεγάλο. Εκτιμάται συνολικά σε 50.000 TJ (terajoule) ή 12.000 Ktoe (χιλιάδες ισοδύναμοι τόνοι πετρελαίου), το οποίο ισοδυναμεί με το 50% της σημερινής ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης. Σημειώνεται ότι λόγω της μικρότερης ενεργειακής πυκνότητας της βιομάζας σε σχέση με το πετρέλαιο, η καύση ενός τόνου βιομάζας ισοδυναμεί με την καύση 0,4 τόνων πετρελαίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσό αυτό αντιστοιχεί ενεργειακά στο 30-40% της ποσότητας του πετρελαίου που καταναλώνεται ετησίως στη χώρα μας. Παρά ταύτα, με τα σημερινά δεδομένα, καλύπτεται μόλις το 3% περίπου των ενεργειακών αναγκών της χώρας με τη χρήση της διαθέσιμης βιομάζας [11].

Η βιομάζα στη χώρα μας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμότητας στον οικιακό τομέα (μαγειρική, θέρμανση), για τη θέρμανση θερμοκηπίων, σε ελαιουργεία, καθώς και, με τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, στη βιομηχανία, σε μικρότερη όμως κλίμακα. Ως πρώτη ύλη στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιούνται υποπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου, ελαιοπυρηνόξυλα, κουκούτσια φρούτων, βιομάζα δασικής προέλευσης, άχυρο σιτηρών, υπολείμματα εκκοκισμού, κ.α.

Παράλληλα με την αξιοποίηση των διαφόρων γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων, σημαντικές ποσότητες βιομάζας είναι δυνατό να ληφθούν από τις ενεργειακές καλλιέργειες. Συγκριτικά με τα γεωργικά και δασικά υπολείμματα, οι καλλιέργειες αυτές έχουν το πλεονέκτημα της υψηλότερης παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς και της ευκολότερης συλλογής [11].

Είναι γεγονός ότι, οι ενεργειακές καλλιέργειες αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για τις αναπτυγμένες χώρες γενικότερα, καθώς γίνεται προσπάθεια να περιορισθούν, πέραν των περιβαλλοντικών και ενεργειακών προβλημάτων, και το πρόβλημα των γεωργικών πλεονασμάτων. Υπολογίζεται ότι, την προσεχή δεκαετία, θα μπορούσαν να αποδοθούν στις ενεργειακές καλλιέργειες 100-150 εκατομμύρια στρέμματα γεωργικής γης, προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα των επιδοτήσεων των γεωργικών πλεονασμάτων και της απόρριψης αυτών στις χωματερές, με ταυτόχρονη αύξηση των ενεργειακών πόρων [11]. Στη χώρα μας, για τους ίδιους 10 εκατομμύρια στρέμματα καλλιεργήσιμης γης λόνους, έχουν ńδn περιθωριοποιηθεί ή προβλέπεται να εγκαταλειφθούν στο άμεσο μέλλον. Αν η έκταση αυτή αποδοθεί για την ανάπτυξη ενεργειακών καλλιεργειών, το καθαρό όφελος σε ενέργεια που μπορεί να αναμένεται υπολογίζεται σε 5-6 ΜΤΙΠ (1 ΜΤΙΠ= 10<sup>6</sup> ΤΙΠ, όπου ΤΙΠ είναι: Τόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου) [11].

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, οι προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας στην Ελλάδα είναι εξαιρετικά ελπιδοφόρες και ευοίωνες, καθώς οι δυνατότητες εκμετάλλευσης της βιομάζας για ενεργειακούς σκοπούς είναι τεράστιες. Παράλληλα, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι, σε πολλές περιπτώσεις, οικονομικά ανταγωνιστική αυτής που παράγεται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

Σε ότι αφορά τις περιοχές της Ελλάδος, εμφανώς το μεγαλύτερο δυναμικό εμφανίζεται στις περιοχές των μεγάλων καλλιεργειών στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα καθώς επίσης και στην Ήπειρο, όπου τα διαθέσιμα γεωργικά, δασικά και ζωικά υπολείμματα θα μπορούσαν να καλύψουν μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών.

### 1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην πειραματική διερεύνηση της μετατροπής βιομάζας (φυτικής και από ξύλο) σε αέριο σύνθεσης μέσω της τεχνολογίας της *αεριοποίησης*.

Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε μονάδα *ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία* η οποία βρίσκεται εγκατεστημένη στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) στην περιοχή του Πικερμίου. Κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά είδη βιομάζας, ξύλο ιτιάς (willow), γιατρόφα (jatropha) και ηλιόσπορος (sunflower) και εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου που προκύπτει από την αεριοποίηση αυτών των ειδών βιομάζας στην εγκατάσταση.

Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διεργασίας η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκμετάλλευση της βιομάζας και της τεχνολογίας των ρευστοποιημένων κλινών, αφού η πειραματική εγκατάσταση είναι ένας αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Την τελευταία δεκαετία έχει παρατηρηθεί σημαντική εξέλιξη στον τομέα της ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας μέσω της ανάπτυξης νέων και βελτιωμένων τεχνολογιών ενεργειακής μετατροπής της με υψηλούς βαθμούς απόδοσης. Οι τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας που έχουν αναπτυχθεί, αφορούν στερεά, υγρά ή αέρια βιοκαύσιμα με σταθερές ιδιότητες και αυξημένη θερμογόνο δύναμη ανά μονάδα όγκου, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη διευκόλυνση χειρισμών όπως η μεταφορά και η αποθήκευση.

Η ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Διακρίνεται στις βιοχημικές, όπως είναι η αναερόβια χώνευση και η αλκοολική ζύμωση και στις θερμοχημικές, όπως είναι η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Η επιλογή της μεθόδου ενεργειακής εκμετάλλευσης προσδιορίζεται από τη σχέση του άνθρακα ως προς το άζωτο (C/N), από την περιεχόμενη υγρασία των υπολειμμάτων καθώς επίσης και από το επιθυμητό τελικό προϊόν.

**Βιοχημικές διεργασίες:** Ονομάζονται έτσι, επειδή είναι αποτέλεσμα μικροβιακής δράσης, χρησιμοποιούνται για προϊόντα και υπολείμματα, όπως λαχανικών κοπριάς, όπου η σχέση C/N<30 και η υγρασία >50%. Οι σημαντικότερες βιοχημικές διεργασίες είναι η αναερόβια ζύμωση για την παραγωγή βιοαερίου, η αλκοολική ζύμωση για την παραγωγή αιθυλικής αλκοόλης και η μηχανική σύνθλιψη για την παραγωγή φυτικών ελαίων [13].

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται μία διαγραμματική απεικόνιση των διεργασιών που μετατρέπουν τη βιομάζα σε βιοκαύσιμα με βιοχημικό τρόπο.



ΕΙΚΟΝΑ 2.1: Παραγωγή ενέργειας από βιομάζα με βιοχημικές διεργασίες [11].

**Θερμοχημικές διεργασίες:** Περιλαμβάνουν αντιδράσεις που εξαρτώνται από διαφορετικές θερμοκρασίες, για διαφορετικές συνθήκες οξείδωσης. Από τις διεργασίες αυτές οι πλέον γνωστές και χρησιμοποιούμενες είναι η καύση (για

παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού ή συμπαραγωγή και των δύο), η αεριοποίηση και η πυρόλυση. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στη μελέτη της θερμοχημικής διεργασίας της αεριοποίησης. Παρ' όλα αυτά γίνεται αναφορά και στις άλλες δύο διεργασίες αυτής της κατηγορίας, την καύση και την πυρόλυση, τόσο λόγω του τεχνολογικού ενδιαφέροντος και της ευρείας εφαρμογής τους, όσο και λόγω του γεγονότος ότι λαμβάνουν χώρα αρκετές αντιδράσεις πυρόλυσης και καύσης κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης.

Παρακάτω παρατίθενται διαγραμματικά οι θερμοχημικές διεργασίες ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας.





Στη συνέχεια αναλύονται οι διεργασίες αυτές της μετατροπής της βιομάζας εκτενέστερα.

## 2.1 ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

## 2.1.1 ΚΑΥΣΗ

Η άμεση καύση είναι η πιο διαδεδομένη θερμοχημική διεργασία εκμετάλλευσης της βιομάζας. Καύση θεωρείται η εξώθερμη χημική αντίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο, κατά την οποία ο άνθρακας οξειδώνεται πλήρως σε διοξείδιο του άνθρακα, ενώ τα μόρια του υδρογόνου μετατρέπονται σε νερό. Χαρακτηριστικό της καύσης είναι ότι συντελείται με αρκετά υψηλό ρυθμό απόδοσης θερμότητας, έτσι ώστε, η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκειά της, να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη. [15]. Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνεται η καύση της βιομάζας είναι 1000-1350°C (ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται) ενώ η ανάφλεξή της απαιτεί θερμοκρασίες της τάξεως των 550°C. Η ενέργεια που απελευθερώνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή

ηλεκτρισμό, για μαγείρεμα, για θέρμανση χώρων ή στη βιομηχανία. Η βιομάζα μπορεί να καεί σε μικρής κλίμακας μοντέρνους λέβητες ατμού για σκοπούς θέρμανσης ή σε μεγαλύτερους για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή τη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πιο σημαντικές τεχνολογίες αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται για την καύση της βιομάζας είναι η εσχάρα και η ρευστοποιημένη κλίνη [13].

## 2.1.2. ΠΥΡΟΛΥΣΗ

Η διεργασία της πυρόλυσης είναι η θερμική αποικοδόμηση των ανθρακούχων ενώσεων σε θερμοκρασίες μεταξύ 300-600°C, με πλήρη απουσία οξυγόνου (αέρας, οξυγόνο) [16]. Η θερμότητα που απαιτείται για την πυρόλυση, μπορεί να προέλθει με άμεσο τρόπο μέσω θερμών στερεών ή αέριων, ή με έμμεσο με εξωτερική καύση του παραγόμενου πυρολυτικού αερίου και θέρμανση μέσω επιφανειών [16]. Από τη διεργασία παράγονται στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα σε αναλογία 30%, 60% και 10% κατά βάρος αντίστοιχα. Τα στερεά προϊόντα αποτελούνται κυρίως από εξανθράκωμα υψηλού ποσοστού άνθρακα το οποίο παρουσιάζει υψηλή ενεργότητα. Τα υγρά προϊόντα είναι κυρίως αρωματικοί και φαινολικοί υδρογονάνθρακες και τα αέρια προϊόντα είναι χημικές ενώσεις ενεργειακού περιεχομένου. Η βασική ταξινόμηση των εφαρμογών πυρόλυσης προκύπτει από το ρυθμό θέρμανσης της καύσιμης ύλης. Κατά την αργή πυρόλυση ο ρυθμός θέρμανσης είναι τη γρήγορη πυρόλυση ο ρυθμός θέρμανσης κυμαίνεται στους 10<sup>4</sup>C/s και το κύριο προϊόν είναι τα υγρά έλαια [16].

Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται διαγραμματικά η αρχή λειτουργίας της πυρόλυσης ενώ στην 2.4 φαίνονται τα προϊόντα της διεργασίας αυτής.



ΕΙΚΟΝΑ 2.3: Γενική αρχή λειτουργίας της πυρόλυσης [13].



ΕΙΚΟΝΑ 2.4: Παραγόμενα προϊόντα κατά την πυρόλυση.

## 2.1.3 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Η αεριοποίηση βιομάζας είναι μία θερμοχημική διεργασία κατά την οποία η στερεή βιομάζα μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο, υπό την παρουσία είτε οξειδωτικού μέσου (αέρας, καθαρό οξυγόνο) είτε ατμού σε ποσότητα μικρότερη της στοιχειομετρικά απαιτούμενης για την πλήρη καύση του καυσίμου (λ<1) [17]. Το παραγόμενο αυτό αέριο αποτελεί μίγμα πολλών καύσιμων (και μη) αερίων, τα οποία είναι τα εξής: μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), υδρογόνο (H<sub>2</sub>), μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), υδρατμοί (H<sub>2</sub>O) ίχνη υδρογονανθράκων (π.χ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>,  $C_2H_6$ , κλπ) και άζωτο ( $N_2$ , σε περίπτωση που για τη διεργασία χρησιμοποιείται αέρας ως οξειδωτικό μέσο και όχι καθαρό οξυγόνο). Εκτός από τις παραπάνω ενώσεις, στο αέριο προϊόν εμφανίζονται και διάφοροι επιμολυντές, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι διάφορα σωματίδια, ενώσεις πίσσας, τέφρα, αμμωνία, οξέα και σύνθετοι υδρογονάνθρακες. Το καύσιμο προϊόν της διεργασίας της αεριοποίησης ονομάζεται αέριο σύνθεσης (syngas) [17]. Η σύσταση του παραγόμενου αερίου εξαρτάται τόσο από τις χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες (είδος και φύση βιομάζας, αδρανές υλικό, οξειδωτικό μέσο), όσο και από λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας (τεχνολογία αεριοποίησης, γεωμετρία αντιδραστήρα, συνθήκες λειτουργίας, κλπ) που καθορίζουν το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου. Το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο συντελείται η διεργασία αυτή είναι από 700-1350°C [17].

Η αεριοποίηση της βιομάζας θεωρείται μία πολύπλοκη τεχνολογία με πολύ λιγότερες εμπορικές εφαρμογές, σε σχέση με τη συνήθη καύση της βιομάζας. Τα πλεονεκτήματα όμως που παρουσιάζει, με κυριότερο όλων την πολύ μεγάλη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της μονάδας, έχει δημιουργήσει την επιθυμία για διαρκή πολλαπλασιασμό τέτοιου είδους μονάδων τα τελευταία χρόνια στις αναπτυγμένες τεχνολογικά περιοχές. Στην εικόνα 2.5 απεικονίζονται σχηματικά τα βήματα από την μορφοποίηση της βιομάζας μέχρι την παραγωγή ενέργειας μέσω της τεχνολογίας της αεριοποίησης.



Εικόνα 2.5: Βήματα για την παραγωγή ενέργειας μέσω αεριοποίησης βιομάζας [10].

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ

#### 3.1 ΣΤΑΔΙΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ως προς τη χημική πλευρά, η διεργασία της αεριοποίησης είναι αρκετά σύνθετη και περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους στάδια: ξήρανση (drying), πυρόλυση (pyrolysis), καύση (combustion), αεριοποίηση (gasification).

Κατά την ξήρανση της βιομάζας το καύσιμο ξηραίνεται και οδηγείται στη σταδιακή απομάκρυνση και απελευθέρωση της υγρασίας του μέσω των μηχανισμών της εξάτμισης και της διάχυσης των μορίων του νερού από το καύσιμο προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή συντελείται μέχρι θερμοκρασίες 150-200°C.

Στη συνέχεια, όπου επέρχεται το στάδιο της πυρόλυσης, όταν το ξηρό καύσιμο αρχίζει να θερμαίνεται στο εύρος των 200-550°C, ξεκινάει η θερμοχημική διάσπαση των οργανικών συστατικών της καύσιμης ύλης προς αέρια προϊόντα μη συμπυκνούμενα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και πίσσα η οποία βρίσκεται σε αέρια φάση, υπό την απουσία οξειδωτικού μέσου. Ταυτόχρονα με τη διάσπαση αυτή συμβαίνει και η απομάκρυνση των πτητικών συστατικών με αποτέλεσμα να παραμένει μόνο το εξανθράκωμα, το οποίο αποτελείται από σταθεροποιημένο άνθρακα και ανόργανα συστατικά. Ο ρυθμός της πυρόλυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από το είδος του καυσίμου. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά το στάδιο αυτό είναι ενδόθερμες, καθώς η διεξαγωγή τους απαιτεί κατανάλωση ενέργειας, με συνέπεια να δημιουργείται αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο σύστημα, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της ξήρανσης.

Έπειτα, οι εξώθερμες αντιδράσεις οξείδωσης και καύσης του άνθρακα πραγματοποιούνται μεταξύ του οξειδωτικού μέσου και των καύσιμων συστατικών της βιομάζας. Αυτές αποτελούν τις βασικότερες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στον αεριοποιητή, λόγω του γεγονότος ότι παράγουν όλη τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για την πραγμάτωση των υπόλοιπων ενδόθερμων αντιδράσεων της αεριοποίησης. Επίσης, κατά το στάδιο αυτό, παρέχεται η απαιτούμενη θερμότητα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της διεργασίας σε επιθυμητά επίπεδα [18]. Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά τα βήματα που πραγματοποιούνται κατά τη διεργασία της αεριοποίησης.



Εικόνα 3.1: Σχηματική παράσταση σταδίων της διεργσίας της αεριοποίησης [18].

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι αντιδράσεις που συντελούνται κατά τη διεργασία της αεριοποίησης, από τις οποίες καθορίζεται η ποιότητα του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

Είδος αντίδρασης	Αντίδραση	
Αντιδράσεις άνθρακα		
Boudouard	$C + CO_2 \iff 2CO$ (+172 kJ/mol)	(5.1)
Άνθρακα- ατμού	$C + H_2O \iff CO + H_2 (+131 \text{ kJ/mol})$	(5.2)
(water- gas or steam)		
Παραγωγής μεθανίου	$C + 2H_2 \iff CH_4$ (- 74.8 kJ/mol)	(5.3)
(hydrogasification)		
Αντιδράσεις οξείδωσης		
	$C + O_2 \longrightarrow CO_2$ (-394 kJ/mol)	(5.4)
	$CO + 1/2O_2 \longrightarrow CO_2 (-284 \text{ kJ/mol})$	(5.5)
	$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O (-803 \text{ kJ/m})$	nol) (5.6)
	H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O (-242 kJ/mol)	(5.7)

Αντίδραση μετατόπισης	$CO + H_2O \iff CO_2 + H_2 (-41.2 \text{ kJ/mol})$	(5.8)
Αντίδραση αναμόρφωσης	CH₄ + H₂O ← → CO + 3H₂ (+206 kJ/mol)	(5.9)
μεθανίου		
Αντιδράσεις μεθανίου		
	$2CO + 2H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O (-247 \text{ kJ/mol})$	(5.10)
	$CO + 3H_2 \iff CH_4 + H_2O (-206 \text{ kJ/mol})$	(5.11)
	$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O (-165 kJ/mol)$	(5.12)

Πίνακας 3.1: Αντιδράσεις που διέπουν τη διεργασία της αεριοποίησης [18].

Εκτός από τις αντιδράσεις που υποδεικνύουν την παραγωγή του παραγόμενου αερίου στο σύνολο της διεργασίας, παρατηρείται επίσης η παραγωγή συμπυκνώσιμων υδρογονανθράκων (πίσσες). Ως πίσσα μπορεί να ορισθεί το σύνολο των οργανικών μορίων με μοριακά βάρη μεγαλύτερα από το βάρος του βενζενίου (ΜΒ βενζενίου = 78). Η σύσταση της πίσσας είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα και τις συνθήκες υπό τις οποίες συμβαίνει η διεργασία της αεριοποίησης.

## 3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Η ενεργειακή απόδοση του παραγόμενου αερίου εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως είναι το είδος του αεριοποιητή στον οποίο γίνεται η διεργασία, οι συνθήκες των αντιδράσεων, το οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιείται, η θερμοκρασιακή κατάσταση που επικρατεί στον αντιδραστήρα καθώς και η πίεση υπό την οποία πραγματοποιείται η αεριοποίηση.

## 3.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που κρίνουν την ενεργειακή απόδοση του καυσίμου ως προς τη θερμογόνο ικανότητά του είναι το οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιείται. Αυτό μπορεί να προσδωθεί στο σύστημα είτε με αυτόθερμη θέρμανση είτε με αλλόθερμη. Αυτόθερμη θέρμανση είναι όταν ως οξειδωτικό μέσο χρησιμοποιείται αέρας ή οξυγόνο και η θερμότητα εξασφαλίζεται από τη μερική καύση του καυσίμου μέσα στον αντιδραστήρα. Αντιθέτως κατά την αλλόθερμη αεριοποίηση χρησιμοποιείται ατμός ως οξειδωτικό μέσο και η θερμότητα αποδίδεται στο σύστημα από εξωτερική πηγή [19].

#### Αυτόθερμη αεριοποίηση

Αλλόθερμη αεριοποίηση



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση αυτόθερμης και αλλόθερμης αεριοποίησης [23].

Στην περίπτωση που η διεργασία πραγματοποιείται με τη χρήση αέρα (η πιο οικονομική και συνήθης επιλογή), το αέριο σύνθεσης έχει σχετικά χαμηλή καθαρή θερμογόνο δύναμη (περίπου 4-7 MJ/m<sup>3</sup>) [20]. Αυτή η χαμηλής ποιότητας θερμογόνος δύναμη οφείλεται στο γεγονός ότι το οξειδωτικό μέσο αναμιγνύεται στο αέριο προϊόν με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο. Ένα τέτοιο αέριο κρίνεται κατάλληλο για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού με κατάλληλη χρήση του σε λέβητες, κινητήρες και διάφορους στροβίλους. Όταν κατά τη διεργασία χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο ή ατμός αντί για αέρας, η θερμογόνος δύναμη του αερίου μπορεί ακόμα και να τριπλασιασθεί (περίπου 10-18 MJ/m<sup>3</sup>) [20]. Στην περίπτωση αυτή το παραγόμενο αέριο προϊόν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για μετατροπή σε μεθανόλη και βενζίνη λόγω της υψηλής ενεργειακής ποιότητάς του.

### 3.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το φαινόμενο της αεριοποίησης είναι η θερμοκρασία στην οποία συντελείται η διεργασία. Η παράμετρος αυτή καθορίζει την ποιότητα του παραγόμενου αερίου (syngas) καθώς και το ποσοστό του καυσίμου που θα παραμείνει σε μορφή εξανθρακώματος, δηλαδή το ποσοστό μετατροπής του στερεού άνθρακα σε αέριο. Η θερμοκρασία του αεριοποιητή επηρεάζει όλες τις χημικές αντιδράσεις που εμπλέκονται στο φαινόμενο. Έτσι, με την αύξηση της παραμέτρου αυτής ευνοείται η παραγωγή των προϊόντων των ενδόθερμων αντιδράσεων της αεριοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της αντίδρασης boudouard που έχει παρουσιασθεί παραπάνω, η πρόσδοση θερμοκρασίας στο σύστημα πάνω από τους 700 °C οδηγεί στην αύξηση της σύστασης του CO με ταυτόχρονη μείωση του CO<sub>2</sub>. Ακόμα, η αντίδραση του άνθρακα με τους υδρατμούς (H<sub>2</sub>O) οδηγεί στην αύξηση του H<sub>2</sub>. Σε ότι αφορά τις συγκεντρώσεις του CH<sub>4</sub> παρατηρείται μικρή πτώση τους η οποία προκύπτει από την αντίδραση αναμόρφωσης του CH<sub>4</sub>. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα της επίδρασης της θερμοκρασίας στο αέριο σύνθεσης για τη διεργασία της αεριοποίησης.





Η θερμοκρασία στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ένας αεριοποιητής έχει ανώτερο όριο και εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του βιοκαυσίμου που χρησιμοποιείται όσο και από τα διάφορα σημεία τήξης των υλικών κατασκευής του αντιδραστήρα. Σε ότι αφορά τον πρώτο παράγοντα, η τέφρα κάθε είδους βιομάζας έχει διαφορετικό σημείο τήξης και είναι σημαντικό να διατηρείται η θερμοκρασία λειτουργίας κάτω από αυτό το επίπεδο, ώστε να αποφευχθεί η συσσωμάτωση και η επικάθιση της τέφρας. Όσο μεγαλύτερο ποσοστό αλκαλιμετάλλων (όπως κάλιο) έχει η τέφρα στη σύστασή της τόσο πιο εύκολο είναι να παρατηρηθεί το φαινόμενο της προσκόλησής της [21]. Το φαινόμενο αυτό των συσσωματώσεων σχετίζεται, δηλαδή, με την ποσότητα και την ποιότητα της τέφρας του κάθε βιοκαυσίμου. Όταν ξεπεραστεί η θερμοκρασία αυτή η θερμική αξία του παραγόμενου αερίου μειώνεται αισθητά.

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας του συστήματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την ποσότητα της παραγόμενης πίσσας. Η αύξησή της προκαλεί τη διάσπαση των βαρέων αρωματικών υδρογονανθράκων σε ελαφρύτερους με αποτέλεσμα να μειώνεται και η ποσότητα παραγωγής τους. Το γεγονός αυτό είναι επιθυμητό αρχικά επειδή οδηγεί στην αύξηση του ποσοστού του άνθρακα που μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης και στη συνέχεια επειδή δημιουργεί καλύτερες προϋποθέσεις κατά τη διαδικασία καθαρισμού του αερίου.

### 3.2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η πίεση λειτουργίας του αεριοποιητή σχετίζεται άμεσα με την σύσταση του παραγόμενου αερίου που θα προκύψει. Έτσι σε σταθερή θερμοκρασία, η αεριοποίηση υπό πίεση οδηγεί στην αύξηση της περιεκτικότητας του μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στο παραγόμενο αέριο. Παράλληλα, δημιουργείται πτώση του περιεχομένου του υδρογόνου (H<sub>2</sub>) και του μονοξειδίου του άνθρακα την μείωση της απόδοσης του αερίου σύνθεσης (syngas). Αντιθέτως ευνοείται η θερμαντική αξία του καυσίμου λόγω του υψηλότερου ποσοστού στο μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) [19].

Η αεριοποίηση υπό πίεση παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα έναντι αυτής υπό ατμοσφαιρική πίεση. Για τη χρήση του παραγόμενου αέριου σύνθεσης σε κάποια μηχανή (όπως είναι διάφοροι στρόβιλοι ή κινητήρες) απαιτείται η συμπίεση του, γεγονός που απαιτεί την κατανάλωση μεγάλου ποσού ενέργειας. Έτσι, αν το αέριο έχει υποστεί συμπίεση κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης, δηλαδή το παραγόμενο αέριο προκύψει υπό πίεση, τότε θα είναι εφικτή η απευθείας εισαγωγή του στη μηχανή με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η συμπίεση της τροφοδοσίας του αεριοποιητή είναι πολύ πιο εύκολη από τη συμπίεση του παραγόμενου προϊόντος. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της λειτουργίας υπό πίεση είναι η μείωση του μεγέθους της εγκατάστασης λόγω του ότι η συμπίεση του καυσίμου οδηγεί στην μείωση του.

Συμπεραίνεται ότι η πίεση της αεριοποίησης σχετίζεται κυρίως με τη χρήση που θα γίνει στο παραγόμενο αέριο. Για παράδειγμα, αν το προϊόν που παράγεται προορίζεται για μηχανή με αυξημένες απαιτήσεις πίεσης του αερίου αλλά μειωμένες απαιτήσεις απόδοσής του συνίσταται η αεριοποίηση υπό πίεση. Σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν προτεινόμενη η εφαρμογή της διεργασίας σε συνθήκες χαμηλής ή ατμοσφαιρικής πίεσης. Γενικά, σε περιπτώσεις που χρειάζεται ο συνδυασμός των δύο παραμέτρων έχει παρατηρηθεί ότι η βέλτιστη πίεση αεριοποίησης είναι 15-25 bar. Οι περισσότερες σύγχρονες εγκαταστάσεις είναι κατασκευασμένες για λειτουργία σε πίεση από 10 μέχρι 100 bar ανάλογα με το σκοπό της δημιουργίας τους [19]. Στην εικόνα 3.4 φαίνεται διαγραμματικά η επίδραση της πίεσης στο παραγόμενο αέριο για θερμοκρασία αεριοποίησης 1000 °C.



Εικόνα 3.4: Επίδραση της πίεσης στη σύσταση του παραγόμενου αερίου [19].

## 3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΙΣΣΑΣ

Κατά την αεριοποίηση της βιομάζας εκτός από το αέριο σύνθεσης παράγονται και κάποιες ανεπιθύμητες οργανικές ενώσεις του άνθρακα, οι οποίες ονομάζονται πίσσες (tars). Η πίσσα μπορεί να προκαλέσει λειτουργικά προβλήματα στην εγκατάσταση στην οποία γίνεται η διεργασία φράσσοντας τις σωληνώσεις σε διάφορα σημεία της μονάδας. Ακόμα, στις περισσότερες εφαρμογές, για τη χρήση του αέριου σύνθεσης απαιτείται προηγουμένως η απομάκρυνση και ο καθαρισμός των ενώσεων των πισσών.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.3, τα παράγωγα της αεριοποίησης της βιομάζας είναι το αέριο σύνθεσης (syngas) με σύσταση CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O και N<sub>2</sub>, οι οργανικές εννώσεις (πίσσες), κάποιες ανόργανες ενώσεις (όπως H<sub>2</sub>S, HCl, NH<sub>3</sub>, αλκαλικά μέταλλα) καθώς επίσης και σωματίδια. Οι οργανικές προσμίξεις κυμαίνονται από χαμηλού μοριακού βάρους υδρογονάνθρακες μέχρι υψηλού μοριακού βάρους πολυπυρηνικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Οι υδρογονάνθρακες με χαμηλό μοριακό βάρος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα σε κινητήριες μηχανές ή σε αεριοστρόβιλους [22]. Από την άλλη πλευρά, είναι ανεπιθύμητοι σε εφαρμογές όπως τα κελιά καυσίμου και στη σύνθεση της μεθανόλης (methanol synthesis). Οι υδρογονάνθρακες υψηλότερου μοριακού βάρους είναι γνωστοί ως πίσσες. Αυτές οι ενώσεις είναι πυρίμαχες, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η απομάκρυνσή τους με θερμικές, καταλυτικές ή φυσικές διεργασίες . Επίσης, οι πίσσες μπορούν να συμπυκνώνονται και να δημιουργούν ακόμα πιο πολύπλοκες δομές στους σωλήνες εξόδου, στους εναλλάκτες θερμότητας ή σε φίλτρα κατακράτησης των σωματιδίων. Έτσι, μειώνεται η ελεύθερη διατομή των σωληνώσεων, γεγονός που οδηγεί στην ελάττωση του συνολικού βαθμού απόδοσης της διεργασίας και στην αύξηση του κόστους συντήρησης επιτυχούς λειτουργίας [22].

Οι πίσσες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης ύστερα από μία σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων. Ο σχηματισμός των πισσών είναι άμεσα εξαρτώμενος από τις συνθήκες των αντιδράσεων. Με την αύξηση της θερμοκρασίας των αντιδράσεων, ευννοείται η διάσπασή τους αφού οι δεσμοί των πολυκυκλικών υδρογονανθράκων σπάνε ευκολότερα και το ποσοστό του άνθρακα του καυσίμου που μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης μεγιστοποιείται. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το είδος πισσών που σχηματίζονται ανάλογα με τη θερμοκρασία της διεργασίας.



Εικόνα 3.5: Εξέλιξη των πισσών προτινόμενο από τον Elliott [22].

Στο παρακάτω διάγραμμα παρίσταται η σχέση μεταξύ της απόδοσης των πισσών και της θερμοκρασίας των αντιδράσεων.



Εικόνα 3.6: Παραγωγή πισσών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης [22].
## 3.4 ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΩΝ

Κατά τη διεργασία της αεριοποίησης, το παραγόμενο αέριο σύνθεσης διαφέρει σε ποσότητα και ποιότητα καθώς και σε θερμογόνο ικανότητα, ανάλογα με τον τύπο αεριοποιητή στον οποίο συντελείται η διεργασία και το μέσο που χρησιμοποιείται (αέρας, ατμός, οξυγόνο). Ο βασικός διαχωρισμός των αντιδραστήρων αεριοποίησης σχετίζεται με το βαθμό ρευστοποίησης της κλίνης. Έτσι, οι δύο κύριες κατηγορίες αεριοποιητών είναι: *Αεριοποιητές στατικής κλίνης (fixed bed gasifiers) και αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed gasifiers)* [25].

## 3.4.1 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΕΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΛΙΝΗΣ

Οι αεριοποιητές αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε μικρής κλίμακας συστήματα αεριοποίησης με παραγωγή ισχύος μικρότερη από 5 MW<sub>th</sub> ή 500 kW<sub>el</sub>. Μπορούν να διαχωρισθούν ανάλογα με τη διεύθυνση της ροής του ρευστού διαμέσου του αντιδραστήρα ως ανοδικοί (upward), καθοδικοί (downward) και οριζόντιοι (horizontal) ή ανάλογα με τη διεύθυνση της ροής των στερεών σε σχέση με το αέριο ρεύμα ως αντιρροής (counter-current), ομορροής (co-current) ή εγκάρσιου ρεύματος (cross-current).

Σε κάθε περίπτωση, η τροφοδοσία του καυσίμου γίνεται από την κορυφή του αντιδραστήρα και κινείται καθοδικά μέσω της βαρύτητας ενώ η τέφρα που προκύπτει κατακάθεται στο κάτω μέρος του. Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται μέσω ενός φυσητήρα ή από συμπιεστή.

Οι **ανοδικής ροής αντιδραστήρες ή αντιδραστήρες αντιρροής** (updraft or counter-current gasifiers) παράγουν ζεστό αέριο (300-600 °C) το οποίο έχει υψηλή περιεκτικότητα πυρολυτικής πίσσας καθώς και τέφρας και αιθάλης. Σε περίπτωση που το μέσο αεριοποίησης είναι ο ατμός παρατηρείται στο αέριο σύνθεσης παραγωγή υδρογόνου υψηλότερης περιεκτικότητας. Το αέριο σύνθεσης είναι κατάλληλο για χρήση σε καυστήρες αερίου αλλά για την τροφοδοσία μηχανών είναι απαραίτητη η ψύξη και ο καθαρισμός του από πίσσες. Λόγω του γεγονότος ότι οι πίσσες εκπροσωπούν σημαντικό κομμάτι της θερμαντικής αξίας του παραγόμενου αερίου, η αποβολή τους μειώνει την απόδοση του αερίου [25].

Σε αυτό τον αεριοποιητή η εισαγωγή του αέρα γίνεται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα ενώ το παραγόμενο αέριο εξέρχεται από την κορυφή του. Κατά την εισαγωγή του, το κάυσιμο υπόκειται σε διεργασίες ξήρανσης, αποπτητικοποίησης, καύσης και αεριοποίησης οι οποίες επηρεάζονται από τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης και από τις επικρατούσες συνθήκες στο σύστημα [9]. Οι καθοδικής ροής αντιδραστήρες ή αντιδραστήρες ομορροής (downdraft or co-current gasifiers) παράγουν ζεστό αέριο (700-750 <sup>0</sup>C) απαλλαγμένο από πίσσες. Κατά την καθοδική κλίνη παρατηρείται μία συστολή που είναι γνωστή ως λαιμός στην οποία συντελούνται οι περισσότερες από τις αντιδράσεις αεριοποίησης. Τα προϊόντα των αντιδράσεων αναμιγνύονται με την ταραχώδη περιοχή υψηλών θερμοκρασιών γύρω από το λαιμό, γεγονός που ευννοεί τη διάσπαση των πισσών. Διάσπαση πισσών παρατηρείται επίσης κάτω από το λαιμό όπου η κλίνη υπολείπεται σε άνθρακα και εξανθράκωμα (char) όπου η διεργασία της αεριοποίησης έχει ολοκληρωθεί [25]. Μετά από ψύξη και καθαρισμό του αερίου είναι εφικτή η αξιοποίησή του με τροφοδοσία σε μηχανές εσωτερικής καύσης.

Στον αεριοποιητή αυτόν η εισαγωγή του αέρα γίνεται από την κορυφή του αντιδραστήρα ενώ το παραγόμενο αέριο εξέρχεται από το κάτω μέρος του. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μετά την εισαγωγή του αέρα στον αεριοποιητή ανοδικής ροής, πραγματοποιούνται και σε αυτή την περίπτωση με διαφορετική αλληλουχία επιτυγχάνοντας διαφορετικές συνθήκες διεργασίας και ποιότητας παραγόμενων προϊόντων λόγω της διαφορετικής αρχής λειτουργίας των δύο αντιδραστήρων.

Στους αντιδραστήρες σταθερής κλίνης, είτε ανοδικής είτε καθοδικής ροής, οι παραπάνω διεργασίες πραγματοποιούνται σταδιακά δημιουργώντας διαδοχικά στρώματα σχετικά ευδιάκριτα. Στην εικόνα 3.7 φαίνονται διαχωρισμένες οι διεργασίες που συντελούνται σε τέτοιους αντιδραστήρες.



**Εικόνα 3.7:** Στάδια διεργασιών σε σταθερή κλίνη. α) Ανοδικής ροής, β) Καθοδικής ροής [16].

### 3.4.2 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ

Οι κλίνες αυτές χαρακτηρίζονται από πολύ καλή ανάμιξη των στερεών με το γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία και διατήρηση ρευστό, ενός ισοθερμοκρασιακού προφίλ σε όλο το ύψος του αντιδραστήρα. Επίσης, παρατηρούνται υψηλοί ρυθμοί αντιδράσεων λόγω της καλής επαφής του ρευστού με τα στερεά. Το αρχικό αδρανές υλικό της κλίνης (bed material) είναι συνήθως πυριτική άμμος, όμως χρησιμοποιούνται επίσης, οξείδιο του αλουμινίου (alumina) και άλλα πυρίμαχα οξείδια, όπως είναι ο ολιβίνης, με σκοπό την αποφυγή ή τον περιορισμό συσσωματώσεων κατά τη διάρκεια της διεργασίας της αεριοποίησης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης διάφοροι καταλύτες για τη μείωση της παραγωγής των πισσών και την τροποποίηση της έκθεσης του παραγόμενου αερίου [24].

Μία τυπική θερμοκρασία λειτουργίας για την αεριοποίηση βιομάζας είναι μεταξύ 700 και 950 <sup>0</sup>C. Το μεγαλύτερο μέρος της μετατροπής της βιομάζας σε αέριο σύνθεσης συμβαίνει μέσα στην κλίνη. Η μετατροπή του εισαγόμενου άνθρακα σε παραγόμενο αέριο (CO<sub>2</sub>, CO και CH<sub>4</sub>) πλησιάζει το 100%, εκτός αν υπάρχει υπερβολική μεταφορά λεπτών σωματιδίων, γεγονός που συμβαίνει ευκολότερα στην περίπτωση που η τροφοδοσία της βιομάζας γίνεται από την κορυφή του αντιδραστήρα.

Όταν ο αεριοποιητής λειτουργεί σε συνθήκες αναβράζουσας κλίνης, η ποσότητα της πίσσας στο παραγόμενο αέριο προσδιορίζεται μεταξύ αυτής που προκύπτει σε μια κλίνη ανοδικής ροής και μίας καθοδικής κλίνης. Σε μία τέτοια διάταξη, παρατηρείται μετατροπή της βιομάζας σε αέριο σύνθεσης ακόμα και στην περιοχή του αντιδραστήρα που βρίσκεται πάνω από την κλίνη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία ποσότητα λεπτών σωματιδίων ξεφεύγουν από την πυκνή φάση της κλίνης με αποτέλεσμα να συντελούνται αντιδράσεις και σε αυτό το κομμάτι. Επίσης, στην περιοχή αυτή παρατηρείται θερμική διάσπαση των ενώσεων των πισσών σε απλούστερες, γεγονός που επηρεάζει και το παραγόμενο αέριο [25].

Στις ρευστοποιημένες κλίνες ανακυκλοφορίας, η ταχύτητα ρευστοποίησης της κλίνης είναι τόσο μεγάλη ώστε μαζί με το παραγόμενο αέριο να παρασύρεται μεγάλη ποσότητα στερεών έξω από τον ανοδικό σωλήνα του αντιδραστήρα. Αυτά τα συστήματα έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την ανακυκλοφορία του παρασυρόμενου υλικού, πίσω στην ρευστοποιημένη κλίνη. Έτσι, βελτιστοποιείται ο βαθμός μετατροπής του άνθρακα σε σχέση με τον αντίστοιχο μίας απλής ρευστοποιημένης κλίνης.

Το πιο κοινό πρόβλημα που εμφανίζεται στις ρευστοποιημένες κλίνες είναι η ξαφνική απορευστοποίηση του συστήματος. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι σε κάποια θερμοκρασία ξεκινούν να εμφανίζονται μέσα στην κλίνη φαινόμενα συσσωματώσεων των στερεών με αποτέλεσμα να φράσσεται σιγά σιγά η σωλήνωση στην οποία συντελείται η διεργασία και να απορευστοποιείται η κλίνη. Η θερμοκρασία εμφάνισης του φαινομένου αυτού εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά της τέφρας κάθε καυσίμου. Κάποιες αλκαλικές ενώσεις από την τέφρα της βιομάζας, όπως το νάτριο και το ανθρακικό κάλιο, διαμορφώνουν ευτηκτικά χαμηλής τήξης με το πυρίτιο του αδρανούς υλικού.Το γεγονός αυτό οδηγεί στις συσσωματώσεις με περαιτέρω συνέπεια την απορευστοποίηση της κλίνης. Ωστόσο, η γνώση των θερμικών χαρακτηριστικών της τέφρας, διευκολύνει τον καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός συστήματος ρευστοποιημένης κλίνης. Δηλαδή, είναι εφικτή η πρόβλεψη του εύρους λειτουργίας του συστήματος για τα περισσότερα είδη βιομάζας.

Στην εικόνα 3.8 απεικονίζονται τα δύο διαφορετικά συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης που αναφέρθηκαν παραπάνω.



α.

**Εικόνα 3.8: α)** Ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδων. **β)** Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας [24].

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

#### ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

**Ρευστοποίηση (fluidization)** είναι η διαδικασία μετατροπής ενός στρώματος ακίνητων στερεών σωματιδίων σε στρώμα αιωρούμενων υπό την επενέργεια ανοδικού υγρού ή αέριου ρεύματος. Το στρώμα των αιωρούμενων σωματιδίων ονομάζεται **ρευστοποιημένη κλίνη (fluidized bed)** [26].

#### 4.1 ΣΤΑΔΙΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ταχύτητα ροής του εισερχόμενου ρευστού (συνήθως αέρας) καθορίζει το είδος της ρευστοποίησης. Έτσι, η επίδραση του εισερχόμενου ρευστού στα αιωρούμενα στερεά σωματίδια και οι ιδιότητες που αποκτούν αυτά εξαρτώνται από το μέγεθος της ταχύτητας αυτής.

Όταν ο ρυθμός ροής είναι χαμηλός, το ρευστό απλώς διεισδύει μέσω των κενών χώρων που υπάρχουν ανάμεσα από τα στατικά στερεά σωματίδια. Αυτή είναι η περίπτωση μίας σταθερής κλίνης (fixed bed). Με αύξηση του ρυθμού ροής του εισαγόμενου ρευστού, τα σωματίδια απομακρύνονται μεταξύ τους και μερικά αρχίζουν να πάλλονται και να μετακινούνται σε περιορισμένο εύρος περιοχής. Αυτή είναι η περίπτωση της διεσταλμένης κλίνης (expanded bed).

Σε ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα, φθάνει ένα σημείο οπού όλα τα σωματίδια ξεκινούν να αιωρούνται οριακά και να αποκτούν συμπεριφορά ρευστού. Στο σημείο αυτό, η δύναμη τριβής μεταξύ ενός σωματιδίου και του ρευστού ανοδικής φοράς εξισώνεται με το βάρος του σωματιδίου, η κάθετη συνιστώσα της δύναμης συμπίεσης μεταξύ των γειτονικών σωματιδίων εξαφανίζεται και η πτώση πίεσης μεταξύ δύο οποιονδήποτε τμημάτων της κλίνης περίπου ισοδυναμεί με το βάρος του ρευστού και των σωματιδίων στο αναφερόμενο τμήμα [27]. Στην περίπτωση αυτή η κλίνη θεωρείται ότι οριακά ρευστοποιείται και ονομάζεται κλίνη ελάχιστης ρευστοποίησης (bed at minimum fluidization).

Σε συστήματα ροής υγρών ρευστών διαμέσου μικρών σωματιδίων, η αύξηση της ταχύτητας της ροής πάνω από την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης συνήθως προκαλεί μία ομαλή και ομοιόμορφη μεταβολή του όγκου της κλίνης. Τα στερεά σωματίδια κινούνται ως ανεξάρτητα σώματα κατά τυχαίες διευθύνσεις διαμέσου όλου του όγκου του υγρού. Η κίνηση αυτή γίνεται πιο έντονη με την αύξηση της ταχύτητας ροής του υγρού, αλλά η πυκνότητα της κλίνης σε δεδομένη ταχύτητα είναι η ίδια σε όλα τα τμήματά της [26]. Σε αυτή την περίπτωση, οι αστάθειες στη ροή είναι πολύ μικρές, σχεδόν ανύπαρκτες, ενώ υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας δεν παρατηρείται καμία ανομοιομορφία στην πυκνότητα της κλίνης. Σε ότι αφορά τα συστήματα ροής αερίων διαμέσου στρωμάτων μικρών σωματιδίων, παρατηρείται μία τελείως διαφορετική συμπεριφορά στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Έτσι, με την αύξηση του ρυθμού ροής πάνω από την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης, παρουσιάζονται μεγάλες αστάθειες ενώ η μεγαλύτερη ποσότητα αερίου διέρχεται από την κλίνη σε μορφή φυσαλίδων (bubbling) οι οποίες είναι σχεδόν ελεύθερες στερεών και μόνο ένα μικρό κλάσμα του αερίου ρέει στα κανάλια (channeling) μεταξύ των σωματιδίων. Τα σωματίδια κινούνται ακανόνιστα μέσα στην κλίνη και στο χώρο μεταξύ των φυσαλίδων το κλάσμα των διακένων είναι περίπου το ίδιο με εκείνο στην έναρξη της ρευστοποίησης [27]. Σε ακόμα υψηλότερη ταχύτητα οι αστάθειες στη ροή γίνονται όλο και πιο βίαιες και η κίνηση των στερεών όλο και πιο έντονη. Μία τέτοια κλίνη ονομάζεται *ρευστοποιημένη κλίνη φυσαλίδων (bubbling fluidized bed).* 

Με περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του ρευστού αρχίζουν να δημιουργούνται δύο φάσεις στην κλίνη. Το κάτω μέρος της, από όπου γίνεται η εισαγωγή του ρευστού, αποτελεί την πυκνή φάση (dense bed) και έχει ένα σταθερό και ξεκάθαρο στρώμα σωματιδίων. Από ένα ύψος της κλίνης η σταθερή στρώση σωματιδίων δεν υπάρχει, τα σωματίδια αιωρούνται σε πολύ μικρότερη ποσότητα και η πυκνότητά τους μειώνεται όσο απομακρύνονται από την πυκνή φάση [27]. Τα σωματίδια έχουν εισέλθει στην αραιή φάση (lean or dispersed phase).

Σε μία επαρκώς υψηλή ταχύτητα ροής, την τερματική ταχύτητα, η άνω επιφάνεια της κλίνης εξαφανίζεται και τα στερεά αρχίζουν να μεταφέρονται έξω από την κλίνη παρασυρόμενα από το ρεύμα του ρευστού. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται σε ρευστοποιημένη κλίνη παράσυρσης σωματιδίων (entrainment fluidized bed) [27].

Όσο αυξάνει η ταχύτητα του αερίου τόσο πιο εύκολα εξέρχονται τα σωματίδια από την κλίνη παρασυρόμενα από τη ροή. Παράλληλα όμως αυξάνει και το μέγεθος των φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες αυτές αρχίζουν να συγχωνεύονται και να μεγαλώνουν όσο κινούνται προς τα ανώτερα επίπεδα της κλίνης. Σε αρκετά ψηλές κλίνες με μικρή διάμετρο μπορούν να γίνουν τόσο μεγάλες ώστε να εξαπλωθούν σε όλο το ύψος της κλίνης. Σε αυτή την περίπτωση η κλίνη βρίσκεται σε κατάσταση ταραχώδους ρευστοποίησης με φυσαλίδες (slugging mode). Το τμήμα της κλίνης πάνω από την διογκωμένη φυσαλίδα ωθείται προς τα πάνω. Τα σωματίδια πολύ λεπτής κοκκομετρίας ρέουν προς το κάτω μέρος της κλίνης γύρω από το κενό που έχει δημιουργηθεί. Αντιθέτως τα πολύ χονδρόκοκκα σωματίδια αρχίζουν να σπάζουν το κενό αέρος ώσπου τελικά αυτό αποσυντίθεται. Στη συνέχεια αρχίζει να σχηματίζεται επόμενη διογκωμένη φυσσαλίδα (slug) οπότε η ασταθής αυτή κατάσταση επαναλαμβάνεται [27]. Αυτό γενικά είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο καθώς διευρύνει το πρόβλημα της παράσυρσης σωματιδίων και εμποδίζει την ομοιόμορφη αιώρησή τους.







Εικόνα 4.1: Κατηγορίες ρευστοποιημένων κλινών [27].

# 4.2 Μαθηματική ανάλυση του φαινομένου

## 4.2.1 ΚΙΝΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΡΕΥΣΤΩΝ

Η κίνηση ενός σωματιδίου διαμέσου ρευστού, απαιτεί την εξάσκηση εξωτερικής δύναμης πάνω στο σωματίδιο. Αυτή είναι συνήθως η δύναμη βαρύτητας (όταν δεν είναι επαρκώς ισχυρή, χρησιμοποιείται η φυγόκεντρος δύναμη). Εκτός από την εξωτερική δύναμη, στο σωματίδιο ασκούνται και η δύναμη της άνωσης, η οποία έχει φορά προς τα άνω, καθώς επίσης και η οπισθέλκουσα δύναμη, η οποία ενεργεί παράλληλα προς τη διεύθυνση της κίνησης του σωματιδίου, αλλά με αντίθετη φορά [26].

Θεωρείται η κίνηση ενός σωματιδίου, μάζας m, διαμέσου ενός ρευστού υπό την επίδραση της βαρύτητας όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.





Η συνισταμένη των δυνάμεων που ενεργεί στο σωματίδιο, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, είναι:

$$\Sigma F = F_g - F_b - F_D \tag{4.1}$$

Όπου Fg: Η δύναμη της βαρύτητας

F<sub>b</sub>: Η δύναμη της άνωσης

F<sub>D</sub>: Η οπισθέλκουσα δύναμη

Η δύναμη  $F_g$  εκφράζεται ως το γινόμενο της μάζας του σωματιδίου επί την επιτάχυνση της βαρύτητας. Η άνωση, σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη, είναι ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζεται από το σωματίδιο και η οπισθέλκουσα δύναμη εξαρτάται από το συντελεστή οπισθέλκουσας και τη μετωπική επιφάνεια του σωματιδίου.

Συγκεντρωτικά είναι:

$$F_{g} = mg \tag{4.2}$$

$$F_{b} = \rho_{g}gV = \frac{mg\rho_{g}}{\rho_{s}}$$
(4.3)

$$F_{D} = C_D \frac{\rho_g u_z^2}{2} A \tag{4.4}$$

Όπου, m: η μάζα του σωματιδίου

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

 $\rho_g$ και  $\rho_s$ : η πυκνότητα του ρευστού και του σωματιδίου αντίστοιχα

 $C_{D}$ : ο συντελεστής οπισθέλκουσας

 $u_z$ : η σχετική ταχύτητα σωματιδίου- ρευστού

Α: η μετωπική επιφάνεια του σωματιδίου

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_D$  εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds (Re) και δίνεται από αρκετές διαφορετικές εμπειρικές σχέσεις ανάλογα με το βαθμό σφαιρικότητας του σωματιδίου που κινείται μέσα στο ρευστό [26].

# 4.2.2 ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ (ut)

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η οπισθέλκουσα δύναμη, σε αντίθεση με τη δύναμη της βαρύτητας και την άνωση, δεν είναι σταθερή καθώς εξαρτάται από τη σφαιρικότητα, το μέγεθος του σωματιδίου και το τετράγωνο της σχετικής ταχύτητας του αερίου με το στερεό. Έτσι, ανάλογα με τη συμπεριφορά της σχετικής αυτής ταχύτητας, η οπισθέλκουσα δύναμη μπορεί είτε να αυξάνεται είτε να μειώνεται συναρτήσει του χρόνου. Η συνισταμένη των δυνάμεων έχει αντίστροφη συμπεριφορά σε σχέση με την F<sub>D</sub>, οπότε το σωματίδιο μπορεί είτε να κινείται προς τα άνω είτε προς τα κάτω. Η οριακή ταχύτητα του ρευστού για την οποία η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκείται σε ένα σωματίδιο που αιωρείται μέσα στην κλίνη είναι μηδενική, ονομάζεται *τελική ταχύτητα u*<sub>t</sub>[26].Σε αυτή την περίπτωση, ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας του αερίου είναι μηδέν, οπότε αν το σωματίδιο βρεθεί μέσα στο ρευστό θα αιωρείται σε μία σταθερή θέση.

Από το δεύτερο νόμο του Newton είναι:

$$F_{g} - F_{b} - F_{D} = 0 \implies$$

$$mg - \frac{mg\rho_{g}}{\rho_{s}} - C_{D} \frac{u_{t}^{2}m\rho_{g}}{2} A = 0 \implies$$

$$u_{t} = \sqrt{\frac{2mg(\rho_{s} - \rho_{g})}{C_{D}A\rho_{s}\rho_{g}}} \qquad (4.5)$$

Αν τα σωματίδια είναι σφαιρικά διαμέτρου d<sub>σ</sub> με μάζα  $m = \frac{\pi \rho_s d_s^3}{6}$  και μετωπική επιφάνεια  $A = \frac{\pi d_s^2}{4}$  τότε η τελική ταχύτητα είναι:

$$u_t = \sqrt{\frac{4gd_s(\rho_s - \rho_g)}{3C_D\rho_g}} \tag{4.6}$$

#### 4.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η ανοδική ροή ρευστού σε μια κλίνη ασκεί στο στρώμα των σωματιδίων μία δύναμη λόγω της οποίας προκαλείται *πτώση πίεσης* καθ' ύψος της κλίνης. Αυτή εξαρτάται από το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) και από το πορώδες ε.

Ως πορώδες ε ενός στρώματος σωματιδίων ορίζεται το κλάσμα του όγκου του στρώματος το οποίο είναι ελεύθερο σωματιδίων [26]. Είναι δηλαδή, το κενό που δημιουργείται ανάμεσα στα σωματίδια όταν αυτά ρευστοποιούνται λόγω της ανοδικής ροής. Το ε εξαρτάται από το σχήμα (βαθμός σφαιρικότητας) και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Μαθηματικά μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{V - V_S}{V} = 1 - \frac{V_S}{V} \tag{4.7}$$

όπου *V<sub>s</sub>* είναι ο όγκος των στερεών που περιλαμβάνονται στον ολικό όγκο V του στρώματος [26].

Έχουν διατυπωθεί αρκετές εκφράσεις για τον προσδιορισμό της πτώσης πίεσης (Δρ) κατά μήκος μίας κλίνης. Το 1952 ο χημικός μηχανικός Sabri Ergun διατύπωσε

μαθηματικά το συσχετισμό μεταξύ της καθ' ύψους πτώσης πίεσης (Δp/L) σε μία σταθερή κλίνη, σε σχέση με το μέγεθος των στερεών και την επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού (u<sub>f</sub>). Έτσι, κατά τον Ergun, η πτώση πίεσης σε σταθερή κλίνη για ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους σωματιδίων είναι [27]:

$$\frac{\Delta p}{L}g_{c} = 150 \frac{(1-\varepsilon_{m})^{2}}{\varepsilon_{m}^{3}} \frac{\mu u_{\varphi}}{(\varphi_{s}d_{p})^{2}} + 1.75 \frac{1-\varepsilon_{m}}{\varepsilon_{m}^{3}} \frac{\rho_{g}u_{\varphi}^{2}}{\varphi_{s}d_{p}}$$
(4.8)

Όπου είναι:

L: ύψος της κλίνης

 $\varepsilon_m$ : πορώδες για σταθερή κλίνη (voidage)

μ: κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού

 $\rho_{g}$ :πυκνότητα του ρευστού

 $u_{o}$ : φαινόμενη ταχύτητα του ρευστού

d<sub>p</sub>: μέση διάμετρος των σωματιδίων

 $φ_s$ : σφαιρικότητα των σωματιδίων

Ως σφαιρκότητα ορίζεται ο λόγος της επιφάνειας σφαίρας διαμέτρου  $d_p$  προς την πραγματική επιφάνεια του σωματιδίου για τον ίδιο όγκο [26]. Δηλαδή,

Από αυτόν τον προσδιορισμό προκύπτει ότι είναι  $\varphi_s$ =1 για σφαιρικά σωματίδια και 0 <  $\varphi_s$  < 1 για όλα τα άλλα σχήματα σωματιδίων.

Η φαινόμενη ταχύτητα του ρευστού u<sub>φ</sub> αναφέρεται στην ταχύτητα που έχει η ροή μόλις πριν συναντήσει το πρώτο στρώμα των σωματιδίων και ορίζεται από τη σχέση:

$$u_{\varphi} = \frac{V}{A} = \varepsilon u \tag{4.9}$$

## 4.2.4 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ $(u_{mf})$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η έναρξη της ρευστοποίησης ενός στρώματος σωματιδίων γίνεται μόλις η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη που ασκείται στα στερεά από το ρευστό, εξισώνεται με το βάρος των σωματιδίων. Τη στιγμή αυτή, η πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης ισούται με το γινόμενο της άνωσης με το βάρος των σωματιδίων ανηγμένα στον όγκο της κλίνης [27]. Έτσι, για τις συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \qquad (4.10)$$

Σε μία κλίνη κατά την έναρξη της ρευστοποίησης το κενό μεταξύ των σωματιδίων (voidage) είναι λίγο μεγαλύτερο από αυτό σε μία σταθερή κλίνη. Έτσι, ως  $\varepsilon_{mf}$  συμβολίζεται το κενό μεταξύ των σωματιδίων σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης, και ως  $L_{mf}$  το μήκος της κλίνης στην κατάσταση αυτή.

Στον ακόλουθο πίνακα εκτιμάται η  $\varepsilon_{mf}$  (πορώδες) για διάφορα μεγέθη σωματιδίων, ύστερα από πειραματική διαπίστωση.

Μέγεθος (mm)							
Σωματίδια	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
Αιχμηρή άμμος $\varphi_s$ =0.67	-	0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
Στρογγυλή άμμος $\varphi_s$ =0.86	-	0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	-
Μικτή στρογγυλή άμμος	-	-	0.42	0.42	0.41	-	-
Σκόνη άνθρακα και γυαλιού	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	
Ενεργός άνθρακας	0.74	0.72	0.71	0.69	-	-	-
Ανθρακοπυρίτιο	-	0.61	0.59	0.56	0.56	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Πορώδες υλικών σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης ( $\varepsilon_{mf}$ ) [27].

Η επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης (ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης,  $u_{mf}$ ) μπορεί να υπολογιστεί με συνδυασμό των σχέσεων (4.8) και (4.10). Προκύπτει μία έκφραση για το τετράγωνο της ταχύτητας αυτής σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, το πορώδες του υλικού, τη συνεκτικότητα του ρευστού και την πυκνότητα του ρευστού και των στερεών, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.11).

$$\frac{1.75}{\varphi_s \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu}\right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varphi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu}\right) = \frac{(\rho_s - \rho_g) \rho_g g d_p^3}{\mu^2} \quad (4.11)$$

Με βάση την ισότητα αυτή για τον προσδιορισμό της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης απαιτείται η γνώση του πορώδους του υλικού που ρευστοποιείται και της σφαιρικότητας των σωματιδίων. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλη, καθώς αποτελεί την απλούστερη μέθοδο προσδιορισμού της  $u_{mf}$  ενώ ταυτόχρονα δίνει πρόβλεψή της με αρκετά μικρή απόκλιση από την πραγματική τιμή.

## 4.2.5 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ( $u_{mb}$ )

Η εμφάνιση φυσαλίδων σε μία ρευστοποιημένη κλίνη προκαλείται με την αύξηση της ταχύτητας της ροής. Η ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων ( $u_{mb}$ , minimum bubbling velocity) δεν είναι μία σταθερή τιμή, αλλά εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κλίνης και από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που πρόκειται να ρευστοποιηθούν.

Τα λεπτά σωματίδια (όπως οι καταλύτες πυρόλυσης), σε αντίθεση με τα πιο χονδρά, έχουν την ιδιότητα να ρευστοποιούνται σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την  $u_{mf}$  χωρίς να σχηματίζονται φυσαλίδες. Τότε η κλίνη διαστέλλεται ομοιόμορφα και ομαλά μέχρι μία ταχύτητα όπου ξεκινούν να εμφανίζονται μικρές φυσαλίδες στην επιφάνεια. Με επιπλέον αύξηση της ταχύτητας ροής, όπως έχει αναφερθεί, οι φυσαλίδες αρχίζουν να διογκώνονται και να καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο μέσα στην κλίνη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ύψους της κλίνης. Μειώνοντας την ταχύτητα του ρευστού αρχίζουν να εξαφανίζονται οι φυσαλίδες, ωσπού η κλίνη ξαναγίνεται ομοιόμορφη. Η εξαφάνιση των φυσαλίδων παρατηρείται στην ίδια ταχύτητα που αυτές σχηματίζονται.

Έτσι, ως **ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων (u**<sub>mb</sub>) ορίζεται ο μέσος όρος των ταχυτήτων στις οποίες οι φυσαλίδες εμφανίζονται και εξαφανίζονται και συνήθως συμπίπτει με το μέγιστο ύψος της πυκνής φάσης της κλίνης [28]. Οι Abrahamsen και Geldart διατύπωσαν την ακόλουθη σχέση για την u<sub>mb</sub>:

$$u_{mb} = 2.07 \exp(0.716F) \frac{d_p \rho_g^{0.06}}{\mu^{0.347}}$$
 (4.12)

όπου F: το κλάσμα μάζας των σωματιδίων μικρότερα από 45μm.

Στην περίπτωση που η F $\approx$  0.1 και τα σωματίδια ρευστοποιούνται από ροή αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος τότε η  $u_{mb}$  είναι:

$$u_{mb} \approx 100 d_p \tag{4.13}$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει η σημαντική παρατήρηση ότι η ελάχιστη ταχύτητα εμφάνισης φυσαλίδων δεν εξαρτάται από την πυκνότητα των στερεών.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου παρατηρείται εμφάνιση φυσαλίδων πριν από την  $u_{mb}$  λόγω ανομοιόμορφης κατασκευής του διασκορπιστή ή εξαιτίας εξογκωμάτων της κλίνης [28].

#### 4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Ο χαρακτηρισμός και η κατηγοριοποίηση των σωματιδίων είναι σημαντικοί σε όλες τις πτυχές του χειρισμού, της επεξεργασίας και των εφαρμογών τους. Η διάκρισή τους είναι το πρώτο απαραίτητο βήμα πριν την χρήση τους. Ο απαιτούμενος χαρακτηρισμός τους δεν περιλαμβάνει μόνο τις εγγενείς στατικές παραμέτρους, όπως είναι το μέγεθος, η πυκνότητα, το σχήμα και η μορφολογία τους, αλλά και τη δυναμική τους συμπεριφορά σε σχέση με τη ροή του ρευστού, όπως είναι η ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης και η τερματική ταχύτητα.

Για την πιο αποτελεσματική μελέτη της κίνησης των σωματιδίων μέσα σε ρευστό ανοδικής ροής και την παρατήρηση του είδους ρευστοποίησης που προκαλείται μέσα σε μία κλίνη, έχουν επινοηθεί κάποια κριτήρια διαχωρισμού των σωματιδίων σε κατηγορίες. Έτσι, ο Geldart έκανε αυτό τον διαχωρισμό ανάλογα με τη μέση διάμετρό τους, την πυκνότητα και την μορφολογία τους. Οι ιδιότητες των τεσσάρων ομάδων σωματιδίων για πυκνότητα ρ=2.500 kg/m<sup>3</sup> παρατίθενται παρακάτω [28].

#### <u>ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ C</u>

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα σωματίδια πολύ μικρής διαμέτρου (< 20μm) και έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι είναι ιδιαίτερα συνεκτικά. Η ομοιόμορφη ρευστοποίηση των στερεών αυτών είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω του γεγονότος ότι οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων είναι μεγαλύτερες από αυτές που το ρευστό μπορεί να ασκήσει στο σωματίδιο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα σωματίδια είναι πολύ μικρής διαμέτρου, τα ηλεκτρικά τους φορτία είναι πολύ ισχυρά, η επιφάνειά τους είναι κολλώδης λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε υγρασία και η μορφολογία τους είναι αρκετά ακανόνιστη.

Η πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης είναι πολύ μικρή. Χαμηλότερη από την θεωρητική της τιμή που ορίζεται ως η μάζα της κλίνης ανά μονάδα εμβαδού διατομής. Η ανάμειξη των σωματιδίων είναι πολύ πιο φτωχή σε σχέση με αυτήν των υπολοίπων κατηγοριών, κάτι που οδηγεί στην κακή μεταφορά θερμότητας και στη μη ύπαρξη σταθερού προφίλ θερμοκρασιών σε όλο το ύψος της κλίνης.

Τα στερεά αυτά παραμένουν ρευστοποιημένα μέσα στην κλίνη για αρκετά λεπτά μέχρι τελικά να γίνει η πνευματική μεταφορά τους εκτός αυτής. Επίσης, κατά την αιώρησή τους όταν συντελείται η διεργασία της αεριοποίησης είναι αυξημένος ο κίνδυνος εμφάνισης συσσωματώσεων λόγω της υπερβολικής ηλεκτροστατικής φόρτισής τους. Οπτικά τα σωματίδια αυτά έχουν τη μορφή πούδρας [28].

## <u>ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α</u>

Τα σωματίδια αυτά έχουν εύρος μέσης διαμέτρου 20 – 90 μm και είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στους περισσότερους βιομηχανικούς αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης.

Έχει αποδειχθεί ότι η ρευστοποίησή τους μπορεί να ξεκινήσει ομοιόμορφα μόλις το ρευστό αποκτήσει την ταχύτητα ελάχιστης ρευστοποίησης  $(u_{mf})$ . Σε ταχύτητες αερίου μεταξύ της  $u_{mf}$  και της ελάχιστης ταχύτητας εμφάνισης φυσαλίδων  $(u_{mb})$  η κλίνη διαστέλλεται σημαντικά επειδή αυτά τα σωματίδια είναι ελαφρώς συνεκτικά. Αν η ταχύτητα του ρευστού ξεπεράσει την  $u_{mb}$ , η κίνηση κάθε φυσαλίδας διαταράσσει την αδύναμη δομή της διεσταλμένης πυκνής φάσης της κλίνης. Το ύψος της κλίνης μειώνεται διότι ο κενός χώρος μεταξύ των σωματιδίων στην πυκνή φάση ελαττώνεται γρηγορότερα από πριν.

Όταν η επιφανειακή ταχύτητα του αερίου είναι επαρκώς υψηλή και η διάμετρος της κλίνης αρκετά μικρή, ετσί ώστε να ευννοείται η δημιουργία καταστάσεων γρήγορης ταραχώδους ρευστοποίησης, οι διογκωμένες φυσαλίδες δημιουργούνται αξονοσυμμετρικά. Με αύξηση της επιφανειακής ταχύτητας του αερίου, οι φυσαλίδες και οι συγχωνεύσεις τους διασπώνται με αποτέλεσμα η παράσυρση των σωματιδίων να γίνεται πολύ μεγάλη.Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας επιτρέπει την ανακυκλοφορία των στερεών διά μέσου βρόχου μεταφοράς με αποτέλεσμα να δημιουργείται κατάσταση γρήγορης ρευστοποίησης στην κλίνη [28].

#### <u>ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β</u>

Η μέση διάμετρος των σωματιδίων αυτών για πυκνότητα στερού περίπου 2.500 kg/ $m^3$  κυμαίνεται μεταξύ 90 και 650 μm.

Σε αντίθεση με τα στερεά της κατηγορίας Α, οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων είναι ασήμαντες και οι φυσαλίδες ξεκινούν να σχηματίζονται όταν η ταχύτητα του ρευστού γίνει ελαφρώς μεγαλύτερη από την  $u_{mf}$ . Η διαστολή της κλίνης είναι μικρή ενώ παρατηρείται πολύ απότομη πτώση της όταν διακόπτεται η παροχή του αέρα.

Οι φυσαλίδες διασπώνται σαν διακεκριμένες οντότητες ενώ η μεταφορά και ανακυκλοφορία των σωματιδίων γίνεται σε εξαιρετικά χαμηλό και ακανόνιστο ρυθμό. Οι περισσότερες φυσαλίδες διαστέλλονται γρηγορότερα από την ταχύτητα του ρευστού. Το μεγεθός τους αυξάνεται σε συνάρτηση τόσο του ύψους της κλίνης όσο και της ταχύτητας του αερίου. Η συγχώνευση των φυσαλίδων (slagging) είναι το επικρατέστερο φαινόμενο για αυτή την κατηγορία. Όταν η ταχύτητα του ρευστού είναι τέτοια ώστε να ξεκινήσει το φαινόμενο αυτό, οι ενωμένες φυσαλίδες είναι αξονοσυμμετρικές. Με αύξηση της ταχύτητας αρχίζει να παρατηρείται η δημιουργία μη αξονικών ασύμμετρων συγχωνεύσεων. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα της ροής τόσο μεγαλώνει το ποσοστό των ασύμμετρων συγχωνεύσεων.

#### <u>KATHFOPIA D</u>

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν σωματίδια μεγάλης διαμέτρου (> 650μm) ή με μεγάλη πυκνότητα. Για το λόγο αυτό η ρευστοποίησή τους είναι δυσκολότερη από ότι στις κατηγορίες Α και Β.

Η παροχή του ρευστού στην κλίνη πρέπει να είναι ομοιόμορφη και σταθερή ώστε να περιορίζονται τα φαινόμενα εμφάνισης φυσαλίδων. Όταν προκύψουν, παρατηρείται πολύ ταραχώδης ρευστοποίηση των στερεών καθώς λόγω του μεγάλου μεγέθους τους το ρευστό ρέει στη βάση και περιμετρικά της φυσαλίδας χωρίς να είναι εύκολη η διάσπασή της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη φτωχή και διαταραγμένη ανάμειξη των σωματιδίων. Η ταραχώδης ροή μπορεί να προκαλέσει τη διάσπαση των σωματιδίων λόγω των δυνάμεων τριβής που ασκούνται μεταξύ τους. Στη συνέχεια παρατηρείται γρήγορη και έντονη παράσυρση των πιο λεπτόκοκκων σωματιδίων που έχουν προκύψει [28].

Στην εικόνα 4.3 παρίσταται διαγραμματικά η κατηγοριοποίηση των σωματιδίων κατά Geldart και στην εικόνα 4.4 φαίνεται σχηματικά η μεταβολή της φάσης ρευστοποίησης ανάλογα με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού για κάθε κατηγορία σωματιδίων.



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης σωματιδίων κατά Geldart [28].



**Εικόνα 4.4:** Μεταβολή της φάσης ρευστοποίησης ανάλογα με την ταχύτητα του ρευστού [29].

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εστιάζει στην πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και του αδρανούς υλικού κατά τη διεργασία της αεριοποίησης. Για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού, διεξήχθησαν μία σειρά πειραμάτων αεριοποίησης τριών μορφών βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας. Το οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αέρας ενώ η μονάδα είναι σχεδιασμένη για παραγωγή ισχύος 100 kW<sub>th</sub>. Η μονάδα κατασκευάστηκε και λειτουργεί ύστερα από τη συνεργασία των τριών ακόλουθων φορέων: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) και Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην πειραμάτων Πηγών Ενέργειας στην περιοχή του Πικερμίου.



Παρακάτω παρατίθεται μία φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης.

Εικόνα 5.1: Φωτογραφία της πειραματικής εγκατάστασης.

Στην εικόνα 5.2 παρατίθεται σχηματικά συνολικά η πειραματική εγκατάσταση καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας της σε κάθε σημείο.



**Εικόνα 5.2:** Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία και του συστήματος μέτρησης του παραγόμενου αερίου.

## 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

## 5.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η βιομάζα που εισάγεται στη μόναδα προς αεριοποίηση έχει μετατραπεί σε μορφή πελλέτας ώστε να είναι εφικτή η είσοδός της στον αντιδραστήρα μέσω του συστήματος τροφοδοσίας καθώς επίσης και να είναι σταθερή και γνωστή η ποσότητα που εισάγεται κάθε χρονική στιγμή. Για την σωστή και ασφαλή εισαγωγή της βιομάζας έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ένας απλός μηχανισμός τροφοδοσίας του καυσίμου. Αυτός αποτελείται από τέσσερα σιλό (χοάνες) τοποθετημένες καθ' ύψος σε σειρά μεταξύ τους, των οποίων η σύνδεση γίνεται με διαφανείς εύκαμπτους σωλήνες. Στο τέλος κάθε σιλό είναι τοποθετημένη μία βάννα χάρη στην οποία μπορεί να διακοπεί και να επανέλθει η επικοινωνία μεταξύ των σιλό.

Η τροφοδοσία ξεκινάει με την εισαγωγή της βιομάζας (με χειρωνακτικό τρόπο) στο σιλό που βρίσκεται στην κορυφή του συστήματος. Στη συνέχεια ανοίγοντας τη βάννα που βρίσκεται κάτω από το σιλό γίνεται η μεταφορά του καυσίμου στη δεύτερη κατά σειρά χοάνη. Με τον ίδιο τρόπο η βιομάζα καταλήγει στο τρίτο σιλό. Το σύστημα αυτό των δύο πρώτων σιλό είναι σχεδιασμένο με αυτό τον τρόπο αφ'ενός για την αποφυγή της διαρροής των αερίων μέσω του συστήματος τροφοδοσίας και αφ'ετέρου για την εξασφάλιση της στεγανότητας του συστήματος κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Το τέλος του τρίτου σιλό καταλήγει σε έναν κοχλία τροφοδοσίας ο οποίος είναι συνδεμένος σε έναν σύγχρονο κινητήρα. Ο κοχλίας αυτός έχει το ρόλο της ρύθμισης του ρυθμού τροφοδοσίας της βιομάζας και της διατήρησης σταθερής συχνότητας εισαγωγής της στον αντιδραστήρα. Ο κινητήρας διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα ρύθμισης των στροφών λειτουργίας του. Στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή της ηλεκτρικής σε μηχανική ισχύ μέσω του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται [30]. Έτσι μπορεί να καθοριστεί η ταχύτητα περιστροφής του κοχλία με αποτέλεσμα να είναι εφικτός ο έλεγχος του ρυθμού τροφοδοσίας της βιομάζας στο επόμενο σιλό.

Το τελευταίο σιλό δέχεται την βιομάζα σε σταθερή ποσότητα κάθε δευτερόλεπτο, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Μέσα από τη χοάνη αυτή διέρχεται ένας δεύτερος κοχλίας ο οποίος λειτουργεί με αντίστοιχο τρόπο με τον προηγούμενο. Ο ρόλος του κοχλία αυτού είναι η οριζόντια μεταφορά και τροφοδοσία του καυσίμου στον αντιδραστήρα. Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής κάποιου πειράματος, ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι ο κοχλίας αυτός πρέπει να τίθεται σε λειτουργία (και μάλιστα ρυθμισμένος στις κατάλληλες στροφές) πριν ξεκινήσει κάποια άλλη διαδικασία έναρξης του πειράματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η είσοδος αδρανούς υλικού στο σωλήνα τροφοδοσίας, γεγονός που θα οδηγούσε στη φραγή του και στην πυράκτωση του. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το σύστημα τροφοδοσίας της εγκατάστασης που περιγράφηκε παραπάνω.







**Εικόνα 5.3:** α) Σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου β) Σύστημα τροφοδοσίας των δύο πρώτων σιλό γ) Σύστημα τροφοδοσίας του τρίτου και τέταρτου σιλό.

### 5.1.2 ΑΝΟΔΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ (RISER)

Το τμήμα ανόδου της μονάδας αποτελείται από το σωλήνα μέσα στον οποίο συντελείται η διεργασία της αεριοποίησης σε συνθήκες ρευστοποίησης. Είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα ώστε να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες που του επιβάλλονται, η εσωτερική του διάμετρος είναι 78 mm, το ύψος του είναι 5,85 μέτρα και το πάχος των τοιχωμάτων του 5,49 mm.

Στο κάτω μέρος του σωλήνα είναι τοποθετημένος ένας διασκορπιστής μέσω του οποίου γίνεται η εισαγωγή του αέρα στο σύστημα. Ο διασκορπιστής είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε ο αέρας να εισέρχεται στον ανοδικό σωλήνα κυκλικής διατομής με ομοιόμορφο τρόπο και ταυτόχρονα να μειώνεται η πιθανότητα επικάθισης άκαυστης ύλης στις οπές από όπου εισέρχεται ο αέρας.

Ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του riser, είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε ο λόγος του ύψους του προς τη διατομή του να είναι πολύ μεγάλος. Ένα τέτοιο σύστημα ευννοεί τη δημιουργία τέτοιων προϋποθέσεων, ώστε να υπάρχει η επιθυμητή μεταφορά στερεών έξω από το σωλήνα με σκοπό την ανακυκλοφορία τους. Επίσης, το ύψος του σωλήνα σχετίζεται με το χρόνο παραμονής των σωματιδίων (residence time) στον αντιδραστήρα. Ο σωστός χρόνος παραμονής της βιομάζας στο σύστημα είναι σημαντικός, καθώς καθορίζει την αποτελεσματικότητα της αεριοποίησης.

Για την ένωση του ανοδικού σωλήνα με τον κυκλώνα έχει χρησιμοποιηθεί ανοξείδωτος σωλήνας ο οποίος είναι τοποθετημένος υπό κλίση 30°. Η γεωμετρία της ένωσης αποσκοπεί στην επίτευξη κανονικής ροής των σωματιδίων στο τμήμα αυτό και την αποφυγή της προσκόλησης των στερεών στο σωλήνα ένωσης με συνέπεια την στόμωσή του.

#### 5.1.3 ΚΥΚΛΩΝΑΣ

Για να λειτουργήσει η ρευστοποιημένη κλίνη σε κατάσταση ανακυκλοφορίας θα πρέπει να επιτευχθεί τέτοια ταχύτητα ρευστού ώστε να παρατηρείται σημαντική παράσυρση αδρανούς υλικού και εξανθρακώματος έξω από τον ανοδικό σωλήνα. Για τη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου αερίου σύνθεσης και της αποδοτικότητας του συστήματος, είναι πολύ επιθυμητό να επιτευχθεί επαναφορά του εξανθρακώματος που θα έχει παρασυρθεί έξω από τον αεριοποιητή, πίσω σε αυτόν. Για την εξασφάλιση της ανακυκλοφορίας αυτού του υλικού και του διαχωρισμού της από το παραγόμενο αέριο έχει τοποθετηθεί ένας κυκλώνας, ο οποίος συνδέει τον ανοδικό σωλήνα με τον καθοδικό [31].

Γενικά, ο κυκλωνικός διαχωρισμός είναι μία μέθοδος για την απομάκρυνση σωματιδίων από ένα αέριο ρεύμα. Το κυρίως μέρος του κυκλώνα είναι κυλινδρικού

σχήματος και καταλήγει σε κωνικό τμήμα που στενεύει ομοιόμορφα μέχρι την έξοδο του. Λόγω του κυλινδρικού σχήματος της κατασκευής, το εισερχόμενο αέριο αναγκάζεται να διαγράψει ελικοειδή τροχιά. Η περιστροφική κίνηση την οποία υπόκειται το ρεύμα αερίου και άκαυστων στερεών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία φυγόκεντρης δύναμης η οποία ενεργεί πάνω στα σωματίδια. Η δύναμη αυτή διαχωρίζει τα στερεά από το αέριο ρεύμα και τα οδηγεί στα τοιχώματα της κατασκευής. Τότε λόγω της επίδρασης της βαρύτητας τα σωματίδια ολισθαίνουν προς τα κάτω ώσπου διαφεύγουν από την έξοδο [32]. Τα μεγαλύτερα και τα πιο πυκνά σωματίδια έχουν τέτοια αδράνεια ώστε να μην μπορούν να ακολουθήσουν το υπόλοιπο ρεύμα. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι να χάνουν τον προσανατολισμό τους, να χτυπούν στα τοιχώματα του κυκλώνα και να πέφτουν στο κάτω μέρος του, από όπου διαφεύγουν. Όσο η ελικοειδής ροή κινείται προς τη στενή έξοδο του κυκλώνα η ακτίνα στροβιλισμού του αέριου ρεύματος μειώνεται διαχωρίζοντας έτσι όλο και μικρότερα σωματίδια. Επίσης, λόγω της γεωμετρίας του, στο κωνικό τμήμα του κυκλώνα αυξάνεται η ταχύτητα ροής του ρευστού ρεύματος με αποτέλεσμα το αέριο να αναστρέφει την προς τα κάτω σπείρα του και να κινείται προς τα πάνω με μία μικρότερη εσωτερική σπείρα. Έτσι, το αέριο τμήμα εξέρχεται από το πάνω μέρος του κυκλώνα και συνεχίζει τη διαδρομή του προς τα υπόλοιπα μέρη της εγκατάστασης [33]. Η μονάδα στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα είναι σχεδιασμένη για αεριοποίηση σε συνθήκες ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία του υλικού. Έτσι, η έξοδος του κυκλώνα από όπου διαφεύγουν τα στερεά είναι συνδεμένη με τον καθοδικό σωλήνα της εγκατάστασης μέσω του οποίου επιστρέφει το υλικό στον ανοδικό σωλήνα.

Η χρήση του κυκλώνα για το διαχωρισμό των σωματιδίων και την καθοδήγησή τους στον καθοδικό σωλήνα παρουσιάζει τέσσερα βασικά πλεονεκτήματα. Είναι μία απλή μηχανολογική κατασκευή χωρίς κινούμενα μέρη, είναι κατασκευή αρκετά χαμηλού κόστους, παρατηρείται σχετικά μικρή πτώση πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου και τέλος έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης [32]. Στην εικόνα 5.4 φαίνεται σε τομή το σχέδιο ενός κυλινδρικού κυκλώνα. Σε αυτήν φαίνεται η λειτουργία που περιγράφηκε παραπάνω.



ΕΙΚΟΝΑ 5.4: Σχηματική περιγραφή λειτουργίας του κυκλώνα [33].

Στην εικόνα 5.5 απεικονίζεται ο κυκλώνας που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση του περιγράφεται.



**Εικόνα 5.5:** α) Φωτογραφία του κυκλώνα της εγκατάστασης καλυμένου με κεραμοβάμβακα. β) Φωτογραφία της εξόδου των στερεών του κυκλώνα.

#### 5.1.4 ΚΑΘΟΔΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ- ΒΑΛΒΙΔΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ L (L-VALVE)

Ο καθοδικός σωλήνας (downcomer) έχει ύψος 4,3m και η διάμετρός του είναι 68mm, δηλαδή τέτοια ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα φραγής της φλάντζας ένωσης του κυκλώνα με τον σωλήνα ανακυκλοφορίας. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρατηρούνται μεταβολές στο ύψος των δύο σωλήνων (ανοδικού και καθοδικού), σε σχέση με το αρχικό τους, λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται για τις ανάγκες του πειράματος. Η θερμοκρασιακή κατάσταση των δύο σωλήνων, όμως, είναι διαφορετική μεταξύ τους και πιο συγκεκριμένα η θερμοκρασία του σωλήνα ανακυκλοφορίας είναι περίπου κατά 250 °C μικρότερη. Συμπεραίνεται ότι οι μεταβολές του ύψους και οι διαστολές των δύο σωλήνων είναι διαφορετικές. Το συνολικό σύστημα της εγκατάστασης όμως, αποτελεί έναν κλειστό βρόχο, καθώς ο καθοδικός σωλήνας ενώνεται με τον ανοδικό τόσο στο κάτω μέρος τους (άμεσα) όσο και στο πάνω μέρος (μέσω του κυκλώνα). Έτσι, θα ήταν αδύνατο να έχουν διαφορετικές μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια κάποιου πειράματος. Για να αντιμετωπιστεί το κατασκευαστικό αυτό πρόβλημα, στο σωλήνα ανακυκλοφορίας έχει τοποθετηθεί ένα διαστολικό. Πρόκειται για μία εύκαμπτη κατασκευή η οποία έχει τη δυνατότητα μεταβολής των διαστάσεών της. Έτσι, η διαφορά στις μετατοπίσεις και τις διαστολές που παρουσιάζονται καλύπτονται μέσω αυτής της κατασκευής.

Η επαναφορά των στερεών που έχουν μεταφερθεί στον καθοδικό σωλήνα γίνεται μέσω μίας βαλβίδας που έχει σχήμα L (L-VALVE). Πρόκειται για μία ειδική μη μηχανική κατασκευή η γεωμετρία της οποίας εξασφαλίζει την ύπαρξη σταθερής κλίνης στο οριζόντιο κομμάτι της βαλβίδας και σε ένα μέρος του κάθετου σωλήνα της. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την ισορροπία στις πιέσεις του ανοδικού σωλήνα και της L-Valve στο βρόχο σύνδεσής τους και παράλληλα δημιουργεί μία τέτοια πτώση πίεσης στη βαλβίδα ώστε να διασφαλίζεται ότι τα σωματίδια θα κινούνται προς τον αντιδραστήρα και δε θα συμβαίνει το αντίθετο. Έτσι, η ομαλή λειτουργία της ανακυκλοφορίας του συστήματος θα πρέπει να επαληθεύει την εξίσωση (5.1) [34].

$$\Delta P_{FA} + \Delta P_{AB} + \Delta P_{BC} + \Delta P_{CD} = \Delta P_{DE} + \Delta P_{EF}$$
(5.1)

Οι δείκτες Α, Β, C, D, Ε, F αναφέροντα στο σχήμα της εικόνας 5.6.



**Εικόνα 5.6:** Προφίλ πιέσεων κατά τη διάρκεια σωστής λειτουργίας μίας ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας [34].

Κατά τη διάρκεια κάποιου πειράματος είναι πιθανή η φραγή του οριζόντιου κομματιού της L-Valve λόγω επικάθισης και συγκάλυψης της διατομής του από τα πιο μεγάλα στερεά (για παράδειγμα εξανθράκωμα) που ανακυκλοφορούν. Ένα τέτοιο φαινόμενο οδηγεί σταδιακά στη διακοπή της ανακυκλοφορίας, με αποτέλεσμα τη μεταφορά της κλίνης προς τον σωλήνα ανακυκλοφορίας και τη συσσώρευση του υλικού εκεί. Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης έχει σχεδιαστεί κατάλληλο ακροφύσιο στο πίσω μέρος του οριζόντιου τμήματος της βαλβίδας, μέσω του οποίου εισάγεται άζωτο με ταχύτητα λίγο μεγαλύτερη της u<sub>mf</sub> για την διευκόλυνση της ροής των σωματιδίων. Η διαπίστωση ότι δεν έχει φράξει η διατομή της L-Valve γίνεται μέσω της παρατήρησης των τιμών των πιέσεων στη βαλβίδα και στο κάτω μέρος του ανοδικού σωλήνα όπου εισέρχεται το υλικό που ανακυκλοφορεί. Αν η πίεση στον riser αρχίσει να μειώνεται συνεχόμενα με ταυτόχρονη συνεχή αύξηση της πίεσης στη βαλβίδα τότε αρχίζει να παρατηρείται απώλεια υλικού από τον ανοδικό σωλήνα και συσσώρευσή του στον καθοδικό.

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται μία μη μηχανική κατασκευή σχήματος L ενώ στην 5.8 απεικονίζεται ο βρόχος σύνδεσης της βαλβίδας με τον ανοδικό σωλήνα της μονάδας που περιγράφεται.



Εικόνα 5.7: Σχηματική απεικόνιση βαλβίδας σχήματος L [35].



Εικόνα 5.8: Σύνδεση της βαλβίδας τύπου L με τον ανοδικό σωλήνα.

# 5.1.5 ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της πίεσης που επικρατεί στο σύτημα έχουν τοποθετηθεί 12 θερμοστοιχεία τύπου Κ και ισάριθμοι μετρητές πίεσης σε διάφορα σημεία καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα, στην είσοδο και την έξοδο του αερίου στον κυκλώνα καθώς επίσης και στη βαλβίδα σχήματος L. Οι μετρητές θερμοκρασίας επιτρέπουν την παρακολούθηση της θερμοκρασιακής κατάστασης του συστήματος. Ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος τόσο για την διαβεβαίωση οτί υπάρχει καλή μεταφορά μάζας καθ' ύψος του αντιδραστήρα όσο και για την εξασφάλιση του γεγονότος οτί η θερμοκρασία μετάλλου δεν υπερβαίνει τα όρια αντοχής του. Μέσω των μετρητών πίεσης οι πειραματιστές ελέγχουν την ποιότητα της ανακυκλοφορίας των σωματιδίων καθώς επίσης και αν έχει συσσωρευτεί υλικό σε κάποιο σημείο της εγκατάστασης. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται αύξηση των πιέσεων κατ' απόλυτη τιμή με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η ποιότητα της παραγωγής του αερίου σύνθεσης.

## 5.1.6 ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Ύστερα από πειραματική διαπίστωση αποδείχτηκε ότι στην έξοδο του αερίου στον κυκλώνα διαφεύγει και μία ποσότητα άκαυστου υλικού (εξανθράκωμα) το οποίο δεν έχει προλάβει να αντιδράσει με το οξειδωτικό μέσο ούτε έχει διαφύγει προς τον σωλήνα ανακυκλοφορίας. Για την απομάκρυνση του υλικού αυτού και τη συλλογή του έχει τοποθετηθεί ένας δεύτερος κυκλώνας μικρότερου μεγέθους αμέσως μετά την έξοδο του πρώτου. Ο κυκλώνας αυτός καταλήγει σε ένα σιλό από το οποίο μέσω βάννας γίνεται η συλλογή του εξανθρακώματος. Στη συνέχεια ακολουθεί ζύγιση της ποσότητας άνθρακα που διαφεύγει από το σύστημα αεριοποίησης και υπολογισμός του ρυθμού αποβολής του.

Το αέριο σύνθεσης, ύστερα από μία διαδρομή, οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας αέρα-νερού με σκοπό την ψύξη του. Το παραγόμενο αέριο διέρχεται μέσα από 19 αγωγούς. Εξωτερικά των αγωγών ρέει το ψυκτικό μέσο με αποτέλεσμα το αέριο να πέφτει σε θερμοκρασία συμπύκνωσης των πισσών (≈ 350 °C). Από το κάτω μέρος του εναλλάκτη, που είναι κωνικού σχήματος, εξάγονται μέσω βάννας οι συμπυκνωμένες πίσσες. Όσο καλύτερη ψύχρανση του αερίου γίνεται τόσο μεγαλύτερη ποσότητα πισσών συμπυκνώνεται.

Στην έξοδο του εναλλάκτη είναι τοποθετημένο σύστημα προσρόφησης του αερίου το οποίο είναι συνδεμένο με τα όργανα μέτρησης της σύστασης του αερίου μέσω σωλήνων από τεφλόν. Για την κατακράτηση του σωματιδιακού φορτίου που έχει απομείνει και την προστασία των οργάνων, είναι τοποθετημένο ένα κεραμικό φίλτρο. Για καλύτερη κατακράτηση στη διαδρομή μέχρι τα όργανα είναι τοποθετημένα άλλα δυο φίλτρα από τεφλόν.

Το αέριο σύνθεσης μέσω σωληνώσεων καταλήγει σε καπνοδόχο. Στη βάση της παρέχεται προπάνιο και μέσω σπινθηριστή παράγεται φλόγα. Το αέριο σύνθεσης καίγεται πλήρως ώστε να μην εκλύεται προς την ατμόσφαιρα το μονοξείδιο του άνθρακα που έχει παραχθεί.

# 5.1.7 ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

#### Θέρμανση της εγκατάστασης:

Εφόσον η διεργασία της αεριοποίησης συντελείται με οξειδωτικό μέσο αέρα, η θέρμανση της μονάδας θα είναι αυτόθερμη, καθώς η θερμότητα εξασφαλίζεται από την μερική καύση του καυσίμου μέσα στον αντιδραστήρα. Η μονάδα όμως είναι εγκατεστημένη για πειραματικούς σκοπούς και η επίδραση της θερμοκρασίας στη σύσταση του αερίου αποτελεί αντικείμενο μελέτης. Για το λόγο αυτό σε όλο το ύψος του ανοδικού σωλήνα έχουν τοποθετηθεί ηλεκτρικές αντιστάσεις οι οποίες καθορίζουν θερμοκρασία του συστήματος. Οι αντιστάσεις τn που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στην εταιρεία KANTHAL και έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αξιόπιστες, ενώ η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με τη μέθοδο της ακτινοβολίας.

#### Τροφοδοσία του αέρα – Πρόγραμμα καταγραφής δεδομένων:

Η τροφοδοσία του αέρα ή του αζώτου γίνεται από τρία διαφορετικά σημεία της εγκατάστασης και η ποσότητα που παρέχεται ρυθμίζεται από τρία παροχόμετρα που έχουν τοποθετηθεί. Εισαγωγή αέρα γίνεται τόσο από το κάτω μέρος του ανοδικού σωλήνα, μέσω ειδικά διαμορφωμένων οπών που υπάρχουν στο διασκορπιστή, όσο και από το τελευταίο σιλό που επικοινωνεί με τον ανοδικό σωλήνα. Η τροφοδοσία του αζώτου γίνεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από το πίσω μέρος της βαλβίδας L με σκοπό την επαναφορά της άκαυστης ύλης στον αντιδραστήρα.

Τα παροχόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας AALBORG και είναι υπεύθυνα για τη σταθερή παροχή αέρα και αζώτου στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της πίεσης μέσα στους σωλήνες.

Η αρχική τροφοδοσία του αέρα γίνεται μέσω ενός εμβολοφόρου συμπιεστή, ο οποιός συμπιέζει αέρα μέχρι πίεση 10 bar. Μέσω ρυθμιστή πίεσης ο αέρας αποτονώνεται στα 2-4 bar πριν τροφοδοτηθούν τα παροχόμετρα.

Για την επίβλεψη και το χειρισμό της διεργασίας και των παραμέτρων που διέπουν το πείραμα έχει εγκατασταθεί σε Η/Υ το πρόγραμμα καταγραφής δεδομένων DASYLAB.

## 5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΙΣΣΩΝ

## 5.2.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΤΩΝ ΠΙΣΣΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να τροφοδοτηθεί μία μηχανή κίνησης ή θέρμανσης με το αέριο σύνθεσης, θα πρέπει αυτό να έχει καθαρισθεί από τις διάφορες ενώσεις των πισσών που έχουν σχηματιστεί. Για το λόγο αυτό, ένας από τους παράγοντες που μελετήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν η ποσότητα και ποιότητα πίσσας που παράχθηκε από κάθε είδος βιομάζας.

Για τη συλλογή και τη μέτρηση της περιεκτικότητας των ενώσεων των πισσών έχει τοποθετηθεί ένας μηχανισμός στην εγκατάσταση, στο σωλήνα που οδηγεί το αέριο στον εναλλάκτη. Η λειτουργία και τα μέρη του μηχανισμού αυτού θα περιγραφούν παρακάτω σύμφωνα με τον οδηγό για τη δειγματοληψία και ανάλυση των πισσών και των σωματιδίων σε αντιδραστήρες αεριοποίησης βιομάζας [36].

## Περιγραφή του πρωτοκόλου για τη συλλογή πισσών σύμφωνα με τον οδηγό.

Η βασική αρχή του πρωτοκόλου στηρίζεται στην ασυνεχή προσρόφηση του αέριου ρεύματος που περιέχει σωματίδια και οργανικές ενώσεις (πίσσες) υπό ισοκινητικές συνθήκες. Το σύστημα δειγματοληψίας πισσών αποτελείται από έναν θερμαινόμενο λήπτη (heated probe), ένα θερμαινόμενο φίλτρο σωματιδίων (heated particle filter) και μία σειρά από πλυντηρίδες (impinge bottles) στις οποίες έχει εισαχθεί διαλύτης (ισοπροπανόλη) για την απορρόφηση των πισσών. Οι πλυντηρίδες συλλογής των πισσών περιβάλλονται από ένα παγωμένο λουτρό που έχει διαμορφωθεί ύστερα από τοποθέτηση 6 ποτηριών πάγου και 2 ποτηριών αλατιού. Σκοπός είναι η ψύξη του προσροφούμενου αερίου από τους 20 °C στους -20 °C. Ο ρυθμός ροής διατηρείται με τη βοήθεια μίας αντλίας που έχει τοποθετηθεί. Το σύστημα δειγματοληψίας είναι σχεδιασμένο για προσρόφηση με ρυθμό ροής μέχρι 0,6 Nm<sup>3</sup>/h (κανονικά κυβικά μέτρα την ώρα).

Ως προς την αρχή λειτουργίας του, το σύστημα αποτελείται από τέσσερις ενότητες και από τις αντίστοιχες υποενότητες. Αυτές είναι η προετοιμασία του αερίου (gas preconditioning), η συλλογή των σωματιδίων (particle collection), η συλλογή των πισσών (tar collection) και η μέτρηση του όγκου του αερίου (volume measurement).

Στο στάδιο της προετοιμασίας (ενότητα 1) το προσροφούμενο αέριο ρυθμίζεται σε κατάλληλη θερμοκρασία μέσω του θερμαινόμενου λήπτη. Ο λήπτης του δείγματος ρυθμίζεται σε αυτή τη θερμοκρασία έτσι ώστε να αποφευχθεί η συμπύκνωση των πισσών πριν αυτές διέλθουν από τις πλυντηρίδες. Από την άλλη πλευρά, για την αποφυγή θερμικών διασπάσεων των οργανικών ενώσεων, η θερμοκρασία αυτή πρέπει να είναι κατάλληλα επιλεγμένη. Σε αυτή την περίπτωση που η διεργασία συντελείται σε ρευστοποιημένη κλίνη, έχει αποδειχθεί ότι οι κατάλληλες θερμοκρασίες είναι μεταξύ 300-350 °C. Σε ότι αφορά στο δεύτερο στάδιο, η κατακράτηση των στερεών και απομάκρυνσή τους από το αέριο ρεύμα γίνεται μέσω του φίλτρου που διατηρείται στην ίδια θερμοκρασία με το λήπτη.

Το στάδιο της συλλογής των πισσών αποτελείται από τρεις υποενότητες. Στην πρώτη υποενότητα, το αέριο ψύχεται στους 20 °C (περίπου) μέσω ενός συμπυκνωτή με αποτέλεσμα να συλλέγεται η υγρασία και ένα μέρος των πισσών. Στη δεύτερη υποενότητα, η πίσσα και τα πτητικά (VOC's) απορροφούνται μέσα στο διαλύτη στους -20 °C μέσω μίας σειράς έξι πλυντηρίδων. Στην τρίτη υποενότητα, η οποία είναι προαιρετική, μία εφεδρική παγίδα των πτητικών (VOC) συλλέγει τα υπολείματα των VOC τα οποία μπορεί να έχουν διαφύγει από τη σειρά των πλυντηρίδων. Η εφεδρική παγίδα δεν είναι απαραίτητη όταν χρησιμοπούνται επαρκής αριθμός πλυντηρίδων, ο κατάλληλος διαλύτης και σωστές θερμοκρασίες κατά τη συλλογή. Ο διαλύτης που χρησιμοποιείται είναι η ισοπροπανόλη καθώς έχει διαπιστωθεί οτί είναι ο καταλληλότερος. Ο όγκος, η θερμοκρασία, η πίεση και ο ρυθμός ροής του αέριου ρεύματος μετρώνται μετά τις πλυντηρίδες.

Το στάδιο της μέτρησης του όγκου που λαμβάνεται χωρίζεται σε τρεις υποενότητες. Ο σκοπός αυτών των υποενοτήτων είναι η διατήρηση της ροής του δείγματος μέσω μίας αντλίας, η προσαρμογή και ο έλεγχος του ρυθμού ροής, η μέτρηση του όγκου του δείγματος και η έξοδος του αερίου. Το αέριο στη συνέχεια ακολουθεί τη διαδρομή προς την καπνοδόχο μέσω γραμμών παράκαμψης.

Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος δειγματοληψίας των πισσών απεικονίζεται συγκεντρωτικά στην εικόνα 5.9. Στην εικόνα 5.10 απεικονίζεται το σύστημα δειγματοληψίας των πισσών που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση αυτή.



**Εικόνα 5.9:** Σχηματική απεικόνιση του συστήματος δειγματοληψίας των πισσών [36].



Εικόνα 5.10: Σύστημα δειγματοληψίας των πισσών.

Αμέσως μετά τη δειγματοληψία το περιεχόμενο που έχουν συλλέξει οι πλυντηρίδες μεταγγίζεται σε φιάλες αποθήκευσης χωρητικότητας 500 ml. Όλες οι επιφάνειες (συμπεριλαμβανομένων των μεταλικών) που ήρθαν σε επαφή με το αέριο, πλένονται με το διαλύτη και συγκαταλέγονται στο δείγμα που αποθηκεύεται στη φιάλη. Στη συνέχεια, η φιάλη τοποθετείται καλά κλεισμένη σε περιβάλλον θερμοκρασίας <-5 °C ώστε να ακολουθήσει η σωστή ανάλυση του δείγματος.

## 5.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΙΣΣΩΝ

Οι πίσσες που προκύπτουν από την αεριοποίηση της βιομάζας περιλαμβάνουν εκατοντάδες πολύπλοκες ενώσεις οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους σε πολικότητα και μοριακή μάζα. Όπως έχει αναφερθεί, οι οργανικές αυτές ενώσεις, είναι ανεπιθύμητες και έχουν επιβλαβείς επιδράσεις τόσο στην μονάδα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της όσο και στη χρήση στην οποία αποσκοπεί το παραγόμενο αέριο. Συμπεραίνεται ότι μία αξιόπιστη ανάλυση των ενώσεων αυτών, μετά τη δειγματοληψία τους, θα ήταν απαραίτητη τόσο για την επιτυχή εκτέλεση της διεργασίας όσο και για την εξασφάλιση οικονομικής λειτουργίας των αεριοποιητών του εμπορίου.

#### Βαρυμετρική ανάλυση (gravimetric analysis).

Η ανάλυση των πισσών που συλλέχθηκαν μέσω του συστήματος δειγματοληψίας που περιγράφηκε παραπάνω, πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της βαρυμετρικής ανάλυσης. Αυτή η διεργασία στηρίζεται σε έμπιστες και καλά αποδεδειγμένες μεθόδους για τον βαρυμετρικό καθορισμό των οργανικών ενώσεων.

Ο εξοπλισμός της μεθόδου αυτής περιλαμβάνει μία συσκευή soxhlet, ένα περιστροφικό εξατμιστήρα με όργανο ένδειξης πίεσης και έναν ξηραντήρα ενώ απαραίτητος είναι και ένας βαθμονομημένος ζυγός ακρίβειας 0,1 mg [36].

Γενικά ο απαγωγέας soxhlet είναι μία συσκευή που έχει σχεδιαστεί για την απόσπαση ενώσεων με περιορισμένη διαλυτότητα από το διαλύτη στον οποίο βρίσκονται. Στην προκειμένη περίπτωση, σκοπός είναι ο διαχωρισμός του διαλύτη, μέσω της εξάτμισής του, από τις ενώσεις των πισσών [37]. Το μίγμα αρχικά εισάγεται σε γυάλινη φιάλη και τοποθετείται σε κατάλληλη συσκευή η οποία θερμαίνεται και ρυθμίζεται μέσω αντιστάσεων στους 50-60 °C. Η φιάλη είναι συνδεμένη με έναν περιστροφικό εξατμιστήρα. Η θερμοκρασία αυτή είναι ικανή για να εξατμιστεί ο διαλύτης και λόγω της κίνησης που επιβάλλει στη φιάλη ο περιστροφικός εξατμιστήρας μεταφέρεται προς τα έξω. Στη συνέχεια ο διαλύτης εναλάσσει θερμότητα με εναλλάκτη και υγροποιείται, ωσπού με κατάλληλο σύστημα σωληνώσεων καταλήγει σε γυάλινη φιάλη που έχει τοποθετηθεί στην άλλη άκρη της συσκευής. Τελικά, ο διαλύτης διαχωρίζεται πλήρως και στην αρχική φιάλη παραμένουν οι οργανικές ενώσεις που έχουν μεγαλύτερο σημείο ζέσεως από τους 60 °C [36]. Στη συνέχεια ακολουθεί προσδιορισμός της ποσότητας των ενώσεων πισσών που έχουν προκύψει μέσω της ζύγισης της φιάλης πριν και μετά τη διαδικασία σε ζυγό μεγάλης ακρίβειας. Στην εικόνα 5.11 παρατίθεται η φωτογραφία του βαρυμεντρικού αναλυτή που χρησιμοποιήθηκε για το διαχωρισμό των ενώσεων των πισσών από την ισοπροπανόλη.



**Εικόνα 5.11:** Βαρυμετρικός αναλυτής για το διαχωρισμό των ενώσεων των πισσών από την ισοπροπανόλη.

# 5.3 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ

Κατά την διάρκεια πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί παρατηρήθηκαν κάποια σφάλματα στη λειτουργία της μονάδας με αποτέλεσμα να κριθεί αναγκαίο να υπάρξουν κάποιες τροποποιήσεις.

# 5.3.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΕΡΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ

βασικότερο πρόβλημα που παρατηρήθηκε κατά τη διεξανωνή То προηγούμενων πειραμάτων είναι το γεγονός οτί δεν είχε κατορθωθεί η επίτευξη αεριοποίησης των καυσίμων σε συνθήκες ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία. Διαπιστώθηκε οτί υπήρχε κατασκευαστικό λάθος στην έξοδο των στερεών του κυκλώνα ως προς το μέγεθος της διατομής της. Συνέπεια του γεγονότος αυτού ήταν η στόμωση της διατομής εξόδου με υλικό που προοριζόταν για ανακυκλοφορία κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Για το λόγο αυτό, λήφθηκε η απόφαση αλλαγής της διαμέτρου του σωλήνα ανακυκλοφορίας και της εξόδου των στερεών του κυκλώνα από 30mm σε 68mm. Μετά την αλλαγή αυτή, δεν παρατηρήθηκε εκ νέου κάποιο πρόβλημα αντίστοιχης φύσεως. Έτσι, στα πειράματα που διεξήχθησαν μετά την αλλαγή αυτή επιτεύχθηκε ρευστοποίηση σε συνθήκες ανακυκλοφορίας, ανεξάρτητα από το είδος της βιομάζας που εισάχθηκε για αεριοποίηση. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται οι αλλαγές που έγιναν στην πειραματική διάταξη.



Εικόνα 5.12:α) Η πειραματική διάταξη

πριν τις αλλαγές.



β) Η πειραματική διάταξη

μετά την τροποποίηση.

## 5.3.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Για την καλύτερη καταγραφή και παρακολούθηση των πειραμάτων στη βαλβίδα τύπου L (L-valve) τοποθετήθηκε ένα αισθητήριο πίεσης και ένα θερμοστοιχείο. Μέσω του θερμοστοιχείου, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, μπορεί να γίνει αντιληπτό αν η θερμοκρασία στη βαλβίδα L έχει την τιμή που υποδηλώνει ότι μεταφέρεται υλικό σε αυτήν. Η βασικότερη πληροφορία ότι έχει επιτευχθεί ανακυκλοφορία του υλικού καθώς επίσης και ότι δεν φράσσεται η διατομή σύνδεσης της L-valve με τον ανοδικό σωλήνα δίνεται από το αισθητήριο πίεσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε συνθήκες ανακυκλοφορίας, η πτώση πίεσης από το κάτω μέρος του ανοδικού σωλήνα μέχρι την έξοδο του κυκλώνα πρέπει να ισούται με την πτώση πίεσης από την έναρξη του καθοδικού σωλήνα μέχρι την έξοδο της βαλβίδας L. Μία πιο πρακτική και άμεση ένδειξη ανακυκλοφορίας είναι η παρατήρηση του γεγονότος ότι όταν μεταφέρεται υλικό προς τον ανοδικό σωλήνα παρατηρείται πτώση στην πίεση της βαλβίδας με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης του κάτω μέρους του riser. Όταν υπάρχει προσθήκη υλικού στη βαλβίδα οι πιέσεις συμπεριφέρονται αντίστροφα.

## 5.3.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΥΚΛΩΝΑ ΣΤΟ ΛΗΠΤΗ ΠΙΣΣΩΝ

Στο σύστημα δειγματοληψίας των πισσών διαπιστώθηκε μεταφορά σωματιδιακού φορτίου στις πλυντηρίδες συλλογής των ενώσεων των πισσών. Για το λόγο αυτό υπήρξε αλλοίωση της ποιότητας των μετρήσεων με αποτέλεσμα αυτές να θεωρηθούν μη αξιόπιστες και εσφαλμένες. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, μετά το θερμαινόμενο φίλτρο του συστήματος λήψης του αέριου ρεύματος, τοποθετήθηκε ένας μικρός κυκλωνικός διαχωριστής. Μετά την προσθήκη αυτή, ακολούθησε μία σειρά πειραμάτων κατά την οποία κρίθηκε επιτυχής η δειγματοληψία των πισσών. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την λειτουργικότητα του κυκλώνα και την προσφορά του στην απομάκρυνση του σωματιδιακού φορτίου. Ο κυκλώνας αυτός καταλήγει σε ειδικό μεταλλικό δοχείο όπου συλλέγονται τα σωματίδια που έχουν απομακρυνθεί από το αέριο ρεύμα. Μετά τη λήξη της δειγματοληψίας ο κυκλωνικός διαχωριστής αποσυναρμολογείται για τον καθαρισμό του δοχείου του. Παρακάτω φαίνεται το σωματιδιακό φορτίο που έχει συλλέξει το δοχείο κατά τη διάρκεια πειράματος.



**Εικόνα 5.13:** Σωματιδιακό φορτίο που συλλέχθηκε από τον κυκλώνα κατά τη δειγματοληψία πισσών.

## 5.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού αεριοποίησης καθώς επίσης και της σωστής ρευστοποίησης σε συνθήκες ανακυκλοφορίας, πριν την έναρξη κάθε πειράματος μελετώνται κάποιοι παράμετροι που καθορίζουν τη λειτουργία της διεργασίας. Επιθυμία των πειραματιστών είναι να διατηρούνται κάποιες παράμετροι σταθερές σε κάθε πείραμα. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επίδραση της μεταβλητής παραμέτρου που μελετάται ή τη διαφορετική συμπεριφορά των βιοκαυσίμων μεταξύ τους για ίδιες συνθήκες. Παρακάτω θα περιγραφούν οι παράμετροι που λαμβάνονται ως δεδομένα του πειράματος, ο τρόπος υπολογισμού τους καθώς και η αλληλεξάρτηση που έχουν μεταξύ τους για τον καθορισμό τους.

# 5.4.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΛΟΓΟΥ ΑΕΡΑ-ΚΑΥΣΙΜΟΥ (λ)

Η τιμή του λόγου αέρα-καυσίμου επιδρά σημαντικά στο παραγόμενο αέριο καθώς καθορίζει το ποσοστό του άνθρακα που θα οξειδωθεί αρχικά. Έτσι, ανάλογα με την τιμή του καθορίζονται η σύνθεση του παραγόμενου αερίου, το ποσοστό δημιουργίας εξανθρακώματος και η ποσοτική και ποιοτική παραγωγή πίσσας. Η τιμή του λ για την οποία έχει παρατηρηθεί ο βέλτιστος συνδυασμός αποτελεσμάτων στις παραμέτρους που επηρεάζει είναι 0,3. Για το λόγο αυτό όλα τα πειράματα έχουν διεξαχθεί με λ=0,3 (30%, το ποσοστό του αέρα σε σχέση με την απαιτούμενη ποσότητα για στοιχειομετρική καύση).

Για να επιτευχθεί αεριοποίηση με λ=0,3 σταθερά, θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί σταθερή παροχή καυσίμου στον αντιδραστήρα καθώς επίσης και
εισαγωγή σταθερής ποσότητα αέρα ανά δευτερόλεπτο. Επίσης, οι τιμές αυτές πρέπει να συνδυάζονται έτσι ώστε να προκύπτει το σωστό λ.

Ο υπολογισμός της παροχής αέρα που τροφοδοτεί το σύστημα γίνεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$Q_{\alpha \epsilon \rho \alpha} = \left[\frac{C_{a.r.}}{12} + \frac{H_{a.r}}{4} + \frac{N_{a.r}}{2*14} + \frac{S_{a.r}}{32} - \frac{O_{a.r}}{32}\right] * \frac{100}{21} * m_{f} * 22,4 * \frac{1000}{60} * \lambda \quad (5.2)$$

Στην παραπάνω σχέση η παροχή του αέρα υπολογίζεται σε (NL/min). Τα (C, H, N, S, O)<sub>a.r</sub> είναι τα ποσοστά των στοιχείων που περιέχονται στη βιομάζα όπως προκύπτουν από την απόλυτη στοιχειακή ανάλυσή της. Η ποσότητα m<sub>f</sub> αναφέρεται στο ρυθμό με τον οποίο εισάγεται το καύσιμο στον αντιδραστήρα και μετριέται σε (kg/h). Έτσι προκύπτει ότι με δεδομένη την παροχή του καυσίμου (m<sub>f</sub>) και για  $\lambda$ =0,3 υπολογίζεται η παροχή του αέρα στο σύστημα.

#### 5.4.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΟΧΛΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Μία πολύ βασική διεργασία για τη σωστή προετοιμασία του πειράματος ήταν η βαθμονόμηση του κοχλία τροφοδοσίας του καυσίμου. Η διεργασία αυτή αποσκοπούσε στον προσδιορισμό της παροχής καυσίμου που θα εξασφάλιζε την επιθυμητή τιμή στο λ κατά τη διάρκεια του πειράματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κοχλίας που καθορίζει την ποσότητα βιομάζας που θα εισέλθει στο σύστημα είναι ο πρώτος (επάνω). Για το λόγο αυτό η βαθμονόμηση πριν από κάθε πείραμα γίνεται σε αυτόν.

Όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μορφοποιημένα σε σχήμα πελλέτας. Ανάλογα όμως, με το είδος του καυσίμου οι πελλέτες διαφέρουν ως προς το μήκος τους, τη διάμετρό τους, την υγρασία που περιέχουν και τη σκληρότητά τους. Για το λόγο αυτό, για ίδιες στροφές στον κινητήρα προκύπτει διαφορετική παροχή για κάθε καύσιμο.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ξεκινούσε ύστερα από αποσύνδεση του τελευταίου σιλό με το σιλό από το οποίο περνούσε ο κοχλίας. Στη συνέχεια οι πειραματιστές δημιουργούσαν τέτοια σύνδεση ώστε οι πελλέτες να καταλήγουν σε ζυγό με προσαρτημένο δοχείο. Μετά από ρύθμιση των στροφών λειτουργίας του κινητήρα ακολουθούσε, για διάστημα έξι λεπτών, καταγραφή των τιμών του ζυγού ανά λεπτό. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται εφικτή η αναγωγή της παροχής καυσίμου ανά ώρα. Η καταγραφή της τιμής του ζυγού ανά λεπτό αποσκοπεί στην εξακρίβωση του γεγονότος ότι υπήρχε σταθερή τροφοδοσία του καυσίμου. Η διαδικασία της βαθμονόμησης επαναλαμβάνονταν τουλάχιστον τρεις φορές για κάθε στροφή λειτουργίας του κινητήρα και σε κάθε καύσιμο για λόγους επαλήθευσης της ακρίβειας των μετρήσεων. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονταν η παροχή του καυσίμου (m<sub>f</sub>).

Στα διαγράμματα της εικόνας 5.14 παρουσιάζονται οι καμπύλες συσχέτισης μεταξύ της ένδειξης του ροοστάτη που είναι συνδεμένος με τον κοχλία και της παροχής μάζας των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν. Στα ίδια διαγράμματα φαίνεται και η τυπική απόκλιση της κάθε ανά λεπτό μέτρησης. Η γραμμικότητα που παρουσιάζει η καμπύλη συσχέτισης αποτελεί ένδειξη της ορθότητας των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.









Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την εικόνα 5.14, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του κοχλία δεν ρίπτεται ακριβώς η ίδια ποσότητα βιομάζας ανά λεπτό, αλλά υπάρχει μία μικρή απόκλιση στην τιμή αυτή. Το γεγονός αυτό προκαλεί μικρή απόκλιση στην ανά λεπτό παροχή αέρα που χρειάζεται για να προκύψει λ=0.3. Έτσι, η πραγματική τιμή του λόγου αέρα-καύσης (λ) παρουσιάζει διακύμανση, η οποία κρίθηκε απαραίτητο να υπολογιστεί. Έτσι, με βάση την τυπική απόκλιση των μετρήσεων υπολογίστηκε ο αντίστοιχος απαιτούμενος αέρας για στοιχιομετρική καύση για τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή. Ο λόγος της παροχής αέρα του πειράματος προς τις τιμές που υπολογίστηκαν δίνει τις τιμές της πραγματικής τιμής του λ που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Γιατρόφα							
διακύμανση πραγματικής τιμής του λ							
total airflow	airmass	λ (m+st.dev)	airmass	λ (m-st.dev)			
(από το μ.ο.)	stoichiometric		stoichiometric				
	(µ.o. + st.dev)		(µ.o st.dev)				
189.845478	658.2895386	0.288392063	607.3469816	0.312581578			
223.894808	765.7982312	0.292367883	726.8338221	0.308041262			
225.3857801	765.8322891	0.294301746	736.7395781	0.305923269			
239.0520304	810.4204727	0.294972842	783.25973	0.305201482			
243.2774453	827.6806046	0.29392672	794.169031	0.306329554			
271.8534167	955.3441445	0.284560719	857.0119668	0.317210759			
274.5878595	937.1642207	0.292998659	893.4215095	0.307344133			

Στους πίνακες που ακολουθούν απεικονίζεται η διακύμανση της τιμής του λ για κάθε καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ανάλογα με την ένδειξη του ροοστάτη του κοχλία. Παρατηρείται ότι η τιμή του λ κυμαίνεται μεταξύ 0.29 και 0.31.

Ηλίανθος							
διακύμανση πραγματικής τιμής του λ							
total airflow	airmass $\lambda$ (m+st.dev) airmass $\lambda$ (m-st.						
(από το μ.ο.)	stoichiometric		stoichiometric				
	(µ.o. + st.dev)		(µ.o st.dev)				
248.9125469	865.1851125	0.287698601	794.2318667	0.313400352			
239.775876	851.192013	0.281694227	747.3138271	0.320850314			
243.4799318	869.5476671	0.280007573	753.6518781	0.323066841			
221.5025343	768.9619752	0.28805395	707.7215867	0.312979763			
216.5637933	750.7709458	0.288455213	692.987676	0.312507424			
225.20659	774.0653409	0.290940026	727.311926	0.309642372			
182.2395433	632.9408165	0.287925093	581.9894718	0.313132027			
194.3394587	665.6599757	0.291950043	629.9364158	0.308506468			
190.635403	666.7300363	0.285925926	604.1726502	0.315531335			

Ξύλο Ιτιάς							
διακύμανση πραγματικής τιμής του λ							
total airflow	airmass $\lambda$ (m+st.dev) airmass $\lambda$ (m-st.dev)						
(από το μ.ο.)	stoichiometric		stoichiometric				
	(µ.o. + st.dev)		(µ.o st.dev)				
191.1080231	650.3346782	0.293861037	623.7188091	0.30640093			
191.3327769	653.1644144	0.292932029	622.3874316	0.307417482			
203.6646277	698.0554853	0.291759942	659.7086994	0.308719027			
201.8746723	692.7764026	0.291399464	653.054746	0.309123659			
214.6600682	728.4579004	0.294677384	702.6092209	0.305518433			
214.4353144	725.2732976	0.295661394	704.2954651	0.304467834			
276.7930548	943.6213486	0.293330641	901.6656836	0.306979693			
277.2412166	941.1609558	0.294573649	907.1138216	0.305630021			

**Πίνακας 5.1:** Διακύμανση πραγματικής τιμής του λ για τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν.

### 5.4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ

Σε μία ρευστοποιημένη κλίνη, σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης αλλά και της τερματικής ταχύτητας των σωματιδίων διαδραματίζει η διάμετρος και η σφαιρικότητα του υλικού που

εισάγεται για ρευστοποίηση. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται από τις εξισώσεις 4.6 και 4.11.

Σε μία ρευστοποιημένη κλίνη, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων επηρεάζει πολλές ιδιότητες των σωματιδιακών υλικών και είναι ένας αξιόπιστος δείκτης της ποιότητας και του είδους της ρευστοποίησης. Η ροή του ρευστού είναι πιο ομαλή διαμέσου μεγαλύτερων και πιο σφαιρικών σωματιδίων. Τα μικρά σωματίδια διαλύονται ευκολότερα και γρηγορότερα, ενώ έχουν και μεγαλύτερο ιξώδες σε σχέση με τα μεγάλα [39]. Για τους λόγους αυτούς κρίθηκε απαραίτητος ο καθορισμός της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Η παρελθοντική εφαρμογή πειραμάτων στη ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας που περιγράφεται, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η ιδανική κοκκομετρία του αδρρανούς υλικού είναι μεταξύ 350-500 μm. Η επιλογή της κοκκομετρίας αυτής έγινε γιατί για την επιθυμητή ποσότητα καυσίμου που εισάγεται, οπότε και αέρα, αποδείχθηκε ιδανική για την επίτευξη κατάλληλου ρυθμού ανακυκλοφορίας.

Για την προετοιμασία του πειράματος ως προς αυτή την παράμετρο χρησιμοποιήθηκαν ειδικά πιστοποιημένα κόσκινα με συγκεκριμένο μέγεθος διακένων. Τα κόσκινα τοποθετήθηκαν κατακόρυφα πάνω σε ηλεκτρικό τάρακτρο. Με κατάλληλη ρύθμιση του χρόνου λειτουργίας του ταράκτρου και της έντασης της δόνησης προέκυπτε ο διαχωρισμός των σωματιδίων ανάλογα με τη διάμετρό τους. Τα σωματίδια με κοκκομετρία μεταξύ 350-500 μm ήταν αυτά που συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που διεξήχθησαν.

#### 5.4.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η διάμετρος και η σφαιρικότητα του υλικού που εισάγεται για ρευστοποίηση επηρεάζει τόσο την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης (u<sub>mf</sub>) όσο και την τερματική ταχύτητα των σωματιδίων (u<sub>t</sub>). Το γεγονός αυτό επαληθεύεται από τις εξισώσεις 4.6 και 4.11.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός σύστηματος ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία η επιφανειακή ταχύτητα ρευστοποίησης ή απλούστερα ταχύτητα ρευστοποίησης (u<sub>f</sub>) θα πρέπει να είναι εντός των ορίων της γρήγορης ρευστοποίησης (fast fluidization). Μία τυπική ταχύτητα ρευστοποίησης για ανακυκλοφορία υλικού με μέση διάμετρο κόκκων 350 μm, είναι περίπου 3-5 m/s [18]. Έτσι, εξασφαλίζεται η ανακυκλοφορία της επιθυμητής ποσότητας στερεών ανά δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα αυτή (u<sub>f</sub>) προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση [40]:

$$u_f = \frac{Q_{gas} * T * 1013}{A_{riser} * P * 273, 15}$$
(5.3)

όπου,

uf: Ταχύτητα ρευστοποίησης σε [m/s]

 $Q_{gas}$ : Παροχή του ρευστού σε [Nm<sup>3</sup>/s]

T<sub>process</sub>: Η θερμοκρασία της κλίνης κατά τη διάρκεια της διεργασίας σε [K]

Pprocess: Η πίεση της κλίνης κατά τη διάρκεια της διεργασίας σε [Pa]

 $A_{riser}$ : Η διατομή του ανοδικού σωλήνα σε  $[m^2]$ .

# 5.4.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ

Για την εξακρίβωση του γεγονότος ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η κλίνη λειτουργεί σε κατάσταση ανακυκλοφορίας, ήταν αναγκαίος ο προσδιορισμός της ελάχιστης ταχύτητας εμφάνισης ταραχώδους ρευστοποίησης με φυσαλίδες (ums) καθώς και της ταχύτητας έναρξης ανακυκλοφορίας του υλικού (uc).

H u<sub>ms</sub> (minimum slugging velocity) υπολογίζεται από τη σχέση [32]:

$$u_{ms} = \left(\frac{d_p}{D}\right)^* \left(\frac{D_i}{D}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{2gL(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}}$$
(5.4)

Η ταχύτητα εμφάνισης ανακυκλοφορίας του υλικού (choking velocity) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{u_c \rho_g d_p}{\mu} = 0.936^* \text{A}^{0.47} \tag{5.5}$$

Όπου, d<sub>p</sub>: μέση διάμετρος σωματιδίων

D: διάμετρος ανοδικού σωλήνα

 $D_i$ : μέση διάμετρος δημιουργούμενης φυσαλίδας σε ταραχώδη κατάσταση ρευστοποίησης με φυσαλίδες

L: ύψος κλίνης

ρ<sub>s</sub>, ρ<sub>g</sub>: πυκνότητα στερεών και αερίων αντίστοιχα

Α: διατομή του ανοδικού σωλήνα

μ: συνεκτικότητα ή ιξώδες του ρευστού

Κατά τη διάρκεια κάποιου πειράματος, πριν την έναρξη της τροφοδοσίας του καυσίμου, καθορίζονται οι συνθήκες θερμοκρασίας και παροχής αέρα στις οποίες

θα γίνει η αεριοποίηση. Η κλίνη λειτουργεί σε αυτές τις συνθήκες χωρίς καύσιμο για διάρκεια 30 λεπτών περίπου. Με τον τρόπο αυτό οι πειραματιστές, μέσω του προγράμματος καταγραφής δεδομένων, επιβεβαιώνουν ότι κατά την έναρξη της αεριοποίησης η ταχύτητα ρευστοποίησης είναι τέτοια ώστε να υπάρχει σωστή ανακυκλοφορία του υλικού. Παρόλο που οι συνθήκες θερμοκρασίας και παροχής αέρα έχουν καθοριστεί πριν την τροφοδοσία του καυσίμου, με την έναρξη της παροχής του, αρχίζει να αυξάνεται η ταχύτητα ρευστοποίησης (u<sub>f</sub>). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την έναρξη της ρευστοποίησης, η u<sub>f</sub> εξαρτάται τόσο από την παροχή του αέρα όσο και από την ταχύτητα με την οποία συντελούνται οι αντιδράσεις μετατροπής της βιομάζας σε αέριο σύνθεσης. Έτσι, πριν την έναρξη της αεριοποίησης η κλίνη βρίσκεται σε κατάσταση ταραχώδους ρευστοποίησης με φυσαλίδες (slugging mode) ενώ στη συνέχεια με ίδιες παροχές αέρα περνάει σε κατάσταση ανακυκλοφορίας υλικού.

Το όριο μέσα στο οποίο πρέπει να βρίσκεται η ταχύτητα ρευστοποίησης για να θεωρείται ότι η κλίνη βρίσκεται σε κατάσταση ταραχώδους ρευστοποίησης είναι [32]:

$$u_{ms} \le u_f < u_c \tag{5.6}$$

Όταν το ρευστό βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση, οι φυσαλίδες που σχηματίζονται έχουν συγχωνευτεί και έχουν επεκταθεί έτσι ώστε να καλύπτουν σχεδόν όλο το ύψος της κλίνης. Η επιφάνεια της κλίνης αυξάνεται και ελαττώνεται με σταθερή συχνότητα. Συνεπώς, σε αυτή την κατάσταση παρατηρείται πολύ μεγάλη διακύμανση στην πτώση πίεσης. Όταν το ρευστό περάσει σε κατάσταση μεταφοράς υλικού, οι διακυμάνσεις στην πίεση μειώνονται σταδιακά [32]. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και αποτελεί ένδειξη της κατάστασης της ρευστοποίησης.

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, η σωστή εκτίμηση των παραμέτρων που περιγράφηκαν σε αυτή την υποενότητα καθορίζει την εξέλιξη του πειράματος.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

#### 6.1 ΚΑΥΣΙΜΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αεριοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής καύσιμα: ξύλο ιτιάς (willow), ηλίανθος (sunflower) και γιατρόφα (jatropha). Τα καύσιμα αυτά εξετάστηκαν ως προς την ποιότητα του αερίου σύνθεσης που παράγουν ενώ στον ηλίανθο έγινε επίσης έλεγχος σχετικά με την ποιότητα και την ποσότητα πισσών που παράγει. Τα αποτελέσματα του ελέγχου αυτού δεν εξαρτώνται μόνο από τα καύσιμα, αλλά και από το αδρανές υλικό που χρησιμοποιήθηκε καθώς και από τις συνθήκες κάθε πειράματος. Ο λόγος που στα καύσιμα του ξύλου ιτιάς και της γιατρόφα δεν υπήρξε δειγματοληψία πισσών ήταν επειδή δεν είχε διορθωθεί ακόμα το πρόβλημα που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.3. Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή των καυσίμων αυτών.

### 6.1.1 ΞΥΛΟ ΙΤΙΑΣ

Η ιτιά είναι δέντρο που ανήκει στην οικογένεια Salix (Ιτεοειδή), η οποία περιλαμβάνει περίπου 400 είδη φυλλοβόλων δέντρων και θάμνων. Τέτοια δέντρα υπάρχουν κυρίως σε υγρά εδάφη, σε ψυχρές αλλά και σε εύκρατες περιοχές, ενώ η πλειοψηφία τους βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο της γης [41]. Ως προς το είδος καλλιέργειας, η ιτιά αποτελεί πολυετή ενεργειακή καλλιέργεια καθώς συγκομίζεται ανά μικρά και τακτά χρονικά διαστήματα (2 ή 3 χρόνια) λόγω της ικανοτητάς του να αναπτύσσεται ταχέως μετά τη συγκομιδή [42]. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ένα δέντρο ιτιάς ενώ στην 4.2 το ξύλο της ιτιάς όπως υπάρχει στη φύση.





Εικόνα 6.1: Δέντρο ιτιάς [41].

**Εικόνα 6.2:** Ξύλο ιτιάς [41].

Το ξύλο ιτιάς, όπως και τα υπόλοιπα είδη βιομάζας, χρησιμοποιήθηκαν αφού πρώτα είχαν κατεργαστεί έτσι ώστε να πάρουν τη μορφή πελλετών. Οι πελλέτες του

συγκεκριμένου καυσίμου μεταφέρθηκαν στη μονάδα από την Πολωνία, σε συνεργασία με το University of Warmia and Mazury in Olsztyn, μέσω του προγράμματος Eurobioref.

Σε ότι αφορά τη φυσική της σύσταση, τη χαρακτηρίζει η αμελητέα ποσότητα θείου ενώ η περιεκτικότητά της σε τέφρα είναι αρκετά μικρή (2.19%, όπως έχει ληφθεί από τη φύση). Οι αναλύσεις έδειξαν ότι οι πελλέτες της ιτιάς χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, σε σύγκριση με άλλα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στη μονάδα αυτή. Η μικρή περιεκτικότητα της σε τέφρα επιτρέπει την εκτέλεση διεργασιών αεριοποίησης με ξύλο ιτιάς σε υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς την εμφάνιση συσσωματώσεων (agglomerates) άρα και απορευστοποίησης της κλίνης (defluidization). Συνεπώς, σύμφωνα με τη στοιχειακή της ανάλυση, το ξύλο από ιτιά θεωρείται ως ένα καύσιμο υψηλής αξιοπιστίας, κατάλληλο για διεργασίες αεριοποίησης.

### 6.1.2 ГІАТРОФА

Η γιατρόφα είναι ένα ανθοφόρο φυτό που ανήκει στην οικογένεια των Euphorbiaceae. Σε αυτή την οικογένεια περιλαμβάνονται περίπου 170 είδη χυμώδων φυτών, δέντρων και θάμνων ενώ η πλειοψηφία αυτών είναι αμερικάνικης προέλευσης. Χαρακτηριστικό του φυτού αυτού είναι ότι περιέχει αρκετές ενώσεις που είναι ιδιαίτερα τοξικές [43]. Στην εικόνα 6.3 παρατίθενται δύο είδη γιατρόφας.





Εικόνα 6.3: Δύο είδη γιατρόφας [43].

Η γιατρόφα είναι μία εν δυνάμει και υποσχόμενη ενεργειακή καλλιέργεια, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας ελαίου που έχει στον καρπό της και της ανθεκτικότητας που παρουσιάζει στην ξηρασία. Η εγκατάσταση τροφοδοτήθηκε με πελλέτες γιατρόφας μήκους 4-6 mm. Η περιεκτικότητά της σε τέφρα είναι 8,25% κατά βάρος (w/w) όπως συλλέχθηκε από τη φύση(a.r) και 8,79% w/w σε ξηρή βάση (db). Σε ότι αφορά το ποσοστό υγρασίας που έχει στη σύστασή της, δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό καθώς αποτελεί το 6.17%. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που παρουσιάζει η γιατρόφα είναι ότι κατατάσσεται στα βιοκαύσιμα δεύτερης γεννιάς. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση της γίνεται αποκλειστικά για ενεργειακούς σκοπούς, καθώς δεν μπορεί ούτε να καλλιεργηθεί ούτε να χρησιμοποιηθεί για βρώση.

#### **6.1.3 ΗΛΙΑΝΘΟΣ**

Ο ηλίανθος είναι ένα ετήσιο φυτό που ανήκει στην οικογένεια Compositae. Διαθέτει μεγάλη κεφαλή ανθήσεως και η ονομασία του προέρχεται από το σχήμα και την εικόνα του λουλουδιού, η οποία συχνά χρησιμοποιείται για να απεικονίσει τον ήλιο. Το φυτό περιλαμβάνει έναν τραχύ, τριχωτό μίσχο, ανοιχτά, οδοντωτά και τραχιά φύλλα καθώς και κυκλική κεφαλή στο κέντρο του λουλουδιού. Οι κεφαλές αποτελούνται από πολλά επιμέρους λουλούδια, τα οποία οριμάζουν σε σπόρους κατά εκατοντάδες [44]. Η φωτογραφία της εικόνας 6.4 απεικονίζει ένα φυτό ηλίανθου.



Εικόνα 6.4: Λουλούδι ηλίανθου [44].

Ο ηλίανθος καλλιεργείται σε αρδευόμενα εδάφη και σε αντίθεση με τη γιατρόφα, μπορεί να αξιοποιήθει με τη βρώση του, εκτός από την ενεργειακή του μετατροπή σε αέριο σύνθεσης. Παρά ταύτα, το κομμάτι του ηλίανθου που χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο στα πειράματα αεριοποίησης δεν ήταν ο σπόρος του φυτού, αλλά τα υπολείμματα αυτού. Αυτά δεν αξιοποιούνται για βρώση ή για άλλη χρήση εκτός από ενεργειακή αξιοποίηση. Το γεγονός αυτό το κατατάσσει στα βιοκαύσιμα δεύτερης γεννιάς. Ο ηλίανθος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αυτά, καλλιεργήθηκε και πελλετοποιήθηκε από Έλληνα παραγωγό βιοκαυσίμων. Το μήκος των πελλετών ήταν 4-6 mm. Το καύσιμο αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα καθώς περιέχει 8.97% κατά βάρος σε ξηρή βάση. Σε ότι αφορά το ποσοστό του σε υγρασία, είναι το 8.10% της σύστασής του.

### 6.1.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στον πίνακα 6.1, συνοψίζονται η απόλυτη και η προσεγγιστική στοιχειακή ανάλυση των καυσίμων που περιγράφηκαν παραπάνω. Ανάλογα με την ανάλυση αυτή έχουν προκύψει κάποιες παράμετροι στα πειράματα που διεξήχθησαν ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν στην σύσταση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.

	Ιτιά	Γιατρόφα	Ηλίανθος
Προσεγγιστική	%	%	%
ανάλυση			
(%,w/w,a.r)			
Συνολική υγρασία	8.29	6.17	8.10
Τέφρα	2.19	8.25	8.85
Πτητικά	76.41	74.08	72.56
Άνθρακας	13.11	11.50	10.49
LHV [kcal/kg]	4139	4080	3734
LHV [MJ/kg]	17.32	17.07	15.62

	Ιτιά	Γιατρόφα	Ηλίανθος
Προσεγγιστική	%	%	%
ανάλυση (%,w/w,			
db)			
Τέφρα	2.39	8.79	9.63
Πτητικά	83.31	78.95	78.95
Άνθρακας	14,30	12.26	11.42
HHV [MJ/kg]	20.55	19.90	18.52
LHV [MJ/kg]	18.88	18.19	17.00

Πίνακας 6.1: Προσεγγιστική ανάλυση των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν.

	Ιτιά	Γιατρόφα	Ηλίανθος
Απόλυτη ανάλυση	%	%	%
(%,w/w, db)			
С	48.6	47.4	46.00
Н	6.63	7.08	6.00
N	3.00	5.68	0.87
S	0.0	0.11	0.0
Cl	0.06	0.20	0.19
0	39.32	30.74	37.31

Πίνακας 6.2: Απόλυτη ανάλυση των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στην εικόνα 6.5 απεικονίζονται σε φωτογραφία οι πελλέτες των τριών καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν για αεριοποίηση.





α)



γ)

Εικόνα 6.5: α. Πελλέτες ιτιάς. β. Πελλέτες γιατρόφας. γ. Πελλέτες ηλίανθου.

### 6.2 ΑΔΡΑΝΕΣ ΥΛΙΚΟ

### **6.2.1 ΟΛΙΒΙΝΗΣ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η λειτουργία μίας ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία απαιτεί την χρήση κάποιου αδρανούς υλικού για να υπάρχει ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας και μάζας σε όλο το ύψος της κλίνης.

Ο ολιβίνης είναι ένα αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται συχνά σε διεργασίες αεριοποίησης, λόγω των καταλυτικών ιδιοτήτων του και την αποτελεσματικότητα που παρουσιάζει στην αποσύνθεση και περιορισμό των ενώσεων των πισσών. Πρόκειται για ένα από τα άφθονα μέταλλα που υπάρχουν στο φλοιό της γης και αποτελείται από ένα φυσικό στερεό διάλυμα πυριτικού μαγνησίου (φορστερίτης, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) και πυριτίου του σιδήρου (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) [45].

Οι ιδιότητές του και η χημική του σύσταση μπορούν να το κατατάξουν ως το ενδιάμεσο αδρανές υλικό μεταξύ της χαλαζιακής άμμου (quartz sand) και του μαγνησίτη (magnesite). Η αντίσταση στην τριβή μεταξύ των κόκκων του που εμφανίζει ο ολιβίνης είναι πολύ καλύτερη από αυτή του μαγνεσίτη και η

περιεκτικότητα του σε σίλικα (silica) μισή από αυτή της χαλαζιακής άμμου. Παρ' όλα αυτά είναι αρκετά υψηλή ώστε να δημιουργεί τις προϋποθέσεις σχηματισμού συσσωματώσεων σε κατάλληλη θερμοκρασία [40].

Για τις ανάγκες των πειραμάτων που θα περιγραφούν, χρησιμοποιήθηκε ολιβίνης με διάμετρο κόκκων 350-500 (μm) και πυκνότητα 3200 (kg/m<sup>3</sup>). Στην εικόνα 6.6 παρατίθεται ενδεικτικά μία φωτογραφία μίας μικρής ποσότητας του ολιβίνη που χρησιμοποιήθηκε.



**Εικόνα 6.6:** Ολιβίνης που χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές υλικό κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

#### 6.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΣ ΟΛΙΒΙΝΗΣ

Στα πλαίσια μίας σειράς πειραμάτων που είχε σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης του αδρανούς υλικού στο παραγόμενο αέριο σύνθεσης και στη σύνθεση των πισσών, λήφθηκε η απόφαση θέρμανσης του ολιβίνη και χρήσης του στη συνέχεια ως επεξεργασμένο.

Έτσι, ο ολιβίνης τέθηκε σε θερμοκρασία 1100 °C γεγονός που βελτίωσε τις μηχανικές του ιδιότητες σε σχέση με τη χρήση του σε ρευσοποιημένη κλίνη. Η αρχική του χημική σύνθεση [(Mg0.92,Fe0.08)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>] μετασχηματίστηκε, λόγω της θερμικής αποσύνθεσης στην υψηλή θερμοκρασία, και παρατηρήθηκε αφυδάτωση και οξείδωση του πυριτίου του σιδήρου. Αποτέλεσμα αυτής της θερμικής διεργασίας στην οποία υποβλήθηκε ο ολιβίνης ήταν η απώλεια βάρους του λόγω εξαφάνισης της υγρασίας από τη σύστασή του [45].

Ως προς την ποιότητα του αερίου σύνθεσης και των ενώσεων των πισσών, αυτός ο δομικός μετασχηματισμός του ολιβίνη ενίσχυσε τις ιδιότητές του ως

καταλύτη. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η πρόκληση θερμικής διάσπασης των ενώσεων των πισσών κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Έτσι, η χρήση του επεξεργασμένου ολιβίνη συνδυάστηκε από μείωση της ποσότητας των ενώσεων των πισσών και αύξηση της κατ' όγκο σύστασης του υδρογόνου (H<sub>2</sub>) σε σχέση με αντίστοιχα πειράματα που διεξήχθησαν με απλό ολιβίνη [46].

Για την διαπίστωση του χρόνου που απαιτείται για την αφυδάτωση και οξείδωση του ολιβίνη τοποθετήθηκαν κάψες με το αδρανές υλικό σε πυραντήριο για διαφορετικό χρονικό διάστημα κάθε φορά. Έτσι, έγιναν δοκιμές θέρμανσής του για 5, για 12 και για 15 ώρες στους 1100 °C. Αποδείχθηκε ότι ύστερα από 5 ώρες ο ολιβίνης αφυδατώνεται σχεδόν πλήρως καθώς η μεταβολή βάρους ήταν αμελητέα μεταξύ των υπολοίπων δοκιμών. Έτσι, η απώλεια καθαρού βάρους που σημειώθηκε στην κάψα μικρού μεγέθους ήταν 9.66% ενώ στη μεγάλη κάψα 10.92%.

Στον πίνακα 6.3 φαίνονται οι ποσοστιαίες μεταβολές βάρους του ολιβίνη για κάθε δοκιμή σε σχέση με την αρχική ποσότητα καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ των δοκιμών.

	Μικρή κάψα	Μεγάλη κάψα
άδεα κάψα (g)	88.9232	134.8357
κάψα με αρχικό ολιβίνη (g)	92.8637	140.2279
αρχικό βάρος ολιβίνη (g)	3.9405	5.3922
βάρος κάψας μετά από 5h στους 1100C	92.483	139.6389
τελικό βάρος ολιβίνη μετά από 5h στους 1100C	3.5598	4.8032
μεταβολή βάρους μετά από 5h (%)	9.661210506	10.92318534
βάρος κάψας μετά από 12h στους 1100C	92.482	139.6188
καθαρό βάρος ολιβίνη μετά από 12h στους 1100C	3.5588	4.7831
μεταβολή βάρους από 5 - 12h στους 1100C (%)	0.028091466	0.418471019
μεταβολή βάρους αρχικ. Ολιβίνη -12h στους 1100C (%)	9.686587996	11.295946
βάρος κάψας μετά από 15h στους 1100C	92.4811	139.6138
καθαρό βάρος ολιβίνη μετά από 15h στους 1100C	3.5579	4.7781
μεταβολή βάρους από 12 - 15h στους 1100C (%)	0.025295821	0.104534716
μεταβολή βάρους αρχικ. Ολιβίνη -15h στους 1100C (%)	9.709427738	11.38867253

Πίνακας 6.2: Δοκιμές θέρμανσης ολιβίνη στο πυραντήριο.

Στην εικόνα 6.7 φαίνεται σε φωτογραφία ο επεξεργασμένος ολιβίνης και στην εικόνα 6.8 υποδεικνύεται η οπτική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο.



Εικόνα 6.7: Επεξεργασμένος ολιβίνης. Εικόνα 6.8: Οπτική σύγκριση επεξεργασμένου

και απλού ολιβίνη.

### 6.2.3 ΧΑΛΑΖΙΑΚΗ ΑΜΜΟΣ

Η χαλαζιακή άμμος αποτελεί το τρίτο αδρανές υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας που μελετάται. Πρόκειται για ένα υλικό που συναντάται σε αφθονία στη φύση και είναι φτηνό ως προς την αγοραστική του αξία. Η αντοχή που παρουσιάζει σε φαινόμενα διάσπασης των κόκκων του λόγω τριβών καθώς και η διαθεσιμότητά του, κατατάσσουν τη χαλαζιακή άμμο ως ένα πολύ ελκυστικό αδρανές υλικό για αρκετούς τύπους αεριοποιητών που στηρίζονται στην τεχνολογία της ρευστοποίησης.

Παρ' όλα αυτά, η υψηλή περιεκτικότητά του σε σίλικα (silica) δημιουργεί εύκολα ευτηκτικά χαμηλού σημείου τήξης. Αυτά τα ευτηκτικά όταν τηχθούν σχηματίζουν κολλώδη επιφάνεια γύρω από τα σωματίδια του αδρανούς υλικού, και σε συνδυασμό με την υψηλή περιεκτικότητα σε αλκαλιμέταλλα ορισμένων ειδών βιομάζας οδηγούν στο φαινόμενο των συσσωματώσεων [40].

Στην εικόνα 6.9 απεικονίζεται η χαλαζιακή άμμος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αεριοποίησης.



Εικόνα 6.9: Χαλαζιακή άμμος.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 7.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ

#### 7.1.1 ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ

Μετά τις υποχρεωτικές αλλαγές που έγιναν στον αεριοποιητή και περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 5, διεξήχθησαν δύο πειράματα μόνο με αδρανές υλικό. Τα πειράματα αυτά αποσκοπούσαν στον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των τροποποιήσεων ως προς την ανακυκλοφορία του υλικού. Το αδρανές υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ολιβίνης. Στον πίνακα 7.1 φαίνονται οι ιδιότητες που χαρακτήριζαν το υλικό που χρησιμοποιήθηκε.

Πυκνότητα [kg/m3]	3200
Μέση διάμετρος (D <sub>p</sub> ) [μm]	350
Ποσότητα ολιβίνη [kg]	8

Πίνακας 7.1: Ιδιότητες χρησιμοποιούμενου ολιβίνη.

Τα δύο πειράματα ανακυκλοφορίας έγιναν σε θερμοκρασία μέχρι 250 °C. Με βάση την εξίσωση 5.3, δεν επιτεύχθηκε ταχύτητα ρευστοποίησης ανάλογη με αυτή των πειραμάτων με καύσιμο καθώς τόσο η θερμοκρασία όσο και η παροχή του ρευστού ήταν πολύ μικρότερες από αυτές που θα επικρατούσαν σε ένα πείραμα αεριοποίησης. Παρ' όλα αυτά η ταχύτητα ρευστοποίησης ήταν τέτοια έτσι ώστε να παρατηρηθεί ανακυκλοφορία του αδρανούς υλικού. Στο διάγραμμα 7.1 φαίνεται ότι το αδρανές υλικό ανακυκλοφορούσε.



Εικόνα 7.1: Ένδειξη ανακυκλοφορίας αδρανούς υλικού χωρίς βιοκαύσιμο.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές αεριοποίησης με χρήση ξύλου ιτιάς (willow) ως καύσιμο σε συνθήκες ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία. Στα πειράματα αυτά με βιομάζα διαπιστώθηκε η σωστή λειτουργία του βρόχου και σε συνθήκες αεριοποίησης. Στο δεύτερο πείραμα με ξύλο ιτιάς διαφοροποιήθηκε μόνο η παροχή μάζας του καυσίμου και αποσκοπούσε τόσο στην επιβεβαίωση της ανακυκλοφορίας όσο και στον έλεγχο της συμπεριφοράς της κλίνης για ίδιο καύσιμο αλλά για διαφορετικές παροχές μάζας. Έτσι, κατά τη διάρκεια των δύο αυτών πειραμάτων παρατηρήθηκε επιτυχής ανακυκλοφορία του υλικού. Στην εικόνα 7.2 φαίνεται η πίεση συναρτήσει του χρόνου στο σωλήνα ανόδου πάνω από το διασκορπιστή και η πίεση στην L-valve. Παρατηρείται ότι όταν η πίεση στο σωλήνα ανόδου πέφτει, την ίδια στιγμή αυξάνεται στην L-valve. Επίσης στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η διακύμανση των πιέσεων είναι σχετικά μικρή. Από το γεγονός αυτό συμπεραίνεται ότι η κλίνη βρίσκονταν σε κατάσταση ανακυκλοφορίας του αδρανούς υλικού και όχι σε ταραχώδη ρευστοποίηση με φυσαλίδες (slugging mode). Σε ορισμένα σημεία, παρατηρείται αρκετά απότομη αύξηση της πίεσης στην L-valve. Το γεγονός αυτό οφείλεται (μάλλον) σε στιγμιαία συσσώρευση εξανθρακώματος στο βρόχο ανακυκλοφορίας. Στο παρακάτω διάγραμμα αυτό το φαινόμενο υποδεικνύεται με το πλαίσιο καφέ χρώματος ενώ η εύρυθμη ανακυκλοφορία του υλικού με το μαύρο πλαίσιο.

Στην εικόνα 7.3 φαίνεται το διάγραμμα του μέσου όρου πτώσης πίεσης συναρτήσει του ύψους του αντιδραστήρα για την ίδια χρονική στιγμή με το διάγραμμα 7.2. Από αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι σε όλο το ύψος του αντιδραστήρα κυκλοφορεί υλικό.



**Εικόνα 7.2:** Διάγραμμα πιέσεων συναρτήσει του χρόνου στον ανοδικό και καθοδικό σωλήνα με χρήση ξύλου ιτιάς ως καύσιμο.



**Εικόνα 7.3:** Διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει του ύψους του σωλήνα ανόδου σε πείραμα αεριοποίησης ξύλου ιτιάς.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εκτός από πειράματα με ξύλο ιτιάς πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αεριοποίησης σε συνθήκες ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία με καύσιμα τη γιατρόφα και τον ηλίανθο.

Όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα 5.4.5, πριν την έναρξη της τροφοδοσίας του καυσίμου, το σύστημα λειτουργεί για διάρκεια 30 λεπτών περίπου στην θερμοκρασία και στην παροχή του αέρα που έχει καθοριστεί να γίνει η αεριοποίηση. Στα διαγράμματα της εικόνας 7.4 απεικονίζονται οι τιμές της πίεσης πάνω από το διασκορπιστή πριν και μετά την τροφοδοσία του καυσίμου για διάρκεια 15 λεπτών. Οι δύο καταστάσεις αναφέρονται σε ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και παροχής αέρα. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι πριν την τροφοδοσία του καυσίμου η διακύμανση της πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη διεργασία της αεριοποίησης. Όπως έχει αποδειχθεί στην ενότητα 5.4.5, το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη μετάβασης από την ταραχώδη ρευστοποίηση με φυσαλίδες, πριν την τροφοδοσία του καυσίμου, σε ρευστοποίηση με ανακυκλοφορία των στερεών (αδρανές υλικό + εξανθράκωμα), μετά τη ρίψη του καυσίμου.







**Εικόνα 7.4:** Διακύμανση της πίεσης πριν και μετά την τροφοδοσία του καυσίμου για κάθε καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε για αεριοποίηση.

Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης (A= 0.00447 m<sup>2</sup>, D= 0.078 mm) και για μέση διάμετρο σωματιδίων, d<sub>p</sub>= 350 μm, είναι u<sub>ms</sub>= 1.037 (m/s) και u<sub>c</sub>=2.245 (m/s).

Από την εξίσωση 5.3 για το αντίστοιχο πείραμα αεριοποίησης με ξύλο ιτιάς προέκυψε ότι η ταχύτητα ρευστοποίησης πριν την τροφοδοσία καυσίμου υπολογίστηκε  $u_{f1}$ = 2.17 (m/s), ενώ μετά την παροχή καυσίμου  $u_{f2}$ =4.14 (m/s). Παρομοίως, για το πείραμα με γιατρόφα, υπολογίστηκε  $u_{f1}$ = 2.21 (m/s) (πριν την τροφοδοσία καυσίμου) και  $u_{f2}$ = 4.93 (m/s). Σε ότι αφορά το πείραμα αεριοποίησης με ηλίανθο ως καύσιμο, υπολογίστηκε η  $u_{f1}$ = 1.72 (m/s) και  $u_{f2}$ = 3.3 (m/s).

Έτσι, πριν την έναρξη της αεριοποίησης η κλίνη λειτουργούσε σε κατάσταση ταραχώδους ρευστοποίησης με φυσαλίδες ενώ στη συνέχεια σε ομοιόμορφη ανακυκλοφορία των στερεών. Σε όλες τις περιπτώσεις ισχύει δηλαδή η σχέση 5.6 της παραγράφου 5.4.5.

## 7.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ.

Στόχος των πειραμάτων αεριοποίησης που πραγματοποιήθηκαν με ηλίανθο ήταν ο έλεγχος της επίδρασης του αδρανούς υλικού στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης επιβάλλοντας ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες και στις τρεις περιπτώσεις, μέσω των αντιστάσεων. Όπως αποδείχθηκε στην πράξη, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων του κάθε αδρανούς υλικού, οι αντιδράσεις αεριοποίησης δεν συντελέστηκαν στον ίδιο χρόνο, ούτε στην ίδια ταχύτητα μεταξύ των πειραμάτων αυτών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μικρή απόκλιση στο θερμοκρασιακό προφίλ της κλίνης μεταξύ των πειραμάτων αυτών παρά το γεγονός ότι οι τιμές των αντιστάσεων ήταν ίδιες κάθε φορά. Στα διαγράμματα της εικόνας 7.5 φαίνεται η διαφοροποίηση στις θερμοκρασίες όταν είχε οριστεί ως θερμοκρασία αεριοποίησης 750 °C ανάλογα με το ύψος της κλίνης ενώ στην εικόνα 7.6 παρίστανται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη θερμοκρασία των 800 °C. Στο ύψος των 6 μέτρων απεικονίζονται δύο θερμοκρασίες. Η υψηλότερη αναφέρεται στη θερμοκρασία στην κορυφή του ανοδικού σωλήνα ενώ η μικρότερη στη θερμοκρασία μετά τον κυκλώνα.



**Εικόνα 7.5:** Θερμοκρασιακό προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα για τα τρία αδρανή υλικά στη σταθερή κατάσταση των 750 °C.



**Εικόνα 7.6:** Θερμοκρασιακό προφίλ καθ' ύψος του ανοδικού σωλήνα για θερμοκρασία αεριοποίησης 800 °C.

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι όταν η αεριοποίηση γινότανε με επεξεργασμένο ολιβίνη ως αδρανές υλικό, το θερμοκρασιακό προφίλ καθ' ύψος της κλίνης παρουσίαζε τη μικρότερη διακύμανση. Αντίθετα η μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρήθηκε με αδρανές υλικό τη χαλαζιακή άμμο. Κυρίως στη θερμοκρασία των 800 °C όταν έγινε χρήση χαλαζιακής άμμου, παρατηρήθηκαν εμφανώς πιο υψηλές θερμοκρασίες από τις άλλες περιπτώσεις στο κάτω μέρος του ανοδικού σωλήνα και πιο χαμηλές στο πάνω μέρος. Στην παράγραφο 7.3 εξηγείται ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό το φαινόμενο στο θερμοκρασιακό προφίλ.

### 7.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα προκαταρκτικά πειράματα διεξήχθησαν με καύσιμα το ξύλο ιτιάς και τη γιατρόφα και στόχο είχαν τόσο τον έλεγχο της συμπεριφοράς της εγκατάστασης ως προς την παροχή καυσίμου, όσο και την αντοχή της σε μακράς διάρκειας δοκιμές αεριοποίησης. Τα πειράματα αυτά έγιναν με αδρανές υλικό ολιβίνη ενώ ο λόγος αέρα καυσίμου έμεινε σταθερός και ίσος με 0.3. Μέσα από αυτή τη σειρά πειραμάτων εξετάστηκε ακόμα η επίδραση της θερμοκρασίας στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης σε καθένα από τα δύο καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν. Στις δοκιμές αυτές δεν πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία πισσών για το λόγο ότι δεν είχε επιδιορθωθεί το πρόβλημα που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.3

Στον πίνακα 7.2 συνοψίζονται τα δεδομένα κάθε σταθερής κατάστασης των δοκιμών αεριοποίησης που συντελέστηκαν. Παρατηρείται ομοιότητα στα περισσότερα δεδομένα του πίνακα ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των καταστάσεων αυτών ως προς τη θερμοκρασία, το είδος καυσίμου καθώς και την παροχή μάζας καυσίμου.

Κατάσταση	1	2	3	4	5	6
Είδος καυσίμου	Ξύλο ιτιάς	Ξύλο ιτιάς	Ξύλο ιτιάς	Ξύλο ιτιάς	Γιατρόφα	Γιατρόφα
Θερμοκρασία (Τ) [°C]	750	800	750	800	800	800
Παροχή μάζας καυσίμου (m <sub>f</sub> ) [kg/h]	9	9	9.5	9.5	7.64	9.7
Μάζα αδρανούς υλικού [kg]	8 (kg) Ολιβίνης	8(kg) ολιβίνης	8 (kg) ολιβίνης	8 (kg) ολιβίνης	8 (kg) Ολιβίνης	8(kg) ολιβίνης
Διάμετρος κόκκων (d <sub>p</sub> ) [μm]	350-500	350-500	350-500	350-500	350-500	350-500
Λόγος αέρα καυσίμου (λ)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Κατάσταση ρευστοποίησης	Ανακυκλοφο ρία υλικού	Ανακυκλοφο ρία υλικού				
Λόγος u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> και u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub>	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =5.29 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.81	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =5.63 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.87	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =5.34 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.82	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =5.75 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.89	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =5.31 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.82	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =6.9 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =1.06
Παροχή αέρα (Q <sub>air</sub> ) [Nm <sup>3</sup> /h]	11.44	11.88	11.94	12.02	11.52	14.89
Παραγόμενο αέριο (Q <sub>gas</sub> ) [Nm <sup>3</sup> /h]	18.84	19.99	19	20.23	18.53	22.4
Ποσοστό μετατροπής άνθρακα σε syngas (CCE) [%]	75 %	87.8 %	73.4 %	83.1 %	70.1 %	69.6 %
LHV [MJ/kg]/[MJ/Nm <sup>3</sup> ]	11.40/ 3.41	15.03/ 4.35	11.70/ 3.51	13.97/ 4.11	14.43/ 3.38	12.72/ 3.19
CGE [%]	58.20 %	78.75%	56.64 %	75.63%	71.91 %	67.72%
Διάρκεια σταθερής κατάστασης [λεπτά]	34	28	38	35	247	78

**Πίνακας 7.2:** Σύνοψη συνθηκών προκαταρκτικών πειραμάτων αεριοποίησης ξύλου ιτιάς και γιατρόφας σε κατάσταση ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία.

Στο διάγραμμα 7.7 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των βασικών συστατικών του αερίου σύνθεσης (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) για τις έξι καταστάσεις αεριοποίησης. Ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας, με την αύξησή της παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και ταυτόχρονη μείωση του διοξειδίου (CO<sub>2</sub>). Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς συμβαίνει λόγω της ενδόθερμης αντίδρασης boudouard. Επίσης, παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του

υδρογόνου τόσο λόγω της αντίδρασης μετατόπισης (shift reaction) όσο και λόγω της ενδόθερμης αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου. Από την τελευταία θα αναμενότανε πτώση στη συγκέντρωση του μεθανίου γεγονός που δεν επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει οτί τα moles του υδρογόνου αυξάνονται λόγω μείωσης της ποσότητας των υδρατμών (H<sub>2</sub>O). Επίσης, μεταξύ των δύο καυσίμων, σε ίδια θερμοκρασιακή κατάσταση σημειώθηκε καλύτερη παραγωγή αερίου σύνθεσης στην ποσότητα βιομάζας στην οποία στυντελείται η διεργασία ανά δευτερόλεπτο, σημειώθηκε καλύτερη παραγωγή αερίου σύνθεσης όταν εκαλύτερη παραγωγή αερίου σύνθεσης της ποσότητας των οποία στυντελείται η διεργασία ανά

Έτσι, για παροχή καυσίμου 9 (kg/h) και αεριοποίηση ξύλου ιτιάς, το μονοξείδιο αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία από 12.3% κατ'όγκο ξηρού αερίου (κ.ο.ξ) στους 750 °C, σε 16.5% κ.ο.ξ στους 800 °C ενώ το διοξείδιο ελαττώθηκε από 15.1% κ.ο.ξ σε 14.1% κ.ο.ξ. Η σύσταση του υδρογόνου μεταβλήθηκε από 7.2% κ.ο.ξ στους 750 °C σε 9.7% κ.ο.ξ στους 800 °C. Το μεθάνιο σημείωσε μικρή αύξηση, καθώς από 3.0% κ.ο.ξ στους 750 °C αυξήθηκε σε 3.4% κ.ο.ξ στους 800 °C. Όσον αφορά την παρουσία της υγρασίας στο παραγόμενο αέριο από 23.88% στους 750 <sup>0</sup>C ελαττώθηκε σε 18.64% στους 800 °C. Αντίστοιχα, για παροχή μάζας 9.5 (kg/h), η συγκέντρωση του μονοξειδίου μετατράπηκε από 12.2% κ.ο.ξ στους 750 °C σε 15.3% κ.ο.ξ στους 800  $^{\circ}$ C ενώ το διοξείδιο μειώθηκε από 15.8% κ.ο.ξ σε 14.4% κ.ο.ξ. Το H<sub>2</sub> σημείωσε αύξηση από 7.3% κ.ο.ξ σε 8.9% κ.ο.ξ ενώ το CH4 διατηρήθηκε σχεδόν σταθερό καθώς από 3.3% κ.ο.ξ μετατράπηκε σε 3.4% κ.ο.ξ. Αιτία της αύξησης στη συγκέντρωση του H<sub>2</sub> ήταν η ποσοστιαία πτώση της υγρασίας του παραγόμενου αερίου. Αυτή μεταβλήθηκε από 24.54% σε 20.42%. Σε ότι αφορά την αεριοποίηση γιατρόφας, η διεργασία συντελέστηκε μόνο για θερμοκρασία 800 °C. Συγκεκριμένα, το CO από 10.8% κ.ο.ξ με παροχή 7.64 (kg/h) μειώθηκε σε 9.9% κ.ο.ξ με παροχή 9.7 (kg/h). Αντίστοιχα το CO2 από 11.5% κ.ο.ξ στη μικρή παροχή μάζας αυξήθηκε σε 13.2% κ.ο.ξ στη μεγαλύτερη παροχή. Η συγκέντρωση του υδρογόνου μεταβλήθηκε από 10% κ.ο.ξ με παροχή 7.64 (kg/h) ελαττώθηκε σε 8.6% κ.ο.ξ με παροχή 9.7 (kg/h), γεγονός που αποδεικνύεται από την αύξηση στην υγρασία του syngas από 17.51% σε 20.19%. Το μεθάνιο διατηρήθηκε σχεδόν σταθερό, καθώς από 2.6% κ.ο.ξ στους 750 °C αυξήθηκε σε 2.8% κ.ο.ξ στους 800 °C. Στο διάγραμμα 7.8 φαίνονται τα αποτελέσματα της αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου.



**Εικόνα 7.7:** Κατ' όγκο σύσταση αερίου σύνθεσης για τις σταθερές καταστάσεις αεριοποίησης του πίνακα 7.2.





Στο διάγραμμα 7.9 παρουσιάζεται το ποσοστό του άνθρακα που μετατράπηκε σε παραγόμενο αέριο syngas καθώς επίσης και η ποσότητα του εξανθρακώματος που συλλέχθηκε από τον μικρό κυκλώνα, για τις έξι σταθερές καταστάσεις αεριοποίησης. Στις δοκιμές αεριοποίησης με ξύλο ιτιάς παρατηρήθηκε καλύτερη μετατροπή άνθρακα από εκείνες με γιατρόφα. Επίσης, σε ότι αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας, η αύξησή της ευννοούσε τις ενδόθερμες αντιδράσεις αεριοποίησης με αποτέλεσμα να σημειώνεται καλύτερη μετατροπή του άνθρακα. Τέλος, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της σύστασης του αερίου σύνθεσης, όσο μικρότερη ήταν η παροχή καυσίμου τόσο αυξημένος ήταν ο δείκτης CCE. Ως προς την εξαγωγή εξανθρακώματος από τον μικρό κυκλώνα, στην αεριοποίηση γιατρόφας σημειώθηκε μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με το ξύλο ιτιάς.

Συγκεκριμένα, στην αεριοποίηση ξύλου ιτιάς, στους 750 °C ο δείκτης CCE κυμάνθηκε από 75% για παροχή 9 (kg/h) σε 73.4% για παροχή 9.5 (kg/h). Στους 800 °C το ποσοστό αυτό αυξήθηκε και κυμάνθηκε από 87.8% για παροχή 9 (kg/h) σε 83.1% για παροχή 9.5 (kg/h). Για αεριοποίηση γιατρόφας, στους 800 °C ο δείκτης CCE από 70.6% για παροχή 7.64 (kg/h) μειώθηκε σε 69.6% για παροχή 9.7 (kg/h). Ως προς τη συλλογή εξανθρακώματος, στην αεριοποίηση ξύλου ιτιάς κυμάνθηκε μεταξύ 2.5-3.5 % με ελαφρώς αυξημένο ποσοστό στη μεγαλύτερη θερμοκρασία, ενώ στην αεριοποίηση γιατρόφας, στη μικρή παροχή σημειώθηκε ποσοστό 7.2% ενώ στη μεγάλη 5.9%.





Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο δείκτης CGE % (cold gas efficiency). Κατά τον Prabir Basu το CGE είναι το ποσό ενέργειας που παράγεται κατά την αεριοποίηση ως προς το ποσό ενέργειας που εισέρχεται αρχικά στον αντιδραστήρα [18]. Έτσι, αν η αρχική παροχή της βιομάζας σε ξηρή βάση, Φ<sub>ξηρού.καυσίμου</sub> (kg), αεριοποιηθεί για να

παράγει  $\Phi_{\alpha \epsilon \rho i o \upsilon}$  (kg) παραγόμενου αερίου με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του αερίου (LHV<sub>αερίου</sub>), τότε αυτός ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται ως:

$$\mathsf{CGE} = \frac{LHV_{\alpha\varepsilon\rho(ov)}}{LHV_{\xi\eta\rho,\kappa\alpha\nu\sigma,}} \frac{\Phi_{\alpha\varepsilon\rho(ov)}}{\Phi_{\xi\eta\rho,\kappa\alpha\nu\sigma,}}$$
(7.1)

Ο δείκτης CGE αναφέρεται, δηλαδή, στο καιόμενο μίγμα του αερίου (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO) γι' αυτό και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στην εικόνα των διαγραμμάτων 7.10 παρατίθεται η σύγκριση του βαθμού απόδοσης (CGE) ως προς τη θερμοκρασία της διεργασίας για ίδιο καύσιμο και για ίδια παροχή καυσίμου και η σύγκρισή του με το βαθμό μετατροπής άνθρακα. Για την αεριοποίηση της γιατρόφα συγκρίνεται ο δείκτης CGE ως προς την παροχή καυσίμου για θερμοκρασία 800 °C.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών, η αύξηση της θερμοκρασίας δημιούργησε βελτίωση του βαθμού απόδοσης CGE. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς λόγω της αντίδρασης boudouard, η πρόσδοση θερμότητας ευννοεί την παραγωγή CO ενώ λόγω της αντίδρασης αναμόρφωσης μεθανίου ευννοείται και η παραγωγή H<sub>2</sub>. Ακόμα, ενδεικτικό των πειραμάτων αυτών είναι ότι σε μικρότερη παροχή καυσίμου για ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες ο δείκτης CGE παρουσιάστηκε αυξημένος. Τέλος, η αεριοποίηση με ξύλο ιτιάς αποδείχθηκε πιο αποδοτική ως προς το δείκτη αυτό σε σχέση με την αεριοποίηση γιατρόφας.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την αεριοποίηση με ξύλο ιτιάς για παροχή καυσίμου 9 (kg/h), ο δείκτης CGE μεταβλήθηκε από 58.20% στους 750 °C σε 78.75% στους 800°C. Αντίστοιχα για παροχή καυσίμου 9.5 (kg/h) αυξήθηκε από 56.64% στους 750°C σε 75.63% στους 800°C. Τέλος, σε ότι αφορά τη γιατρόφα ως καύσιμο, πραγματοποιήθηκε αεριοποίηση μόνο στους 800°C. Έτσι, γι' αυτή τη θερμοκρασία ο δείκτης CGE μεταβλήθηκε από 71.91% για παροχή καυσίμου 7.64 (kg/h) σε 67.72% για παροχή 9.7 (kg/h).





**Εικόνα 7.10:** Σύγκριση CGE και του βαθμού μετατροπής του άνθρακα για τις έξι καταστάσεις αεριοποίησης.

## 7.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Παρακάτω θα παρουσιασθούν τρία πειράματα αεριοποίησης με ηλίανθο σε κατάσταση ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία που διεξήχθησαν στα πλαίσια μίας σειράς πειραμάτων με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης του αδρανούς υλικού της κλίνης στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Έτσι, τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αεριοποίηση του καυσίμου αυτού ήταν ολιβίνης, επεξεργασμένος ολιβίνης σε θερμοκρασία 1100 °C και χαλαζιακή άμμος. Κάθε δοκιμή αεριοποίησης είχε διάρκεια 12 ώρες με δύο σταθερές καταστάσεις θερμοκρασίας στο καθένα.

Για να μπορεί να υπάρξει συγκρισιμότητα μεταξύ των τριών αυτών πειραμάτων, κάποιες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθεροί. Έτσι, επιλέχθηκε διατήρηση της παροχής μάζας του καυσίμου στα 6.3 (kg/h) με λόγο αέρα καυσίμου λ=0.3. Επίσης, κάθενα από αυτά τα πειράματα χαρακτηρίστηκαν από δύο θερμοκρασιακές καταστάσεις, ίδιες για κάθε πείραμα. Τέλος, υπήρξε η δυνατότητα δειγματοληψίας πισσών για κάθε θερμοκρασιακή κατάσταση με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2.1. Έτσι, εκτός από την καταγραφή των τεσσάρων κύριων προϊόντων (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) του αερίου σύνθεσης, την ποσοστιαία μετατροπή του άνθρακα, τη θερμογόνο δύναμη, μπορεί ακόμα να γίνει σύγκριση μεταξύ των συγκεντρώσεων πίσσας που συλλέχθησαν σε κάθε πείραμα. Στον πίνακα 7.3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες και τα πειραματικά αποτελέσματα των έξι σταθερών καταστάσεων αεριοποίησης.

Κατάσταση	1	2	3	4	5	6
Είδος καυσίμου	Ηλίανθος	Ηλίανθος	Ηλίανθος	Ηλίανθος	Ηλίανθος	Ηλίανθος
Θερμοκρασία (Τ) [°C]	750	800	750	800	750	800
Παροχή μάζας καυσίμου (m <sub>f</sub> ) [kg/h]	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
Μάζα αδρανούς υλικού (Α.Υ)[kg] /Α.Υ	7 ολιβίνης	7 ολιβίνης	7 επεξεργασμένος ολιβίνης στους 1100 °C	7 επεξεργασμένος ολιβίνης στους 1100 °C	7 χαλαζιακή άμμος	7 χαλαζιακή άμμος
Διάμετρος κόκκων (d <sub>p</sub> ) [μm]	350-500	350-500	350-500	350-500	350-500	350-500
Λόγος αέρα καυσίμου (λ)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Κατάσταση ρευστοποίησης	Ανακυκλοφο ρία υλικού	Ανακυκλοφο ρία υλικού	Ανακυκλοφο ρία υλικού	Ανακυκλοφο ρία υλικού	Ανακυκλοφο ρία υλικού	Ανακυκλοφο ρία υλικού
Λόγος u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> και u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub>	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =3.6 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.55	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =3.67 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.56	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =3.58 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.55	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =3.63 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.56	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =3.53 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.54	u <sub>f</sub> /u <sub>mf</sub> =3.74 u <sub>f</sub> /u <sub>t</sub> =0.58
Παροχή αέρα (Q <sub>air</sub> ) [Nm <sup>3</sup> /h]	7.9	7.9	7.9	7.89	7.89	7.89
Παραγόμενο αέριο (Q <sub>gas</sub> ) [Nm <sup>3</sup> /h]	14.87	15.56	14.81	15.28	14.24	13.86
Ποσοστό μετατροπής άνθρακα σε syngas (CCE) [%]	80.18 %	88.54 %	81.54 %	87.14 %	71.49 %	67.22 %
LHV [MJ/kg]/ [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	14.81/ 3.64	16.94/ 4.13	16.03/ 3.84	17.33/ 4.15	13.81/ 3.52	14.01/ 3.62
CGE [%]	69.86 %	86.08 %	76.46%	86.97 %	59.56 %	68.79%
Περιεκτικότητα πίσσας που συλλέχθηκε (C <sub>t</sub> ) [g/Nm <sup>3</sup> ]	9.58	2.03	5.70	1.32	10.49	3.88
Διάρκεια σταθερής κατάστασης [λεπτά]	145	194	87	44	47	78

**Πίνακας 7.3:** Συνοπτική παρουσίαση των σταθερών καταστάσεων αεριοποίησης ηλίανθου με σκοπό τον έλεγχο του αδρανούς υλικού της κλίνης στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης.

Στο διάγραμμα 7.11 απεικονίζονται οι μέσες τιμές των βασικών συστατικών του αερίου σύνθεσης που προέκυψαν από την αεριοποίηση του ηλίανθου για τις έξι σταθερές θερμοκρασιακές καταστάσεις που συγκρίνονται. Στο διάγραμμα 7.12 παρουσιάζεται η μεταβολή της σύστασης του υδρογόνου σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας του παραγόμενου αερίου, για κάθε σταθερή κατάσταση.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος βελτίωσε την ποιότητα του αερίου σύνθεσης ως προς το μονοξείδιο του άνθρακα σε όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα σχετικά με τη συγκέντρωση του υδρογόνου, η αεριοποίηση με ολιβίνη (απλός και επεξεργασμένος) οδήγησε σε αύξηση της σύστασής του, ενώ όταν χρησιμοποιήθηκε χαλαζιακή άμμος παρατηρήθηκε πτώση του H<sub>2</sub>. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της υγρασίας στο παραγόμενο αέριο στην κατάσταση αυτή. Έτσι μπορούμε να καταλάβουμε ότι στις δύο πρώτες περιπτώσεις η αντίδραση της αναμόρφωσης του μεθανίου οδηγείται πιο εύκολα στα προϊόντα, ειδικά για τη θερμοκρασία των 800 °C.

Σε ότι αφορά την επίδραση του αδρανούς υλικού, στη σειρά των πειραμάτων αυτών, η βέλτιστη ποιότητα αερίου σύνθεσης παρατηρήθηκε κατά την αεριοποίηση με επεξεργασμένο ολιβίνη ως αδρανές υλικό ενώ η χείριστη με χαλαζιακή άμμο. Ιδιαίτερα σε ότι αφορά τη σύσταση του υδρογόνου, η αεριοποίηση με επεξεργασμένο ολιβίνη σημείωσε αξιοσημείωτη άνοδο (περίπου κατά 1% κ.ο.ξ σε σχέση με τον απλό ολιβίνη). Αυτό, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.2.2, οφείλεται στις καταλυτικές ιδιότητές του που οδηγούν σε διάσπαση των ενώσεων των πισσών και αύξηση της σύστασης του υδρογόνου. Για την ακρίβεια, αναμορφώνονται οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα [47].

Πιο συγκεκριμένα, σε θερμοκρασία αεριοποίησης στους 750 °C, το μονοξείδιο του άνθρακα σημείωσε ποσοστό 11% κ.ο.ξ με χρήση απλού ολιβίνη, 11.6% κ.ο.ξ με χρήση επεξεργασμένου ολιβίνη και 10.2% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Αντιστοίχως, το διοξείδιο του άνθρακα κυμάνθηκε από 13.1% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη σε 13% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο ολιβίνη και 11.9% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Ως προς την παραγωγή του μεθανίου, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη μεταβολή καθώς μετρήθηκε ως 3.2% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη, 3.3% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο ολιβίνη και 3.4% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Η σύσταση του υδρογόνου, που επηρεάζεται άμεσα από το ποσοστό υγρασίας στο παραγόμενο αέριο, κυμάνθηκε από 10% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη, σε 11% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο ολιβίνη και σε 9.2% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας που σημειώθηκαν ήταν 14.38% με απλό ολιβίνη, 13.38% με επεξεργασμένο και 16.21% με χαλαζιακή άμμο.

Στους 800 °C, η διεργασία της αεριοποίησης ήταν πιο επιτυχημένη γεγονός που αποδεικνύεται από τη σύσταση του αερίου σύνθεσης. Έτσι, το μονοξείδιο μετρήθηκε 13.4% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη, 13.5% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο και 12% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Το διοξείδιο κυμάνθηκε από 12.1% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη, σε 12.3% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο και 9.9% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Ως προς τη σύσταση του μεθανίου, στην κατάσταση αεριοποίησης με χαλαζιακή άμμο σημείωσε μικρή πτώση σε σχέση με την προηγούμενη θερμοκρασία ενώ στην αεριοποίηση με ολιβίνη (απλός και επεξεργασμένος) διατηρήθηκε σχεδόν σταθερό. Έτσι, κυμάνθηκε από 3.3% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη,σε 3,2% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο ολιβίνη και σε 2.8% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Οι συστάσεις του υδρογόνου που σημειώθηκαν ήταν 11.6% κ.ο.ξ με απλό ολιβίνη, 11.9% κ.ο.ξ με επεξεργασμένο και 8.3% κ.ο.ξ με χαλαζιακή άμμο. Αντίστοιχα, το ποσοστό υγρασίας ήταν 11.21% με απλό ολιβίνη, 11.73% με επεξεργασμένο και 19.29% με χαλαζιακή άμμο.



**Εικόνα 7.11:** Κατ' όγκο σύσταση του αερίου σύνθεσης ανάλογα με τις έξι σταθερές θερμοκρασιακές καταστάσεις.



**Εικόνα 7.12:** Επίδραση της υγρασίας στη σύσταση του υδρογόνου για τις έξι σταθέρες καταστάσεις αεριοποίησης.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα 7.11, οι καταλυτικές ιδιότητες του ολιβίνη (κυρίως του επεξεργασμένου) οδήγησαν σε αυξημένη σύσταση τόσο του υδρογόνου όσο και του διοξειδίου του άνθρακα στην αεριοποίηση με αυτό το αδρανές υλικό. Το γεγονός αυτό διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των διαφορετικών θερμοκρασιακών προφίλ καθ' ύψος της κλίνης μεταξύ των τριών αδρανών υλικών που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 7.5 και 7.6. Ο λόγος είναι ότι η αυξημένη παραγωγή υδρογόνου προϋποθέτει πιο ευννοϊκή μετατόπιση της ενδόθερμης αντίδρασης αναμόρφωσης του μεθανίου προς τα προϊόντα. Με τη σειρά του το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τον ατμό μέσω της αντίδρασης μετατόπισης, με αποτέλεσμα την περαιτέρω παραγωγή υδρογόνου και την αύξημενη σύσταση του διοξειδίου του άνθρακα.

Η αντίδραση μετατόπισης, κατά την οποία το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τους υδρατμούς προς παραγωγή υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα, είναι από αυτές που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του παραγόμενου αερίου. Πρόκειται για ελαφρώς εξώθερμη αντίδραση, γεγονός που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία αεριοποίησης, τόσο ευννοούνται τα αντιδρώντα και όχι η παραγωγή των προϊόντων, άρα η σταθερά ισορροπίας της συγκεκριμένης αντίδρασης σε μεγάλες θερμοκρασίες είναι κάτω της μονάδας.

Η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης ισούται με το λόγο του ρυθμού προς τα προϊόντα (K<sub>for</sub>) διά το λόγο του ρυθμού προς τα αντιδρώντα (K<sub>back</sub>). Επίσης, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ισότητα του Gibbs (ΔG<sup>o</sup>) [18]. Έτσι είναι:

$$K_{eq} = \frac{K_{for}}{K_{back}} = \exp(\frac{-\Delta G^o}{RT})$$
(7.3)

Όπου, η θερμοκρασία Τ μετριέται σε Κ και ο αριθμός Gibbs υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Delta G^{\circ}$$
 = -32.197 + 0.031T- (1774.7/T) (kJ/mol) (7.4)

Από τις εξισώσεις (7.3) και (7.4) υπολογίστηκε η Κ<sub>eq</sub> για κάθε θερμοκρασιακή σταθερή κατάσταση ορίζοντας ως θερμοκρασία τη μέση τιμή του καθ' ύψους θερμοκρασιακού προφίλ σε κάθε κατάσταση. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η σταθερά Κ της αντίδρασης για κάθε κατάσταση όπως προκύπτει από τη σύσταση του αερίου σύνθεσης. Αυτή υπολογίστηκε διαιρώντας τις μερικές πιέσεις των προϊόντων προς τα αντιδρώντα. Το διάγραμμα της εικόνας 7.13 απεικονίζει το λόγο της Κ/Κ<sub>ea</sub> για κάθε σταθερή θερμοκρασιακή κατάσταση. Όπως φαίνεται, ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας, για αεριοποίηση στους 800 °C ο λόγος πλησιάζει περισσότερο τη μονάδα. Αυτό συμβαίνει γιατί, μπορεί η αντίδραση της μετατόπισης να είναι ελαφρώς εξώθερμη αλλά σ' αυτή τη θερμοκρασία υπάρχει καλύτερη ανμόρφωση των υδρογονανθράκων, δηλαδή παράγονται 1mol CO και 3mol H2. Έτσι, αυτά τα δύο έχουν σαν αποτέλεσμα την καλύτερη παραγωγή των προϊόντων της μετατόπισης (H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>) στη θερμοκρασία αυτή σε σχέση με τους 750  $^{\circ}$ C. Αντίστοιχα, σε ότι αφορά την επίδραση του αδρανούς υλικού φαίνεται ότι κατά την αεριοποίηση με ολιβίνη και κυρίως με τον επεξεργασμένο, ευννοούνταν πολύ περισσότερο τα προϊόντα της αντίδρασης, σε σχέση με την αεριοποίηση με χαλαζιακή άμμο.



**Εικόνα 7.13:** Επίδραση της θερμοκρασίας και του αδρανούς υλικού στην αντίδραση μετατόπισης κατά την αεριοποίηση ηλίανθου.

Σε ότι αφορά την περιεκτικότητα των πισσών που συλλέχθηκαν και μετρήθηκαν, αυτές παρουσιάσαν σημαντική μείωση με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τη θεωρία και δικαιολογείται από το γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της διεργασίας προκαλεί θερμική διάσπαση των ενώσεων των πισσών αφού οι δεσμοί των πολυκυκλικών υδρογονανθράκων σπάνε ευκολότερα. Ως προς την επίδραση του αδρανούς υλικού στην παραγωγή πισσών, η βέλτιστη μείωση της περιεκτικότητας σημειώθηκε με χρήση επεξεργασμένου ολιβίνη ενώ η μεγαλύτερη περιεκτικότητα πισσών μετρήθηκε με χαλαζιακή άμμο. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κάθε αδρανούς υλικού, που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2, τα αποτελέσματα αυτά χαρακτηρίζονται λογικά.

Πιο συγκεκριμένα, στην αεριοποίηση του ηλίανθου με ολιβίνη ως αδρανές υλικό, μετρήθηκε περιεκτικότητα πισσών 9.58 (g/Nm<sup>3</sup>) στους 750 °C και 2.03 (g/Nm<sup>3</sup>) στους 800 °C. Όταν το αδρανές υλικό ήταν επεξεργασμένος ολιβίνης μετρήθηκαν 5.70 (g/Nm<sup>3</sup>) στους 750 °C και 1.32 (g/Nm<sup>3</sup>) στους 800 °C. Τέλος, κατά την αεριοποίηση με χαλαζιακή άμμο συλλέχθηκαν 10.49 (g/Nm<sup>3</sup>) πίσσας στους 750 °C και 3.88 (g/Nm<sup>3</sup>) στους 800 °C.



Στην εικόνα 7.14 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των ενώσεων των πισσών για κάθε σταθερή κατάσταση που περιγράφεται.

**Εικόνα 7.14:** Συγκέντρωση των πισσών για τις έξι σταθερές καταστάσεις αεριοποίησης ηλίανθου.
Στην εικόνα 7.15 παρατίθεται η οπτική διαφοροποίηση μεταξύ των διαλυμάτων των πισσών όπως προκύπτουν στους 750 °C και στους 800 °C. Το δείγμα με το σκούρο χρώμα είναι σε θερμοκρασία 750 °C ενώ το ανοιχτόχρωμο σε 800 °C. Η φωτογραφία δείχνει δείγματα που συλλέχθηκαν από την αεριοποίηση ηλίανθου με αδρανές υλικό τη χαλαζιακή άμμο. Αντίστοιχη χρωματική διαφορά παρατηρήθηκε και στα πειράματα με τα υπόλοιπα αδρανή υλικά.



**Εικόνα 7.15:** Διάλυμα πίσσας μέσα σε ισοπροπανόλη όπως συλλέχθηκε από αεριοποίηση ηλίανθου με χρήση χαλαζιακής άμμου.

Στο διάγραμμα 7.16 παρουσιάζεται ο βαθμός μετατροπής του αρχικού άνθρακα σε παραγόμενο αέριο σύνθεσης καθώς και το ποσοστό εξανθρακώματος που συλλέχθηκε από τον μικρό κυκλώνα, για τις έξι σταθερές καταστάσεις αεριοποίησης. Όπως αναμένεται από τη σύσταση του αερίου σύνθεσης που παρουσιάσθηκε, ο δείκτης CCE εμφανίστηκε σημαντικά υψηλότερος για αεριοποίηση με ολιβίνη παρά με χαλαζιακή άμμο. Σε ότι αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στη μετατροπή άνθρακα, παρατηρήθηκε αύξηση με την πρόσδοση θερμοκρασίας στο σύστημα σε περιπτώσεις αεριοποίησης με ολιβίνη (απλός και επεξεργασμένος) ενώ αντίθετα πτώση του δείκτη αυτού στην περίπτωση αεριοποίησης με χαλαζιακή άμμο. Η πτώση που παρατηρήθηκε στην τελευταία περίπτωση δικαιολογείται με την αύξηση του ποσοστού της υγρασίας στο παραγόμενο αέριο.

Συγκεκριμένα, για αεριοποίηση με ολιβίνη ο δείκτης CCE αυξήθηκε από 80.18% στους 750 °C σε 88.54% στους 800 °C. Στην περίπτωση του επεξεργασμένου ολιβίνη, η μεταβολή ήταν από 81.54% στους 750 °C σε 87.14% στους 800 °C. Τέλος, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην αεριοποίηση του ηλίανθου με χαλαζιακή άμμο παρατηρήθηκε αισθητά μικρότερο ποσοστό μετατροπής του αρχικού άνθρακα σε αέριο σύνθεσης. Έτσι, από 71.49% στους 750 °C μειώθηκε σε 67.22% στους 800 °C.



**Εικόνα 7.16:** Ποσοστιαία μετατροπή του αρχικού άνθρακα σε αέριο σύνθεσης για τις έξι σταθερές καταστάσεις αεριοποίησης.

Στην εικόνα των διαγραμμάτων 7.17 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη CGE ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και η σύγκριση αυτού του δείκτη με το βαθμό μετατροπής του αρχικού άνθρακα σε αέριο σύνθεσης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, σε σχέση με την επίδραση του αδρανούς υλικού, στα πειράματα με επεξεργασμένο ολιβίνη παρουσιάστηκε το μεγαλύτερο ποσοστό του δείκτη CGE ενώ το χειρότερο εμφανίστηκε στα πειράματα με χαλαζιακή άμμο. Ως προς την επίδραση του ποσοστού του CGE.





**Εικόνα 7.17:** Σύγκριση του δείκτη CGE με την ποσοστιαία μετατροπή του αρχικού άνθρακα σε αέριο σύνθεσης για τις έξι καταστάσεις αεριοποίησης που περιγράφονται.

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

#### 8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7, η ποιότητα του παραγόμενου αερίου σύνθεσης καθώς και η παραγωγή πίσσας κατά τη διεργασία της αεριοποίησης διαφέρουν ανάλογα με τη θερμοκρασία αεριοποίησης, το είδος βιομάζας με το οποίο συντελείται η διεργασία καθώς και το αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται. Ακόμα αποδείχθηκε ότι για ίδιες θερμοκρασίες αεριοποίησης και χρήση ίδιου καυσίμου καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται στο πείραμα με τη μικρότερη παροχή καυσίμου.

Συγκεκριμένα, ως προς την επίδραση του αδρανούς υλικού στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου, οι ιδιότητες του ολιβίνη αποδείχθηκαν πιο ευννοϊκές τόσο στην απόδοση του αερίου σύνθεσης όσο και στον περιορισμό της ποσότητας των ενώσεων των πισσών σε σχέση με τη χαλαζιακή άμμο. Ιδιαίτερα ο επεξεργασμένος ολιβίνης, λόγω της εξαφάνισης της υγρασίας από τη σύστασή του, αποδείχθηκε ότι είχε τις πιο καταλυτικές ιδιότητες από τα τρία αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, στα πειράματα αυτά, παρατηρήθηκε σημαντική πτώση των συγκεντρώσεων των πισσών λόγω της ικανότητας του επεξεργασμένου ολιβίνη να προκαλεί θερμική διάσπαση στους πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες. Επίσης, η αεριοποίηση με χρήση επεξεργασμένου ολιβίνη στους 1100 °C, μπορεί να θεωρηθεί εξαιρετική για αύξηση της σύστασης του υδρογόνου (H2), καθώς η θερμική διάσπαση των ενώσεων των πισσών ευννοεί την παραγωγή του. Τη χειρότερη συμπεριφορά ως προς την σύσταση του παραγόμενου αερίου και την ποσότητα των πισσών εμφάνισε η χαλαζιακή άμμος. Συμπερασματικά, για θερμοκρασίες αεριοποίησης 750 °C και 800 °C, σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας, το καταλληλότερο αδρανές υλικό κρίνεται ο επεξεργασμένος ολιβίνης. Στον πίνακα 8.1 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται σχετικά με την αποτελεσματικότητα του κάθε αδρανούς υλικού.

Ως προς την επίδραση του καυσίμου στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου, είναι εφικτή η σύγκριση δοκιμών με απλό ολιβίνη, καθώς τα πειράματα με ξύλο ιτιάς και γιατρόφα πραγματοποιήθηκαν μόνο με αυτό το αδρανές υλικό. Επίσης η σύγκριση γίνεται μόνο για θερμοκρασία 800 °C καθώς η γιατρόφα δοκιμάστηκε μόνο σε αυτή τη θερμοκρασία. Οι δοκιμές αεριοποίησης απέδειξαν ότι τη χειρότερη συμπεριφορά ως προς τη μετατροπή άνθρακα σε αέριο σύνθεσης είχε η γιατρόφα καθώς το ποσοστό CCE ήταν 70.1%. Αντίθετα κατά την αεριοποίηση με ηλίανθο και με ξύλο ιτιάς σημειώθηκαν υψηλά ποσοστά μετατροπής άνθρακα. Σε ότι αφορά την ποιότητα του αερίου, το ξύλο ιτιάς παρουσίασε ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά τόσο μονοξειδίου του άνθρακα όσο και διοξειδίου ενώ λίγο μικρότερη ήταν η κατ' όγκο σύσταση των δύο αυτών αερίων κατά την αεριοποίηση με ηλίανθο. Αντίθετα, με τη χρήση γιατρόφας παρατηρήθηκαν αισθητά χαμηλότερα ποσοστά γεγονός που δικαιολογεί το χαμηλό ποσοστό CCE που εμφάνισε. Ως προς το μεθάνιο, το ξύλο ιτιάς και ο ηλίανθος παρουσίασαν σχεδόν ίδια σύσταση (περίπου 3.5 κ.ο.ξ%) ενώ η αντίστοιχη τιμή της γιατρόφας κυμάνθηκε περίπου κατά μία ποσοστιαία μονάδα χαμηλότερα. Τέλος, σε ότι αφορά τη συγκέντρωση του υδρογόνου, τόσο ο ηλίανθος όσο και η γιατρόφα παρουσίασαν υψηλή κατ'όγκο σύσταση, ενώ αντίθετα στο ξύλο ιτιάς το ποσοστό ήταν πιο περιορισμένο. Συμπερασματικά, ο ηλίανθος μπορεί να κριθεί καλό καύσιμο για αεριοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας στους 800 °C. Σε ότι αφορά το ξύλο ιτιάς κρίνεται αξιόπιστο με καλύτερη απόδοση στη μετατροπή άνθρακα σε σχέση με την παραγωγή υδρογόνου. Τέλος, η γιατρόφα δεν ενδείκνυται για παραγωγή μονοξειδίου, αλλά κρίνεται αρκετά αποδοτική ως προς την παραγωγή υδρογόνου. Ο πίνακας 8.2 συνοψίζει την επίδραση του κάθε καυσίμου στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης.

Τέλος, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας τόσο στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης όσο και στην παραγωγή πισσών. Έτσι, επειδή οι αντιδράσεις αεριοποίησης είναι ενδόθερμες, η αύξηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης από τους 750 °C στους 800 °C βελτίωσε την παραγωγή των προϊόντων. Αυτό σημαίνει ότι, λόγο της αντίδρασης boudouard, η σύσταση του μονοξειδίου αυξήθηκε αισθητά με παράλληλη πτώση της σύστασης του διοξειδίου. Αντίστοιχα, λόγω της αντίδρασης αναμόρφωσης μεθανίου ευννοήθηκε η παραγωγή υδρογόνου με άμεση συνέπεια την πτώση της υγρασίας στο αέριο σύνθεσης. Η μόνη περίπτωση που παρατηρήθηκε το αντίθετο φαινόμενο ήταν κατά την αεριοποίηση ηλίανθου με αδρανές υλικό τη χαλαζιακή άμμο. Τέλος, η σύσταση του μεθανίου μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσίασε ελάχιστη πτώση με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε ότι αφορά την παραγωγή πίσσας, η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε θερμικές διασπάσεις στους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, με αποτέλεσμα την πτώση της συγκέντρωσής τους. Ο πίνακας 8.3 συνοψίζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης.

Αδρανές υλικό	Ποιότητα Αερίου Σύνθεσης	Πίσσες	Σχόλιο
Ολιβίνης	<b>↑ ↑</b>	$\downarrow\downarrow\downarrow$	-Υψηλό ποσοστό μετατροπής άνθρακα - Καλύτερες ιδιότητες από τη χαλαζιακή άμμο
Επεξεργασμένος ολιβίνης	<b>↑</b> ↑↑	$\downarrow \downarrow \downarrow$	<ul> <li>-Αναμόρφωση αρωματικών</li> <li>υδρογονανθράκων</li> <li>Υψηλή περιεκτικότητα σε Η<sub>2</sub></li> <li>Υψηλό ποσοστό μετατροπής</li> <li>άνθρακα</li> <li>Η βέλτιση επιλογή</li> </ul>
Χαλαζιακή άμμος	1	V	-Κακή μετατροπή άνθρακα σε αέριο σύνθεσης -Υψηλό ποσοστό υγρασίας με αύξηση της θερμοκρασίας - Υψηλές συγκεντρώσεις πισσών.

**Πίνακας 8.1:** Συγκεντρωτικός πίνακας επίδρασης αδρανούς υλικού στην ποιότητα του παραγόμενου αερίου.

Καύσιμα	Ποιότητα Σύνθεσης	Αερίου	Σχόλιο
Ξύλο ιτιάς	11		-Πολύ υψηλό ποσοστό CO στους 800 °C - Καλό ποσοστό μετατροπής άνθρακα - Ενδείκνυται για αεριοποίηση
Γιατρόφα	$\downarrow$		<ul> <li>-Κακή μετατροπή άνθρακα</li> <li>- Αρκετά υψηλό ποσοστό</li> <li>Η<sub>2</sub></li> <li>- Προτείνεται μόνο για παραγωγή Η<sub>2</sub></li> </ul>
Ηλίανθος	111		<ul> <li>-Καλή ποιότητα αερίου σύνθεσης (σε CO και σε H<sub>2</sub>)</li> <li>Το καλύτερο καύσιμο για αεριοποίηση μέχρι τη θερμοκρασία των 800 °C</li> </ul>

**Πίνακας 8.2:** Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων ως προς την επίδραση του καυσίμου στο αέριο σύνθεσης.

Θερμοκρασία (°C)	Ποιότητα Αερίου Σύνθεσης	Πίσσες	Σχόλιο
750	1	$\downarrow$	-Χαμηλή θερμοκρασία για αεριοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη
800	111	$\downarrow \downarrow$	<ul> <li>-Θερμική διάσπαση πισσών</li> <li>-Βελτίωση της ποιότητας του αερίου σύνθεσης</li> <li>- Καλύτερος ρυθμός αντίδρασης της boudouard και της αναμόρφωσης των αρωματικών</li> </ul>

**Πίνακας 8.3:** Συνοπτική παρουσίαση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο αέριο σύνθεσης.

### 8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στα πλαίσια του ελέγχου της επίδρασης του αδρανούς υλικού στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης, πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα αεριοποίησης με ηλίανθο με δύο σταθερές θερμοκρασιακές καταστάσεις το καθένα. Για την πιο πλήρη εποπτεία της επίδρασης του αδρανούς υλικού σε πειράματα αεριοποίησης σε συνθήκες ρευστοποίησης με ανακυκλοφορία, προτείνεται η διεξαγωγή αντίστοιχων πειραμάτων με καύσιμα τόσο τη γιατρόφα όσο και το ξύλο ιτιάς. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει εφικτή η σύγκριση της επίδρασης του κάθε αδρανούς υλικού στο παραγόμενο αέριο για την αεριοποίηση κάθε καυσίμου. Έτσι, θα μπορέσουν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για το βελτιστό συνδυασμό καυσίμου και αδρανούς υλικού για αεριοποίηση σε θερμοκρασίες 750 και 800 °C.

Ακολούθως, προτείνεται η ανάπτυξη μηχανισμού καθαρισμού του αερίου μέσω της τοποθέτησης μεγάλων φίλτρων στο σωλήνα πριν τη δειγματοληψία του αερίου σύνθεσης. Υπολογίζεται ότι με την κίνηση αυτή, θα παρατηρείται αισθητά μειωμένη ποσότητα πισσών στο τελικό αέριο σύνθεσης. Τέλος, εφόσον τοποθετηθούν τα φίλτρα καθαρισμού του αερίου, προτείνεται η σύνδεση της εξόδου των αερίων με κάποια κινητήρια μηχανή (όπως μία Μ.Ε.Κ ή ένας αεριοστρόβιλος) ώστε να ελεγχθεί αν το αέριο θα είναι τόσο λειτουργικό ώστε να μπορεί να θέσει τον κινητήρα της μηχανής σε λειτουργία.

## 9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κέντρο περιβαλλοντικής εκπαίδευσης Καστοριάς, ΚΠΕ Καστοριάς.

http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/human\_activities/ecological\_crisis.htm.

[2] Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (ΙΤΕΣΚ), Περιβάλλον και διαχείριση ενέργειας. <u>http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi325.html</u>.

[3] Μώκος Α. Διπλωματική εργασία: Μελέτη κατασκευής κρύου μοντέλου αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης για αεριοποίηση σκουπιδιών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων.

**[4]** Klass D. Biomass for Renewable Energy and Fuels. Encyclopedia of Energy. Volume 1, Elsevier inc, 2004.

[5] Μαρινάκης Ι. Ηλεκτρολόγος Τεχνολόγος Μηχανικός (ΠΕ1703).

http://imarinakis.webs.com, http://imarinakiss.webs.com/notes\_biomass.pdf.

[6] BBC news. http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/5353118.stm.

**[7]** Βουρδούμπας Γ. Χρήση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Χημικός Μηχανικός, Μ.Sc. Χανιά 1998.

**[8]** Zhang, Linghong, Xu, Chunbao (Charles), Champagne, Pascale. Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. Energy conversion and Management. Elsevier, 2010, 561: 969-982.

[9] Κουφοδήμος Στ.Γ. Διδακτορική διατριβή: Καθαρισμός Αερίου Αεριοποίησης για Χρήση σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής. 2009.

**[10]** Φούντη Μ. Αναπληρώτρια Καθηγήτρια. Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα 2005.

**[11]** Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). 19° χιλιόμετρο, λεωφόρος Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι.

http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass\_guide.pdf.

**[12]** Παλάτος Γ. Οργαζλή Χ. Ιοαννίδου Α. Πτυχιακή εργασία: Η χρήση φυτικών υπολειμμάτων και υποπροϊόντων οπωροκηπευτικών ως εναλλακτική πηγή

ενέργειας. Ιδρυματικό Καταθετήριο Εύρηκα. Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας. Τμήμα Φυτικής Παραγωγής. 2009.

http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/1695/Orgazli%20-%20Ioannidou%20%5BMain%5D.pdf?sequence=5.

**[13]** Μπουτέτσιου Ε. Ενεργειακή Αξιοποίηση Δασικής Βιομάζας: Η περίπτωση του Μετσόβου. Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών. Περιβάλλον και Ανάπτυξη. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Οκτώβριος 2010.

**[14]** Faaij A. Modern biomass conversion technologies. Mitigation and adaptation strategies for global change. 2006.

**[15]** Παπαγεωργίου Ν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. Ατμοπαραγωγοί Ι. Γενικές Αρχές. Έκδοση δεύτερη: εκδόσεις Συμεών.

**[16]** Morf P. Secondary reactions of tar during thermochemical biomass conversion. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich ETH, 2001.

[17] Biomass Energy. Environmentally friendly and profitable energy.

http://www.biomassenergy.gr/articles/technology/gasification/12-biomass-gasification.

**[18]** Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Elsevier Inc, 2010.

[19] Hingman C, van der Burgt M. Gasification. Elsevier, 2003.

**[20]** Li X.T, Grace J.R, Lim C.J, Watkinson A.P, Chen H.P, Kim J.R. Biomass gasification in a circulating fluidized bed. Received 10 October 2002, received in revised form 17 April 2003, accepted 28 April 2003.

**[21]** Fryda L.E, Panopoulos K.D, Kakaras E. Agglomeration in fluidized bed gasification of biomass. Received 13 February 2006, received in revised form 17 February 2007, accepted 17 May 2007, available online 29 May 2007.

**[22]** Chunshan L, Suzuki K. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification – An overview. Received 12 November 2007, accepted 7 January 2008.

**[23]** Karellas S. Online analysis of the composition of biogenous gases and their effect on microturbine and fuel cell systems.

**[24]** Panopoulos K.D. Eurobioref. Gasification of biomass solid residues. Advanced catalytic thermochemical conversion process. Eurobioref. European multilevel

integrated Biorefinery design for sustainable biomass processing. Due date of deliverable: 31 August 2011, Actual submission date: 6 April 2012.

**[25]** Panopoulos KD, Christodoulou C, Koytsoumpa EI. Biomass gasification: gas production and cleaning for diverse applications- CHP and chemical syntheses. In: Aresta M, Dibenedetto A, Dumeignil F. Biorefinery: From biomass to chemicals and fuels, Berlin: De Gruyter, 2012: p302-305.

**[26]** Παπαϊωάννου Α.Θ. Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π. Μηχανική των ρευστών. Τμήμα Χημικών Μηχανικών. Τόμος ΙΙ, έκδοση β.

[27] Kunii D, Levenspiel O. Fluidization Engineering. Copyright John Wiley and sons INC, 1969.

[28] Geldart D. Gas Fluidization Technology. Copyright John Wiley and sons, 1986.

**[29]** Kunii D, Levenspiel O. Fluidization Engineering. Butterworth- Heinemann, Boston second edition, 1991.

**[30]** Παπαδόπουλος Ε. Καθηγητής Ε.Μ.Π. Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου.

**[31]** Xiu L.Y, Chuang Z.W, Shun P.Z, Yong C. Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. Received 15 January 2001, received in revised form 4 April 2002, accepted 5 April 2002.

**[32]** Wen C.Y. Handbook of fluidization and fluid-particle systems. Copyright Potentiality of Cynara cardunculus L. as energy crop. Journal of Biotechnology: Volume 150: Supplement: November by Talor and Francis group, 2003.

[33] http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclone.

[34] Portis E, Acquadro A, Longo A.M.G, Mauro R, Mauromicale G, Lanteri S. 2010.

[35] Τομαράς Δ. Διπλωματική εργασία: Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο παραγόμενο αέριο από αεριοποίηση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων. Αθήνα, Οκτώβριος 2012.

**[36]** Neeft J.P.A, Knoef H.A.M, Zielke U, Sjostrom K, Hasler P, Simell P.A, Dorrington M.A, Thomas L, Abatzoglou N, Deutch S, Greil C, Buffinga G.J, Brage C, Suomalainen M. Guideline for sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases. Energy project ERK6-CT1999-20002 (tar protocol), Version 3.3.

[37] http://en.wikipedia.org./wiki/Soxhlet\_apparatus.

**[38]** Simell P, Stahlberg P, Kurkela E, Albrecht J, Deutch S, Sjostrom K. Provisional protocol for the sampling and analysis of tar and particulates in the gas from large-scale biomass gasifiers. Version 1998: Received 4 May 1999, received in revised form 7 July 1999, accepted 13 July 1999.

[39] HORIBA Scientific. A guidebook to particle size analysis. Ηλεκτρονικό:

http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/PSA\_Guidebo ok.pdf.

**[40]** Siedlecki M, de Jong W. Biomass gasification as the first hot step in clean syngas production process- gas quality optimization and primary tar reduction measures in a 100 kW thermal input steam-oxygen blown CFB gasifier. Received 27 August 2010, received in revised form 21 May 2011, accepted 30 May 2011, available online 2 July 2011.

[41] http://en.wikipedia.org/wiki/Willow.

[42] Αλεξοπούλου Ε. Βέλτιστες πρακτικές στην επιλογή ενεργειακών καλλιεργειών για τα Ελληνικά δεδομένα. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ): Εκδόσεις ΚΑΠΕ 2010.

[43] http://en.wikipedia.org/wiki/Jatropha.

[44] http://en.wikipedia.org/wiki/Sunflower.

**[45]** Michel R, Ammar M.R, Poirier J, Simon P. Phase transformation characterization of olivine subjected to high temperature in air. Ceramics international: Elsevier Inc, available online 22 December 2012.

**[46]** Anis S, Zainal Z.A. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 2011, 2355-2377.

**[47]** Lopamudra D et al. A review of the primary measures for the tar elimination in biomass gasification process. Biomass bioenergy 2003, 24: 125-140.