

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ  
ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ**

ΒΑΚΟΥΦΤΣΗ ΕΛΕΝΗ Α.Ε.Μ 14  
ΠΟΥΛΟΠΟΥΛΟΥ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ Α.Ε.Μ. 89

ΑΡΜΟΔΙΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ: Χ. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ  
Αριθμ. Εισαγ.:...<sup>1254</sup>.....  
Ημερομηνία:...<sup>4/11/04</sup>.....

ΚΟΖΑΝΗ 2004

1. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ		2. ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	
3. Υπεύθυνος: Καθ. Ι. ΜΠΑΡΤΖΗΣ		4. Αρμόδιος Παρακολούθησης: Καθ. Χ. Κορωναίος	
5. Τίτλος εργασίας: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ			
6. Ονοματεπώνυμο φοιτητών: ΒΑΚΟΥΦΤΣΗ ΕΛΕΝΗ ΠΟΥΛΟΠΟΥΛΟΥ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ		7. Αριθμός μητρώου: 14 89	
8. Θεματική περιοχή: Ενέργεια & Περιβάλλον	9. Ημερομηνία έναρξης: / /2002	10. Ημερομηνία παράδοσης: 26/10/2004	11. Αριθμός εργασίας:
12. Περίληψη: Στην παρακάτω μελέτη παρουσιάζεται μοντέλο αεριοποίησης άχυρου σιτηρών σε ρευστοποιημένη κλίνη για την παραγωγή υδρογόνου. Το μοντέλο στηρίζεται στη θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης και περιλαμβάνει ισοζύγια μάζας και ενέργειας, χαρακτηριστικές παραμέτρους και ιδιότητες της ρευστοποιημένης κλίνης. Τα αποτελέσματά του συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από αεριοποίηση άχυρου σιτηρών σε πιλοτική μονάδα. Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου αναφέρονται βασικοί ορισμοί όσον αφορά στη βιομάζα (είδη και πηγές βιομάζας, ιδιότητες, χαρακτηριστικά) και στην αεριοποίησή της (είδη αεριοποιητών, αεριοποιητές σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης, μέγεθος φυσαλίδας, ανάμειξη στερεών, ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαίωρησης, διάμετρος σωματιδίων). Επιπλέον, αναφέρονται οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα καθώς και ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου.		13. Στοιχεία εργασίας: Αρ. Σελίδων: 161 Αρ. Σχημάτων: 57 Αρ. Πινάκων: 19 Αρ. Παραρτημάτων: 1 Αρ. Παραπομπών: 103	
		14. Λέξεις κλειδιά: Αεριοποίηση βιομάζας, ρευστοποιημένη κλίνη, παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα	
		15. Σχόλια:	
16. Συμπληρωματικές παρατηρήσεις:		17. Βαθμός:	

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους

- ❖ κ. Ρούμπα Γεώργιο  
Χημικό Μηχανικό ΑΠΘ  
Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής
  
- ❖ κ. Λυχναρά Βασίλη  
Τμήμα Βιομάζας ΚΑΠΕ  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

χωρίς την πολύτιμη βοήθεια των οποίων δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας μας.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 2. Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Βιομάζα.....	4
2.1.1 Εισαγωγή.....	4
2.1.2 Πηγές βιομάζας.....	6
2.1.3 Ιδιότητες.....	11
2.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας.....	20
2.2 Εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας στην Ελλάδα.....	23
2.2.1 Υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών.....	24
2.2.1.1 Ετήσιες καλλιέργειες.....	25
2.2.2 Υπολείμματα γεωργικών βιομηχανιών.....	36
2.2.3 Βιομάζα δασικής προέλευσης.....	41
2.2.4 Ενεργειακές καλλιέργειες.....	43
2.2.5 Δημοτικά στερεά απορρίμματα.....	50
2.2.6 Ζωικά υπολείμματα.....	50

## 3. ΥΔΡΟΓΟΝΟ

3.1 Εισαγωγή.....	51
3.2 Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα.....	51
3.3 Συγκριτική μελέτη.....	56
3.4. Εξευγενισμός του υδρογόνου.....	57
3.5. Γενικά χαρακτηριστικά υδρογόνου.....	57
3.5.1 .Ιδιότητες υδρογόνου.....	58

## 4. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Θεωρία της αεριοποίησης.....	61
4.3 Είδη αεριοποιητών.....	64
4.3.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης (Fixed bed gasifiers).....	65
4.3.1.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης ανερχόμενης ροής (Updraft ή counter current fixed bed gasifiers).....	65
4.3.1.2 Αεριοποιητές κατερχόμενης ροής σταθερής κλίνης (Downdraft ή co-current fixed bed gasifiers).....	69
4.3.1.3 Αεριοποιητές διασταυρωμένης ροής σταθερής κλίνης (Cross draft fixed bed gasifiers).....	72
4.3.1.4 Αεριοποιητές ανοικτού πυρήνα σταθερής κλίνης (Open core fixed bed gasifiers).....	73
4.3.1.5 Δίδυμοι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (Twin fire gasifiers).....	74
4.3.1.6 Εξέλιξη των αεριοποιητών σταθερής κλίνης.....	75
4.3.1.7 Τεχνικά και λειτουργικά προβλήματα των αεριοποιητών σταθερής κλίνης.....	78
4.3.2 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized bed gasifiers).....	79
4.3.2.1 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (Bubbling fluidized bed gasifiers).....	85
4.3.2.2 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (Circulating fluidized bed gasifiers).....	87
4.3.2.3 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης με πίεση (Pressurized fluidized bed).....	90



4.3.2.4 Σύγκριση των συστημάτων ρευστοποιημένης κλίνης ατμοσφαιρικής και πυρρικής λειτουργίας.....	91
4.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	93
4.5 Άλλα είδη αεριοποιητών.....	96

## 5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΜΕ

### ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΧΥΡΟΥ ΣΙΤΗΡΩΝ

5.1 Μοντέλο.....	98
5.1.1 Διακριτοποίηση του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης.....	98
5.1.2 Ισοζύγιο μάζας.....	99
5.1.3 Ισοζύγιο ενέργειας.....	103
5.1.3.1 Φάση φυσαλίδας.....	104
5.1.3.2 Φάση γαλακτώματος (α).....	105
5.1.3.3. Φάση γαλακτώματος (β).....	106
5.1.4 Σχηματισμός πίσσας.....	107
5.1.5 Εξαέρωση βιομάζας.....	107
5.1.6 Ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας για υπολογισμό της σύνθεσης αερίου.....	108
5.1.7 Υδροδυναμικοί παράμετροι ρευστοποιημένης κλίνης.....	109
5.1.7.1 Διάμετρος και πυκνότητα σωματιδίου.....	109
5.1.7.2 Κενό μεταξύ των σωματιδίων (voidage) στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης.....	110
5.1.7.3 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης.....	110
5.1.7.4 Ταχύτητα φυσαλίδων.....	111
5.1.7.5 Ταχύτητα στην περιοχή slugging.....	111
5.1.7.6 Ταχύτητα στην περιοχή γαλακτώματος.....	111
5.1.8 Εισαγωγή αέρα (jet region).....	112
5.1.8.1 Βάθος εισαγωγής.....	112
5.1.8.2 Συντελεστής μεταφοράς μάζας στη ζώνη έγχυσης.....	112
5.1.8.3 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη ζώνη έγχυσης.....	112
5.1.9 Φάση φυσαλίδας (bubble zone).....	112
5.1.9.1 Συντελεστής μεταφοράς μάζας στη φάση φυσαλίδας.....	113
5.1.9.2 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη φάση φυσαλίδας.....	113
5.1.10 Περιοχή slugging.....	113
5.1.10.1 Ύψος slugging.....	113
5.1.10.2 Συντελεστής μεταφοράς μάζας στην περιοχή slugging.....	114
5.1.10.3 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή slugging.....	114
5.1.11 Μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενδιάμεσου αερίου/ στερεών.....	115
5.1.12 Μεταφορά και θερμοδυναμικές ιδιότητες.....	116
5.1.12.1 Ιξώδες αερίων.....	116
5.1.12.2 Ιξώδες του μίγματος αερίων.....	116
5.1.12.3 Θερμική αγωγιμότητα αερίων.....	116
5.1.12.5 Θερμική χωρητικότητα.....	116
5.1.12.6 Θερμική χωρητικότητα μίγματος αερίων.....	117
5.1.12.7 Θερμότητα σχηματισμού.....	117
5.1.12.8 Ανώτερη θερμογόνο δύναμη.....	117
5.2 Πείραμα.....	118
5.2.1 Εισαγωγή.....	118
5.2.2 Περιγραφή πειράματος.....	118

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Αποτελέσματα μοντέλου.....	123
6.1.1 Θερμοκρασία κλίνης.....	124
6.1.2 Σύνθεση αερίου.....	127
6.1.2.1 Εύφλεκτα αέρια.....	127
6.1.2.2 Μη εύφλεκτα αέρια.....	133
6.1.3 Ανώτερη θερμογόνο δύναμη των αερίων.....	136
6.1.4 Ρυθμός παραγωγής αερίου.....	140
6.2 Αποτελέσματα πειράματος.....	142
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	144
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	150
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	155

## 1. Εισαγωγή

Η παραγωγή ενέργειας από συμβατικά καύσιμα συνδέεται άμεσα με τη ρύπανση του περιβάλλοντος, η οποία είναι αναπόφευκτη έως ένα βαθμό, αλλά μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι επιπτώσεις της με τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Η βιομάζα θεωρείται κύρια πηγή ενέργειας για το μέλλον εξαιτίας του υψηλού δυναμικού της, της οικονομικής βιωσιμότητας καθώς και των ποικίλων περιβαλλοντικών προτερημάτων της.

Η μετατροπή της βιομάζας βασίζεται σε θερμοχημικές διεργασίες (καύση, πυρόλυση, αεριοποίηση) και φυσικές διεργασίες (αναερόβια ζύμωση, αλκοολική ζύμωση, μετεστεροποίηση). Η αεριοποίηση είναι η διεργασία στην οποία οργανική ύλη μετατρέπεται σε αέρια προϊόντα ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), πίσσα και υπόλειμμα άνθρακα μέσω θερμικής διάσπασης παρουσία αέρα, οξυγόνου (λιγότερες ποσότητες από τις στοιχειομετρικές), ατμού ή και συνδυασμό τους.

Η αεριοποίηση βιομάζας με αέρα αναπτύχθηκε για βιομηχανικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά, η παραπάνω τεχνολογία οδηγεί σε αέριο με χαμηλή θερμογόνο δύναμη ( $4-6 \text{ MJ/Nm}^3$ ) και περιεχόμενο υδρογόνου περίπου 8-14 %. Η αεριοποίηση βιομάζας με οξυγόνο θεωρείται αποτελεσματικός τρόπος για την παραγωγή αερίου με μέση θερμογόνο δύναμη, αλλά απαιτείται υψηλό κόστος επένδυσης για τον εξοπλισμό παραγωγής οξυγόνου, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα της τεχνικής. Η αεριοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη με ατμό (με ή χωρίς οξυγόνο) παράγει αέριο μέσης θερμογόνου δύναμης ( $4-16 \text{ MJ/Nm}^3$ ) και περιεχόμενο υδρογόνου 30-60 % κ.ό.. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη τεχνολογία απαιτεί θερμοκρασία ατμού άνω των  $700^\circ\text{C}$ , δηλαδή επιπλέον κόστος για την παραγωγή του. Επομένως, η αεριοποίηση βιομάζας με αέρα και ατμό σε χαμηλή θερμοκρασία προτιμάται. Εφόσον, οι αντιδράσεις αεριοποίησης του ατμού είναι ενδόθερμες απαιτείται παροχή ενέργειας, η οποία προέρχεται από μερική καύση της βιομάζας στον αντιδραστήρα με ποσότητα αέρα μικρότερη από τη στοιχειομετρική.

Παρακάτω εξετάζεται το μοντέλο δύο φάσεων αεριοποίησης άχυρου σιτηρών για παραγωγή υδρογόνου σε αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης αέρα-ατμού. Το μοντέλο στηρίζεται στη θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης. Ισοζύγια μάζας και ενέργειας λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των κλασμάτων mol των αερίων προϊόντων. Σκοπός της εργασίας είναι να εξεταστεί η αποδοτικότητα του μοντέλου για την πρόβλεψη της σύνθεσης του παραγόμενου αερίου και ειδικότερα του υδρογόνου και να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας της κλίνης κατά την αεριοποίηση είναι 800-850 °C. Εντός της κλίνης υπάρχει αδρανές υλικό (άμμος αλουμίνας) σαν μέσο μεταφορά και μετάδοσης θερμότητας. Καύσιμο βιομάζας τροφοδοτείται στην κλίνη η οποία συμπεριφέρεται σαν ρευστό και χαρακτηρίζεται από υψηλή τύρβη. Η ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνικήσει την βαρύτητα των σωματιδίων και να τα διατηρήσει αιωρούμενα.

Η ρευστοποιημένη κλίνη διακρίνεται στην αραιή φάση (bubbling) και την πυκνή (emulsion). Στην πυκνή φάση ή φάση γαλακτώματος σχηματίζεται η φάση συνεχούς ροής της κλίνης ενώ η αραιή φάση αποτελείται από πολυάριθμες ευδιάκριτες φυσαλίδες, οι οποίες πλαισιώνονται από ένα σύννεφο αερίου (cloud) που κινείται γύρω από τη φυσαλίδα ή πίσω της. Η αραιή φάση διακρίνεται σε τρεις ζώνες (jetting, bubbling, slugging) ενώ η πυκνή φάση σε δύο ζώνες (interstitial gas, solids).

Η αραιή φάση αποτελείται από τη ζώνη έγχυσης της βιομάζας, τη ζώνη σχηματισμού φυσαλίδων και την περιοχή slugging. Η έγχυση γίνεται ομοιόμορφα μέσω διανομέα. Παρά το γεγονός ότι το μέγεθος φυσαλίδων αυξάνεται διαρκώς από το διανομέα προς την κορυφή του αντιδραστήρα, η διάμετρος τους θεωρείται σταθερή στα περισσότερα μοντέλα. Ο ρυθμός σχηματισμού και καταστροφής των φυσαλίδων δεν μπορεί να προβλεφθεί εφόσον οι φυσαλίδες μπορούν να ενωθούν ή να διασπαστούν. Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό φυσαλίδων διαδραματίζει και ο διανομέας.

Η περιοχή slugging ξεκινά όταν η διάμετρος της φυσαλίδας ισοδυναμεί με το 1/3 της διαμέτρου της κλίνης. Στην περιοχή αυτή, οι φυσαλίδες λόγω του μεγάλου μεγέθους τους διασπώνται και απελευθερώνεται το αέριο που περιέχουν, συμπαρασύροντας ταυτόχρονα και τα γύρω στερεά σωματίδια. Η περιοχή δεν είναι επιθυμητή διότι υπάρχει κίνδυνος να παρασυρθούν τα σωματίδια προς την έξοδο του αντιδραστήρα και να μην επιστρέψουν σε αυτόν ή ακόμα και να προσκληθούν στα τοιχώματα του αεριοποιητή δημιουργώντας προβλήματα στην απόδοση και στον καθαρισμό του.

Η πυκνή φάση υποδιαιρείται σε αέρια (interstitial gas) και στερεή φάση (solid). Η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ της αραιής φάσης και του ενδιάμεσου αερίου, μεταξύ του ενδιάμεσου αερίου και των στερεών καθώς και η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ των στερεών λόγω αγωγής πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό έτσι ώστε η κατανομή θερμοκρασίας να θεωρείται ομοιόμορφη εντός των σωματιδίων.



Χαρακτηριστικό μέγεθος της ρευστοποιημένης κλίνης αποτελεί η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης, η οποία ορίζεται ως η ταχύτητα στην οποία η κλίνη περνά από τη σταθερή κατάσταση στη ρευστοποιημένη. Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης σχετίζεται με τη επιφανειακή ταχύτητα του αερίου δηλαδή με την ταχύτητά του όταν η ρευστοποιημένη κλίνη δεν περιέχει στερεά σωματίδια. Επιπλέον, εξαρτάται από την πυκνότητα και τη διάμετρο των σωματιδίων και πλήθος ακόμα παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πείραμα που διεξήχθη από ομάδα ερευνητών (Samy S. Sadaka<sup>a</sup>, A.E. Ghaey<sup>b</sup>, M.A.Sabbah<sup>γ</sup>). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε πιλοτική εγκατάσταση αεριοποίησης άχυρου σιτηρών σε ρευστοποιημένη κλίνη με συνδυασμό αέρα-ατμού και άμμο αλουμίνας εντός της κλίνης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αφορά τη θερμοκρασία κλίνης, τη σύνθεση αερίου, την ανώτερη θερμογόνο δύναμη και το ρυθμό παραγωγής αερίου για διάφορες τιμές της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, του ρυθμού ροής ατμού και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές.

---

<sup>a</sup> Agricultural and Biosystems Engineering Department, Iowa State University, NSRIC, Ames, IA 50011, USA

<sup>b</sup> Biological Engineering Department, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia Canada B3J2X4

<sup>γ</sup> Desert Development Center, American University, Cairo, Egypt

## 2. Η ΒΙΟΜΑΖΑ ΩΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 2.1 Βιομάζα

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Οι πηγές ενέργειας θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: ορυκτά καύσιμα, ανανεώσιμες πηγές και πυρηνικές πηγές. Τα ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνουν τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι ανανεώσιμες πηγές είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα και η γεωθερμική ενέργεια. Η πυρηνική ενέργεια περιλαμβάνει τη σχάση και η σύντηξη.

Βιομάζα καλείται η ζώσα γήινη ύλη. Με την ευρύτερη έννοια του όρου περιλαμβάνει οποιοδήποτε υλικό προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς. Ειδικότερα, η βιομάζα για ενεργειακούς σκοπούς περιλαμβάνει κάθε τύπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων.

Ο όρος βιομάζα είναι το μόνο οργανικό υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων που είναι ανανεώσιμο και αναφέρεται στην οργανική ύλη που δημιουργείται από τη φωτοσύνθεση, διαδικασία στην οποία η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται το νερό και το CO<sub>2</sub> σε οργανική ύλη, δηλαδή σε ενεργειακά πλούσια βιομάζα. Κατά συνέπεια, τα υλικά βιομάζας είναι το άμεσο ή έμμεσο αποτέλεσμα της ανάπτυξης των φυτών. Τα φυτά απορροφούν ηλιακή ενέργεια που τη χρησιμοποιούν για την διαδικασία της φωτοσύνθεσης, απαραίτητη για την ανάπτυξη τους. Σε αυτήν την διαδικασία, η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τον ιστό των πράσινων φυτών, παρέχει την ενέργεια για να μειωθεί το CO<sub>2</sub> και να δημιουργηθούν υδρογονάνθρακες (σάκχαρα, κυτταρίνη) που χρησιμοποιούνται έπειτα ως πηγές ενέργειας και ως πρώτες ύλες για όλες τις άλλες συνθετικές αντιδράσεις των φυτών.

Η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στα φυτά και τα ζώα (αυτά θρέφονται με φυτά ή άλλα ζώα) ή στα απορρίμματά τους μπορεί να ανακτηθεί με την χρήση της βιομάζας ως καύσιμο. Κατά την ανάφλεξη, η βιομάζα απελευθερώνει θερμότητα και διοξείδιο του άνθρακα το οποίο είχε απορροφηθεί κατά την ανάπτυξη του φυτού. Ουσιαστικά, η χρήση της βιομάζας είναι διαδικασία αντίστροφη της φωτοσύνθεσης.

Στη φύση, η βιομάζα αποσυντίθεται στα συστατικά της απελευθερώνοντας θερμότητα. Η απελευθέρωση ενέργειας από την καύση βιομάζας μιμείται φυσικές διαδικασίες. Επομένως, η ενέργεια που προέρχεται από βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμη ενέργεια και δεν ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου αφού δεν

προστίθενται νέες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η βιομάζα είναι μοναδική αφού αποθηκεύει αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια. Επιπλέον, είναι η μόνη ανανεώσιμη πηγή άνθρακα και μπορεί να μετατραπεί σε στερεό, υγρό και αέριο καύσιμο.

Παρόλα αυτά, η φωτοσύνθεση χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό ποσοστό της ηλιακής ενέργειας ώστε να δημιουργηθούν 200 δις τόνοι άνθρακα σε γήινη και υδρόβια βιομάζα με ενεργειακό περιεχόμενο της τάξης των 3000 δις GJ/y. Ωστόσο, μόνο το 1/10 της παγκόσμιας ενέργειας της βιομάζας καταναλώνεται, ενώ το υπόλοιπο παραμένει ανεκμετάλλευτο. Κάθε χρόνο τα φυτά αποθηκεύουν 10 φορές την παρούσα ετήσια κατανάλωση ενέργειας. Αυτό το τεράστιο ποσό ενέργειας δεν συμβάλλει μόνο στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των χωρών αλλά παρέχει ένα πλήθος χημικών ανατροφοδοτών για την οργανική χημική βιομηχανία, συμβάλλοντας έτσι στη διαφύλαξη των πολύτιμων μη-ενεργειακών αποθεμάτων πετρελαίου.

Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα (καύση ξυλείας για θέρμανση και μαγείρεμα) ή έμμεσα, με μετατροπή της σε υγρό ή αέριο καύσιμο (για παράδειγμα, αλκοόλ από φυτείες ζαχάρου ή βιοαέριο από ζωικά απορρίμματα). Η ενέργεια από τη βιομάζα κυμαίνεται από 8 MJ/kg για πράσινη ξυλεία, σε 20 MJ/kg για ξηρή φυτική ύλη, σε 55 MJ/kg για μεθάνιο ενώ για τον άνθρακα είναι περίπου 27 MJ/kg.

Η βιομάζα υπό μορφή ξύλου είναι η παλαιότερη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο. Παραδοσιακά, χρησιμοποιείται μέσω της άμεσης καύσης και αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται ευρέως ακόμα και σήμερα. Στις μέρες μας, αντιπροσωπεύει μόνο το 3 % της κατανάλωσης πρωταρχικής ενέργειας στις βιομηχανοποιημένες χώρες. Εντούτοις, ένα μεγάλο μέρος του αγροτικού πληθυσμού στις αναπτυσσόμενες χώρες, που αντιπροσωπεύει περίπου το 50 % του παγκόσμιου πληθυσμού, εμπιστεύεται τη βιομάζα του ξύλου για καύσιμο.

Κατά την καύση της βιομάζας παράγονται ρύποι συμπεριλαμβανομένης της σκόνης, το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), τα αέρια της όξινης βροχής ( $\text{SO}_x$ ) και τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ). Οι εκπεμπόμενοι ρύποι μπορούν να μειωθούν πριν απελευθερωθούν με τα αέρια καύσιμα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές. Συγκριτικά με την καύση του άνθρακα το παραγόμενο θείο είναι μειωμένο κατά 90 %. Στο παρόν ποσοστό χρήσης, οι ποσότητες ατμοσφαιρικής ρύπανσης που εκπέμπονται από την καύση βιομάζας είναι ασήμαντες έναντι άλλων πηγών ρύπανσης, παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί εάν η



χρήση της βιομάζας αυξηθεί στο μέλλον. Η τυπική σύνθεση της βιομάζας δίνεται στον πίνακα 2.1 [1].

Στοιχείο	Περιεκτικότητα (%)
Ανθρακας	49
Οξυγόνο	43
Υδρογόνο	6
Θείο	0,05
Αζωτο	1
Τέφρα	0,95 (K, Na, Ca, Si, Mg κλπ)

Πίνακας 2.1: Τυπική σύνθεση βιομάζας

Η βιομάζα έχει μεγάλες δυνατότητες ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας τόσο για τις πλουσιότερες χώρες όσο και για τις αναπτυσσόμενες. Παρόλα αυτά, ως καύσιμο βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο και είναι πιθανό να αυξηθεί η χρήση της εξαιτίας της παρότρυνσης των νέων νομοθεσιών για λιγότερο ρυπογόνες μεθόδους διάθεσης αποβλήτων, όπως η καύση των απόβλητων για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, τα συστήματα εκμετάλλευσης της βιομάζας θα γίνουν πιο προσιτά στο μέλλον καθώς η τεχνολογία βελτιώνεται.

### 2.1.2 Πηγές βιομάζας

Στην πράξη υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας: Α) οι υπολειμματικές μορφές (τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και τα απορρίμματα) και Β) η βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες [2].

Α) Οι υπολειμματικές μορφές βιομάζας διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. Γεωργικά υπολείμματα, δηλαδή υπολείμματα που παραμένουν στον αγρό μετά την συγκομιδή του κυρίου προϊόντος. Τέτοιου είδους υπολείμματα είναι το άχυρο σιτηρών, τα στελέχη βαμβακιού, κ.α.
2. Υπολείμματα γεωργικών και δασικών βιομηχανιών όπως ελαιοπυρήνες, υπολείμματα εκκοκκισμού, πριονίδια κ.α.
3. Υπολείμματα δασικής προέλευσης δηλαδή υπολείμματα που παραμένουν στο δάσος μετά την συγκομιδή ξυλείας ή εργασιών υλοτομίας όπως τα κλαδιά δένδρων, τα πρέμνα κ.α.

4. Δημοτικά στερεά απορρίμματα (το οργανικό τμήμα τους).
5. Ζωικά απορρίμματα

Β) Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι καλλιεργούμενα είδη τα οποία παράγουν βιομάζα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων. Η τεχνολογία εξαγωγής του ελαίου και οι γεωργικές τεχνικές είναι απλές και τα φυτά πολύ ανθεκτικά. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν το σιτάρι, το κριθάρι, τα ζαχαρότευτλα, ο ηλιάνθος κ.α.

Η παγκόσμια παραγωγή βιομάζας εκτιμάται ότι φτάνει τα 146 δις τόνους το χρόνο. Το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας της βιομάζας παράγεται από το ξύλο και τα υπολείμματα του (64 %), ακολουθούν τα δημοτικά στερεά απόβλητα (24 %), τα γεωργικά απόβλητα (5 %) και τα αέρια των χώρων υγειονομικής ταφής (5 %).

Παρακάτω αναλύονται περαιτέρω οι πηγές βιομάζας.

#### 1. Γεωργικά υπολείμματα

Πρόκειται για τα υπολείμματα που προκύπτουν από τις γεωργικές καλλιέργειες όπως σιτηρά, βαμβάκι, καλαμπόκι. Μεγάλες ποσότητες γεωργικών υπολειμμάτων παράγονται ετησίως σε παγκόσμια κλίμακα και παραμένουν σχεδόν ολοκληρωτικά ανεκμετάλλευτες. Το πιο κοινό γεωργικό υπόλειμμα είναι ο φλοιός ρυζιού, ο οποίος αποτελεί το 25 % του ρυζιού. Άλλα υπολείμματα φυτών περιλαμβάνουν τις ίνες ζαχαροκάλαμων (γνωστή ως βαγάσση-bagasse), τους φλοιούς και τα κελύφη καρυδιών, τους φλοιούς φιστικιών και το άχυρο

#### 2. Δασικά υπολείμματα

Πρόκειται για υπολείμματα δασικών υλοτομιών καθώς και τα υπολείμματα που προκύπτουν από την επεξεργασία του ξύλου. Το ξύλο είναι κυρίαρχο καύσιμο σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες και ανταγωνίζεται τα ορυκτά καύσιμα, επειδή είναι ανανεώσιμο και αποθηκεύει ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακή και αιολική ενέργεια. Χρησιμοποιείται στον οικιακό τομέα (μαγειρική και ζεστό νερό), στον εμπορικό τομέα (θέρμανση νερού) και στο βιομηχανικό τομέα (για τη θέρμανση νερού και για τη διαδικασία θέρμανσης), επίσης στις αγροτικές βιομηχανίες, όπως σε κλιβάνους τούβλου, στην κεραμοποιία κ.λ.π.

Το ξύλο είναι ένα σύνθετο κυτταρίνης, λιγνίνης και ημι-κυτταρίνης (43 %, 36 % και 22 %, αντίστοιχα). Μια χαρακτηριστική ανάλυση ξηρού ξύλου περιλαμβάνει άνθρακα (52 %), υδρογόνο (6,3 %), οξυγόνο (40,5 %) και αζώτου (0,4 %). Στην ανάλυση του ξύλου παρουσιάζονται τα ακόλουθα συστατικά:

- ξύλο: πτητική ύλη (80%), σταθερός άνθρακας (19,4%) και τέφρα (0,6%)
- φλοιός: πτητική ύλη (74,7%), σταθερός άνθρακας (24%) και τέφρα (1,3%).

Το ενεργειακό περιεχόμενο των διαφορών φυτικών ιστών καθορίζει τη θερμογόνο δύναμη (περιεχόμενο θερμότητας), η οποία εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα και του υδρογόνου, συστατικά τα οποία καθορίζουν κατά κύριο λόγο την ενεργειακή αξία της βιομάζας. Τα χαρακτηριστικά των καύσιμης ξυλείας δείχνουν ότι η πυκνότητα των ξύλων ποικίλλει μεταξύ 400 και 900 kg/m<sup>3</sup> και το ενεργειακό τους περιεχόμενο ποικίλλει μεταξύ 4200 και 5400 kcal/kg.

Η δασική ενέργεια περιλαμβάνει την χρήση της δασικής βιομάζας που προς το παρόν δεν χρησιμοποιείται στις παραδοσιακές βιομηχανίες δασικών προϊόντων. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι τα δασικά υπολείμματα παραμένουν ανεκμετάλλευτα μετά από δασική συγκομιδή, παρ' ότι αποτελούν το 50 % της συνολικής δασικής βιομάζας.

### 3. Ενεργειακές καλλιέργειες

Πρόκειται για τις καλλιέργειες που πραγματοποιούνται με σκοπό όχι την παραγωγή τροφίμων ή βιομηχανικών πρώτων υλών αλλά ενέργειας.

Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι είδη με υψηλή παραγωγικότητα σε βιομάζα ανά μονάδα γης και αναφέρονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τις γεωργικές και τις δασικές καλλιέργειες. Οι γεωργικές καλλιέργειες διακρίνονται περαιτέρω σε ετήσιες και πολυετείς.

#### *Δασικές ενεργειακές καλλιέργειες*

- Δυο είδη ευκαλύπτων (*Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh)
- Ψευδακακία (*Robinia pseudoacacia*)

#### *Πολυετείς γεωργικές ενεργειακές καλλιέργειες*

- Καλάμι (*Arundo donax* L)
- Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus* L)
- Μίσχανθος (*Miscanthus x giganteus* GREEF et DEU)
- Switch grass (*Panicum virgatum* L)

#### *Ετήσιες γεωργικές ενεργειακές καλλιέργειες*

- Γλυκό και κυτταρινούχο σόργο (*Sorghum bicolor* L)

- Κέναφ (*Hibiscus cannabinus* L)
- Ελαιοκράμβη (*Brassica napus*, *Brassica carinata*)
- Ηλίανθος (*Helianthus annuus* L)
- Σιτάρι (*Triticum aestivum*)
- Ζαχαρότευτλα (*Beta vulgaris* L)
- Αραβόσιτος (*Zea mays* L)
- Κριθάρι (*Hordeum sativum/Vulgare*)]

Το κύριο πλεονέκτημα των ενεργειακών καλλιιεργειών είναι ότι η σταθερή παραγωγή τους μπορεί να εξασφαλίσει μεγάλης κλίμακας, μακροπρόθεσμη προμήθεια πρώτης ύλης με ομοιόμορφα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε μονάδες παραγωγής βιοκαυσίμου και ενέργειας. Οι νέες καλλιέργειες παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις ανά μονάδα εδάφους από τις συμβατικές. Αυτές οι υψηλότερες αποδόσεις βελτιώνουν την οικονομικότητα τους και ελαχιστοποιούν τις απαιτήσεις σε υψηλής ποιότητας έδαφος, χημικά, μεταφορικά και άλλες αρνητικές περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Τα κυριότερα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση ενεργειακών καλλιιεργειών είναι τα παρακάτω:

- *Προστασία έναντι της διάβρωσης του εδάφους:* Το πλούσιο υπέργειο τμήμα και το ριζικό σύστημα των ενεργειακών καλλιιεργειών (ειδικά των πολυετών), ελαχιστοποιεί τις δυσμενείς επιπτώσεις της διάβρωσης του εδάφους και βελτιώνει τη δομή του,
- *Διαχείριση νερού:* Στο πλαίσιο της ενεργειακής γεωργίας δίνεται η ευκαιρία να επιλεγούν είδη που αξιοποιούν το νερό αποδοτικά, ή και σε πολλές περιπτώσεις είδη που αξιοποιούν τις χειμερινές βροχοπτώσεις για την ανάπτυξη τους και δεν απαιτούν επιπλέον άρδευση, παρουσιάζοντας ικανοποιητική ανάπτυξη και παραγωγικότητα σε βιομάζα. Φυτά όπως ο ευκάλυπτος και το καλάμι, μπορούν να αναπτυχθούν ικανοποιητικά χωρίς άρδευση, αν και όταν αρδεύονται η παραγωγή τους σε βιομάζα είναι υψηλότερη.
- *Χαμηλές εισροές σε λιπάσματα:* Οι ενεργειακές καλλιέργειες απαιτούν χαμηλότερα επίπεδα λίπανσης σε σχέση με τα ετήσια φυτά, προστατεύοντας έτσι το περιβάλλον με μείωση της χρήσης λιπασμάτων.
- *Μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων:* Οι ενεργειακές καλλιέργειες καλύπτουν ευρύ φάσμα ποικιλίας φυτών και με την εγκατάστασή τους στον αγρό περιορίζουν



την ανάπτυξη ζιζανίων. Επιπρόσθετα, δεν προσβάλλονται από σοβαρές ασθένειες και έντομα, και ως εκ τούτου, η χρήση μυκητοκτόνων και εντομοκτόνων είναι πολύ μικρή.

- *Εκμετάλλευση εδαφών χαμηλής γονιμότητας:* Οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτικές λύσεις σε εγκαταλελειμμένες περιοχές χαμηλής γονιμότητας, καθώς προσαρμόζονται εύκολα και αποδίδουν ικανοποιητικά σε μεγάλο εύρος εδαφών.

Τα κοινωνικά και οικονομικά οφέλη από τη χρήση ενεργειακών καλλιεργειών είναι τα παρακάτω:

- *Προσφορά εναλλακτικών καλλιεργητικών λύσεων:* Οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις για τους αγρότες, λαμβάνοντας υπόψη ότι ήδη υπάρχουν κάποια είδη επιδοτήσεων.
- *Ενδυνάμωση του γεωργικού χώρου:* Με τη ανάπτυξη καλλιεργειών για ενέργεια, θα δημιουργηθεί ανάγκη για προμήθεια νέων ποικιλιών, βελτίωση καλλιεργητικών μεθόδων και εξοπλισμού, που θα υποστηρίζουν την παραγωγή και αποθήκευση των νέων φυτών. Αυτό θα δώσει ώθηση στη γεωργική οικονομία και θα οδηγήσει στην ανάπτυξη της εγχώριας γεωργικής βιομηχανίας.
- *Αύξηση του αγροτικού εισοδήματος:* Η διεύθυνση των ενεργειακών καλλιεργειών στην εσωτερική αγορά μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητικό αγροτικό εισόδημα σε σχέση με ορισμένες συμβατικές καλλιέργειες και να ενισχύσει τη διαφοροποίηση των δραστηριοτήτων των γεωργών.
- *Μείωση των περιφερειακών ανισοτήτων και αναζωογόνηση των λιγότερο ανεπτυγμένων γεωργικών οικονομιών:* Η εισροή, νέων εισοδημάτων στις αγροτικές περιοχές θα βελτιώσει τη ζωή των τοπικών κοινωνιών και θα στηρίξει την ανάπτυξη σε λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές της χώρας.
- *Εξασφάλιση αειφόρου περιφερειακής ανάπτυξης:* Η δημιουργία αγοράς για παραγωγή βιοκαυσίμων, θερμότητας και ηλεκτρισμού στην περιφέρεια, θα συμβάλει στην παραμονή του πληθυσμού στις αγροτικές περιοχές, με τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και την εξασφάλιση πρόσθετων εισοδημάτων στην τοπική κοινωνία.
- *Μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο:* Η χρήση καλλιεργειών για ενεργειακούς σκοπούς οδηγεί στην ανάπτυξη στρατηγικών εθνικών προϊόντων και ελατώνει την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου.

#### 4. Δημοτικά απόβλητα

Τα αστικά απόβλητα περιλαμβάνουν τα δημοτικά στερεά απόβλητα που παράγονται από οικιακές ή εμπορικές δραστηριότητες και τα υγρά λύματα. Τα περισσότερα δημοτικά στερεά απόβλητα εναποτίθενται στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Το περιεχόμενο τους ποικίλει από τα πιο ακίνδυνα και απλά σιτατικά (χώμα, κατάλοιπα τροφών) μέχρι τις πιο σύνθετες και επικίνδυνες ουσίες (βαρέα μέταλλα, τοξικά απόβλητα). Η ποιοτική σύσταση των απορριμμάτων είναι παράμετρος που μεταβάλλεται τόσο τοπικά όσο και χρονικά, δηλαδή είναι συνάρτηση της περιοχής, της χώρας και της εποχής του έτους. Οι διαχρονικές μεταβολές που παρατηρούνται στην σύσταση των απορριμμάτων οφείλονται στις καταναλωτικές συνήθειες των κατοίκων της εκάστοτε περιοχής.

Κυρίαρχο στοιχείο, στη διαχείριση των στερεών δημοτικών απορριμμάτων, αποτελεί η υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών, με αποτέλεσμα την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

Στην εξέλιξη αυτή έχουν συμβάλει:

- η τεχνολογική υποδομή
- η επένδυση σημαντικών ποσών, για αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων
- η ύπαρξη σύγχρονου θεσμικού πλαισίου, που διέπει όλες τις σχετικές με το θέμα λειτουργίες.

#### 5. Ζωικά απορρίμματα

Στα ζωικά υπολείμματα περιλαμβάνονται τα απόβλητα, όπως το ζωικό λίπασμα (π.χ. από βοοειδή, κοτόπουλα και χοίρους).

### 2.1.3 Ιδιότητες

#### **α) Ιδιότητες βιομάζας ως καύσιμο**

Τα υψηλά περιεχόμενα υγρασίας και τέφρας στα καύσιμα βιομάζας προκαλούν προβλήματα ανάφλεξης και καύσης. Το σημείο τήξης της τέφρας είναι χαμηλό με αποτέλεσμα να προκαλούνται προβλήματα ακαθαρσίας και σκουριάς των μεταλλευμάτων, εξαιτίας των χαμηλότερων τιμών της θερμογόνου δύναμης της βιομάζας που οδηγεί σε προβλήματα σταθεροποίησης της φλόγας. Αναμένεται ότι η ανάμειξη βιομάζας με κάρβουνο υψηλής ποιότητας μειώνει τα προβλήματα σταθεροποίησης της φλόγας καθώς και ελαχιστοποιεί τα προβλήματα διάβρωσης [3].

Η βιομάζα προσφέρει σημαντικά προτερήματα ως τροφοδοσία καύσης εξαιτίας της υψηλής πτητικότητας του καυσίμου και του εναπομείναντος στερεού υπολείμματος τέφρας. Παρόλα αυτά, συγκριτικά με τα στερεά συμβατικά καύσιμα η βιομάζα περιέχει λιγότερο άνθρακα, περισσότερο οξυγόνο και μικρότερη τιμή θερμογόνου δύναμης. Το χλώριο, που βρίσκεται σε μερικά είδη βιομάζας, επηρεάζει τη διάβρωση η οποία προκαλείται λόγω υψηλής θερμοκρασίας στις θερμαινόμενες επιφάνειες σωλήνων.

Η βιομάζα διαφέρει από τον άνθρακα όσον αφορά το οργανικό, ανόργανο, ενεργειακό περιεχόμενο και τις φυσικές ιδιότητες. Η βιομάζα γενικά έχει λιγότερο άνθρακα, περισσότερο οξυγόνο, περισσότερο πυρίτιο και κάλιο, λιγότερο αλουμίνιο και σίδηρο, χαμηλότερη θερμογόνο δύναμης, υψηλότερη περιεχόμενη υγρασία και χαμηλότερη πυκνότητα. (πίνακας 2.2).

Ιδιότητα	Βιομάζα	Άνθρακας
Πυκνότητα καυσίμου (kg/m <sup>3</sup> )	500	1300
Κατανομή μεγέθους	3 mm	100 μm
Άνθρακας (% κ.β. ξηρού καυσίμου)	42-54	65-85
Οξυγόνο (% κ.β. ξηρού καυσίμου)	35-45	2-15
Θείο (% κ.β. ξηρού καυσίμου)	max 0,5	0,5-7,5
SiO <sub>2</sub> (% κ.β. ξηρής τέφρας)	23-49	40-60
K <sub>2</sub> O (% κ.β. ξηρής τέφρας)	4-48	2-6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% κ.β. ξηρής τέφρας)	2,4-9,5	15-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% κ.β. ξηρής τέφρας)	1,5-8,5	8-18
Θερμοκρασία ανάφλεξης (K)	418-426	490-595
Θερμοκρασία αιχμής (K)	560-575	-
Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	14-21	23-28

Πίνακας 2.2: Φυσικές, χημικές και ιδιότητες καυσίμου βιομάζας και άνθρακα

Ο πίνακας 2.3(α) παρουσιάζει την περιεκτικότητα διαφόρων ειδών βιομάζας σε C,H,N,S,O. Ο πίνακας 2.3(β) παρουσιάζει την περιεκτικότητα σε τέφρα και την ανώτερη θερμογόνο δύναμη(kJ/kg). Οι τιμές δίνονται σε ποσοστά επί % σε ξηρή βάση. Είναι δύσκολο να υιοθετηθεί μια αντιπροσωπευτική βιομάζα εξαιτίας της



μεγάλης διαφοροποίησης των ιδιοτήτων κάθε δείγματος. Το άζωτο, χλώριο και η τέφρα ποικίλουν σημαντικά στα καύσιμα βιομάζας και αποτελούν συστατικά άμεσα συνδεδεμένα με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα, τη διάβρωση και την αναπόθεση τέφρας, αντίστοιχα. Η βιομάζα περιέχει μικρότερα ποσοστά θείου συγκριτικά με τον άνθρακα.

Υλικό	C	H	N	S	O
Αγνήτης	60	4,2	0,9	1,3	19,2
Υπολείμματα άνθρακα	80,3	3,1	0,2	0,0	11,3
Έλατο	52,3	6,3	0,1	0,0	40,5
Πεύκο	52,3	5,8	0,1	0,0	38,8
Οξιά	51,6	6,3	0,0	0,0	41,5
Λεύκα	51,6	6,3	0,0	0,0	41,5
Φλοιός ριζικό	38,5	5,7	0,5	0,0	39,8
Άχρω ριζικό	39,2	5,1	0,6	0,1	35,8
Πριονίτι	47,2	6,5	0,0	0,0	45,4
Χαρτί	43,4	5,8	0,3	0,2	44,3
Βελανιδιά	49,5	5,7	0,2	0,0	41,3
Δημοτικά στασιά απόβλητα	47,6	6,0	1,2	0,3	32,9
Υπολείμματα εύων βάμβακος	42	5,4	1,4	0,5	35
Κοπριά	45,4	6,0	1,0	0,3	31
Κέλφος αμυγδαλιού	47,9	5,1	1,1	0,06	41,6
Άχρω σιτηρών	45,5	6,6	1,8	0,07	34,1
Κέλφος καρυδιάς	53,5	5,5	1,5	0,1	35,5
Ζωικά υπολείμματα	42,7	5,2	2,4	0,3	31,3
Ζαγ/πυύλο	40	5,2	1,4	0,2	40,7
Φλοιός ελιάς	52,8	6,7	0,5	0,05	36,7

Πίνακας 2.3 (α): Περιεκτικότητα σε άνθρακα (C), υδρογόνο (H), άζωτο(N), θείο (S) και οξυγόνο (O) διαφόρων ειδών βιομάζας

Υλικό	Τέφρα	ΔΘΔ
Αιγυπτίς	10,4	24894
Υπολείμματα άνθρακα	3,4	57390
Έλατο	0,8	21031
Πεύκο	2,9	20404
Οξιά	0,6	20357
Δρύνα	0,6	20729
Φλοιός ρυζιού	15,5	15361
Άχυρο ρυζιού	19,2	15198
Πριονίδι	1,0	20483
Σαπύ	6,0	17597
Βελανιδιά	3,3	19196
Δημοτικά στερεά απόβλητα	12,0	19860
Υπολείμματα ενύθρων βάμβακος	4,5	15500
Κοπριά	15,9	17361
Κέλφος αμυγδάλου	3,3	18800
Άχυρο στερών	13,4	17000
Κέλφος καρυδιάς	2,8	21600
Ζωικά υπολείμματα	17,8	17150
Ζαχ/τευτίο	12,5	15400
Φλοιός ελιάς	3,3	20900

Πίνακας 2.3(β): Περιεκτικότητα σε τέφρα και ανώτερη θερμογόνος δύναμη (KJ/kg) διαφόρων ειδών βιομάζας

Το περιεχόμενο σε πτητικά συστατικά % σε ξηρή βάση για ορισμένα είδη βιομάζας είναι: 1) οξιά: 65 %, 2) άχυρο σιταριού 66,3 %, 3) φλοιός ελιάς 77,5 %, 4) ξύλο οξιάς 82,5 %, 5) έλατο 80,2 %, 6) καλαμπόκι 87,4 %, 7) υπολείμματα σιταριού 85,5 %, 8) κέλφος καρύδας 59,3 %, 9) κέλφος αμυγδάλου 74 %, 10) πεύκο 7,3 %, 11) υπολείμματα βαμβακιού 81 %, 12) υπολείμματα ελιάς 66,1 %, 13) πριονίδι 82,2 %, 14) λεύκα 0 %, 15) ροδάκινο 0 %, 16) φλοιός ρυζιού 61 %, 17) ζαχαρότευτλο 0 %.

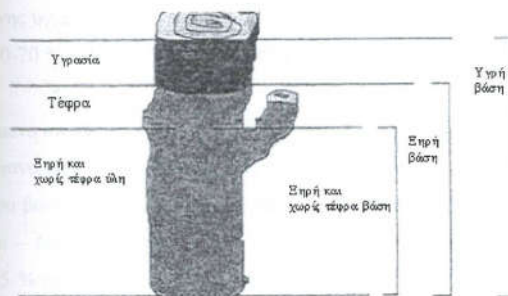
Ο άνθρακας περιέχει περισσότερο αλουμίνιο, σίδηρο και τιτάνιο από τη βιομάζα ενώ μεγαλύτερες ποσότητες πυριτίου, καλίου και νατρίου εμφανίζονται στον άνθρακα. Η βιομάζα προερχόμενη από ξύλο περιέχει μικρά ποσά αζώτου και τέφρας ενώ τα γεωργικά υπολείμματα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές για τα παραπάνω δύο συστατικά. Το άχυρο περιέχει υψηλή ποσότητα χλωρίου και καλίου, στοιχεία ανεπιθύμητα στα καύσιμα. Η κυριότερη διαδικασία απομάκρυνση του καλίου από το άχυρο βασίζεται στην πυρόλυση και στον καθαρισμό του εναπομείναντος στερεού υπολείμματος. Το άχυρο πυρολύεται σε μέτρια θερμοκρασία στην οποία το κάλιο

παραμένει στο στερεό υπόλειμμα. Κάλιο και εναπομείναντα χλώριο απομακρύνονται από το στερεό υπόλοιπο με νερό. Τα αέρια πυρόλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε boiler εξαιτίας του υψηλού περιεχομένου του άχρτου σε κάλιο. Τα αλκάλια όταν αντιδρούν με σουλφίδια και χλώριο μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα θερμοχημικά συστήματα επεξεργασίας, καθώς και ακαθαρσίες στις επιφάνειες των εναλλακτών και στα πτερύγια των στροβίλων.

### β) Θερμικές ιδιότητες βιομάζας

Κάθε είδος βιομάζας έχει διαφορετικές ιδιότητες που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη χρήση του καυσίμου σε συσκευές καύσης και αεριοποίησης. Οι σημαντικότερες ιδιότητες που σχετίζονται με τη θερμική μετατροπή της βιομάζας είναι [4]:

- Περιεχόμενο σε υγρασία (moisture content)
- Περιεχόμενο σε τέφρα (ash content)
- Περιεχόμενο σε πτητικά συστατικά (volatile matter content)
- Στοιχειακή ανάλυση (elemental composition)
- Θερμογόνος δύναμη (heating value)
- Μέση πυκνότητα (bulk density)



Σχήμα 2.1: Στοιχεία της βιομάζας ενός δένδρου

Επικρατεί σύγχυση όσον αφορά στον πλήρη ορισμό των παραπάνω ιδιοτήτων. Είναι σημαντικό λοιπόν να σημειωθεί ότι η βιομάζα αποτελείται από νερό, τέφρα και υλικό απαλλαγμένο από τέφρα (ash matter), (σχήμα 2.1). Στο σχήμα 2.1 δίνεται παραστατικά το σχέδιο που περιγράφει μερικά από τα συστατικά στοιχεία της

βιομάζας ενός δένδρου. Το 55 % περίπου του χλωρού βάρους ενός δένδρου συγκεντρώνεται στον κορμό, 25 % στα κλαδιά και στα φύλλα και 20 % στις ρίζες. Η αναλογία του καθενός από τα παραπάνω συστατικά εξετάζεται προσεκτικά προκειμένου να εξεταστεί η καταλληλότητα του κάθε τύπου βιομάζας ως καύσιμο.

#### **1) Περιεχόμενο σε υγρασία**

Ορίζεται ως η ποσότητα του νερού στο υλικό εκφρασμένη σε ποσοστό επί του βάρους του υλικού, το οποίο αναφέρεται σε ξηρή βάση, υγρή βάση και σε ξηρή και χωρίς τέφρα βάση.

Αν η περιεχόμενη υγρασία ορίζεται σε υγρή βάση (wet bases) το βάρος του νερού εκφράζεται σαν ποσοστό του αθροίσματος του βάρους του νερού, της τέφρας καθώς και του ξηρού – χωρίς τέφρα υλικού. Όμοια, υπολογίζοντας την περιεχόμενη υγρασία σε ξηρή βάση (dry bases) το βάρος του νερού εκφράζεται ως ποσοστό του βάρους της τέφρας και του ξηρού-χωρίς τέφρα υλικού. Το περιεχόμενο σε υγρασία μπορεί να εκφραστεί και ως ποσοστό του ξηρού-χωρίς τέφρα υλικού. Σε αυτή την περίπτωση, το βάρος του νερού σχετίζεται με το βάρος της ξηρής βιομάζας. Αφού η περιεχόμενη υγρασία καθορίζει την αξία της βιομάζας ως καύσιμο, η βάση στην οποία η υγρασία μετράται πρέπει πάντα να αναφέρεται. Το παραπάνω είναι εξαιρετικά σημαντικό εφόσον τα υλικά βιομάζας παρουσιάζουν μεγάλο εύρος σε τιμές περιεχόμενης υγρασίας (wet bases), που κυμαίνονται από 10 % για δημητριακά, άχυρα και έως 50-70 % για δασικά υπολείμματα.

#### **2) Περιεχόμενο σε τέφρα**

Τα ανόργανα συστατικά (περιεχόμενη τέφρα) εκφράζονται σε υγρή, ξηρή ή ξηρή χωρίς τέφρα βάση. Γενικά, χρησιμοποιείται η ξηρή βάση (πίνακας 2.4). Η τέφρα που περικλείεται – ένα αναπόσπαστο τμήμα της δομής του φυτού - αντιπροσωπεύει λιγότερο από 0,5 % σε ξύλο, 5-10 % σε γεωργικά υπολείμματα και πάνω από 30-40 % σε φλοιούς ρυζιού και φύλλα.

Η χημική σύνθεση της τέφρας καθώς και η συνολικά περιεχόμενη ποσότητα της στη βιομάζα είναι πολύ σημαντικές. Η σύνθεση της τέφρας επηρεάζει τη συμπεριφορά της σε υψηλές θερμοκρασίες καύσης και αεριοποίησης. Για παράδειγμα, επεξεργασμένη τέφρα μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε αντιδραστήρες καύσης και αεριοποίησης. Τα προβλήματα αυτά ποικίλουν από

απλούς φραγμούς στην απομάκρυνση της τέφρας λόγω της σκουριάς έως σοβαρά λειτουργικά προβλήματα σε ρευστοποιημένες κλίνες.

Βιομάζα	Υγρασία (%)	Τέφρα (%)	Θερμιδική αξία (MJ/kg)
Βαγιάση	50	1-2	9,2
Πριονίδια	35	2	11,3
Φλοιοί ρυζισό	10-15	15-20	12,6-13,8
Άχρρορυζισό	6	16	14,4
Φλοιοί φυτειών	11-14	2-5	15-17,5
καφέ Φλοιοί	10	2-3	16,75
φιστικισό Φλοιοί	10	1	18,8
καρύδας Στελέχη	8	3	18,4
βαμβάκισό Άχρρο σόγιας	7-8	5-6	15,5-15,9

Πίνακας 2.4: Περιεχόμενη υγρασία, τέφρα και θερμιδική αξία διαφόρων ειδών βιομάζας

### 3) Περιεχόμενο σε πτητικά συστατικά

Ως πτητικά συστατικά ορίζονται εκείνα που απελευθερώνονται κατά τη θέρμανση της βιομάζας στους 400-500 °C. Κατά τη θέρμανση η βιομάζα διασπάται σε πτητικά συστατικά και στερεό υπόλειμμα άνθρακα. Το περιεχόμενο σε πτητικά συστατικά είναι περίπου 80 % για τη βιομάζα ενώ για τον άνθρακα περίπου 20 %.

### 4) Στοιχειακή ανάλυση

Η σύνθεση των οργανικών χωρίς τέφρα στοιχείων βιομάζας είναι ενιαία. Τα κυριότερα συστατικά είναι άνθρακας, οξυγόνο και υδρογόνο, με μικρές αναλογίες αζώτου. Οι περιεκτικότητες ορίζονται ως εξής: C: 44-51 %, H<sub>2</sub>: 5,5-6,7 %, O<sub>2</sub>: 41-50 %, N: 0,12-0,60 %, S: 0-0,2 %.

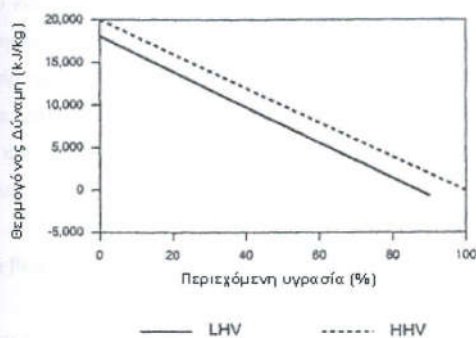


### 5) Θερμογόνος δύναμη

Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου αποτελεί ένδειξη της χημικά αποθηκευμένης ενέργειας του σε δεδομένο περιβάλλον. Σημαντικές παράμετροι αποτελούν η θερμοκρασία, η κατάσταση του νερού (υγρή ή αέρια) και τα προϊόντα καύσης ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , κλπ).

Η χημικά αποθηκευμένη ενέργεια του καυσίμου αποδίδεται με τη θερμογόνου δύναμή του σε ενέργεια (J) ανά ποσότητα ύλης (kg). Η ενέργεια αυτή δεν μετράται άμεσα παρά μόνο με ορισμό μιας κατάστασης αναφοράς. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (low heating value-LHV) με κατάσταση αναφοράς νερό σε αέρια κατάσταση και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (high heating value - HHV) με κατάσταση αναφοράς νερό σε υγρή μορφή.

Η βιομάζα περιέχει πάντα νερό το οποίο απελευθερώνεται κατά τη θέρμανση με τη μορφή υδρατμών. Επομένως, μέρος της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τις χημικές αντιδράσεις απορροφάται από τη διαδικασία εξάτμισης. Έτσι, η καθαρή θερμογόνος δύναμη (net heating value-NHV) μειώνεται καθώς το περιεχόμενο υγρασίας της βιομάζας αυξάνεται. Το σχήμα 2.2 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της θερμογόνου δύναμης και της περιεχόμενης υγρασίας.



Σχήμα 2.2: Θερμογόνος δύναμη ως συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας.

Για ποσοστό υγρασίας 87 % η LHV είναι σχεδόν μηδέν. Πρακτικά, η μέγιστη περιεχόμενη υγρασία για ανάφλεξη του καυσίμου και απόδοση ενέργειας είναι περίπου 55 % σε υγρή βάση (wet bases). Η HHV επηρεάζεται από την περιεχόμενη υγρασία με τη μείωση του περιεχόμενου του εύφλεκτου υλικού ανά κιλό καυσίμου

βιομάζας. Η θερμότητα εξάτμισης ανακτάται πλήρως με συμπύκνωση των υδρατμών όταν τα καυσάερια ανάγονται στην κατάσταση αναφοράς της HHV. Πρακτικά, η θερμογόνος δύναμη μετράται σε ξηρή, υγρή ή ξηρή – χωρίς τέφρα βάση. Για όλα τα είδη βιομάζας η HHV είναι περίπου 20400 kJ/kg ( $\pm 15\%$ ) σε ξηρή – χωρίς τέφρα βάση

#### 6) Μέση πυκνότητα

Αναφέρεται στο βάρος του υλικού ανά μονάδα όγκου. Η μέση πυκνότητα της βιομάζας κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές (150-200 kg/m<sup>3</sup>) για δημητριακά, κόκκους και άχυρα ενώ εμφανίζει υψηλότερες τιμές (600-900 kg/m<sup>3</sup>) για στερεό ξύλο. Η θερμογόνος δύναμη και η μέση πυκνότητα καθορίζουν την πυκνότητα ενέργειας, δηλαδή τη διαθέσιμη δυναμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου της βιομάζας. Γενικά, οι τιμές πυκνότητας ενέργειας της βιομάζας είναι περίπου το 1/10 των συμβατικών καυσίμων, όπως πετρέλαιο και υψηλής ποιότητας άνθρακα.

#### γ) Χαρακτηριστικά καυσίμου

Τα χαρακτηριστικά καυσίμου επηρεάζουν την επιλογή της τεχνολογίας μετατροπής: «εύκολα» καύσιμα όπως ξύλο ή υπολείμματα άνθρακα εφαρμόζονται σε ποικιλία εξοπλισμού ενώ «δύσκολα» καύσιμα, όπως φλοιοί ρυζιού απαιτούν ειδικές και συνήθως δαπανηρές τεχνολογικές λύσεις, είτε στην τεχνολογία μετατροπής είτε στην προεπεξεργασία καυσίμου. Τα καύσιμα βιομάζας παρουσιάζουν διαφορές εξαιτίας της ποικιλίας φυσικών (περιεχόμενη υγρασία και μέση πυκνότητα), χημικών (πτητικά συστατικά και περιεχόμενη τέφρα) και μορφολογικών (κατανομή μεγέθους) χαρακτηριστικών τους.

#### δ) Χαρακτηριστικά βιομάζας σχετικά με το περιβάλλον

##### 1) Μολυντές

Η βιομάζα δεν περιέχει συστατικά βλαβερά για το περιβάλλον. Παρόλα αυτά, θείο και χλώριο παρατηρούνται σε μικρές ποσότητες και συμβάλλουν στο σχηματισμό όξινης βροχής, με τη μετατροπή τους σε διοξείδιο του θείου και υδροχλώριο κατά την καύση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι: ξύλο: S 0,01 %, Cl 0,01 %, άχυρο: S 0,07 %, Cl 0,49 %, κοπριά: S 0,05 %, Cl 0,02 %, καλαμπόκι: S 0,05 %, Cl 1,48 %.



## 2) Περιεχόμενο σε άζωτο

Τα οξειδία του αζώτου συμβάλλουν στο σχηματισμό όξινης βροχής. Κατά την καύση παράγεται θερμικό  $\text{NO}_x$  (thermal  $\text{NO}_x$ ) σε θερμοκρασία άνω των  $950^\circ\text{C}$  από το άζωτο που περιέχεται στον αέρα καύσης. Καυστικό  $\text{NO}_x$  (fuel  $\text{NO}_x$ ) σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από το άζωτο που περιέχεται στο καύσιμο. Γενικά, οι ποσότητες οξειδίων του αζώτου περιορίζονται με τη χρήση χαμηλότερων θερμοκρασιών καύσης ή με σταδιακή καύση.

## 3) Πτητικοί υδρογονάνθρακες.

Κατά την καύση και αεριοποίηση σχηματίζονται πτητικοί υδρογονάνθρακες ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ), που καίγονται όταν παραμείνουν για αρκετό χρόνο στη θερμή ζώνη καύσης. Σε καλά σχεδιασμένα συστήματα, οι εκπομπές πτητικών υδρογονανθράκων είναι αμελητέες. Παρόλα αυτά, σε συσκευές καύσης παλαιότερης τεχνολογίας ή σε αεριοποιητές ανοικτής φλόγας (open fire gasifiers) οι εκπομπές πτητικών υδρογονανθράκων λαμβάνονται υπόψη.

### 2.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας είναι τα ακόλουθα [1], [5], [6], [7]:

1. Η αποτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) που παράγεται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων. Η βιομάζα δε συμβάλλει στην αύξηση της συγκέντρωσης του ρύπου αυτού στην ατμόσφαιρα γιατί, ενώ κατά την καύση της παράγεται  $\text{CO}_2$ , κατά την παραγωγή της και μέσω της φωτοσύνθεσης δεσμεύονται ξανά σημαντικές ποσότητες αυτού του ρύπου. Επομένως, η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τη βιομάζα θα οδηγήσει σε μείωση των αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου. Γι' αυτό μεγάλοι παραγωγοί στις βιομηχανικές χώρες στρέφονται στη βιομάζα ως μέσο για την ικανοποίηση των στόχων τους για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.
2. Η αποφυγή της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας με το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) που παράγεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων και συντελεί στο φαινόμενο της «όξινης βροχής». Η περιεκτικότητα της βιομάζας σε θείο είναι πρακτικά αμελητέα.

3. Η καύση της βιομάζας παράγει λιγότερη τέφρα από την καύση άνθρακα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο εδάφους στους αγρούς.
4. Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, που είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής καυσίμων από τρίτες χώρες, με αντίστοιχη εξοικονόμηση συναλλάγματος.
5. Η εξασφάλιση εργασίας και η συγκράτηση των αγροτικών πληθυσμών στις παραμεθόριες και τις άλλες γεωργικές περιοχές, συμβάλλοντας έτσι στην περιφερειακή ανάπτυξη της χώρας.
6. Η εξοικονόμηση των συμβατικών καυσίμων με αξιοποίηση του δυναμικού της βιομάζας που παραμένει ανεκμετάλλευτο.
7. Η καύση γεωργικών αποβλήτων, δασικών υπολειμμάτων και δημοτικών στερεών αποβλήτων για παραγωγή ενέργειας θεωρείται ως η πιο αποτελεσματική χρήση των αποβλήτων αφού περιορίζει το σημαντικό πρόβλημα της διάθεσής τους, ιδιαίτερα στις κατοικημένες περιοχές.

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

1. Ο μεγάλος όγκος της βιομάζας σε φυσική κατάσταση, η υψηλή περιεκτικότητά της σε υγρασία καθώς και η μικρή πυκνοτήτά της συμβάλλουν στο αυξημένο κόστος μεταφοράς και αποθήκευσής της ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.
2. Η δυσκολία στη συλλογή, μεταποίηση, μεταφορά και αποθήκευση της έναντι των ορυκτών καυσίμων.
3. Οι δαπανηρότερες εγκαταστάσεις και εξοπλισμός που απαιτούνται για την αξιοποίηση της βιομάζας σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
4. Η μεγάλη διασπορά και η εποχιακή παραγωγή της βιομάζας δυσκολεύουν την συνεχή τροφοδοσία με πρώτη ύλη των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησής της.
5. Η απαίτηση εδαφικών εκτάσεων για την παραγωγή της.

Μέρος των προβλημάτων που προκύπτουν από τα παραπάνω μειονεκτήματα της βιομάζας αντιμετωπίζονται με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών και μεθόδων συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσής της. Αυτές οι μέθοδοι αναπτύσσονται διαρκώς με βασικό στόχο την επίτευξη δυνατότητας διαρκούς τροφοδοσίας των συστημάτων, την υψηλή θερμογόνο δύναμη και το χαμηλό κόστος. Συγχρόνως, η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας πρέπει να πραγματοποιείται κοντά στον τόπο

παραγωγής της προκειμένου να μειωθεί το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης της, το οποίο εμφανίζεται σχετικά χαμηλό λόγω του χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου της ανά μονάδα όγκου.

Εξαιτίας των παραπάνω μειονεκτημάτων, και για την πλειοψηφία των εφαρμογών της, το κόστος της βιομάζας παραμένει συγκριτικά με το πετρέλαιο υψηλό. Ήδη, όμως, 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 και σημαντικότερο, λόγω της βελτίωσης και ανάπτυξης των τεχνολογιών αξιοποίησης της βιομάζας. Τέλος, πρέπει κάθε φορά να συνυπολογίζεται το περιβαλλοντικό όφελος, το οποίο αν και δεν μπορεί να αποτιμηθεί με οικονομικά μεγέθη, παρόλα αυτά είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα ζωής και το μέλλον της ανθρωπότητας.

## 2.2 Εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας στην Ελλάδα

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνέβαλαν κατά 5,2 % στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας το 2000 και η βιομάζα σε ποσοστό 67 %. Η οικιακή χρήση του ξύλου (μαγειρική, θέρμανση νερού και χώρων) κατείχε το 74 % της συνολικής παραγωγής ενέργειας από βιομάζα. Το υπολειπόμενο 26 % παράγεται από την καύση παραπροϊόντων ξύλου, γεωργικών και βιομηχανικών υπολειμμάτων και από τη χρήση του βιοαερίου που παράγεται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, σε γεωργικές βιομηχανίες και σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας δημοτικών αποβλήτων. Ο πίνακας 2.5 παρουσιάζει τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας για το 2000 (ΚΑΠΕ 2002) [8]. Από συνολική έκταση γης  $13,2 \cdot 10^4 \text{ km}^2$  τα  $9,2 \cdot 10^4 \text{ km}^2$  αφορούν τη γεωργία. Από αυτά,  $5,2 \cdot 10^4 \text{ km}^2$  είναι βοσκοτόπια,  $3,9 \cdot 10^4 \text{ km}^2$  καλλιεργούνται με διάφορα είδη καρπών και περίπου  $0,5 \cdot 10^4 \text{ km}^2$  παραμένουν αδρανή κάθε χρόνο [1].

Η βιομάζα στην Ελλάδα προέρχεται από διάφορες δραστηριότητες, όπως γεωργικές καλλιέργειες, εκμετάλλευση δασών, επεξεργασία γεωργικών προϊόντων, κλπ. Σημαντικές πηγές βιομάζας αποτελούν τα υπολείμματα των γεωργικών καλλιεργειών, τα δασικά υπολείμματα, τα υπολείμματα των γεωργικών βιομηχανιών και τα στερεά αστικά απορρίμματα.

Ενεργειακό ισοζύγιο 2000	%
Ορυκτά καύσιμα	32,11
Υγρά καύσιμα	56,63
Αέρια καύσιμα	6,05
ΑΠΕ	4,14
Ηλεκική ενέργεια	0,35
Αιολική ενέργεια	0,38
Μικρά υδροηλεκτρικά	0,05
Μεγάλα υδροηλεκτρικά	1,08
Βιομάζα (βιομηχανική)	0,86
Βιομάζα (οικιακή)	2,50
Συνολικά	100,00

Πίνακας 2.5: Συμβολή των ΑΠΕ στο Ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο για το 2000 (ΚΑΠΕ 2002)

### 2.2.1 Υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών

Στην Ελλάδα, η συνολική γεωργική γη είναι περίπου  $3,9 \cdot 10^4 \text{ km}^2$ , από τα οποία 60 % καλλιεργούνται με δημητριακά, 25 % με δέντρα και αμπέλια, 3 % κατέχουν τα φυτώρια και 12 % η αδρανής γη.

Για τον υπολογισμό της βιομάζας των υπολειμμάτων γεωργικής προέλευσης ιδιαίτερη σημασία έχει η ποσότητα που μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, η οποία εξαρτάται από το βαθμό διαθεσιμότητας τους. Ο βαθμός διαθεσιμότητας διαφέρει ανάλογα με το είδος της γεωργικής καλλιέργειας, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και παρουσιάζει σημαντική διακύμανση από χρόνο σε χρόνο.

Από τα συνολικά παραγόμενα γεωργικά υπολείμματα στην Ελλάδα, ένα τμήμα τους είναι ήδη εκμεταλλεύσιμο και χρησιμοποιείται σε πλήθος ενεργειακών και μη αγορών. Υπολείμματα δημητριακών χρησιμοποιούνται κυρίως για εκτροφή ζώων. Επιπλέον, στη νότια Ελλάδα λειτουργεί θερμοκήπιο με άχυρο για παραγωγή θερμότητας (250 MWh/έτος). Όσον αφορά στα άχυρα ρυζιού, βαμβακιού και μίσχους ρυζιού, ο βαθμός διαθεσιμότητας τους είναι περίπου 60 % εξαιτίας των δυσκολιών στην καλλιέργεια και τη συγκομιδή τους. Τα υπολείμματα από το κλάδεμα της ελιάς χρησιμοποιούνται για οικιακή θέρμανση και ο βαθμός διαθεσιμότητάς τους είναι 50 %, ενώ αντίστοιχα υπολείμματα από αμπέλια και άλλα είδη δέντρων δεν προτιμούνται για τέτοιου είδους σκοπούς [7].

Ο κύριος όγκος των γεωργικών υπολειμμάτων ενσωματώνεται στο έδαφος ή καίγεται. Παρά τη σημαντική ποσότητα υπολειμμάτων στην Ελλάδα, ορισμένοι παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν την ενεργειακή εκμετάλλευση των υπολειμμάτων.

- Κόστος του υπολείμματος (για παράδειγμα για τα υπολείμματα δημητριακών υπάρχει ήδη ενεργειακή αγορά εφόσον πωλούνται για εκτροφή ζώων).
- Έλλειψη εμπορικά διαθέσιμων μηχανημάτων για τη συγκομιδή ορισμένων τύπων υπολειμμάτων, όπως για παράδειγμα υπολείμματα βαμβακιού.
- Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι λόγω μετακίνησης υπολειμμάτων, όπως διάβρωση και μείωση της γονιμότητας του εδάφους.

Τα γεωργικά υπολείμματα στην Ελλάδα προέρχονται από τις ακόλουθες καλλιέργειες:

- Ετήσιες καλλιέργειες: Χειμερινά σιτηρά, ρύζι, αραβόσιτος, βαμβάκι, καπνός,



ζαχαρότευτλα και ηλίανθος.

- Πολυετείς καλλιέργειες: Αμπέλια, ακτινιδιές, ροδακινιές, αμυγδαλιές, μηλιές, κερασιές, αχλαδιές, πορτοκαλιές, λεμονιές και ελιές.

Η εκτίμηση της συνολικής ποσότητας των υπολειμμάτων αυτών των καλλιεργειών βασίζεται: (1) σε στοιχεία που αφορούν είτε την ποσότητα των παραγομένων προϊόντων κατά καλλιέργεια είτε την καλλιεργούμενη έκταση και (2) σε δείκτες που εκφράζουν είτε τη σχέση καρπού προς υπόλειμμα είτε την ποσότητα υπολείματος ανά στρέμμα.

#### 2.2.1.1 Ετήσιες καλλιέργειες

- Σκληρό σιτάρι

Η παραγωγή του άχυρου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ποικιλία, εφαρμοζόμενη καλλιεργητική τεχνική, εδαφικές-κλιματικές συνθήκες. Από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στη Λάρισα προκύπτει ότι η στρεμματική παραγωγή από την καλλιέργεια σκληρού σιταριού είναι περίπου 255 kg, με μέση περιεκτικότητα σε υγρασία περίπου 15 %. Η περιεκτικότητα του άχυρου σε υγρασία κυμαίνεται από 10- 20 % ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4273 kcal/kg ξηρής ουσίας. Με τις σημερινές συνθήκες αλωνισμού στην Ελλάδα οι μηχανές κόβουν τα στελέχη σε ύψος 25-30 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Για την εκτίμηση της διαθέσιμης ποσότητας άχυρου λοιπόν πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα μέρος παραμένει στο έδαφος και δεν είναι δυνατό να συλλεχθεί.



Εικόνα 2.3: Σιτάρι

Η διαθεσιμότητα του άχυρου για ενεργειακούς σκοπούς εκτός από τον τρόπο συγκομιδής εξαρτάται και από τη ζήτηση που υπάρχει σε κάθε περιοχή για άλλες χρήσεις. Το άχυρο χρησιμοποιείται σαν ζωοτροφή, σαν υπόστρωμα για διάφορες καλλιέργειες (μανιτάρια) και σαν βελτιωτικό εδάφους. Η διαθέσιμη για ενεργειακούς

σκοπούς ποσότητα άχυρου που προέρχεται από το σκληρό σιτάρι εκτιμάται στο 50 % της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου άχυρου.

Η παραγωγή άχυρου, που προέρχεται από την καλλιέργεια του σκληρού σιταριού, συγκεντρώνεται σε σημαντικές ποσότητες στις περιοχές της Μακεδονίας, Θράκης και Θεσσαλίας.

- **Μαλακό σιτάρι**

Η καλλιεργούμενη έκταση με μαλακό σιτάρι έχει μειωθεί σημαντικά μετά την εφαρμογή της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής.

Ο δείκτης συγκομιδής, που εκφράζει % τη σχέση καρπού προς υπέργειο τμήμα σε ξηρή βάση, κυμαίνεται μεταξύ 43 %, και 64 %, σύμφωνα με εργασίες του Ινστιτούτου Σιτηρών Θεσσαλονίκης. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, η σχέση καρπού προς άχυρο για το μαλακό σιτάρι κυμαίνεται μεταξύ 1:1,3 και 1,7:1. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά στοιχεία, η σχέση καρπού προς άχυρο είναι 1:1. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του άχυρου του μαλακού σιταριού κυμαίνεται από 10-20 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.273 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Η ποσότητα άχυρου, που προέρχεται από το μαλακό σιτάρι και μπορεί να αξιοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς εκτιμάται, όπως και στο σκληρό σιτάρι, στο 50 % της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου άχυρου.

Το άχυρο που προέρχεται από την καλλιέργεια του μαλακού σιταριού παράγεται σε μεγάλες ποσότητες στις περιοχές της Μακεδονίας, Θράκης και Θεσσαλίας.

- **Κριθάρι**

Οι καλλιεργούμενες ποικιλίες κριθαριού προορίζονται κυρίως για κτηνοτροφική χρήση. Σύμφωνα με εργασίες του Ινστιτούτου Σιτηρών Θεσσαλονίκης, ο δείκτης συγκομιδής κυμαίνεται μεταξύ 35 % και 55 %, εξαρτώμενος από πολλούς παράγοντες όπως η ποικιλία, εξάστοιχη ή δίστοιχη κ.ά. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, η σχέση καρπού προς άχυρο για το κριθάρι κυμαίνεται μεταξύ 1:1,85 και 1,22:1. Σύμφωνα όμως με βιβλιογραφικά στοιχεία, η σχέση καρπού προς άχυρο είναι 1,24 : 1. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του άχυρου του κριθαριού κυμαίνεται από 10-20 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.180 kcal/kg ξηρής ουσίας.



Η διαθέσιμη ποσότητα για ενεργειακούς σκοπούς, του άχυρου που προέρχεται από την καλλιέργεια του κριθαριού θεωρείται αμελητέα, καθώς το άχυρο χρησιμοποιείται κυρίως σαν ζωοτροφή.

Το άχυρο που προέρχεται από την καλλιέργεια του κριθαριού παράγεται σε μεγάλες ποσότητες κυρίως στη Μακεδονία.



Εικόνα 2.4: Συγκομιδή κριθαριού

- **Βρώμη**

Η περιεκτικότητα σε υγρασία του άχυρου της βρώμης κυμαίνεται μεταξύ 10-20 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4,160 kcal/kg ξηρής ουσίας. Η διαθέσιμη ποσότητα για ενεργειακούς σκοπούς του άχυρου που προέρχεται από την καλλιέργεια της βρώμης θεωρείται αμελητέα, καθώς το άχυρο χρησιμοποιείται στην κτηνοτροφία. Η παραγωγή άχυρου από την καλλιέργεια της βρώμης συγκεντρώνεται κυρίως στην Πελοπόννησο.

- **Ρύζι**

Η καλλιέργεια του ρυζιού συγκεντρώνεται κυρίως στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Μακεδονίας και συγκεκριμένα στο νομό Θεσσαλονίκης (περίπου το 56 % της καλλιεργούμενης έκτασης). Η μέση στρεμματική απόδοση του ρυζιού σε καρπό εκτιμάται σε 810 kg. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά στοιχεία, η σχέση καρπού προς άχυρο είναι 1:1.



Εικόνα 2.5: Ρύζι



Η περιεκτικότητα σε υγρασία του άχυρου κυμαίνεται μεταξύ 20-30 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.000 kcal/kg ξηρής ουσίας. Το άχυρο του ρυζιού δεν αξιοποιείται αλλά καίγεται στους αγρούς. Η διαθεσιμότητα του για ενεργειακούς σκοπούς εκτιμάται σε 60 %.

- **Αραβόσιτος**

Η καλλιέργεια του αραβοσίτου, όπως και των άλλων σιτηρών, έχει περιορισθεί τα τελευταία χρόνια. Η μέση στρεμματική απόδοση του αραβοσίτου σε καρπό εκτιμάται περίπου σε 990 kg. Από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στη Θράκη και στη Λάρισα, προκύπτει ότι η μέση στρεμματική παραγωγή υπολειμμάτων από την καλλιέργεια καλαμποκιού είναι περίπου 1.156 kg με μέση περιεκτικότητα σε υγρασία 15 %.

Τα υπολείμματα (στελέχη, φύλλα) της καλλιέργειας του αραβοσίτου δεν αξιοποιούνται, είναι ανεπιθύμητα και εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές (καύση, τεμαχισμός με ειδικό κόπτη στελεχών, ταφή στο έδαφος), για να γίνει δυνατή η επαναχρησιμοποίηση του χωραφιού. Υπολείμματα από την καλλιέργεια του αραβοσίτου παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης και Κεντρικής Μακεδονίας.

- **Βαμβάκι**

Η καλλιέργεια του βαμβακιού αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η μέση στρεμματική απόδοση σύσπορου βαμβακιού εκτιμάται σε 330 kg. Η σχέση σύσπορου βαμβακιού προς υπόλειμμα αναφέρεται ότι είναι 1:2.



Εικόνα 2.6: Συγκομιδή βαμβακιού

Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια του βαμβακιού θεωρούνται ανεπιθύμητα και δεν αξιοποιούνται μέχρι σήμερα. Τα στελέχη του βαμβακιού, συνήθως, τεμαχίζονται και ενσωματώνονται στο έδαφος. Ο βαθμός διαθεσιμότητας τους για

ενεργειακούς σκοπούς εκτιμάται σε 60 %. Υπολείμματα από την καλλιέργεια βαμβακιού παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, Κεντρικής Μακεδονίας και Στερεάς Ελλάδας.

- **Καπνός**

Η μέση στρεμματική απόδοση του καπνού εκτιμάται σε 185 kg. Η σχέση των φύλλων καπνού προς υπολείμματα (στελέχη, φούντα, άχρηστα φύλλα), σύμφωνα με βιβλιογραφικά στοιχεία είναι 1:1,1. Η περιεκτικότητα σε υγρασία των υπολειμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 80-90 %. Από μετρήσεις, προκύπτει ότι η ανά στρέμμα ξηρή ουσία των υπολειμμάτων ανέρχεται σε 37 kg. Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των υπολειμμάτων ανέρχεται σε 3,840 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια του καπνού δεν αξιοποιούνται, καίγονται στον αγρό ή τεμαχίζονται και θάβονται. Ο βαθμός διαθεσιμότητας των υπολειμμάτων εκτιμάται σε 60 %. Υπολείμματα από την καλλιέργεια του καπνού παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Θεσσαλίας, Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης, Κεντρικής Μακεδονίας και Στερεάς Ελλάδας.

- **Ζαχαρότευτλα**

Τα υπολείμματα που προέρχονται από την καλλιέργεια των ζαχαρότευτλων είτε χρησιμοποιούνται για ζωοτροφή είτε τεμαχίζονται και ενσωματώνονται στο έδαφος [9].



Εικόνα 2.7: Ζαχαρότευτλα

Η αξιοποίηση των υπολειμμάτων για την παραγωγή ενέργειας θεωρείται δύσκολη, κυρίως λόγω του τρόπου συγκομιδής τους αλλά και της υψηλής περιεκτικότητας τους σε υγρασία. Η υγρασία των υπολειμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 75-85 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη ανέρχεται σε 3,477 kcal/kg ξηρής ουσίας.

- **Ηλιάνθος**

Η καλλιέργεια του ηλιάνθου έχει περιορισθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η υγρασία των υπολειμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 35-45 % ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη ανέρχεται σε 3.400 kcal/kg ξηρής ουσίας. Από μετρήσεις, προκύπτει ότι η στρεμματική απόδοση σε υπόλειμμα είναι 417 kg, με περιεκτικότητα σε υγρασία 20 % .



Εικόνα 2.8: Ηλιάνθος

Τα στελέχη του ηλιάνθου τεμαχίζονται και ενσωματώνονται στο έδαφος. Η συλλογή και η χρησιμοποίησή τους για την παραγωγή ενέργειας θεωρείται δύσκολη λόγω του τρόπου συγκομιδής του ηλιόσπορου και της μεγάλης ευθρυπτότητας που παρουσιάζουν τα στελέχη.

- **Αμπέλι**

Η στρεμματική απόδοση σε κλαδοδέματα εξαρτάται από την ποικιλία, επιτραπέζια, οινοποιήσιμη ή σταφίδα. Η σχέση των παραγόμενων σταφυλιών προς το υπόλειμμα (κληματίδες), σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι 1,2:1. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κληματίδων είναι 45 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη ανέρχεται σε 4.522 kcal/kg ξηρής ουσίας. Τα υπολείμματα της καλλιέργειας του αμπελιού, μετά το κλάδεμα κάθε χρόνο, συγκεντρώνονται και απομακρύνονται από το χωράφι ενώ σε κάποιες άλλες περιοχές παραμένουν στο χωράφι, τεμαχίζονται και θάβονται με σκαπτικά μηχανήματα στο έδαφος. Η διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων της καλλιέργειας για ενεργειακούς σκοπούς εκτιμάται στο 80 % της συνολικής παραγόμενης ποσότητας, τόσο για τις κληματίδες όσο και για αυτά που προέρχονται από την αντικατάσταση της καλλιέργειας που πραγματοποιείται κάθε 40 χρόνια [1].

Τα υπολείμματα (κληματίδες) από την καλλιέργεια των αμπελιών σπαντώνται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Πελοποννήσου (νομοί Κορινθίας, Αχαΐας, Μεσσηνίας), Κρήτης (νομός Ηρακλείου), Στερεάς Ελλάδας (νομός Αττικής) και Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (νομός Καβάλας).



Εικόνα 2.9: Αμπελώνας

- **Ροδακινιά**

Η μέση στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε ροδάκινα είναι 2.230 kg. Η στρεμματική απόδοση σε κλαδοδέματα εκτιμάται σε 400 kg, ενώ τα υπολείμματα, που προέρχονται από την αντικατάσταση της καλλιέργειας, εκτιμώνται σε 800 kg/στρέμμα. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κλαδοδεμάτων είναι 40 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.642 kcal/kg ξηρής ουσίας.



Εικόνα 2.10: Ροδακινιά

Τα υπολείμματα που προέρχονται από το κλάδεμα της ροδακινιάς, το οποίο γίνεται κάθε χρόνο, συγκεντρώνονται στην άκρη του οπωρώνα, όπου καίγονται ή σπανιότερα τεμαχίζονται και θάβονται στο έδαφος. Τα δένδρα της ροδακινιάς που εκριζώνονται, όταν αντικαθίσταται η καλλιέργεια κάθε 15 χρόνια περίπου, χρησιμοποιούνται κατά ένα μικρό μέρος σαν καυσόξυλα. Η διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων που προέρχονται από την καλλιέργεια της ροδακινιάς για ενεργειακούς σκοπούς, εκτιμάται σε 80 %, τόσο για τα κλαδοδέματα, όσο και για αυτά που προέρχονται από την αντικατάσταση της καλλιέργειας.



Υπολείμματα από την καλλιέργεια της ροδακινιάς παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Ημαθίας και Πέλλας) και Κεντρικής Ελλάδας (νομός Λάρισας).

- **Ελιά**

Η καλλιέργεια της ελιάς καταλαμβάνει σημαντική έκταση στην Ελλάδα. Η μέση στρεμματική απόδοση της επιτραπέζιας ελιάς ανέρχεται σε 176 kg, ενώ της άσιτοποιήσιμης σε 247 kg. Τα υπολείμματα της καλλιέργειας της ελιάς προέρχονται από το κλάδεμα, ο βαθμός εφαρμογής του οποίου εξαρτάται από την ποικιλία και την περιοχή. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κλαδοδεμάτων είναι 35 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.329 Kcal/kg ξηρής ουσίας.

Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της ελιάς χρησιμοποιούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος σαν καυσόξυλα (μεγάλης διαμέτρου κλαδιά), ενώ τα λεπτότερα κλαδιά συγκεντρώνονται και καίγονται στο χωράφι. Η διαθεσιμότητα των κλαδοδεμάτων για ενεργειακούς σκοπούς εκτιμάται σε 60 %. Μεγάλες ποσότητες κλαδοδεμάτων ελιάς παράγονται στην Πελοπόννησο (νομοί Λακωνίας, Μεσσηνίας, Αργολίδας και Ηλείας), Κρήτη (νομοί Χανίων, Ηρακλείου και Λασιθίου), Στερεά Ελλάδα (νομοί Εύβοιας, Φθιώτιδας και Αττικής), στα νησιά του Αιγαίου (νομοί Λέσβου, Δωδεκανήσου, Σάμου), στα νησιά του Ιονίου (νομοί Κέρκυρας, Λευκάδας, Ζακύνθου), στη Θεσσαλία (νομός Μαγνησίας) και στη Μακεδονία (νομός Χαλκιδικής).



Εικόνα 2.11: Ελιά

- **Ακτινιδιά**

Η ακτινιδιά καλλιεργείται κυρίως στο νομό Πιερίας. Τα υπολείμματα της καλλιέργειας της ακτινιδιάς προέρχονται από το ετήσιο κλάδεμα και από τα φυτά που εκριζώνονται όταν αντικαθίσταται η καλλιέργεια κάθε 20 χρόνια. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των υπολειμμάτων (κληματιδών) είναι 45 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη 4,523 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Τα υπολείμματα συνήθως απομακρύνονται από τον οπωρώνα και καίγονται. Ένα μέρος από τις κληματιδες τεμαχίζονται και θάβονται στο χωράφι ενώ τμήμα των φυτών που εκριζώνονται χρησιμοποιούνται ως καυσόξυλα.

Τα υπολείμματα της ακτινιδιάς παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Κεντρικής Μακεδονίας (νομός Πιερίας και σε μικρό ποσοστό στους νομούς Ημαθίας και Πέλλας ) και Κεντρικής Ελλάδας (νομός Λάρισας).

- **Πορτοκαλιά**

Η μέση στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε πορτοκάλια ανέρχεται σε 2.423 kg. Η στρεμματική απόδοση σε κλαδοδέματα εκτιμάται σε 250 kg. Η σχέση του παραγόμενου καρπού προς τα κλαδοδέματα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι 2,9:1. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κλαδοδεμάτων είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη 4.220 kcal/kg ξηρής ουσίας. Τα υπολείμματα από το κλάδεμα της πορτοκαλιάς απομακρύνονται από τον οπωρώνα και καίγονται. Η διαθεσιμότητα των κλαδοδεμάτων που προέρχονται από την καλλιέργεια της πορτοκαλιάς εκτιμάται σε 80 %. Κλαδοδέματα παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες της Πελοποννήσου, της Κρήτης και της Ηπείρου.



Εικόνα 2.12: Πορτοκαλιά

- **Λεμονιά**

Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κλαδιών λεμονιάς είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.200 kcal/kg ξηρής ουσίας. Η διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων της καλλιέργειας της λεμονιάς εκτιμάται

σε 80 % και παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στην Κρήτη, Πελοπόννησο και Ήπειρο.



Εικόνα 2.13: Λεμονιά

- **Μανταρινιά**

Η μέση στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε μανταρινία ανέρχεται σε 1.606 kg. Η στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε κλαδοδέματα εκτιμάται σε 500 kg. Η σχέση του παραγόμενου καρπού προς τα κλαδοδέματα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι 1,55:1. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κλαδοδεμάτων είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.201 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Η διαθεσιμότητα των υπολείμματων από την καλλιέργεια της μανταρινιάς εκτιμάται σε 80 %. Τα υπολείμματα παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στην Κρήτη, Πελοπόννησο και Ήπειρο.

- **Αμυγδαλιά**

Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της αμυγδαλιάς προέρχονται από το κλάδεμα και την αντικατάσταση της καλλιέργειας που γίνεται κάθε 30 χρόνια. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των κλαδοδεμάτων είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.400 kcal/kg ξηρής ουσίας.



Εικόνα 2.14: Αμυγδαλιά

Σημαντικό μέρος των κλαδοδεμάτων χρησιμοποιείται σαν καυσόξυλα. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της αμυγδαλιάς παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στις περιφέρειες Κεντρικής Ελλάδας (νομοί Λάρισας και Μαγνησίας), Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Σερρών και Καβάλας).

- **Αχλαδιά**

Η μέση στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε αχλάδια είναι 2.460 kg. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της αχλαδιάς προέρχονται από το κλάδεμα και την αντικατάσταση της καλλιέργειας. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία είναι 40 % και ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.299 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Τα υπολείμματα που παράγονται από το κλάδεμα απομακρύνονται από τον οπωράνα και καίγονται. Τα δένδρα της αχλαδιάς που εκριζώνονται κατά την αντικατάσταση της καλλιέργειας κάθε 30 χρόνια περίπου, χρησιμοποιούνται κατά ένα μέρος σαν καυσόξυλα. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της αχλαδιάς παράγονται σε αξιόλογες ποσότητες στις περιφέρειες Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Ημαθίας) και Κεντρικής Ελλάδας (νομοί Λάρισας και Μαγνησίας).

- **Μηλιά**

Η στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε κλαδοδέματα εκτιμάται σε 300 kg, ενώ τα υπολείμματα από την αντικατάσταση της καλλιέργειας ανέρχονται σε 600 kg/στρέμμα. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.251 kcal/kg ξηρής ουσίας. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της μηλιάς παράγονται σε αξιόλογες ποσότητες στις περιφέρειες Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Ημαθίας και Πέλλας) και Κεντρικής Ελλάδας (νομοί Λάρισας και Μαγνησίας).

- **Βερικοκιά**

Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της βερικοκιάς προέρχονται από το κλάδεμα και από την αντικατάσταση της καλλιέργειας. Η στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε κλαδοδέματα εκτιμάται σε 300 kg, ενώ τα υπολείμματα, από την αντικατάσταση της καλλιέργειας που πραγματοποιείται κάθε 30 χρόνια, σε 600 kg/στρέμμα. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος είναι 4.604 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Η διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων από την καλλιέργεια της βερικοκιάς εκτιμάται σε 60 %, όσον αφορά τα κλαδοδέματα και σε 80 %, όσον αφορά στα υπολείμματα που προέρχονται από την αντικατάσταση της καλλιέργειας. Τα υπολείμματα, από την καλλιέργεια της βερικοκιάς, παράγονται σε αξιόλογες ποσότητες στην περιφέρεια της Πελοποννήσου (νομοί Ηλείας και Κορίνθου).

- **Κερασιά**

Η μέση στρεμματική απόδοση της καλλιέργειας σε κεράσια ανέρχεται σε 550 kg. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της κερασιάς προέρχονται από το κλάδεμα και την αντικατάσταση της καλλιέργειας. Η στρεμματική απόδοση σε υπολείμματα της καλλιέργειας εκτιμάται σε 350 kg, όσον αφορά τα κλαδοδέματα, και σε 700 kg, όσον αφορά αυτά που προκύπτουν από την αντικατάσταση της καλλιέργειας, η οποία πραγματοποιείται κάθε 40 χρόνια. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία είναι 40 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.400 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Η διαθεσιμότητα των υπολειμμάτων που προέρχονται από την καλλιέργεια της κερασιάς εκτιμάται σε 60 %, όσον αφορά τα κλαδοδέματα και σε 80 %, όσον αφορά αυτά που προέρχονται από την αντικατάσταση της καλλιέργειας. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια της κερασιάς παράγονται σε αξιόλογες ποσότητες στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Ημαθίας και Πέλλας).

#### **2.2.2 Υπολείμματα γεωργικών βιομηχανιών**

Η εκτίμηση της συνολικής ποσότητας και γεωγραφικής κατανομής των υπολειμμάτων των γεωργικών βιομηχανιών είναι περίπλοκη εξαιτίας των διαφορετικών εφαρμοζόμενων τεχνολογιών, του μεγέθους και των χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων [10]. Επιπλέον, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία για την παραγωγή προϊόντων γεωργικών βιομηχανιών, τα οποία θα διευκόλυναν την εκτίμηση των παραγόμενων υπολειμμάτων. Στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των βιομηχανικών υπολειμμάτων για την Ελλάδα [1].

Υπάρχει μεγάλος αριθμός μικρών βιοτεχνιών και βιομηχανιών, πολλών κατηγοριών, χωροταξικά κατανεμημένων σε όλη την Ελλάδα, των οποίων η παραγωγή προϊόντων, υποπροϊόντων και υπολειμμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί υφίστανται σε κάθε περιοχή και σε κάθε χρόνο λειτουργίας, με συνέπεια να μην είναι σταθερή η παραγωγή των υποπροϊόντων και των υπολειμμάτων. Τα περισσότερα υπολείμματα των βιομηχανιών χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ζωοτροφών και δεν υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους για ενεργειακούς σκοπούς.



Βιομηχανία	Υπόλειμμα	Ανλογία υπόλειμμα/ πρώτον	Παραγωγή (ξηροί τόνοι/ έτος)
Μύλοι ρυζιού	Φλοιός ρυζιού	0,16	30311
Εκκοκκιστήρια βιάβρακος	Υπολείμματα εκκοκκισμού βιάβρακος	0,1	132079
Βιομηχανίες μεταποίησης ροδάκινου	Κουκούτσι	0,04	6400
Πορηνόγειο	Πορηνός κλάος	0,21	423110
Σπαστήρια αμυγδαλιού	Κέλυφος αμυγδαλιού	0,95	119
Σπαστήρια καρυδιών	Κέλυφος καρυδιού	1,5	1328
Σπαστήρια φουντουκιών	Κέλυφος φουντουκιού	1,07	395
<b>Σύνολο</b>			<b>593742</b>

Πίνακας 2.6: Χαρακτηριστικά βιομηχανικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα

#### • Αλευροβιομηχανίες

Οι αλευρόμυλοι επεξεργάζονται κυρίως σιτηρά και τα πίτυρα (παραγόμενα κατά την άλεση) χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σαν υψηλής θρεπτικής αξίας ζωοτροφή και συνεπώς δεν υπάρχει διαθέσιμη ποσότητα για παραγωγή ενέργειας [1].

#### • Μύλοι ρυζιού

Οι μύλοι ρυζιού είναι εγκατεστημένοι κυρίως στο Ν. Θεσσαλονίκης, όπου παράγονται και οι μεγαλύτερες ποσότητες ρυζιού (περίπου το 60 % της συνολικής παραγωγής). Η δυναμικότητα των μονάδων κυμαίνεται μεταξύ 500 και 800 kg/h.

Τα υπολείμματα των μύλων είναι σπασμένο ρύζι, ρυζάλευρο και φλοιός. Η παραγωγή του κύριου προϊόντος (ρύζι), κυμαίνεται μεταξύ 45 και 60 %. Το ρυζάλευρο είναι περίπου 10 % και ο φλοιός 20-25 %. Το υπόλοιπο είναι σπασμένο ρύζι που διατίθεται για παρασκευή ζωοτροφών. Ο φλοιός μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Αξιοποίηση του φλοιού πραγματοποιείται σε μύλους για κάλυψη των αναγκών σε θερμότητα επεξεργασίας. Σε αντίθετη περίπτωση, πετάγεται ή καίγεται.

Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία του φλοιού είναι 10 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 3.855 kcal/kg ξηρής ουσίας.

#### • Εκκοκκιστήρια βαμβακιού

Η καλλιέργεια του βαμβακιού σημείωσε σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα οι ποσότητες σύσπορου βαμβακιού που επεξεργάστηκαν τα εκκοκκιστήρια, να αυξηθούν σημαντικά.

Η επεξεργασία του σύσπορου βαμβακιού στα εκκοκκιστήρια, δίνει κύριο προϊόν το εκκοκκισμένο βαμβάκι και υποπροϊόν το βαμβακόσπορο, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή σπορέλαιου (βαμβακέλαιο) και υψηλής θρεπτικής αξίας ζωοτροφής (βαμβακόπιτα). Το υπόλειμμα, που περιλαμβάνει φύλλα και άχρηστες ίνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς. Σήμερα το υπόλειμμα αξιοποιείται μερικώς, με την παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών των εκκοκκιστηρίων σε θερμότητα. Το παραγόμενο υπόλειμμα που είναι αξιοποιήσιμο για την παραγωγή ενέργειας, ανέρχεται περίπου στο 8-12 % της πρώτης ύλης. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του υπολείμματος κυμαίνεται μεταξύ 15-20 %, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη είναι 4.278 kcal/kg ξηρής ουσίας.

#### • Ξηραντήρια αραβοσίτου

Στην Ελλάδα υπάρχει μεγάλος αριθμός ξηραντηρίων αραβοσίτου, χωροταξικά κατανεμημένων σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους στις περιοχές καλλιέργειας του καλαμποκιού.

Τα υπολείμματα που προέρχονται από τον καθαρισμό του αραβοσίτου αποτελούν μικρό ποσοστό της ποσότητας του αραβοσίτου προς ξήρανση και εκτιμώνται σε 0.5-1 %. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία των υπολειμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 8-10 % και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη εκτιμάται σε 4.400 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Η ποσότητα υπολειμμάτων που παράγεται κατά τον καθαρισμό του αραβοσίτου, πριν από την ξήρανση, είναι πολύ μικρή ανά ξηραντήριο, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αξιοποίησή τους για παραγωγή ενέργειας.

- **Βιομηχανίες μεταποίησης φρούτων**

Οι μονάδες μεταποίησης φρούτων περιλαμβάνουν μονάδες παραγωγής κομποστόν, μαρμελάδων, γλυκών κουταλιού. Οι σημαντικότερες βιομηχανίες κονσερβοποίησης ευρίσκονται κυρίως στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Ημαθίας και Πέλλας). Το σημαντικότερο φρούτο για τη μεταποιητική βιομηχανία είναι το ροδάκινο και ακολουθεί το βερίκοκο, κυρίως για την παραγωγή κομπόστας.

Οι πυρήνες αξιοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και κυρίως για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης σε θερμοκήπια. Η διαθεσιμότητα των πυρήνων για ενεργειακούς σκοπούς προσεγγίζει το 100 %.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλες ποσότητες ροδάκινων και άλλων πυρηνόκαρπων αποσύρονται από την αγορά και θάβονται σε χωματερές. Οι πυρήνες των αποσυρόμενων ροδάκινων θα μπορούσαν επίσης να αξιοποιηθούν για ενεργειακούς σκοπούς.

- **Βιομηχανίες ζάχαρης**

Τα υποπροϊόντα (μελάσσα, πούλπα) που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες από την επεξεργασία των ζαχαρότευτλων στις βιομηχανίες ζάχαρης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζωοτροφών και δεν είναι διαθέσιμα για ενεργειακή αξιοποίηση.

- **Οινοποιία**

Η επεξεργασία των σταφυλιών για παραγωγή διαφόρων τύπων κρασιού πραγματοποιείται κυρίως (50-60 %) σε οργανωμένες οινοποιητικές μονάδες. Μετά την έκθλιψη των σταφυλιών στα οινοποιεία, παράγονται μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων που ανέρχονται στο 20 -30 %, ανάλογα με το βαθμό οινοποίησης της πρώτης ύλης. Το παραγόμενο υπόλειμμα (στέμφυλα) χρησιμοποιείται για παρασκευή ζωοτροφών και σε μικρό ποσοστό για παραγωγή οργανικού λιπάσματος, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις διασκορπίζεται τον επόμενο χρόνο στους αμπελώνες, όπου ενεργεί σαν οργανικό λίπασμα. Οι ποσότητες στέμφυλων που μπορούν να διατεθούν για ενεργειακούς σκοπούς θεωρούνται αμελητέες.

- **Σπορelaiουργεία**

Οι βιομηχανίες και βιοτεχνίες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον κλάδο επεξεργάζονται κυρίως βαμβακόσπορο, ηλιόσπορο και σόγια. Το κύριο προϊόν από την επεξεργασία της πρώτης ύλης στα σπορelaiουργεία είναι ακατέργαστα σπορέλαια (μπρούτο), τα οποία υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία και διατίθενται σαν βρώσιμα σπορέλαια ή για βιομηχανικές χρήσεις. Η ποσότητα των παραγομένων υπολειμμάτων (βαμβακοπλακούντας, ηλιοπλακούντας, κλπ.) εξαρτάται από το είδος της πρώτης ύλης (βαμβακόσπορος, ηλιόσπορος, κλπ). Τα υπολείμματα χρησιμοποιούνται για ζωτοτροφή και δεν είναι διαθέσιμα για ενεργειακούς σκοπούς.

- **Μονάδες επεξεργασίας σταφίδας**

Οι μονάδες καθαρισμού και επεξεργασίας σταφίδας επεξεργάζονται Σουλτανίνα (Κρήτη) και Κορινθιακή σταφίδα (Πελοπόννησο). Η ποσότητα του υπολείμματος είναι πολύ μικρή και χρησιμοποιείται κυρίως για παρασκευή ζωτοτροφών.

- **Μονάδες επεξεργασίας αμυγδάλων**

Οι μονάδες επεξεργασίας αμυγδάλων(σπαστήρια) ευρίσκονται στις περιοχές παραγωγής αμυγδάλων κυρίως στη Θεσσαλία και Μακεδονία. Το υπόλειμμα (κέλυφος) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης σε θερμοκήπια ή κατοικίες, καθώς και σε ασβεστοκάμινους.

- **Ελαιουργεία και πυρηνελαιουργεία**

Το κύριο προϊόν που παράγεται κατά την επεξεργασία της ελιάς είναι το ελαιόλαδο και η απόδοση παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση από χρόνο σε χρόνο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (ποικιλία, αρδευόμενη ή μη καλλιέργεια, εποχή συγκομιδής, κλιματικές συνθήκες κλπ).

Το υποπροϊόν που παράγεται είναι η ελαιοπυρήνα, της οποίας η ποσότητα εξαρτάται από τον τύπο του ελαιουργείου (50-55 % φυγοκεντρικό, 35-40 % κλασικό), από την ποικιλία (Κορωνέικη, Μαστοειδής, Μεγαρίτικη, Αδραμυτινή, κλπ) και από την ποιότητα του καρπού. Η ελαιοπυρήνα που προέρχεται από τα πιεστήρια έχει ποσοστό υγρασίας μεταξύ 28-32 % και ποσοστό λαδιού 7-9 %. Η ελαιοπυρήνα που προέρχεται από φυγοκεντρικά ελαιουργεία έχει ποσοστό

υγρασίας 45-50 % και ποσοστό λαδιού 5-7 %. Η μέση ανώτερη θερμογόνος δύναμη, που εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε λάδι, εκτιμάται σε 5.500 kcal/kg ξηρής ουσίας.

Ένα μέρος της ελαιοπυρήνας χρησιμοποιείται σαν καύσιμη ύλη, κυρίως σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν πυρηνελαιουργεία ενώ η υπόλοιπη ποσότητα περίπου 95 % χρησιμοποιείται για παραγωγή πυρηνελαίων. Για το σκοπό αυτό μεταφέρεται στα πυρηνελαιουργεία, όπου εκχειλίζεται και λαμβάνεται το ακατέργαστο πυρηνέλαιο και το πυρηνόξυλο. Η απόδοση της ελαιοπυρήνας, σε πυρηνέλαιο, είναι περίπου 6-7 % και σε πυρηνόξυλο περίπου 60-65 %, με μέση περιεκτικότητα σε υγρασία 30 %. Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του πυρηνόξυλου εκτιμάται σε 4.600 kcal/kg ουσίας.

### 2.2.3 Βιομάζα δασικής προέλευσης

Η βιομάζα των δασών διακρίνεται σε βιομάζα ξύλου (κυρίως κορμού), φλοιού, κλαδιών, φυλλώματος, πρέμων και ριζών. Περιλαμβάνονται επίσης θάμνοι και άλλη υπόροφη βλάστηση.



Εικόνα 2.15: Κορμοί δένδρων

Τα κυριότερα δασοπονικά είδη που συνθέτουν τα ελληνικά δάση διακρίνονται σε κωνοφόρα της Μεσογειακής ζώνης (χαλέπιος και τραχεία πεύκη), κωνοφόρα της ορεινής ζώνης (κεφαλληνιακή και υβριδογενής ελάτη, μαύρη και δασική πεύκη) και σε πλατύφυλλα είδη (διάφορα είδη δρυός, οξιά, καστανιά). Τα κωνοφόρα δάση παράγουν τη λεγόμενη μαλακή ξυλεία και τα πλατύφυλλα τη λεγόμενη σκληρή ξυλεία.

Κατά τις εργασίες συγκομιδής αποκομίζεται από το δάσος η βιομάζα του ξύλου (κορμός), ο φλοιός και τα κλαδιά. Η βιομάζα των υπολοίπων κατηγοριών παραμένει στο δάσος είτε γιατί απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός για τη



συγκομιδή της είτε γιατί δεν υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία μεταποίησης και αξιοποίησης της.

Γενικά, οι δασικές εργασίες ακολουθούν την εξής σειρά: συλλογή της βιομάζας, μετατόπιση, θρυμματισμός, μεταφορά στο χρήστη. Οι προσπάθειες για μείωση του κόστους παραγωγής της βιομάζας εστιάζεται κυρίως στη μείωση του κόστους αποδάσωσης της μέσω της μηχανοποίησης των δασικών εργασιών.

Το κύριο μειονέκτημα από τη χρήση βιομάζας είναι ο αυξημένος όγκος που καταλαμβάνει το υλικό κατά τη συγκέντρωσή του, γεγονός που αυξάνει κατακόρυφα το κόστος συλλογής και μεταφοράς της.

Με την παραδοχή ότι από τα υπολείμματα αυτά το λεπτό υλικό πρέπει να παραμένει στο δάσος γιατί με την αποσύνθεσή του βελτιώνει ή συντηρεί την παραγωγικότητα του εδάφους, το τεχνικά απολήψιμο δυναμικό βιομάζας συνίσταται στα κλαδιά και στους φλοιούς.

Οι παράγοντες που καθορίζουν το εκάστοτε οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό βιομάζας δασικής προέλευσης διακρίνονται με βάση την εξασφάλιση της πρώτης ύλης (βιομάζας) και με βάση την περαιτέρω μετατροπή - επεξεργασία και ενεργειακή αξιοποίηση αυτής. Όσον αφορά στην εξασφάλιση της πρώτης ύλης (βιομάζας), οι παράγοντες που επηρεάζουν είναι οι εξής:

- Η αποδοτικότητα των τεχνολογιών συγκομιδής και χειρισμού βιομάζας, ιδίως στις μεγάλες κλίσεις που επικρατούν στις δασικές εκτάσεις.
- Οι μέθοδοι εκμετάλλευσης του δάσους.
- Η ύπαρξη εργατικού δυναμικού και η εμπειρία του.
- Το ανάγλυφο του εδάφους (βαθμός προσπέλασης).
- Η κατάσταση του δασικού οδικού δικτύου.
- Η εποχή συγκομιδής.
- Οι κλιματολογικές συνθήκες, κυρίως στις ορεινές περιοχές κατά τους χειμερινούς μήνες.

Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό βιομάζας καθορίζεται και από τους παρακάτω παράγοντες:

- Την τιμή της βιομάζας στην πιο εύχρηστη μορφή της, θρυμματισμένο ξύλο – woodchips (εικόνα 2.16), σε σχέση με την τιμή των άλλων συμβατικών καυσίμων και το σχετικό κόστος μετατροπής αυτών σε θερμότητα ή αλλιώς

την τιμή της παραγόμενης μονάδας ενέργειας από βιομάζα σε σχέση με την τιμή παραγόμενης μονάδας ενέργειας από συμβατικά καύσιμα.

- Την απόσταση του τόπου παραγωγής της βιομάζας από τον τόπο κατανάλωσής της.



Εικόνα 2.16: Θρυμματισμένο ξύλο (Woodchips)

#### 2.2.4 Ενεργειακές καλλιέργειες

Στην Ελλάδα, εξαιτίας των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών ευδοκούν πολλές καλλιέργειες κατάλληλες για ενεργειακή χρήση. Παρόλα αυτά, ο ελλιπής τεχνικός εξοπλισμός και το υψηλό κόστος καθιστούν τις καλλιέργειες αυτές μη εμπορικά εκμεταλλεύσιμες. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας περισσότερα από 60 πειράματα έχουν διεξαχθεί σε ολόκληρη την Ελλάδα με σκοπό να εκτιμηθεί η απόδοση των ενεργειακών καλλιεργειών. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

##### *Διασπόμενες ενεργειακές καλλιέργειες*

- Δύο είδη ευκαλύπτων (*Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh)
- Ψευδακακία (*Robinia pseudoacacia*)

##### *Πολυετείς γεωργικές ενεργειακές καλλιέργειες*

- Καλάμι (*Arundo donax* L.)
- Αγριαγκινάρα (*Cynara cardunculus* L.)
- Μίσχανθος (*Miscanthus x giganteus* GREEF et DEU)
- Switchgrass (*Panicum virgatum* L.)

##### *Ετήσιες γεωργικές ενεργειακές καλλιέργειες*

- Γλυκό και κυτταρινούχο σόργο (*Sorghum bicolor* L.)

- Κέναφ (*Hibiscus cannabinus* L.)

- **Ευκάλυπτος**

Οι φυτείες ευκαλύπτων χαρακτηρίζονται από γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης μετά τη συγκομιδή. Τα δύο σημαντικότερα είδη ευκαλύπτων για τις μεσογειακές χώρες είναι οι *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh και *Eucalyptus globulus* Labill. Στην Ελλάδα το καταλληλότερο είδος ευκαλύπτου που πληρεί τις προδιαγραφές των ενεργειακών καλλιέργειών είναι ο *Eucalyptus camaldulensis*, εφόσον παρουσιάζει: α) μεγαλύτερη ικανότητα προσαρμογής στο μικροπεριβάλλον, σε σχέση με άλλα είδη ευκαλύπτου β) εύκολη πρεμνοβλάστηση μετά από κοπή γ) μεγάλη παραγωγικότητα σε βιομάζα.

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά κάνουν τον ευκάλυπτο μια πολύ καλή ενεργειακή καλλιέργεια, καλά προσαρμοσμένη στις κλιματικές συνθήκες της νότιας Ευρώπης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και σαν πρώτη ύλη για παραγωγή χαρτοπολτού. [11-14].



Εικόνα 2.17: Ευκάλυπτος

- **Ψευδακακία**

Η ψευδακακία είναι πολυετές φυτό, δενδρώδες, που χαρακτηρίζεται από ταχύτερη ανάπτυξη του υπέργειου μέρους και εξαιρετική αναβλάστηση μετά την κοπή. Η ψευδακακία εξαιτίας του ταχύτατου ρυθμού ανάπτυξης, της υψηλής πυκνότητας του ξύλου και της χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, σε σχέση με τα άλλα είδη, θεωρείται πολύ παραγωγικό φυτό σε βιομάζα. Το ενεργειακό δυναμικό της ψευδακακίας είναι τυπικό των πλατύφυλλων φυτών της εύκρατης ζώνης και κυμαίνεται για το ξύλο της περίπου στα 19,44 MJ/kg.

ψευδακακίας είναι τυπικό των πλατύφυλλων φυτών της εύκρατης ζώνης και κυμαίνεται για το ξύλο της περίπου στα 19,44 MJ/kg.

Στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκαν πειράματα των οποίων το αντικείμενο μελέτης ήταν η προσαρμοστικότητα και παραγωγικότητα του φυτού σε διάφορες κλιματικές και εδαφικές συνθήκες. Από πειραματικές μετρήσεις του ΚΑΠΕ, ελήφθησαν αποδόσεις ξηρής ουσίας κατά τον πρώτο χρόνο 0,5 έως 0,8 τόνοι /στρέμμα /έτος σε άγονο και γόνιμο έδαφος αντίστοιχα. Στον δεύτερο χρόνο, οι αποδόσεις αυξήθηκαν για το γόνιμο έδαφος και μειώθηκαν στο άγονο. Κατά τη διάρκεια του τρίτου έτους, ο μέσος όρος των αποδόσεων στο γόνιμο έδαφος έφτασε τους 1,7 τόνους ξηρής ουσίας /στρέμμα /έτος.

- **Καλάμι**

Το καλάμι είναι ένα πολυετές φυτό που συναντάται σε αγρούς με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και μπορεί να καλλιεργηθεί σε ευρεία κλίμακα εδαφικών και κλιματικών συνθηκών. Οι οικονομικές απαιτήσεις της καλλιέργειας ετησίως, εξαιρώντας το κόστος εγκατάστασης, είναι πολύ χαμηλές. Επίσης, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς του σε κυτταρίνη και ημικυτταρίνη θεωρείται καλή πρώτη ύλη για παραγωγή χαρτοπολτού. Επιπλέον, το καλάμι είναι μια καλλιέργεια φιλική προς το περιβάλλον και η θερμογόνοσ του δύναμη έχει προσδιοριστεί σε 3.600 kcal/kg.

Σε πρόσφατες μελέτες στην Ελλάδα έχει επιβεβαιωθεί η ικανότητα του φυτού να παράγει αξιόλογες ποσότητες βιομάζας. Οι αποδόσεις που καταγράφηκαν κυμάνθηκαν από 0,5 έως 3 τόνους ανά στρέμμα σε ξηρή ουσία. Γενικά, δεν έχει αξιοποιηθεί μέχρι σήμερα ευρέως σε εμπορική κλίμακα.[15], [16], [17].

- **Αγριαγκινάρα**

Η αγριαγκινάρα είναι ένα πολυετές είδος αγκαθιού που καλλιεργείται παραδοσιακά σε κάποιες περιοχές της μεσογειακής λεκάνης. Όπως όλα τα είδη αγκαθιών, είναι πολύ καλά προσαρμοσμένη στο ξηρό κλίμα των μεσογειακών χωρών και εφόσον πρόκειται για χειμερινό φυτό, αποδίδει μέγιστα και χωρίς άρδευση [18].

Από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ισπανία, αποδεικνύεται ότι η αγριαγκινάρα είναι ένα φυτό με πολύ καλή προσαρμοστικότητα και μεγάλες αποδόσεις. Το τελικό ύψος του φυτού στην Ελλάδα έφτασε τα 2,6 m. Η παραγωγή ξηράς ουσίας, ανάλογα με την



νό σε αντίστοιχα πειράματα στην Ισπανία οι αποδόσεις κυμάνθηκαν από 0,4-1,5 τόνους/ στρέμμα.

Η θερμογόνος δύναμη για τα διάφορα μέρη του φυτού της αγριαγκινάρας κυμαίνεται από 3.474 kcal/kg για τα φύλλα και τα βράκτια φύλλα έως 5.912 kcal/kg για τους σπόρους. Αυτό συμβαίνει λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των σπόρων σε έλαια. Σημαντικές διαφορές στη θερμογόνο δύναμη παρουσιάζονται ανάμεσα στα διάφορα μέρη του φυτού. Τα φύλλα, τα οποία έχουν μικρή θερμογόνο δύναμη, παρουσιάζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε στάχτη περίπου 14 %. Στα υπόλοιπα φυτικά μέρη, το ποσοστό της στάχτης κυμαίνεται από 3,32 % ως 5,36 %.



Εικόνα 2.18: Αγριαγκινάρα

- Μίσχανθος

Ο μίσχανθος είναι μια πολυετής καλλιέργεια, τροπικής προέλευσης, που καλλιεργούνταν στην Ευρώπη σαν καλλωπιστικό φυτό. Ειδικότερα στην Ελλάδα, παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμοστικότητα σε αρδευόμενες περιοχές, έχει καλές αποδόσεις και η περιεκτικότητά του σε υγρασία είναι σχετικά χαμηλή. Από τα μέχρι τώρα δεδομένα, προέκυψε ότι το ύψος της φυτείας στην Ελλάδα μπορεί να φτάσει τα 3 μέτρα και η παραγωγή ξηρής ουσίας κυμαίνεται από 0,8 έως 3 τόνους/ στρέμμα/ έτος [15], [19].

Σύμφωνα με αναλύσεις δειγμάτων μίσχανθου, τα στελέχη έχουν πολύ μεγάλη θερμιδική αξία (μέση τιμή 4.360 kcal/kg ξηρού βάρους), παρόμοια με αυτή του ξύλου (4.700 kcal/kg ξηρού βάρους). Η περιεκτικότητά σε στάχτη των στελεχών



(μέση τιμή 1,64 % επί του ξηρού βάρους) είναι σχετικά χαμηλή, αυξάνοντας τη θερμιδική τους αξία. Τα φύλλα είναι κατώτερης ποιότητας καύσιμο (4.056 kcal/kg ξηρού βάρους), λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας τους σε στάχτη (μέση τιμή 7,66 % επί του ξηρού βάρους). Τα τελευταία χρόνια, εξετάζεται η πιθανότητα χρησιμοποίησής του σαν ενεργειακή καλλιέργεια, αλλά και για κατασκευή δομικών υλικών.



Εικόνα 2.19: Μίσχανθος

- Switchgrass

Πρόκειται για ένα πολυετές, θερμού κλίματος φυτό με υψηλές αποδόσεις ακόμα και σε φτωχής ποιότητας εδάφη. Η καλλιέργεια του switchgrass παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμα και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (λίπανση, ζιζανιοκτονία).



Εικόνα 2.20: Switchgrass

Οι αρδευτικές του ανάγκες είναι χαμηλές αφού χαρακτηρίζεται από αποδοτική χρήση του νερού [20], [21]. Σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί στην Ελλάδα, η

απόδοση επί ξηρής μάζας κυμαίνεται μεταξύ 14-25 τόνους /στρέμμα, ανάλογα με την ποικιλία και τις μεθόδους καλλιέργειας.

- **Γλυκό σόργο**

Το γλυκό σόργο είναι μονοετές φυτό, με μεγάλη φωτοσυνθετική ικανότητα, με υψηλές αποδόσεις σε βιομάζα, υψηλό ποσοστό σε διαλυτά σάκχαρα και κυτταρίνη και μικρές απαιτήσεις σε άρδευση και λίπανση. Προσαρμόζεται εύκολα σε διάφορα είδη εδαφών και σε ποικίλες κλιματικές συνθήκες. Το γλυκό σόργο μπορεί να καλλιεργηθεί από τις βορειότερες ως τις νοτιότερες περιοχές της Ελλάδας σε εύφορα αλλά και υποβαθμισμένα εδάφη. Η άρδευση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, ενώ η αζωτούχος λίπανση δεν επηρεάζει σημαντικά τις αποδόσεις. Μετά την επεξεργασία της πρώτης ύλης μένουν μεγάλες ποσότητες υπολείμματος (bagasse), υψηλής θερμογόνου δύναμης, οι οποίες μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες τόσο της παραγωγής όσο και της μετατροπής του σόργου σε αλκοόλη [22], [23].



Εικόνα 2.21: Γλυκό σόργο

- **Κυτταρινούχο σόργο**

Το κυτταρινούχο σόργο είναι ετήσιο φυτό με μεγάλες δυνατότητες για ενεργειακή χρήση. Αντίθετα με το γλυκό, έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά σάκχαρα και το ενεργειακό δυναμικό του βασίζεται κυρίως στην υψηλή περιεκτικότητά του σε λιγνίνη και κυτταρίνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι το

κυτταρινούχο σόργο παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στο πλάγιασμα, φαινόμενο το οποίο επιφέρει σημαντικά προβλήματα στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου.



Εικόνα 2.22: Κυτταρινούχο σόργο

- **Κέναφ**

Είναι ετήσιο φυτό με κυτταρίνες υψηλής ποιότητας. Αποτελούνται από ένα κεντρικό δακτύλιο με ίνες μικρού μήκους και το φλοιό με ίνες μεγάλου μήκους. Από τις τελευταίες, μπορεί να παραχθεί χαρτί ανώτερης ποιότητας.



Εικόνα 2.23: Κέναφ

Είναι φυτό τροπικών κλιμάτων και προσαρμόζεται σε μεγάλο εύρος εδαφικών και κλιματικών συνθηκών. Στην Ελλάδα το κέναφ (kenaf) μελετάται σε μικρούς αγρούς έως 3 στρέμματα σε διάφορες περιοχές. Οι αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα κυμαίνονται από 0,7-2,4 τόνοι/ στρέμμα. [24], [25], [26]. Οι πιθανές χρήσεις του φυτού αφορούν στην παραγωγή ενέργειας και βιομηχανικών προϊόντων όπως χαρτοπολτού, δομικών υλικών, κ.α.

### 2.2.5 Δημοτικά στερεά απορρίμματα

Τα στερεά δημοτικά απόβλητα αποτελούν παραπροϊόντα κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας και είναι ετερογενή ως προς τη σύνθεση σε σύγκριση με αντίστοιχα στερεά απόβλητα από βιομηχανικές ή αγροτικές δραστηριότητες. Τα απορρίμματα στην Ελλάδα διαχειρίζονται από τους Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) με σκοπό τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος καθώς και την προστασία της δημόσιας υγείας. Στην Ελλάδα δεν αξιοποιούνται ενεργειακά τέτοιου είδους απορρίμματα.



Εικόνα 2.24: Δημοτικά στερεά απορρίμματα

### 2.2.6 Ζωικά υπολείμματα

Η χρήση των ζωικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα δεν είναι αναπτυγμένη. Η ενέργεια προέρχεται από τα ζωικά υπολείμματα εφόσον αυτά συλλέγονται σε δεξαμενές και υφίστανται αναερόβια διεργασία. Σύμφωνα με την απογραφή της Αγροτικής Τράπεζας της Ελλάδος (31-12-1995) [27] από τις 803 μονάδες ζωικών υπολειμμάτων στην Ελλάδα, 355 αφορούν υπολείμματα βοοειδών (Βόρεια Ελλάδα), 277 υπολείμματα χοίρων και 171 υπολείμματα πουλερικών (Αττική, Ιωάννινα, Εύβοια).

### 3. ΥΔΡΟΓΟΝΟ

#### 3.1 Εισαγωγή

Το υδρογόνο αποτελεί ελκυστική πηγή ενέργειας για την αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων από περιβαλλοντολογικής και οικονομικής άποψης. Θεωρείται αδιάκοπη πηγή παροχής καθαρής ενέργειας και κατά τη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο δεν παράγονται μολυντές ενώ παράγεται νερό το οποίο ανακυκλώνεται για την παραγωγή περαιτέρω υδρογόνου. Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών στη χημική βιομηχανία. Χρησιμοποιείται σαν αντιδρών στη διαδικασία υδρογόνωσης για να παραχθούν συστατικά μικρότερου μοριακού βάρους. Χρησιμοποιείται επίσης, για τη διάσπαση των υδρογονανθράκων ή την απομάκρυνση θειούχων και αζωτούχων συστατικών καθώς και του οξυγόνου για την αποφυγή διαβρώσεων λόγω οξειδωσης.

Η μελλοντική πιο διαδεδομένη χρήση του υδρογόνου αφορά στον τομέα των μεταφορών, συμβάλλοντας στη μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Τα οχήματα εφοδιάζονται με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου οι οποίες είναι τρεις φορές πιο αποδοτικές από τις συμβατικές μηχανές. Όλες οι παραπάνω εφαρμογές του υδρογόνου ισοδυναμούν με το 3 % της κατανάλωσης ενέργειας και αναμένεται το παραπάνω ποσοστό να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια.

Το εμπορικά χρησιμοποιούμενο υδρογόνο προέρχεται κυρίως από το φυσικό αέριο ( $C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n+m/2)H_2$ , 850 °C, 2,5 MPa). Περίπου 90 % του υδρογόνου παράγεται κατά την αναμόρφωση με ατμό της νάφθας ή του φυσικού αερίου. Η αεριοποίηση του άνθρακα και η ηλεκτρόλυση του νερού αποτελούν βιομηχανικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου. Παρόλα αυτά, οι παραπάνω διαδικασίες απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας και δεν είναι πάντα φιλικές προς το περιβάλλον. Επιπλέον, τα αποθέματα συμβατικών καυσίμων (κυρίως πετρελαίου) εξαντλούνται οπότε η παραγωγή του υδρογόνου με τη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας θεωρείται αναγκαία.

#### 3.2 Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα

Οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα είναι οι εξής [28]:

1. Αεριοποίηση της βιομάζας (Thermochemical gasification)
2. Ταχεία πυρόλυση (Fast pyrolysis)
3. Αεριοποίηση με χρήση ηλιακής ενέργειας (Direct solar gasification)



4. Σύγχρονες διαδικασίες αεριοποίησης (Novel gasification processes)
5. Μετατροπή αερίου σύνθεσης προερχόμενο από βιομάζα (Biomass-derived syn-gas conversion)
6. Μετατροπή βιομάζας σε υπερκρίσιμες συνθήκες (Supercritical conversion of biomass)
7. Μετατροπή βιομάζας με χρήση μικροοργανισμών (Microbial conversion of biomass)

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι προτιμώμενοι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου για ορισμένα είδη βιομάζας. Οι παραπάνω μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου αναλύονται παρακάτω.

<b>Βιομάζα</b>	<b>Κύρια τεχνολογία μετατροπής</b>
Κέλυφος αμυγδάλου	Αεριοποίηση με ατμό
Πριονίδια πεύκου	Αναμόρφωση με ατμό
Τεμαχισμένο καουτσούκ	Μετατροπή σε υπερκρίσιμες συνθήκες
Άχρоруζου	Πυρόλυση
Άχρоруτηρών	Πυρόλυση
Φέκια	Αεριοποίηση
Υπολείμματα τσαγιού	Πυρόλυση
Κέλυφος φισικιών	Πυρόλυση
Πριονίδια από σφενάμη	Μετατροπή σε υπερκρίσιμες συνθήκες
Δημοσιικά στερεά απορρίμματα	Μετατροπή σε υπερκρίσιμες συνθήκες
Υπολείμματα χυρτιού	Μετατροπή με μικροοργανισμούς

Πίνακας 3.1: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου και είδη βιομάζας

#### 1. Αεριοποίηση της βιομάζας (Thermochemical gasification)

Η αεριοποίηση βιομάζας αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα (σχήμα 3.1). Οι τεχνολογίες αεριοποίησης θερμικής και μερικής οξειδωσης βρίσκονται υπό εξέλιξη. Ως τροφοδοτούμενη βιομάζα χρησιμοποιούνται γεωργικά και δασικά υπολείμματα (μαλακής και σκληρής ξυλείας) και υπόροφη βλάστηση. Η θερμική αεριοποίηση είναι στην ουσία υψηλού ρυθμού πυρόλυση που διεξάγεται σε θερμοκρασιακό εύρος 600-1000 °C σε αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης. Οι αντιδράσεις είναι οι ακόλουθες:

Βιομάζα+O<sub>2</sub>→CO+H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>+ενέργεια

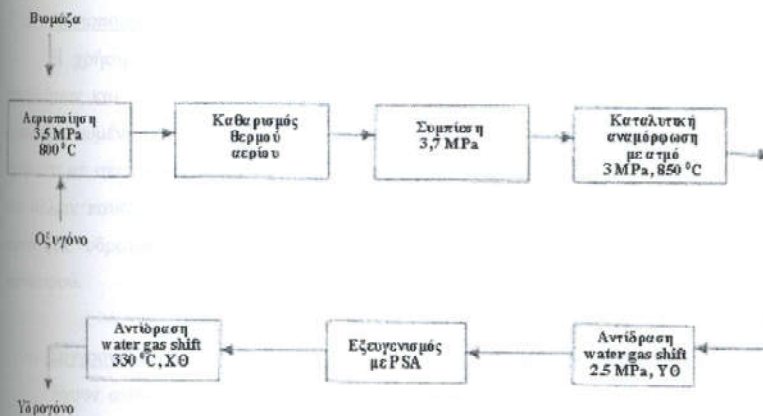
CO+H<sub>2</sub>O → CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> (shift reaction)

Η αντίδραση με οξυγόνο-αέρα και/ ή ατμό αποδίδει μείγμα αερίων 20 %H<sub>2</sub>, 20 % CO, 10 %CO<sub>2</sub>, 5 % CH<sub>4</sub> και 45 %N<sub>2</sub>. Η χρήση καθαρού οξυγόνου ή ατμού περιορίζει το ποσοστό αζώτου. Η μετατροπή του μείγματος αερίου σε αέριο πλούσιο σε υδρογόνο ονομάζεται, ανάλογα με την τροφοδοσία, αεριοποίηση (για στερεά) ή αναμόρφωση (αέριο). Οι ενδόθερμες αντιδράσεις των υδρογονανθράκων με ατμό αποδίδουν αέριο σύνθεσης με υψηλό περιεχόμενο σε υδρογόνο ενώ η shift reaction μεταβάλλει τη μοριακή αναλογία CO/H<sub>2</sub>. Το οργανικό περιεχόμενο της βιομάζας διασπάται μέσω θερμότητας σε εξανθράκωμα και αέρια, διαδικασία γνωστή ως θερμική διάσπαση ή πυρόλυση. Η παρουσία του οξυγόνου στον αντιδραστήρα οδηγεί σε μερική οξείδωση των ενδιάμεσων προϊόντων.

Από μελέτη για αεριοποίηση κελυφών αμυγδάλου με ατμό σε ρευστοποιημένη κλίση προκύπτει ότι για θερμοκρασιακό εύρος 500-800 °C, μικρότερου μεγέθους σωματίδια αποδίδουν περισσότερο υδρογόνο απ' ότι σε υψηλές θερμοκρασίες. Η απόδοση σε υδρογόνο αυξάνεται με τη χρήση καταλύτη (νικέλιο, δολομίτης) και είναι περίπου 60 %κ.ό. για υψηλές θερμοκρασίες.

Πλήθος αναφορών είναι διαθέσιμες για την παραγωγή υδρογόνου από αεριοποίηση δημοτικών αποβλήτων. Κύριο σημείο αναφοράς σε όλες τις αναφορές αποτελεί η προ-επεξεργασία των δημοτικών αποβλήτων ώστε να σχηματιστεί μείγμα κατάλληλου ιξώδους και θερμογόνου δύναμης για αποτελεσματική παραγωγή υδρογόνου. Η επεξεργασία των αποβλήτων, η επίδραση του ιξώδους, το στερεό περιεχόμενο του μείγματος για συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών εξετάζονται.

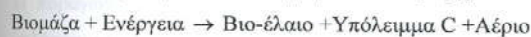
Η αεριοποίηση με ατμό μελετάται εκτενώς [29]. 55 % της απόδοσης του υδρογόνου αναφέρεται με τη χρήση δεύτερου αναμορφωτήρα με ατμό [30].



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα. ΧΘ: Χαμηλή θερμοκρασία, ΥΘ: Υψηλή θερμοκρασία, PSA: Pressure swing adsorption

## 2. Ταχεία πυρόλυση (Fast pyrolysis)

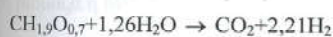
Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης παράγεται υγρό προϊόν (βιο-έλαιο) που αποτελεί βάση πολλών τεχνολογιών για την ανάπτυξη της χημείας των καυσίμων και των υλικών. Η αντίδραση είναι ενδόθερμη και είναι η εξής:



Η καταλυτική αναμόρφωση με ατμό του βιο-ελαίου στους 750-850 °C με καταλύτη Ni είναι διαδικασία δύο σταδίων και είναι η εξής:



Η συνολική στοιχειομετρία δίνει μέγιστη απόδοση για 0,172 gr H<sub>2</sub>/gr βιο-ελαίου (11,2 % βασισμένο στο ξύλο).



Το πρώτο στάδιο κατά την πυρόλυση είναι η χρήση θερμότητας για τη διάσπαση περίπλοκων μορίων σε απλούστερα.. Στη συνέχεια, τα ενεργά αέρια που απελευθερώνονται κατά το πρώτο στάδιο μετατρέπονται σε υδρογόνο.

Οι Caglar και Demirdas [31] εφάρμοσαν την πυρόλυση των υπολειμμάτων τσαγιού για την παραγωγή υδρογόνου ενώ οι Abedy et al [32] μελέτησαν την παραγωγή υδρογόνου από τα κελύφη φιστικιών.

### 3. Αεριοποίηση με χρήση ηλιακής ενέργειας (Direct solar falsifications)

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την αεριοποίηση οργανικών στερεών αποβλήτων και για την παραγωγή υδρογόνου έχει μελετηθεί εδώ και χρόνια. Μια εμπειριστατωμένη μελέτη της τεχνολογίας περιγράφει την ηλιακή αεριοποίηση υλικών άνθρακα με σκοπό την παραγωγή αερίου σύνθεσης και στη συνέχεια του υδρογόνου και άλλων καυσίμων [33]. Η μελέτη των Shahbazon και Usupon απέδωσε υψηλή ποσότητα υδρογόνου από γεωργικά απόβλητα με τη χρήση παραβολοειδούς κατόπτρου.

### 4. Σύγχρονες διαδικασίες αεριοποίησης (Novel gasification processes)

Έχουν αναπτυχθεί πολλές σύγχρονες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από οργανική βιομάζα. Το 1980, δύο πρωτοποριακές μέθοδοι για παραγωγή υδρογόνου από υλικά άνθρακα παρουσιάστηκαν. Ο Thakur [34] πειραματίστηκε στην παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση μείγματος άνθρακα, ασβέστη και νερού. Πλήθος θερμοχημικών εξισώσεων έχουν εφαρμοστεί για την διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας [35].

### 5. Μετατροπή αερίου σύνθεσης προεργόμενο από βιομάζα (Biomass-derived syn-gas conversion)

Η παραγωγή υδρογόνου από αεριοποιούμενη βιομάζα μέσω αντιδραστήρα ατμού σιδήρου αποτελεί απλή τεχνολογία για την αποθήκευση της ενέργειας του αερίου σύνθεσης. Πλήθος πρόσφατων μελετών εξέτασε τη διαδικασία ατμού σιδήρου για την αναβάθμιση του αερίου σύνθεσης σε καθαρό υδρογόνο για τη χρήση του σε κίττιρα καυσίμου και άλλες ενεργειακές συσκευές. Η μελέτη των Friedrich et al [36] εξετάζει την περίπτωση χρήσης της δασικής βιομάζας και των εμπορικά διαθέσιμων υλικών σιδήρου. Η μέθοδος περιλαμβάνει δύο στάδια: (1) καθαρισμό του αερίου από στερεή βιομάζα ή άνθρακα και (2) αποθήκευση σε υλικά σιδήρου (sponge iron).

### 6. Μετατροπή βιομάζας σε υπερκρίσιμες συνθήκες (Supercritical conversion of biomass)

Η παραγωγή υδρογόνου με τη μετατροπή της βιομάζας σε υπερκρίσιμες συνθήκες παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον για τους ερευνητές. Η πιο πρόσφατη αναφορά προέρχεται από τον Modell [37], ο οποίος μελέτησε την επίδραση της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης της γλυκόζης και του πριονιδιού από σφεντάμι στο

νερό, σε ιξώδες στην κρίσιμη κατάσταση (374 °C, 22 MPa). Στερεά υπολείμματα ή υπολείμματα άνθρακα δεν εμφανίζονται και το παραγόμενο ποσοστό υδρογόνου είναι 18 %.

### 7. Μετατροπή βιομάζας με χρήση μικροοργανισμών (Microbial conversion of biomass)

Νερό με υψηλό περιεχόμενο σε οργανικά απόβλητα αποτελεί άφθονη πηγή βιομάζας για τη μετατροπή της σε υδρογόνο με μικροοργανισμούς. Μια καινούρια μέθοδος έχει αναπτυχθεί για τη ζύμωση υποστρώματος υδρογονανθράκων από ομάδα βακτηριδίων και για παραγωγή υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Τα δημοτικά στερεά απόβλητα και τα υγρά λύματα έχουν τη δυνατότητα παραγωγής υψηλών ποσοτήτων υδρογόνου αφού περιορίζεται η παραγωγή μεθανίου με την εισαγωγή ρεύματος χαμηλής τάσης [38].

### 3.3 Συγκριτική μελέτη

Σε όλες τις τεχνολογίες αεριοποίησης επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας σε αέριο χαμηλής ή μέσης θερμογόνου δύναμης. Η αεριοποίηση βιομάζας με αέρα καταλήγει σε παραγόμενο αέριο με θερμογόνο δύναμη 5 MJ/m<sup>3</sup> ενώ η αεριοποίηση με οξυγόνο σε 15 MJ/m<sup>3</sup>. Παρόλα αυτά, οι παραπάνω διαδικασίες απαιτούν υψηλή θερμοκρασία και ατομάκρυνση της πύσσας.

Το υπόλειμμα άνθρακα και η τέφρα προκύπτουν κατά την πυρόλυση και δεν εξατμίζονται. Μέρος του άκαυστου υπολείμματος άνθρακα μπορεί να καεί εντός του αντιδραστήρα και να απελευθερώσει την απαιτούμενη θερμότητα των ενδόθερμων αντιδράσεων πυρόλυσης. Το κυριότερο προϊόν της πυρόλυσης θεωρείται το βιοέλαιο, το οποίο αποτελεί βάση σε πλήθος διαδικασιών για την ανάπτυξη των καυσίμων. Η πιθανότητα απενεργοποίησης του καταλύτη αποτελεί μειονέκτημα της μεθόδου.

Όσον αφορά στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την αεριοποίηση της βιομάζας απαιτούνται ηλιακοί συλλέκτες υψηλής αποδοτικότητας σε υδρογόνο.

Κατά τη μετατροπή της βιομάζας σε υπερκρίσιμες συνθήκες, δεν εμφανίζεται παραγωγή στερεών υπολειμμάτων ή υπολείμματος άνθρακα. Η μέθοδος εφαρμόζεται για την αεριοποίηση διαφόρων ειδών βιομάζας.



Κατά την μετατροπή της βιομάζας παρουσία μικροοργανισμών για τη δημιουργία υποστρώματος χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά αιοβλήτων, τα οποία επεξεργάζονται ταυτόχρονα με την παραγωγή υδρογόνου. Η επιλογή των κατάλληλων μικροοργανισμών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση της μεθόδου.

#### **3.4. Εξευγενισμός του υδρογόνου**

Το υδρογόνο που παράγεται από τη βιομάζα, σε όλες τις παραπάνω διεργασίες, παράγει κυρίως αέριες ακαθαρσίες όπως  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  και ορισμένο ποσό υγρασίας. Μερικές φορές, η παρουσία αυτών των αερίων μειώνει τη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου και δημιουργεί προβλήματα στην αποδοτική καύση των κυψίλων. Το  $CO_2$  συμπεριφέρεται σαν κατασταλτικό της καύσης, διαλύεται ελαφρώς στο νερό και απομακρύνεται με συσκευές καθαρισμού αερίων (scrubber). Διάλυμα με περιεκτικότητα 55 % κ.β σε  $KOH$  απορροφά αποτελεσματικά το  $CO_2$ . Η παρουσία του  $O_2$ , του οποίου η διαλυτότητα είναι μικρότερη από εκείνη του  $CO_2$ , στο αέριο μείγμα αποτελεί κίνδυνο πρόκλησης φωτιάς. Η παρουσία υγρασίας στο αέριο μείγμα αποτελεί σημαντικό πρόβλημα και πρέπει να απομακρύνεται αλλιώς η θερμογόνος δύναμη του υδρογόνου μειώνεται. Το παραπάνω επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του μείγματος είτε μέσω ξηραντήρα είτε μέσω μονάδας ψύξης (συμπυκνώνοντας ατμό σε νερό). Ποικιλία συστημάτων διαχωρισμού με μεμβράνες χρησιμοποιούνται για τον αποτελεσματικό καθαρισμό του παραγόμενου αερίου.

#### **3.5. Γενικά χαρακτηριστικά υδρογόνου**

Το υδρογόνο είναι το πλέον διαδεδομένο στοιχείο στο σύμπαν και το τρίτο πιο άφθονο στο φλοιό της γης μέχρι βάθους 16 Km. Αποτελεί περίπου το 90 % του σύμπαντος ως προς τη μάζα του, παρόλο που είναι το ελαφρύτερο στοιχείο. Στη γη συναντάται κυρίως υπό τη μορφή του οξειδίου του, το νερό. Βρίσκεται, επίσης, σε αφθονία στους υδρογονάνθρακες με γενικό τύπο  $C_xH_y$  αλλά ως καθαρό στοιχείο βρίσκεται μόνο σε ίχνη στην ατμόσφαιρα διότι λόγω της ελαφρότητάς του έχει την τάση να ανεβαίνει γρήγορα ψηλά και να διαφεύγει από την ατμόσφαιρα προς το διάστημα. Οι τρόποι σύνθεσής του και το πλήθος των χημικών του ενώσεων μπορούν να εξηγηθούν εύκολα βάση τριών απλών αλλά θεμελιωδών χαρακτηριστικών του ατόμου του:

- I. Την ηλεκτρονική του δομή

- II. Το μικρό του βάρος που το κάνει ευκίνητο
- III. Το μικρό του μέγεθος που του επιτρέπει να εισχωρεί εύκολα και να παρεμβάλλεται μεταξύ άλλων ατόμων.

### 3.5.1 .Ιδιότητες υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι άχρωμο και άοσμο αέριο. Έχει πυκνότητα 0,0899 gr/lit (14,4 φορές μικρότερη από τον αέρα) και βράζει στους  $-257,77^{\circ}\text{C}$ . Το υγρό υδρογόνο έχει πυκνότητα 70,99 gr/lit. Μ' αυτές τις ιδιότητες έχει την υψηλότερη αναλογία ενέργειας προς βάρος από όλα τα καύσιμα. Η καύση ενός κιλού υδρογόνου δίνει 119,972 kJ και περιέχει το ίδιο ποσό ενέργειας με 2,1 kg βενζίνης. Το νερό περιέχει 11,2 % υδρογόνο (πίνακας 3.2) [39].

Το υδρογόνο καίγεται στον αέρα σε συγκεντρώσεις 4-75 % κ.ό. ενώ το μεθάνιο καίγεται μεταξύ 5,3-15 % και το προπάνιο μεταξύ 2,1-9,5 %. Η υψηλότερη θερμοκρασία καύσεως του υδρογόνου είναι  $2318^{\circ}\text{C}$ , όταν καίγεται σε αναλογία 29 % στον αέρα ενώ σε ατμόσφαιρα οξυγόνου η θερμοκρασία φτάνει τους  $3000^{\circ}\text{C}$ . Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξη του  $\text{H}_2$  είναι 0,02 MJ, 0,29 MJ για το μεθάνιο και 0,26 MJ για το προπάνιο, σε στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου/οξυγόνου. Οι θερμοκρασίες για την καύση του υδρογόνου, του μεθανίου και του προπανίου είναι  $585^{\circ}\text{C}$ ,  $540^{\circ}\text{C}$  και  $487^{\circ}\text{C}$  αντιστοίχως.

Τα όρια έκρηξης του υδρογόνου είναι μεταξύ 13 % και 65 % ενώ του μεθανίου είναι πολύ μικρότερα μεταξύ 6,3 % και 14 %, αλλά το μεθάνιο εκρήγνυται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Ο συντελεστής διάχυσης του υδρογόνου είναι  $0,61 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 4 φορές μεγαλύτερος από του μεθανίου. Επομένως το υδρογόνο αναμιγνύεται με τον αέρα πολύ γρηγορότερα απ' ό,τι το μεθάνιο ή οι απλές βενζίνες, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα σε ανοικτούς χώρους αλλά και σοβαρό μειονέκτημα σε εσωτερικούς χώρους με ανεπαρκή εξαερισμό. Εφόσον το υδρογόνο και το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερα από τον αέρα ανεβαίνουν γρήγορα ψηλά, ενώ αντίθετος το προπάνιο και οι ατμοί βενζίνης είναι βαρύτεροι από τον αέρα και παραμένουν στο έδαφος, οπότε υπάρχει και μεγαλύτερος κίνδυνος έκρηξης.

Μοριακό βάρος	2,01594	
Πυκνότητα (ως αέριο)	0,0838	Kg/m <sup>3</sup>
Ανώτερη θερμογόνος δύναμη	141,90 11,89	MJ/Kg MJ/m <sup>3</sup>
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη	119,90 10,05	MJ/Kg MJ/m <sup>3</sup>
Λαθάνουσα θερμότητα εξάτμισης	445,5 31,78	KJ/Kg MJ/m <sup>3</sup> υγρό
Θερμοκρασία βρασμού	20,3	K
Πυκνότητα ως υγρό	70,8	Kg/m <sup>3</sup>
Κρίσιμο σημείο -Θερμοκρασία	32,94	K
-Πίεση	12,84	bar
-Πυκνότητα	31,40	Kg/m <sup>3</sup>
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης	858	K
Στοιχειομετρικό μείγμα με αέρα	29,53	(κ.ό.%)
Όριο ανάφλεξης στον αέρα	4-75	(κ.ό.%)
Θερμοκρασία φλόγας στον αέρα	2318	K
Θερμοκρασία φλόγας(μέγιστη)	2403	K
Συντελεστής διάχυσης	0,61	cm <sup>2</sup> /sec
Ειδική θερμότητα Cp	14,89	KJ/Kg K
Ιξώδες	87,5	μ-poise
Ταχύτητα ήχου	1308	m/sec

Πίνακας 3.2. Ιδιότητες του υδρογόνου

## 4. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

### 4.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή εύφλεκτου αερίου από υλικά που περιέχουν άνθρακα αποτελεί μια παλιά τεχνολογία. Η επονομαζόμενη ξηρή απόσταξη ή πυρόλυση (θέρμανση υποψία οξυγόνου με αποτέλεσμα τη θερμική διάσπαση του καυσίμου σε πτητικά συστατικά, αέρα και στερεό άνθρακα) εφαρμόστηκε αρχικά το 1812 από μια εταιρία αερίου στο Λονδίνο. Ο πρώτος εμπορικός αεριοποιητής για αεριοποίηση στερεών καυσίμων αντικαταστάθηκε το 1839 αποδίδοντας το λεγόμενο «παραγόμενο αέριο» - «producer gas».

Λόγω των αναξιοπίστων προμηθειών πετρελαίου συστήματα αεριοποιητών για απόμακρες εφαρμογές αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη μεταξύ 1920-1940. Κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου δεκάδες χιλιάδες τέτοιων αεριοποιητών χρησιμοποιούνταν στην Ευρώπη. Μετά το τέλος του πολέμου τα φθηνά καύσιμα ήταν ειρώς διαθέσιμα ξανά με αποτέλεσμα η χρήση των αεριοποιητών να περιοριστεί.

Η ενεργειακή κρίση του 1970 επανέφερε το ενδιαφέρον στην αεριοποίηση. Η τεχνολογία θεωρήθηκε μια σχετικά φθηνή, γηγενής πηγή ενέργειας για μικρής κλίμακας βιομηχανίες και παραγωγή ενέργειας σε αναπτυσσόμενες χώρες που υπέφεραν από υψηλές πετρελαϊκές τιμές που επικρατούσαν στην παγκόσμια αγορά και που είχαν επαρκείς πηγές βιομάζας. Στην αρχή της δεκαετίας του '80, τουλάχιστον δέκα ευρωπαϊκές κατασκευάστριες εταιρίες προσέφεραν ξυλεία χαμηλής κλίμακας και power plant ξυλάνθρακα (περίπου 250 kW) και τέσσερις αναπτυσσόμενες χώρες (Φιλιππίνες, Βραζιλία, Ινδονησία και Ινδία) ξεκίνησαν εφαρμογή προγραμμάτων αεριοποίησης βασισμένων σε τοπικά ανεπτυγμένες τεχνολογίες. Εκατοντάδες συστήματα αεριοποίησης βιομάζας εγκαταστάθηκαν σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες μέσω επιδοτούμενων προγραμμάτων και τοπικών επιχειρηματιών. Τα περισσότερα από αυτά εγκαταλείφθηκαν εξαιτίας οικονομικών, τεχνικών και θεσμικών προβλημάτων.

Στις δυτικές χώρες, ενδιαφέρον στα συστήματα αεριοποίησης άνθρακα εμφανίστηκε το 1980 σαν μια εναλλακτική λύση στη χρήση φυσικού αερίου σε εφαρμογές θέρμανσης. Η τεχνολογική ανάπτυξη αφορούσε κυρίως συστήματα αεριοποίησης άνθρακα ρευστοποιημένης κλίνης καθώς και βιομάζα σε εύρος 10-100 MW. Η ανάπτυξη των συστημάτων αεριοποίησης σχετίζεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε προηγμένες μονάδες συμπαραγωγής.

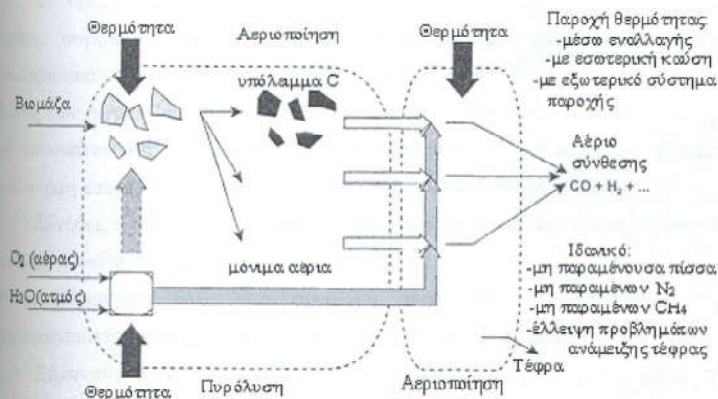
Ενδιαφέρον για την αεριοποίηση βιομάζας προέκυψε εξαιτίας της αλλαγής κλίματος και των συμφωνιών του πρωτοκόλλου του Κιότο. Η αεριοποίηση φαίνεται να είναι σημαντική για την παραγωγή ενέργειας. Η τεχνολογία είναι κοντά στην εμπορευματοποίηση και επομένως απαιτείται ενημέρωση της διεθνούς κοινότητας για τις τρέχουσες τεχνολογίες και εγκαταστάσεις, τα προβλήματα και τις λύσεις τους καθώς και μη τεχνικά θέματα κατά την εφαρμογή.

Η αεριοποίηση της βιομάζας διέπεται από απλές αρχές και πολλά είδη αεριοποιητών. Η παραγωγή ενός αερίου καυσίμου από ένα στερεό - με ελκυστικές ιδιότητες όπως εύκολος χειρισμός και ανάφλεξη που παράγει χαμηλά επίπεδα μόλυνσης (και πιθανόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης) – κάνει την αεριοποίηση μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο. Παρ' όλα αυτά, τα καύσιμα βιομάζας που χρησιμοποιούνται στους αεριοποιητές ποικίλουν και επομένως παρατηρούνται πολλά αντιδράσματα και πολλοί πιθανοί συνδυασμοί αντιδράσεων. Οι βαθμοί αντίδρασης είναι σχετικά υψηλοί. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες συντελούν στην πολύπλοκη φύση της αεριοποίησης και κάνουν την διαδικασία δύσκολο να ελεγχθεί και να λειτουργήσει ικανοποιητικά [40].

#### **4.2 Θεωρία της αεριοποίησης**

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι η ενδόθερμη μετατροπή ενός στερεού καυσίμου σε εύφλεκτο αέριο. Περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου, αέρα, ατμού ή συνδυασμός τους αποτελεί το οξειδωτικό μέσο. Το παραγόμενο αέριο αποτελείται από μονοξειδίο του άνθρακα, διοξειδίο του άνθρακα, υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, νερό, άζωτο (με αέρα ως οξειδωτικό) και ποικιλία μολυντών, όπως σωματίδια άνθρακα, τέφρα, πίσσα, υψηλούς υδρογονάνθρακες και έλαια. Η διαδικασία αεριοποίησης φαίνεται στο σχήμα 4.1.





Σχήμα 4.1: Αρχή της αεριοποίησης

Ένα σύστημα αεριοποίησης βιομάζας αποτελείται αρχικά από έναν αντιδραστήρα μέσα στον οποίο καύσιμο τροφοδοτείται με περιορισμένη ποσότητα αέρα, λιγότερη από τη στοιχειομετρική. Η θερμότητα για την αεριοποίηση παράγεται είτε μέσω μερικής καύσης της τροφοδοτούμενης βιομάζας είτε μέσω εξωτερικής πηγής θερμότητας. Η χημική διάσπαση του καυσίμου καθώς και οι εσωτερικές αντιδράσεις οδηγούν σε εύφλεκτο αέριο όπου ονομάζεται παραγόμενο αέριο (producer gas) με θερμογόνο δύναμη περίπου  $4-6 \text{ MJ/Nm}^3$ .

Η τροφοδοτούμενη βιομάζα αποτελείται συνήθως από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο ενώ υπάρχει πιθανότητα μικρής περιεκτικότητας σε θείο και άζωτο. Σε πλήρη καύση διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από τον άνθρακα και νερό από το υδρογόνο. Το οξυγόνο του καυσίμου ενσωματώνεται στα προϊόντα καύσης μειώνοντας έτσι την ποσότητα του απαιτούμενου αέρα καύσης.

Η προεπεξεργασία της βιομάζας εξαρτάται από τη θερμοχημική διαδικασία μετατροπής. Συνήθως υπάρχουν βέλτιστοι ρυθμοί μεταφορά θερμότητας που εισέρχεται στο σωματίδιο και αέρια και/ ή υγρά προϊόντα που εξέρχονται από τα σωματίδια. Αν το μέγεθος σωματιδίων είναι πολύ μεγάλο μπορεί να πραγματοποιηθεί δαυτερογενής αντίδραση εντός του σωματιδίου και μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή ποσότητα υπολείμματος άνθρακα και σε υπερβολικό σχηματισμό πίσσας. Στην περίπτωση που το μέγεθος σωματιδίου είναι πολύ μικρό ο χρόνος παραμονής του στη ζώνη αντίδρασης είναι περιορισμένος.

Σε ορισμένες θερμοχημικές διαδικασίες, τα σωματίδια που έχουν μικρό μέγεθος, συγκριτικά με το μέσο μέγεθος σωματιδίων στην κλίνη, καίγονται ολοκληρωτικά εξαιτίας του μεγέθους τους. Σε αντίθετη περίπτωση, το μεγάλο μέγεθος των σωματιδίων δεν επιτρέπει τη ολική τους διάσπαση σε αντίστοιχο χρόνο που απαιτείται για τη διάσπαση άλλων μικρότερων σωματιδίων. Επομένως, ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στη κλίνη θεωρείται απαραίτητη.

Συνήθως υπάρχει ένας αριθμός σταδίων που αφορούν την προ-κατεργασία της βιομάζας η οποία έχει ήδη συλλεχθεί, μεταφερθεί και αποθηκευθεί. Τα στάδια αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στη συνολική αποτίμηση της εγκατάστασης από τηρουοικονομικής άποψης. Τα κυριότερα στάδια είναι [1]:

- Ξήρανση: Συνήθως επιτελείται σε περιστρεφόμενα ξηραντήρια ή σε αβαθείς ρευστοποιημένες κλίνες. Η διεργασία επιτυγχάνεται μέσω ενεργειακής ανακύκλωσης στο ίδιο το εργοστάσιο αεριοποίησης.
- Ελάττωση μεγέθους: Συνήθως επιτελείται σε ειδικούς σπαστήρες, για επιθυμητό μέγεθος 10-35 mm (ειδικά για αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης). Αντιδραστήρες σταθερής κλίνης απαιτούν διαφορετικά μεγέθη, ανάλογα με τον κατασκευαστή.
- Συμπύεση/ Μπρικετοποίηση: Χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις και παράγει καύσιμα κατάλληλα για αεριοποίηση. Καταναλώνει περίπου το 2 % του ενεργειακού περιεχομένου της βιομάζας.

Η δασική βιομάζα συλλέγεται και παραδίδεται, τις περισσότερες φορές, υπό μορφή κορμών δένδρων, απαιτώντας περαιτέρω επεξεργασία τεμαχισμού και ξήρανσης. Φυτά όπως μίσχανθος, σόργο, κλπ μπορούν να παραδοθούν είτε υπό μορφή δεματιών (π.χ. για το άχυρο) είτε σε μικρότερα τεμάχια.

Η τροφοδοσία στον αντιδραστήρα μπορεί να είναι απλή ή πολλαπλή (αντιδραστήρες πολλών δεκάδων MW) και να γίνεται με μηχανικό (κοχλίες απλοί ή διπλοί) ή με πνευματικό τρόπο. Αποτελεί ένα από τα βασικότερα τμήματα της εγκατάστασης. Στους αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης υπό πίεση, το κόστος του συστήματος τροφοδοσίας είναι περίπου ίσο με το κόστος του αεριοποιητή, αν όχι μεγαλύτερο.

Ανάλογα με το είδος του αεριοποιητή και των συνθηκών αντίδρασης είναι δυνατόν να παραχθούν αέρια καύσιμα χαμηλής, μέσης ή υψηλής θερμογόνου δύναμης. Αν η χρήση του παραγόμενου αερίου καυσίμου είναι άμεση, τότε η

παραγωγή αερίου χαμηλής θερμογόνου δύναμης ( $4-7 \text{ MJ/Nm}^3$ ) είναι η πιο ανδίαφέρουσα λύση, λόγω της σχετικής απλότητας της διεργασίας.

Αν το παραγόμενο αέριο πρόκειται να μεταφερθεί σε μεγάλη απόσταση ή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη, για την σύνθεση χημικών (αμμωνία, μεθανόλη κλπ.), τότε απαιτείται αέριο με μέση θερμογόνο δύναμη ( $15-25 \text{ MJ/Nm}^3$ ).

Τέλος, είναι δυνατόν να παραχθεί αέριο υψηλής θερμογόνου δύναμης ( $30-40 \text{ MJ/Nm}^3$ ) για αντικατάσταση του φυσικού αερίου, μια τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί πολύ πρόσφατα. Η διεργασία θεωρείται οικονομικά αποδεκτή μόνο σε περιοχές όπου η χρήση του φυσικού αερίου είναι επιθυμητή, αλλά σπανίζει και η διανομή του είναι πολύ δύσκολη και δαπανηρή.

Η μετατροπή της στερεάς βιομάζας σε αέριο προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τη χρήση αερίων και υγρών καυσίμων, όπως καθαρή ανάφλεξη, υψηλή θερμική απόδοση και ικανοποιητικό βαθμό ελέγχου. Οικονομικά οφέλη παρατηρούνται σε περιοχές όπου η βιομάζα αποτελεί φθηνή και γηγενή πηγή ενέργειας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι η παραγωγή αερίου υψηλής καθαρότητας, η καύση του οποίου οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα μόλυνσης. Υπό κατάλληλες συνθήκες παράγεται αέριο σύνθεσης, μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Από αυτό παράγεται ποικιλία υδρογονανθράκων, υποκατάστατα των συμβατικών καυσίμων. Επιπλέον, το υδρογόνο αποτελεί από μόνο του το καύσιμο του μέλλοντος εφόσον πρόκειται να αντικαταστήσει το πετρέλαιο και δεν επιβαρύνει την μόλυνση του περιβάλλοντος.

#### 4.3 Είδη αεριοποιητών

Οι αεριοποιητές βιομάζας λειτουργούν θερμαίνοντας βιομάζα με σκοπό τη διάσπαση της σε εύφλεκτο αέριο, γεγονός που προσφέρει πλεονεκτήματα σχετικά με την άμεση καύση της βιομάζας [41]. Το παραγόμενο αέριο καθαρίζεται και φιλτράρεται για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών. Έτσι, μπορεί για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί σε πιο αποδοτικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, τους συνδυασμένους κύκλους οι οποίοι συνδυάζουν αεριοστρόβιλο και ατμοστρόβιλο για παραγωγή ενέργειας. Η απόδοση αυτών των συστημάτων προσεγγίζει το 60 %.

Επίσης, τα συστήματα αεριοποίησης μπορούν να συνδυαστούν με κύτταρα καυσίμου για μελλοντικές εφαρμογές. Το αέριο υδρογόνο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Οι εκπομπές είναι πολύ χαμηλές και το κύριο καυσάεριο της διαδικασίας είναι οι υδρατμοί. Τέτοια συστήματα θα

αναπτυχθούν περισσότερο με τη μείωση του οικονομικού κόστους των κυψελών καυσίμου και των αεριοποιητών βιομάζας.

Ο σχεδιασμός των αεριοποιητών εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και από τη δυνατότητα μεταφοράς ή όχι του αεριοποιητή. Τα είδη των αεριοποιητών παρατίθενται παρακάτω.

#### 4.3.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης (Fixed bed gasifiers)

Αποτελούν τους πρώτους εμπορικά διαθέσιμους αεριοποιητές και χαρακτηρίζονται από την απλότητα τους στο σχεδιασμό και τη λειτουργία. Αποτελούνται από ένα κάθετο άξονα με μια περιστροφική ή σταθερή εσχάρα στον πυθμένα. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αεριοποιητών αποτελεί ο διαχωρισμός διαφορετικών ζωνών αντίδρασης [4].

Στην περίπτωση της κινούμενης εσχάρας, στον πυθμένα του αεριοποιητή (moving bed gasifiers), η εσχάρα συμβάλλει στη κίνηση του στρώματος υπολείμματος άνθρακα στη ζώνη αναγωγής και στην αποφυγή μπλοκαρισμάτων στη ροή του αερίου. Η διάκριση των αεριοποιητών σταθερής κλίνης γίνεται με βάση τον τρόπο εισαγωγής του ρεύματος αερίου στη στήλη καυσίμου και διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες.

Οι αντιδράσεις ξήρανσης, πυρόλυσης, οξειδωσης και αναγωγής δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνουν ταυτόχρονα σε έναν αεριοποιητή σταθερής κλίνης. Στην περίπτωση αυτή, οι εξισώσεις που θα προέκυπταν θα ήταν εξαιρετικά πολύπλοκες και η μαθηματική τους λύση ιδιαίτερα περίπλοκη και καθόλου πρακτική. Είναι επομένως σκόπιμο να διαιερευθεί ο αντιδραστήρας σε διαδοχικές ζώνες σε καθεμιά από τις οποίες θα κυριαρχεί ένα φαινόμενο, το οποίο θεωρείται ότι διακόπτεται απότομα στο τέλος κάθε ζώνης.

##### 4.3.1.1 Αεριοποιητές σταθερής κλίνης ανερχόμενης ροής (Updraft ή counter current fixed bed gasifiers)

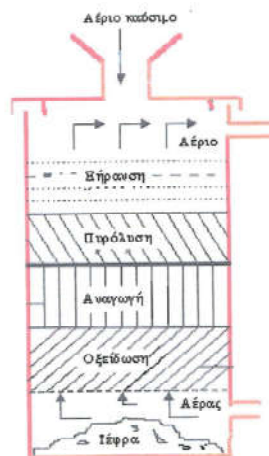
Ο απλούστερος τύπος αεριοποιητή είναι ο σταθερής κλίνης ανερχόμενης ροής αεριοποιητής (Σχήμα 4.2 (α),(β)). Η βιομάζα τροφοδοτείται από την κορυφή του αντιδραστήρα, κινείται καθοδικά και κατακάθεται στον πυθμένα του με τη μορφή τέφρας. Αέρας εισέρχεται από τον πυθμένα και το αέριο εξέρχεται από την κορυφή. Η βιομάζα κινείται αντίθετα από τη ροή του αερίου και διαπερνά διαδοχικά τις ζώνες ξήρανσης (drying zone), απόσταξης/ πυρόλυσης (distillation/ pyrolysis zone),



αναγωγής (reduction zone) και οξειδωσης (oxidation/hearth zone). Στη ζώνη ξήρασης η υγρασία απομακρύνεται από τη βιομάζα. Στη ζώνη απόσταξης ή πυρόλυσης, πραγματοποιείται διάσπαση της βιομάζας σε πτητικά αέρια και στερεά υπολείμματα άνθρακα. Η θερμότητα για την πυρόλυση και την ξήρανση παρέχεται κυρίως από το ανερχόμενο παραγόμενο αέριο και μερικώς από την ακτινοβολία στη ζώνη οξειδωσης.



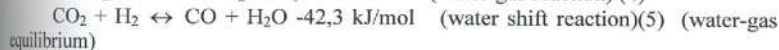
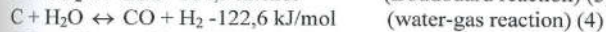
Εικόνα 4.2 (α): Αεριοποιητής ανερχόμενης ροής σταθερής κλίνης [42]



Σχήμα 4.2 (β): Αεριοποιητής ανερχόμενης ροής σταθερής κλίνης



Στη ζώνη αναγωγής πραγματοποιούνται αντιδράσεις στις οποίες ο άνθρακας μετατρέπεται και παράγονται μονοξειδίου του άνθρακα καθώς και υδρογόνο ως τα κύρια συστατικά του παραγόμενου αερίου [1]. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στη ζώνη αναγωγής απαιτούν θερμότητα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να μειώνεται κατά τη διάρκεια της αναγωγής. Οι αντιδράσεις αυτές είναι:



Οι αντιδράσεις (3) και (4) αποτελούν τις κυριότερες αντιδράσεις της αναγωγής και δείχνουν ότι η αναγωγή απαιτεί θερμότητα. Επομένως, η θερμοκρασία αερίου μειώνεται κατά την αναγωγή. Η εξίσωση (5) περιγράφει τη λεγόμενη ισορροπία νερού- αερίου (water-gas equilibrium). Για κάθε θερμοκρασία θεωρητικά, η αναλογία μεταξύ μονοξειδίου και υδρατμών καθώς και διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου καθορίζεται από την τιμή της σταθεράς ισορροπίας νερού- αερίου ( $K_{WE}$ ). Πρακτικά, η ισορροπία του αερίου επιτυγχάνεται μόνο όταν ο βαθμός αντίδρασης και ο χρόνος αντίδρασης επαρκούν.

Ο βαθμός αντίδρασης μειώνεται με την πτώση θερμοκρασίας. Στην περίπτωση ισορροπίας νερού- αερίου, ο βαθμός αντίδρασης μειώνεται σημαντικά για θερμοκρασίες μικρότερες των 700 °C ώστε η ισορροπία θεωρείται παγωμένη. Η σύνθεση αερίου τότε παραμένει αμετάβλητη. Τιμές της σταθεράς ισορροπίας για διαφορετικές θερμοκρασίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 [4].

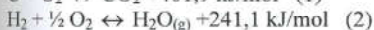
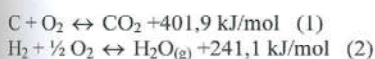
$$K_{WE} = \frac{(CO) \times (H_2O)}{(CO_2) \times (H_2)}$$

Θερμοκρασία (°C)	$K_{WE}$
600	0,38
700	0,62
800	0,92
900	1,27
1000	1,60

Πίνακας 4.1: Τιμές της σταθεράς ισορροπίας για διάφορες θερμοκρασίες

Στη ζώνη οξειδωσης ο υπολειπόμενος άνθρακας αναφλέγεται παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και θερμότητα για τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σε αυτή τη ζώνη [1].

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στη ζώνη οξειδωσης είναι:



Η καύση ενός γραμμομορίου άνθρακα σε διοξείδιο απελευθερώνει θερμότητα 401,9 kJ, ενώ η οξείδωση ενός μορίου υδρογόνου σε υδρατμούς απελευθερώνει 241,1 kJ.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αεριοποιητή είναι η απλότητα του, η υψηλή καύση των στερεών υπολειμμάτων άνθρακα και η εσωτερική εναλλαγή θερμότητας που οδηγεί σε χαμηλές θερμοκρασίες εξόδου του αερίου και σε υψηλής απόδοσης αεριοποίηση. Εξαιτίας της εσωτερικής εναλλαγής θερμότητας, το καύσιμο ξηραίνεται στην κορυφή του αεριοποιητή. Επομένως, καύσιμα με υψηλά ποσά υγρασίας (60 %) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, αυτό το είδος αεριοποιητή μπορεί να λειτουργήσει με σχετικά μικρά σωματίδια καυσίμου και με μεγάλη ποικιλία στο σχήμα του τροφοδοτούμενου καυσίμου. Ο αεριοποιητής ανερχόμενης ροής απαιτεί την υψηλότερη απόδοση καθώς το θερμό αέριο διαπερνά την κλίνη καυσίμου και απομακρύνεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Η αισθητή θερμότητα που προσδίδεται από το αέριο χρησιμοποιείται για την προθέρμανση και ξήρανση του καυσίμου.

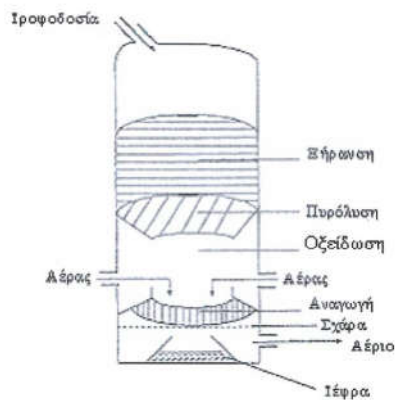
Τα κυριότερα μειονεκτήματα του είναι τα υψηλά ποσά πίσσας (λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας) και τα προϊόντα πυρόλυσης, αφού το αέριο πυρόλυσης δεν διαπερνά τη ζώνη οξειδωσης και επομένως δεν αναφλέγεται. Το παραπάνω είναι μηδαμινής σημασίας εφόσον το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται για απευθείας καύση στην οποία η πίσσα καίγεται. Έτσι, το αέριο προσφέρεται σχεδόν αποκλειστικά για απευθείας καύση ενώ είναι πρακτικά αδύνατη η χρησιμοποίησή του σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Όταν το καύσιμο χρησιμοποιείται σε μηχανές απαιτείται εκτεταμένος καθαρισμός.

4.3.1.2 Αεριοποιητές κατερχόμενης ροής σταθερής κλίνης (Downdraft ή co-current fixed bed gasifiers)



Σχήμα 4.3 (α): Αεριοποιητής κατερχόμενης ροής σταθερής κλίνης [43]

Σε έναν αντιδραστήρα κατερχόμενης ροής [1], [41] η βιομάζα τροφοδοτείται από την κορυφή και ο αέρας εισέρχεται από την κορυφή ή πλευρικά. Το αέριο καθώς και η τέφρα απομακρύνονται από τον πυθμένα του αντιδραστήρα (σχήμα 4.3(α),(β)).



Σχήμα 4.3 (β): Ζώνες αντιδραστήρα κατερχόμενης ροής

Οι ζώνες είναι παρόμοιες με τις ζώνες του αντιδραστήρα ανερχόμενης ροής αλλά με διαφορετική σειρά. Η βιομάζα αρχικά ξηραίνεται στη ζώνη ξήρανσης και στη συνέχεια πυρολύεται. Αυτές οι ζώνες θερμαίνονται κυρίως από ακτινοβολία (και μερικώς από συναγωγή) της ζώνης οξείδωσης, όπου τμήμα του υπολείμματος του άνθρακα καίγεται. Τα αέρια της πυρόλυσης διαπερνούν αυτή τη ζώνη και καίγονται επίσης. Ο βαθμός καύσης τους εξαρτάται από το σχεδιασμό, την τροφοδοσία της βιομάζας και τις ικανότητες του χειριστή, όσον αφορά στην απομάκρυνση της τέφρας. Μετά τη ζώνη οξείδωσης, τα εναπομείναντα υπολείμματα άνθρακα και τα προϊόντα καύσης- διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμοί – περνούν στη ζώνη αναγωγής όπου μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο σχηματίζονται.

1. Ξήρανση (Drying zone): Το στερεό καύσιμο(με ποσοστό υγρασίας 5 έως 35%) εισάγεται στην κορυφή του αεριοποιητή και ως αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας από τα κατώτερα τμήματά του πραγματοποιείται ξήρανση της βιομάζας. Σε υψηλότερη θερμοκρασία από 100<sup>0</sup>C, η υγρασία απομακρύνεται και μετατρέπεται σε υδρατμούς. Οι υδρατμοί κατέρχονται και προστίθενται σε εκείνους της ζώνης οξείδωσης. Ένα μέρος τους ανάγεται σε υδρογόνο ( $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 -122,6 \text{ kJ/mol}$ ) και το υπόλοιπο καταλήγει ως υγρασία στο παραγόμενο αέριο. Στη ζώνη ξήρανσης δεν πραγματοποιείται χημική διάσπαση του καυσίμου.
2. Πυρόλυση (Pyrolysis zone): Σε θερμοκρασίες άνω των 250 <sup>0</sup>C το καύσιμο της βιομάζας πυρολύεται. Πυρόλυση ονομάζεται η θερμική διάσπαση του καυσίμου βιομάζας, απουσία οξυγόνου. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης απελευθερώνονται τρία είδη προϊόντων: στερεά, υγρά και αέρια. Η αναλογία των προϊόντων εξαρτάται από την χημική σύνθεση της βιομάζας και τις συνθήκες λειτουργίας. Τα προϊόντα πυρόλυσης ρέουν στις θερμότερες ζώνες του αεριοποιητή, μέρος αυτών καίγονται στη ζώνη οξείδωσης και τα υπόλοιπα διασπώνται σε άλλα μικρότερα μόρια υδρογόνου, μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα, εφόσον παραμείνουν αρκετή ώρα στη ζώνη. Αν ο χρόνος παραμονής τους είναι μικρός ή η θερμοκρασία χαμηλή, τότε τα μεσαίου μεγέθους μόρια συμπυκνώνονται σαν πίσσα και έλαια, στα τμήματα χαμηλής θερμοκρασίας του συστήματος. Η θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου αερίου είναι χαμηλή (3,5 έως 9MJ/m<sup>3</sup>).
3. Οξείδωση (Oxidation/Burning/Hearth zone): Η ζώνη οξείδωσης σχηματίζεται με την εισαγωγή οξυγόνου, αέρα ή ατμού. Οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται

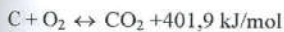


σε θερμοκρασία 700-2000 °C και είναι εξώθερμες. Εκτός από την παραγωγή θερμότητας σκοπός της οξειδωσης είναι η μετατροπή και οξειδωση των συμπυκνώσιμων προϊόντων της πυρόλυσης. Η ταχύτητα εισαγωγής του αέρα καθώς και η γεωμετρία του αντιδραστήρα επιλέγονται προσεκτικά για την αποφυγή ψυχρών σημείων στη ζώνη οξειδωσης. Δύο μέθοδοι εφαρμόζονται για την εξασφάλιση ομοιόμορφης θερμοκρασίας:

a) Μείωση της διατομής σε ορισμένο ύψος του αντιδραστήρα (φαινόμενο λαιμού- throat)

b) Διάχυση του εισερχόμενου αέρα στην περιφέρεια του λαιμού ή χρήση κεντρικού συστήματος ψεκασμού

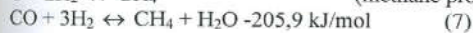
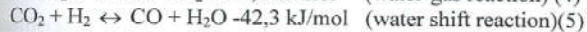
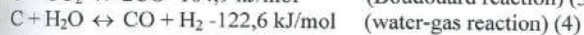
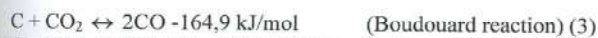
Ετερογενείς αντιδράσεις πραγματοποιούνται μεταξύ του οξυγόνου του αέρα και του στερεού καυσίμου παράγοντας μονοξειδίο του άνθρακα.



Το υδρογόνο αντιδρά πλήρως με το οξυγόνο του αέρα παράγοντας ατμό.



4. Αναγωγή (Reduction zone): Τα προϊόντα οξειδωσης (θερμά αέρια και υπολείμματα άνθρακα) κινούνται στη ζώνη αναγωγής. Η αισθητή θερμότητα μετατρέπεται σε χημική ενέργεια του παραγόμενου αερίου.



Οι στάχτες που προέρχονται από την αεριοποίηση αλομακρύνονται περιστασιακά, γι' αυτό απαιτείται συνήθως μια κινούμενη σχάρα στον πυθμένα του αεριοποιητή. Το τελικό προϊόν είναι ένα εύφλεκτο αέριο που χρησιμοποιείται σε μηχανές εσωτερικής καύσης μετά την απομάκρυνση της σκόνης και αφού ψυχθεί.

Το κυριότερο πλεονέκτημα του αεριοποιητή κατερχόμενης ροής θεωρείται η παραγωγή αερίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα. Πρακτικά, σπάνια προκύπτει αέριο απαλλαγμένο από πίσσα. Η κυριότερη αιτία είναι ότι δεν περνούν τις θερμές ζώνες του αεριοποιητή όλα τα αέρια. Επιπλέον, ο χρόνος παραμονής στη ζώνη



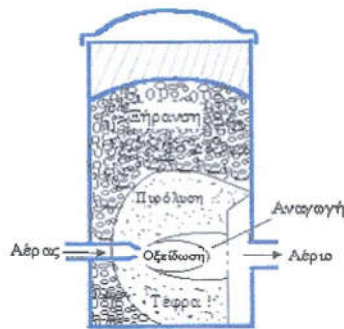
οξειδωσης μπορεί να είναι πολύ μικρός. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτού του αεριοποιητή είναι υψηλή και έτσι ο σχηματισμός πίσσας πολύ μικρός. Εξαιτίας της πηκτικότητας της βιομάζας, της πολύ καλής μεταφοράς θερμότητας, της υψηλής θερμοκρασίας εμφανίζεται βαθμός απόδοσης μετατροπής του άνθρακα περίπου 99 % ενώ ο βαθμός απόδοσης των παραγόμενων θερμών αερίων είναι της τάξης του 80-90 %. Επίσης, η σχεδίαση και η λειτουργία αυτών των αντιδραστήρων σταθερής κλίνης είναι σχετικά απλή.

Τα μειονεκτήματα των αεριοποιητών κατερχόμενης ροής είναι:

1. Υψηλές ποσότητες στάχτης και σωματιδίων σκόνης παραμένουν στο αέριο αφού το αέριο πρέπει να περάσει τη ζώνη οξειδωσης όπου συλλέγονται μικρά σωματίδια καύσης.
2. Οι απαιτήσεις καυσίμου είναι αυστηρές. Το καύσιμο πρέπει να είναι ομοιόμορφα τεμαχισμένο από 4-10 cm έτσι ώστε να μην φράσσεται ο «λαμός» και να επιτρέπεται στα αέρια πυρόλυσης να θερμαίνονται από τη ζώνη οξειδωσης. Επεξεργασία της βιομάζας για μετατροπή της σε σφαιρική μορφή ή σε μικρικές θεωρείται μερικές φορές απαραίτητη. Έτσι, στην περίπτωση π.χ. των αγροτικών υπολειμμάτων χρειάζεται συμπίκνωση τους αυξάνοντας έτσι το κόστος επεξεργασίας του καυσίμου. Αντίθετα, στην περίπτωση της δασικής βιομάζας αποτελούν μια πολύ καλή λύση.
3. Ανώτατο όριο για την υγρασία της βιομάζας είναι το 25 %.
4. Υψηλή θερμοκρασία εξόδου οδηγεί σε αεριοποίηση χαμηλότερης απόδοσης.

#### 4.3.1.3 Αεριοποιητές διασταυρωμένης ροής σταθερής κλίνης (Cross draft fixed bed gasifiers)

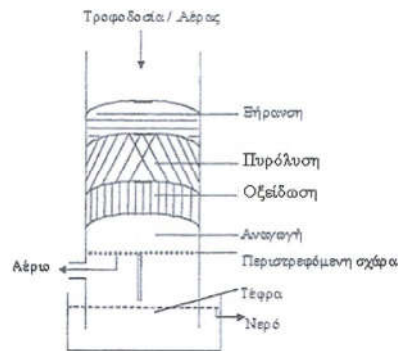
Η αεριοποίηση των υπολειμμάτων άνθρακα πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες (1500 °C) στη ζώνη οξειδωσης και οδηγεί σε τοπικά προβλήματα υλικού. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του αεριοποιητή είναι η εφαρμογή του σε συστήματα μικρής κλίμακας. Σε αναπτυσσόμενες χώρες, εφαρμόζεται σε ισχύ 10 kW πιθανότατα εξαιτίας της απλής διαδικασίας καθαρισμού αερίου (κυκλώνας και σακκόφίλτρο). Σημαντικό μειονέκτημα αυτού του τύπου αεριοποιητή αποτελεί η μικρή ικανότητα μετατροπής πίσσας, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη για υψηλής ποιότητας βιομάζας (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Αεριοποιητής διασταυρωμένης ροής σταθερής κλίνης

#### 4.3.1.4 Αεριοποιητές ανοικτού πυρήνα σταθερής κλίνης (Open core fixed bed gasifiers)

Είναι σχεδιασμένοι να αεριοποιούν υλικά με χαμηλή μέση πυκνότητα όπως για παράδειγμα φλοιοί ρυζιού. Εξαιτίας της χαμηλής μέσης πυκνότητας του καυσίμου δεν εμφανίζεται λαίμος με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται προβλήματα στη ροή του καυσίμου. Ειδικές συσκευές, όπως περιστρεφόμενες εσχάρες, χρησιμοποιούνται για την κίνηση του καυσίμου και τη μεταφορά της στάχτης. Οι αεριοποιητές των φλοιών ρυζιού συγκεκριμένα απαιτούν συστήματα συνεχής απομάκρυνσης στάχτης εξαιτίας του υψηλού ποσοστού στάχτης στους φλοιούς (περίπου 55 % του αρχικού όγκου καυσίμου). Ο πυθμένας του αεριοποιητή τοποθετείται σε νερό το οποίο δρα σαν μεταφορέας για τη μετακίνηση της τέφρας (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Αεριοποιητής Open Core

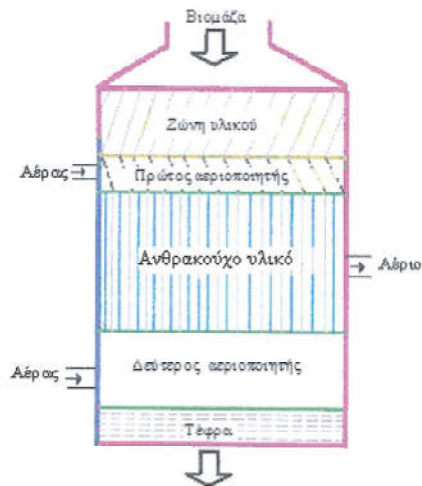
Τύπος	Ανερχόμενη	Κατερχόμενη	Διασταυρωμένη
Ροή στερεού και αερίου	<b>Αντιρροή</b>	<b>Ομορροή</b>	<b>Διασταυρωμένη</b>
Προτιμώμενος τύπος καυσίμου και χαρακτηριστικά	Καύσιμο με χαμηλή τέφρα και με χαμηλή ή μέτρια αντιδραστικότητα π.χ. κωκ, ανθρακίτης, ξυλάνθρακας	Καύσιμο υψηλής αντιδραστικότητας και περιεχομένου σε πτητικά π.χ. ξύλο, λιγνίτης, τύρφη	Καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε πτητικά και τέφρα π.χ. κωκ, ξυλάνθρακας, ανθρακίτης
Προσθήκη ατμού	Ναι	Όχι	Όχι
Άλλα χαρακτηριστικά	Ευρεία ζώνη οξειδωσης με χαμηλές θερμοκρασίες. Μεγαλύτερος χρόνος προθέρμανσης τροφοδοσίας. Κυμαινόμενη παραγωγή αερίου. Απαιτείται συχνά διαχωριστής τέφρας	Περιορισμένη ζώνη οξειδωσης. Μικρός χρόνος προθέρμανσης τροφοδοσίας. Κυμαινόμενη παραγωγή αερίου. Διαχωριστής τέφρας μπορεί συχνά να παραληφθεί.	Περιορισμένη ζώνη οξειδωσης και μικρός χρόνος προθέρμανσης. Κυμαινόμενη παραγωγή αερίου.

Πίνακας 4.2.: Βασικοί τύποι αεριοποιητών σταθερής κλίνης

#### 4.3.1.5 Δίδυμοι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (Twin fire gasifiers)

Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αερίου υψηλής θερμογόνου δύναμης, με χρήση αέρα σαν οξειδωτικό μέσο. Ο πρώτος αεριοποιητής χρησιμοποιείται σαν αεριοποιητής πυρόλυσης, θερμαινόμενος μέσω θερμής άμμου σαν αδρανές υλικό, από τον δεύτερο αεριοποιητή, ο οποίος θερμαίνεται μέσω της καύσης του ανθρακούχου υπολείμματος, που προέρχεται από τον πρώτο αεριοποιητή, με αέρα πριν από την επανακυκλοφορία. Ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω παραγωγή υδρογόνου και για την καλύτερη αντίδραση μεταξύ άνθρακα – ατμού. Έτσι, η ποιότητα του παραγόμενου αερίου είναι πολύ καλή από άποψη παραγόμενου αερίου (σχήμα 4.6).

Η ξήρανση και η διάσπαση των αερίων πραγματοποιείται στην άνω ζώνη αντίδρασης ενώ η αεριοποίηση του υπολείμματος ξυλάνθρακα πραγματοποιείται στη χαμηλότερη ζώνη. Η θερμοκρασία αερίου κυμαίνεται μεταξύ 460-520 °C. Η συνολική διαδικασία πραγματοποιείται υπό πίεση -30 mbar και αποδίδει καθαρό αέριο.



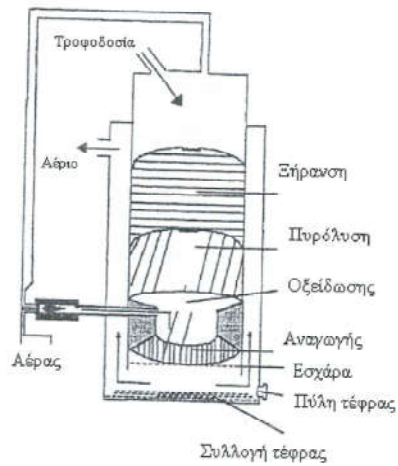
Σχήμα 4.6: Δίδυμοι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης

#### 4.3.1.6 Εξέλιξη των αεριοποιητών σταθερής κλίνης

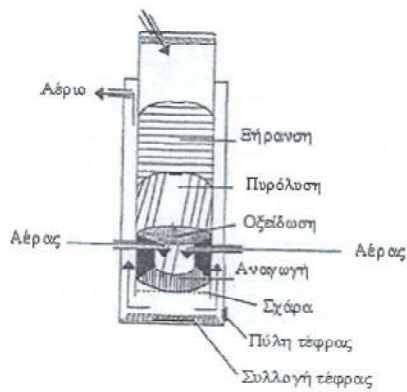
Μόνο μερικοί εμπορικοί αεριοποιητές ανερχόμενης ροής λειτουργούν σήμερα και βρίσκονται στη Νότια Αμερική. Ο τελευταίος αεριοποιητής ανερχόμενης ροής στην Ευρώπη (Γερμανία) διέκοψε τη λειτουργία του για περιβαλλοντολογικούς λόγους (μόλυνση νερού από υπολείμματα πίσσας). Επομένως, ο πιο συχνός τύπος αεριοποιητών σταθερής κλίνης είναι εκείνος της κατερχόμενης ροής.

Οι περισσότεροι αεριοποιητές κατερχόμενης ροής παρουσιάζουν «λαιμό» σε σχήμα V (σχήμα 4.7). Η ζώνη οξειδώσεως είναι το στενότερο τμήμα του λαιμού. Ο σκοπός του λαιμού είναι ο σχηματισμός ζώνης υψηλής θερμοκρασίας και ισχύος ώστε όλα τα αέρια της πυρόλυσης να διασπάσουν την πίσσα. Ο αέρας τροφοδοτείται άμεσα στη ζώνη είτε από κεντρικό σύστημα τροφοδοσίας είτε από ακροφύσια τοποθετημένα στα τοιχώματα του λαιμού. Όσον αφορά στην επιλογή διαμέτρου, χρειάζεται να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ α) της μείωσης του κινδύνου διαφυγής αερίων με υπολείμματα πίσσας από τη ζώνη οξειδώσεως και β) του ιδανικού ρυθμού ροής του καυσίμου και της ταχύτητας αερίου στο λαιμό. Οι ταχύτητες δεν επιδιώκεται να είναι υψηλές διότι τότε η στάχτη σαρώνεται και συγκεντρώνεται από το ρεύμα αέρα, προκαλώντας υψηλό περιεχόμενο σκόνης.

Σε πρόσφατες κατασκευές, οι αντιδραστήρες κατερχόμενης ροής είναι διπλού τοιχώματος (doubled wall). Το παραγόμενο αέριο τροφοδοτείται από το κενό ανάμεσα στα τοιχώματα, επιτρέποντας εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο παραγόμενο αέριο, στο καύσιμο της πυρόλυσης και τη ζώνη ξήρανσης. Η αποτελεσματικότητα της εναλλαγής θερμότητας βελτιώνεται με τη χρήση αντιδραστήρα μικρής διαμέτρου, ο οποίος αυξάνει την επιφάνεια εναλλαγής (σχήμα 4.8).



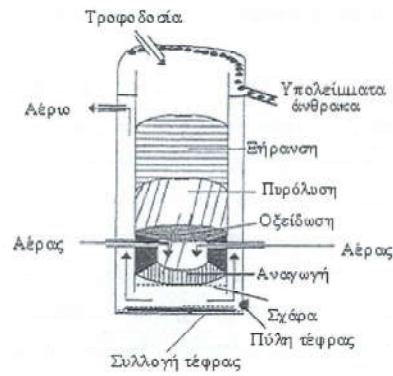
Σχήμα 4.7: Αεριοποιητής κατερχόμενης ροής με «λαιμό» τύπου V



Σχήμα 4.8: Αεριοποιητής μικρής διαμέτρου

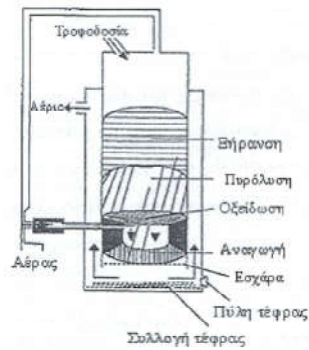


Σε ορισμένα είδη σχεδιασμού, τα αέρια πυρόλυσης συμπυκνώνονται στο κάλυμμα και διοχετεύονται σε σωλήνα και συλλέγονται σε δεξαμενή (σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Αεριοποιητής με συλλογή πίσσας

Στον αεριοποιητή τύπου Delacotte, τα αέρια πυρόλυσης συγκεντρώνονται στην κορυφή του αεριοποιητή, καίγονται μερικώς και διασπώνται σε έναν μεμονωμένο αντιδραστήρα. Τα αέρια τροφοδοτούνται στη ζώνη οξείδωσης του αεριοποιητή και χρησιμοποιούνται για τη μερική καύση και αεριοποίηση των υπολειμμάτων άνθρακα. Προκύπτει αέριο υψηλής καθαρότητας (σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Αεριοποιητής τύπου Delacotte

#### 4.3.1.7 Τεχνικά και λειτουργικά προβλήματα των αεριοποιητών σταθερής κλίνης

Παρά τους διαφορετικούς σχεδιασμούς των αεριοποιητών δεν υπάρχει αεριοποιητής σταθερής κλίνης που παράγει αέριο καθαρό από πίσσα. Η μερική λειτουργία τους κρίνεται ανικανοποίητη για τους περισσότερους αεριοποιητές.

##### > Εκρήξεις (explosions)

Εκρήξεις συμβαίνουν όταν εύφλεκτα αέρια διαφεύγουν από το σύστημα τροφοδοσίας, το σύστημα αποφόρτισης τέφρας ή από οποιοδήποτε άλλο σημείο διαρροής. Με τη διακοπή λειτουργίας ενός αεριοποιητή εύφλεκτα αέρια παραμένουν στην συσκευή. Αν ο αεριοποιητής τεθεί σε λειτουργία χωρίς να έχει προηγηθεί λειτουργία της συσκευής με καθαρό αέρα, τα εύφλεκτα αέρια μπορεί να εκραγούν. Για τη μείωση του κινδύνου έκρηξης οι αεριοποιητές τοποθετούνται σε σωστά αεριζόμενους ή ανοικτούς χώρους. Οι χειριστές επιβάλλεται να γνωρίζουν τους κινδύνους της συσκευής αεριοποίησης ειδικά κατά τη διάρκεια εκκίνησης και άσκητης λειτουργίας της μονάδας.

##### > Προβλήματα στη ροή καυσίμου (fuel blockage)

Η ροή καυσίμου είναι δυνατόν να εμποδιστεί στο λαϊμό του αεριοποιητή. Τέτοιες δυσκολίες προκαλούνται από ακατάλληλο συνδυασμό των ιδιοτήτων καυσίμου, της κατανομής μεγέθους, του περιεχομένου σε τέφρα και της μέσης πυκνότητας. Ο σχεδιασμός του αεριοποιητή πρέπει να προσαρμόζεται στις ιδιότητες του καυσίμου.

##### > Διάβρωση (corrosion)

Η διάβρωση αποτελεί πρόβλημα για τις επιφάνειες υψηλής θερμοκρασίας του αεριοποιητή (λαϊμός) και προκαλείται από το συνδυασμό υψηλής θερμοκρασίας και ύπαρξης μολυντών στην τροφοδοσία. Ο σχεδιασμός επομένως πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να μειώνεται η θερμοκρασία ή να εξασφαλίζεται η χρήση ανθεκτικών υλικών.

##### > Παραγωγή πίσσας (Tar Production)

Είναι αδύνατο να αποφευχθεί η παραγωγή πίσσας. Η υπερβολική παραγωγή οφείλεται σε ακατάλληλες ιδιότητες καυσίμου όπως μορφολογία, κατανομή μεγέθους, περιεχόμενη υγρασία και ακατάλληλης ροής των υπολειμμάτων άνθρακα. Επιπλέον,

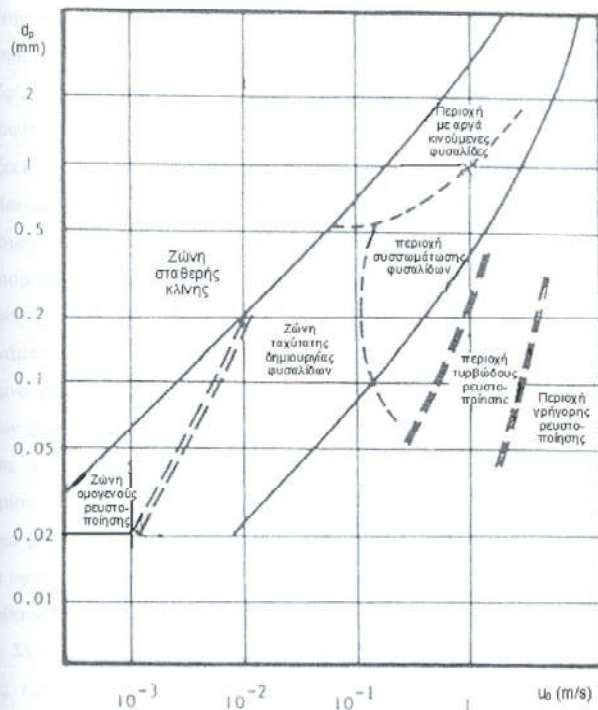
υπερβολική πίσσα παράγεται κατά τη διάρκεια περιόδων ασταθούς ή μερικού φορτίου λειτουργίας. Ο σχεδιασμός ενός αεριοποιητή πρέπει να είναι ανάλογος με τις ιδιότητες καυσίμου και να λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες, συνθήκες πλήρους φορτίου λειτουργίας.

#### 4.3.2 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized bed gasifiers)

Η αεριοποίηση ρευστοποιημένης κλίνης αναπτύχθηκε αρχικά για να ξεπεραστούν τα λειτουργικά προβλήματα αεριοποίησης καυσίμου σταθερής κλίνης με υψηλό περιεχόμενο σε στάχτη. Η θερμοκρασία αεριοποίησης είναι σχετικά σταθερή, περίπου 750-900 °C. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η θερμοκρασία των σωματιδίων είναι ελαφρώς υψηλότερη από τη θερμοκρασία της κλίνης (100-200 °C), εξαιτίας της ταυτόχρονης πραγματοποίησης ενδόθεμων και εξώθεμων αντιδράσεων.

Σε αντίθεση με τους αεριοποιητές σταθερής κλίνης, δεν διαχωρίζονται οι ζώνες αντίδρασης στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης. Ξήρανση, πυρόλυση και αεριοποίηση συμβαίνουν ταυτόχρονα σε όλο τον όγκο του αντιδραστήρα, όπου επικρατεί ομοιόμορφη ανάμειξη και σταθερή θερμοκρασία. Η ρευστοποιημένη κλίμη αποτελείται από αδρανή σωματίδια (άμμος) με τυπική μέση διάμετρο 0,25-2 μm. Το καύσιμο βιομάζας τροφοδοτείται σε μια αιωρούμενη (bubbling) ή ανακυκλοφορούμενη (circulating) θερμή κλίμη άμμου. Η καύση άνθρακα στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (circulating) θεωρείται καλύτερη απ' ό,τι σε εκείνους με αιώρηση (bubbling). Η κλίμη συμπεριφέρεται ως ρευστό και χαρακτηρίζεται από υψηλή τύρβη, τα σωματίδια του καυσίμου αναμειγνύονται γρήγορα με το υλικό της κλίνης, πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις πυρόλυσης και παράγονται τα αντίστοιχα αέρια. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας ο ρυθμός μετατροπής της πίσσας δεν είναι υψηλός.

Το εισερχόμενο καύσιμο στον αντιδραστήρα αναμειγνύεται με το υλικό της κλίνης και κατά την κίνηση τους μέσα στην κλίμη περνούν τα στάδια ξήρανσης, θερμικής διάσπασης και αεριοποίησης. Δεν υπάρχει ειδικός μηχανισμός απομάκρυνσης των υπολειμμάτων, τα οποία αεριοποιούνται τελείως ή διασπώνται σε μικρότερου μεγέθους σωματίδια. Σε αυτή την περίπτωση, τα υπολείμματα συλλέγονται με τη σκόνη και την τέφρα σε κυκλώνα. Έχουν αναπτυχθεί ειδικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων.



Σχήμα 4.11: Περιοχές της ροής

- Περιοχές της ροής

Στους αεριοποιητές σταθερής κλίνης στερεή και αέρια φάση κινούνται σε ξεχωριστές ροές [44]. Αντίθετα, στους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να διακριθούν διάφορες ζώνες στη ροή, που εξαρτώνται από τη διάμετρο των σωματιδίων της κλίνης  $d_p$  και την ταχύτητα αερίου  $u_0$  (σχήμα 4.11), η οποία προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$u_0 = \frac{V}{\Omega}$$

όπου

$u_0$  = επιφανειακή ταχύτητα ρευστοποίησης (m/h)

$V$  = ρυθμός ογκομετρικής ροής αερίου (m<sup>3</sup>/h)

$\Omega$  = διατομή ρευστοποιημένης κλίνης (m<sup>2</sup>)

Στην περιοχή *σταθερής κλίνης (fixed bed region)* τα σωματίδια είναι πολύ μεγάλα και η ταχύτητες αερίου πολύ χαμηλές για ρευστοποίηση. Στη *ζώνη της ομογενούς ρευστοποίησης (homogeneous fluidization zone)*, η κλίνη επεκτείνεται και ρευστοποιείται από την αυξανόμενη ροή αερίου. Η ρευστοποιημένη πια κλίνη σχηματίζει ένα ομογενές μέσο, χωρίς φυσαλίδες.

Μια *περιοχή ταχύτατης δημιουργίας φυσαλίδων (fast bubbling regime)* μπορεί να δημιουργηθεί με σχετικά μικρές ταχύτητες αερίου και μικρά σωματίδια. Το ρευστοποιημένο αέριο κινείται στην κλίνη υπό τη μορφή φυσαλίδων και σε λιγότερο βαθμό μέσω της φάσης του γαλακτώματος. Παρατηρείται περιορισμένη μεταφορά μάζας ανάμεσα στο αέριο που κινείται ανάμεσα στις φυσαλίδες και στο αέριο που κινείται ανοδικά και αργά στη φάση του γαλακτώματος. Για τη γρήγορη δημιουργία φυσαλίδων χρησιμοποιείται το μοντέλο δύο φάσεων της αεριοποίησης.

Για μεγάλα σωματίδια και για υψηλές ταχύτητες αερίου, που είναι χαρακτηριστικές στην καύση άνθρακα, οι φυσαλίδες ανέρχονται με αργότερο ρυθμό συγκριτικά με το γαλάκτωμα. Τα σωματίδια κατακλύζονται από το γαλάκτωμα και δεν είναι εφικτός ο διαχωρισμός της σύνθεσης της αραιής και πυκνής φάσης. Η ροή στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται ως *περιοχή με αργά κινούμενες φυσαλίδες (slow bubbles)*. Στην πυκνή φάση ή φάση γαλακτώματος σχηματίζεται η φάση συνεχούς ροής της κλίνης ενώ η αραιή φάση αποτελείται από πολυάριθμες ευδιάκριτες φυσαλίδες, οι οποίες επεκτείνονται κατά την άνοδό τους, αλλά είναι πιθανό να συσσωματωθούν (*περιοχή συσσωμάτωσης φυσαλίδων-growing bubbles*) ή να διασπαστούν υπό την επίδραση των υλικών της κλίνης. Κάθε φυσαλίδα έχει το σχήμα «πώματος» και ακολουθείται από ένα ρεύμα, για παράδειγμα στερεά σωματίδια που κινούνται ανοδικά μαζί με τη φυσαλίδα. Η φυσαλίδα πλαισιώνεται από ένα σύννεφο, το οποίο περιέχει αέριο που κινείται γύρω από τη φυσαλίδα ή πίσω της.

Στην *περιοχή τυρβώδους ρευστοποίησης (turbulent fluidization regime)* εισέρχεται πλήθος στερεών σωματιδίων οπότε το επίπεδο της κλίνης δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Επιπλέον, δεν υπάρχει προφανής διαχωρισμός μεταξύ φυσαλίδας και γαλακτώματος. Τέτοια περιοχή εμφανίζεται σε σύγχρονες μονάδες καταλυτικής διάσπασης με διπλή κλίνη. Στην *περιοχή της γρήγορης ρευστοποίησης (fast fluidization regime)* μεγάλες ποσότητες στερεών σωματιδίων προστίθενται από το ρευστοποιημένο αέριο. Τέτοιες περιοχές παρατηρούνται σε αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία.



- Θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης

Στην περιοχή του γρήγορου σχηματισμού φυσαλίδων, διακρίνονται δύο φάσεις σε μια ρευστοποιημένη κλίνη [45]. Στη θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης υποθέεται ότι το αέριο ρέει στη φάση γαλακτώματος με ένα ρυθμό που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης. Με την παραπάνω παραδοχή επιτρέπεται ο υπολογισμός της ροής του γαλακτώματος στη κλίνη.

Η σχετική ταχύτητα του αερίου και των σωματιδίων στη φάση γαλακτώματος ισοδυναμεί με την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης:

$$u_c + u_s = \frac{u_{mf}}{\epsilon_{mf}} \quad (1)$$

όπου:

$u_{mf}$  = η ελάχιστη επιφανειακή ταχύτητα ρευστοποίησης, (m/h)

$u_c$  = η απόλυτη ταχύτητα του αερίου στο γαλάκτωμα (ανοδική), (m/h)

$u_s$  = η απόλυτη ταχύτητα σωματιδίου στη φάση γαλακτώματος (καθοδική), (m/h)

$\epsilon_{mf}$  = πορώδες στις συνθήκες ελάχιστης ρευστοποίησης, (m/h)

Ως επιφανειακή ταχύτητα ορίζεται η ταχύτητα του αερίου όταν η ρευστοποιημένη κλίνη δεν περιέχει στερεά σωματίδια. Ο συνολικός ρυθμός ροής του αερίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Omega u_0 = (\text{ροή στη φάση γαλακτώματος}) + (\text{ροή στις φυσαλίδες})$$

$$u_0 = (1 - \delta - \alpha\delta) \epsilon_{mf} u_c + (\delta + \delta\alpha \epsilon_{mf}) u_b \quad (2)$$

όπου

$\delta = V_f/V_t$ , το κλάσμα της κλίνης που περιέχει φυσαλίδες ( $\text{m}^3$  φυσαλίδα/ $\text{m}^3$  κλίνης)

$\alpha = V_w/V_b$ , το κλάσμα του ρεύματος που συνδέεται με τις φυσαλίδες ( $\text{m}^3$  ρεύματος/ $\text{m}^3$  φυσαλίδα)

$u_0$  = επιφανειακή ταχύτητα ρευστοποίησης (m/h)

$u_b$  = απόλυτη ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων (m/h)

Η ποσότητα των σωματιδίων που κινούνται ανοδικά (στο ρεύμα) πρέπει να ισοδυναμεί με την ποσότητα των σωματιδίων που κινούνται καθοδικά στη φάση γαλακτώματος:

$$\Omega(1 - \delta - \alpha\delta) u_s = \alpha\delta u_b \Omega \quad (3)$$

Οπότε:

$$u_s = \frac{\alpha\delta u_b}{1 - \delta - \alpha\delta} \quad (4)$$

Από τις εξισώσεις (1)-(4) υπολογίζεται το κλάσμα  $\delta$ :

$$\delta = \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b - u_{mf} - u_{mf}\alpha} \quad (5)$$

Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαίωρησης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [46]:

$$u_{mf} = 7,90 \cdot 10^{-3} d_p^{1,82} (\rho_s - \rho)^{0,54} / \mu^{0,88} \quad (6)$$

Η ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας υπολογίζεται από:

$$u_b = u_0 - u_{mf} + 1,711 \sqrt{gd_b} \quad (7)$$

όπου  $d_b$  είναι η διάμετρος φυσαλίδας (m) και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/h^2$ )

Το κλάσμα του ρεύματος ( $\alpha$ ) εκτιμάται μεταξύ των τιμών 0,2-0,4. Από τη φύση των εξισώσεων (1)-(4) προκύπτει η ταχύτητα ανόδου του αερίου στη φάση γαλακτώματος:

$$u_v = \frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} - \left( \frac{\alpha u_0}{1 - \delta - \alpha\delta} - \alpha u_{mf} \right) \quad (8)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι η ταχύτητα με δείκτη  $u_e$  μπορεί να γίνει αρνητική, για παράδειγμα του αέριου στη φάση γαλακτώματος κινείται καθοδικά. Αυτό συμβαίνει όταν:

$$\frac{u_0}{u_{mf}} > (1 - \delta - \alpha\delta) \left( 1 + \frac{1}{\alpha\varepsilon_{mf}} \right) \quad (9)$$

#### • Ανάμειξη στερεών σε ρευστοποιημένη κλίνη

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αντιδραστήρων ρευστοποιημένης φάσης είναι τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά ανάμειξης των στερεών καυσίμων. Στα περισσότερα μοντέλα, η στερεή φάση θεωρείται πλήρως αναμεμιγμένη. Πρακτικά, πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές για να εξασφαλιστεί η παραπάνω υπόθεση. Η

ανάμειξη δύο ειδών υλικού εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι:

- i. Το μέγεθος των σωματιδίων
- ii. Η πυκνότητα των σωματιδίων
- iii. Αναλογία πραγματικής και ελάχιστης ταχύτητας ρευστοποίησης ( $u_0/u_{mf}$ )

Όσο περισσότερο τα είδη των υλικών διαφέρουν ως προς το μέγεθος και την πυκνότητα των σωματιδίων, τόσο υψηλότερος εμφανίζεται ο κίνδυνος διαχωρισμού τους. Στην προκειμένη περίπτωση, η βιομάζα επιπλέει στην κορυφή της κλίνης άμμου. Αν συμβεί το παραπάνω, υπάρχει πιθανότητα να μην καταναλωθεί όλο το αζώτο στην κλίνη άμμου, το οποίο θα αντιδράσει τελικά με το καύσιμο στην κορυφή της κλίνης, προκαλώντας τοπικά υψηλές θερμοκρασίες και τελικά συμπίκνωση της άμμου.

Η επίδραση της πυκνότητας καθώς και του μεγέθους των υλικών δίνεται από την παρακάτω εξίσωση κατά Nienow και Rowe [47]. Από την παρακάτω εξίσωση προκύπτει ότι η σημαντικότερη παράμετρος για την ανάμειξη είναι η πυκνότητα των σωματιδίων.

$$M \sim \left( \frac{\rho_H}{\rho_L} \right)^{5/2} \left( \frac{d_L}{d_S} \right)^{1/5}$$

M= ο βαθμός ανάμειξης, κυμαίνεται από 0 (για πλήρη διαχωρισμό) έως 1 (για πλήρη ανάμειξη)

$\rho_H$ = πυκνότητα του βαρύτερου υλικού

$\rho_L$ = πυκνότητα του ελαφρύτερου υλικού

$d_L$ = μέγεθος του μεγαλύτερου σωματιδίου

$d_S$ = μέγεθος του μικρότερου σωματιδίου

Ο καταλληλότερος τρόπος αποφυγής του διαχωρισμού των σωματιδίων είναι η επιλογή κατάλληλης θέσης τροφοδοσίας και η επαρκής αναλογία  $u_0/u_{mf}$ . Για ελαφριά υλικά, όπως υπολείμματα ξύλου ή πριονίδι το καλύτερο σημείο τροφοδοσίας είναι λίγο από την επιφάνεια της κλίνης άμμου. Η επίδραση της ταχύτητας

ρυστοποίησης στην ανάμειξη του πριονιδιού ή των υπολειμμάτων ξύλου με την άμμο έχει ερευνηθεί πειραματικά από τους Masson et al. [48]. Για αναλογίες  $u_0/u_m > 3$  και για μέγεθος σωματιδίων 1,5-5,2 mm παρατηρήθηκε διαχωρισμός, ο οποίος απαντόταν με το μέγεθος των σωματιδίων και την ποσότητα του καυσίμου στην κλίνη. Η ακτινική ανάμειξη θεωρείται προβληματική για αντιδραστήρες διαμέτρου  $\phi > 1m$ . Στους παραπάνω αντιδραστήρες απαιτούνται διαφορετικά σημεία τροφοδοσίας.

#### 4.3.2.1 Αεριοποιητές ρυστοποιημένης κλίνης (Bubbling fluidized bed gasifiers)

Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας της κλίνης κατά την αεριοποίηση της βιομάζας είναι 800-850 °C. Υπάρχει ένα αδρανές υλικό (συνήθως άμμος, αλουμίνα και άλλα πυρίμαχα υλικά για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σύντηξης της κλίνης ή και καταλύτες για τη διάσπαση των πρισσών), που χρησιμεύει σαν μέσο μεταφοράς και μετάδοσης θερμότητας. Στο αδρανές αυτό υλικό η θερμότητα διοχετεύεται μέσω ενός οξειδωτικού μέσου (αέρας ή οξυγόνο), σε συνδυασμό με ή χωρίς ατμό. Το οξειδωτικό αυτό μέσο, προθερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία την οποία αποδίδει στο αδρανές υλικό κατά τη διέλευση του οξειδωτικού διαμέσου της μάζας του αδρανούς υλικού. Η ταχύτητα του αέρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνικήσει τη βαρύτητα που ασκείται από τα σωματίδια και να τα διατηρήσει αιωρούμενα [1].

Το μέγεθος των σωματιδίων στην κλίνη είναι 0.5-3 mm. Τα παραγόμενα θερμά αέρια εξέρχονται από την κορυφή ενώ η στάχτη από τον πυθμένα του αντιδραστήρα. Η άριστη ανάμειξη που λαμβάνει χώρα μέσα στον αντιδραστήρα προσφέρει άριστη μεταφορά θερμότητας και μάζας, υψηλό βαθμό μετατροπής, σταθερό θερμοκρασιακό προφίλ, δυνατότητα χρήσης καυσίμου μη σταθερής υγρασίας (μέχρι και επί 50 %) και γρηγορότερες αντιδράσεις.

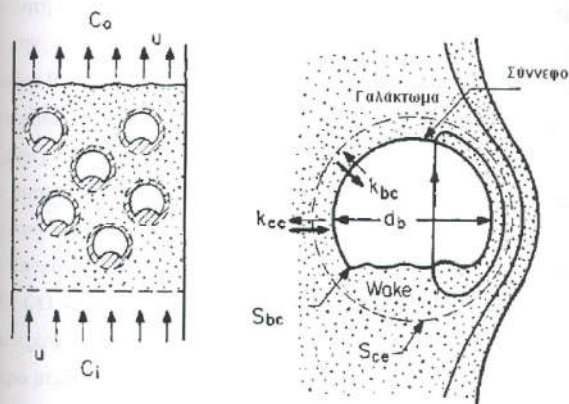
Το μεγαλύτερο τμήμα μετατροπής του καυσίμου προς αέριο επιτελείται εντός της κλίνης και ένα μικρό ποσό της μετατροπής συνεχίζει στον υπερκείμενο χώρο της κλίνης, εξαιτίας αντιδράσεων των εισερχόμενων σωματιδίων και ειδικότερα της θερμικής διάσπασης των πρισσών ουσιών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η μετατροπή του άνθρακα αγγίζει το 100 %, εκτός και αν εμφανιστεί το φαινόμενο της μάζικης μεταφοράς των πολύ λεπτών σωματιδίων έξω από τον αντιδραστήρα, φαινόμενο το οποίο μπορεί να συμβεί σε διαμορφώσεις αντιδραστήρων με εισαγωγή της τροφοδοσίας στο υψηλότερο σημείο.

Υπάρχει περίπτωση να χαθεί η δυνατότητα ρευστοποίησης λόγω σύντηξης της κλίνης και αποτελεί ένα αρκετά σύνηθες φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από τα θερμικά συστατικά της παραγόμενης στάχτης. Οι ενώσεις των αλκαλι-μετάλλων που προέρχονται από τη στάχτη της βιομάζας (συνήθως καλίου και νατρίου) σχηματίζουν χαμηλού σημείου τήξης ευτηκτικά με το πυρίτιο που περιέχεται στην άμμο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δημιουργία μεγάλων συσσωματωμάτων τα οποία συντελούν στη μειωμένη δυνατότητα ρευστοποίησης. Το φαινόμενο αυτό αποφεύγεται εύκολα, με μικρή μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας της κλίνης.

Το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο όταν πρόκειται για χρήση στερεών αστικών απορριμμάτων ως βιομάζα, χωρίς να έχει γίνει διαλογή γυαλιών προηγουμένως. Τότε, χρησιμοποιείται σαν αδρανές πληρωτικό υλικό αλουμίνα ή ακόμα καλύτερα άμμος χρωμίτη.

#### • Μέγεθος φυσαλίδας

Το μέγεθος των φυσαλίδων θεωρείται σημαντική παράμετρος για την μοντελοποίηση αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης, εφόσον η συγκεκριμένη παράμετρος εμφανίζεται σε πληθώρα εμπειρικών εξισώσεων, για παράδειγμα στις σχετικές με την ταχύτητα ανόδου της φυσαλίδας και τον ρυθμό εναλλαγής αερίου μεταξύ των φυσαλίδων και της φάσης γαλακτώματος. Οι μικρότερες φυσαλίδες ανοούν την μεταφορά αερίου ανάμεσα στις δύο φάσεις [44].



Σημια 4.12: Μέγεθος φυσαλίδας



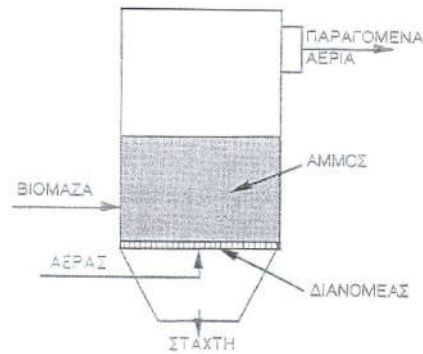
Παρά το γεγονός ότι το μέγεθος των φυσαλίδων αυξάνεται διαρκώς από το διανομέα προς την κορυφή του αντιδραστήρα, η διάμετρος τους  $d_B$  θεωρείται σταθερή στα περισσότερα μοντέλα (σχήμα 4.12) [103]. Πληθώρα εμπειρικών σχέσεων εφαρμόζονται για την πρόβλεψη του μεγέθους της φυσαλίδας  $d_B$ . Συνήθως το πεδίο εφαρμογής τους περιορίζεται από τις ειδικότερες συνθήκες του κάθε πειράματος για το οποίο και προορίζονται. Ο ρυθμός «γένεσης και θανάτου» των φυσαλίδων δεν μπορεί να προβλεφθεί εφόσον οι φυσαλίδες μπορούν να ενωθούν ή να διασπαστούν εξαιτίας εσωτερικών παραμέτρων, όπως οι αγωγοί μεταφοράς θερμότητας της ρευστοποιημένης κλίνης. Επιπλέον, θεωρείται σημαντικός ο τύπος του διανομέα. Σε πληθώρα περιπτώσεων το μέγεθος της φυσαλίδας χρησιμοποιείται ως εμπειρική παράμετρος για την επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

#### 4.3.2.2 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία (Circulating fluidized bed gasifiers)

Η ταχύτητα του αέρα είναι περίπου 4-6 m/sec και ένα τμήμα του υλικού της κλίνης απομακρύνεται και συλλέγεται από έναν κυκλώνα προτού τροφοδοτηθεί ξανά στην κλίνη. Έτσι, βελτιώνεται το ποσοστό μετατροπής του άνθρακα ακόμα περισσότερο. Το μέγεθος των σωματιδίων του υλικού της κλίνης είναι 0,1-0,8 mm. Τα καύσιμα εισάγονται ξηρά, αφού πρώτα ξηραθούν μέχρι 10-20 % υγρασία, πριν να τροφοδοτηθούν στον αεριοποιητή με σκοπό να παραχθεί υψηλής θερμιδικής αξίας αέριο και να ελαχιστοποιηθεί η ολική επένδυση. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μέσα στον αεριοποιητή από 800 °C έως 1000 °C, ανάλογα με το καύσιμο και τις εφαρμογές του. Μετά την εισαγωγή του καύσιμου στον αντιδραστήρα, ο οποίος περιέχει ρευστοποιημένα θερμά στερεά και αέριο, το πρώτο στάδιο της αντίδρασης (μετά την ξήρανση που είναι ταχύτερη) είναι η πυρόλυση, η οποία παράγει αέρια, ανθρακούχο υπόλειμμα (char) και πίσσες (tar).

Όταν αυτά τα προϊόντα κινούνται ανοδικά, στον αντιδραστήρα λαμβάνει χώρα η αντίδραση του δεύτερου σταδίου, η οποία μπορεί να διαχωριστεί στις: ετερογενείς αντιδράσεις (παραγόμενα  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}$  και  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) και σε ομοιογενείς, με προϊόντα ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_{2y+2}$ ). Το παραγόμενο αέριο εισέρχεται σε ένα θερμό κυκλώνα και εξέρχεται από το σύστημα με χαμηλές ποσότητες λεπτόκοκκης σκόνης. Το μεγαλύτερο μέρος των στερεών του συστήματος διαχωρίζονται στον κυκλώνα και επιστρέφουν στο χαμηλότερο τμήμα του αεριοποιητή. Αυτά τα στερεά περιέχουν κάρβουνο, το οποίο καίγεται με τον ρευστοποιημένο αέρα. Αυτή η διεργασία καύσης

επιτελείται στο κατώτερο τμήμα του αντιδραστήρα και παράγει την απαιτούμενη θερμότητα για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων αεριοποίησης και κατά συνέπεια αποτελεί ένα αυτόθερμο σύστημα (direct fluidized bed gasifier).



Σχήμα 4-13: Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης

Το ακατέργαστο αέριο προϊόν που χρησιμοποιείται σε διεργασίες παραγωγής θερμότητας κλειστού κυκλώματος ή σε λέβητες για την απόληψη και εκμετάλλευση της λανθάνουσας θερμότητας του αερίου. Το παραπάνω σύστημα εφαρμόζεται ευρέως, για την μετατροπή αποβλήτων επεξεργασίας ξύλου, σε βιομηχανίες χυροπολτού, για την τροφοδοσία περιστρεφόμενων αντιδραστήρων παραγωγής άσβεστου καιτσιμέντου, καθώς επίσης παραγωγής ατμού υψηλής πίεσης με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης φαίνεται στο σχήμα 4-13. Ατμός ή καθαρό οξυγόνο αντί για αέρα τροφοδοτούνται κατά την αεριοποίηση. Αν η διαδικασία πραγματοποιείται με καθαρό οξυγόνο η θερμιδική αξία του παραγόμενου αερίου είναι υψηλότερη εξαιτίας της απουσίας αζώτου (το οποίο βρίσκεται στον αέρα). Παρόλα αυτά, η παραγωγή με καθαρό οξυγόνο είναι ακριβή.

#### > Εξισώσεις δυναμικής των ρευστών

Τα σωματίδια σε ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία εξισορροπούν λόγω βαρυτικών δυνάμεων και ανωστικών δυνάμεων εξαιτίας της ανερχόμενης ροής του αερίου.[49]

Η ταχύτητα λόγω βαρύτητας ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_g = 2/9 R^2 (\rho_{\text{particle}} - \rho_{\text{gas}}) g / \mu$$

Όπου:

$V_g$  = ταχύτητα αερίου (m/s)

$V$  = ταχύτητα λόγω βαρύτητας (m/s)

$R$  = ακτίνα σωματιδίου (m)

$\rho_{\text{particle}}$  = πυκνότητα σωματιδίου ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{\text{gas}}$  = πυκνότητα αερίου ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\text{m/sec}^2$ )

$\mu$  = ιξώδες του αερίου

Η δύναμη λόγω βαρύτητας ( $V_{\text{gas}}$ ) ισοδυναμεί με τη δύναμη λόγω της ανερχόμενης ταχύτητας αερίου η οποία εξαρτάται από τη ροή του αέρα, τις χημικές αντιδράσεις του καυσίμου, τη θερμοκρασία του αερίου και την διατομή του αντιδραστήρα.

$$V_{\text{gas}} = Q_{\text{air}} S (T_g / T_n) / \text{Area}$$

Όπου:

$V_{\text{gas}}$  = ταχύτητα αερίου

$Q_{\text{air}}$  = ροή αέρα ( $\text{Nm}^3/\text{s}$ )

$S$  = αναλογία mol αερίου που καίγονται/ mol αέρα

$T_g$  = θερμοκρασία αερίου (K)

$T_n$  = 273 (K)

Area = κάθετη διατομή του αντιδραστήρα

Η πραγματική επιφανειακή ταχύτητα αερίου είναι σημαντικά υψηλότερη, καθώς το αέριο κινείται στην περιογή και ανάμεσα στα μεγαλύτερα σωματίδια κλίνης. Επομένως, πολύ μικρά σωματίδια μπορεί να παρουσιάσουν υψηλές ταχύτητες και οι δυνάμεις αδράνειας θεωρούνται σημαντικές.

Η ταχύτητα αερίου είναι αρχικά μηδέν στο τοίχωμα του αντιδραστήρα και υψηλότερη στο μέσον του. Επομένως, τα σωματίδια ρέουν προς τα κάτω κατά μήκος των τοιχωμάτων. Στον υπόλοιπο αντιδραστήρα, τα μικρά σωματίδια ρέουν κυρίως ανοδικά ενώ τα μεγάλα και βαριά σωματίδια κινούνται καθοδικά ακόμα και στο κέντρο του αντιδραστήρα. Λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των

σωματιδίων γίνεται ξεκάθαρο ότι η ταχύτητα αερίου δρα καταλυτικά για τα μικρότερα σωματίδια, τα οποία διακόπτουν την κίνησή τους από τα μεγαλύτερα, τα οποία με τη σειρά τους εμποδίζονται από άλλα σωματίδια.

Κατά την ανερχόμενη ροή, τα περισσότερα σωματίδια κινούνται ανοδικά ή καθοδικά, ενώ η οριζόντια κίνηση είναι σχετικά μικρή εκτός από τα σημεία όπου τα ανακυκλοφορούμενα στερεά εισάγονται στον αντιδραστήρα πλευρικά. Το παραπάνω προκαλεί σημαντική τύρβη και τα μικρότερα σωματίδια με υψηλότερο περιεχόμενο άνθρακα επανεισάγονται στον αντιδραστήρα. Για να αποφευχθεί η εισαγωγή τους με υψηλή ταχύτητα, κατά το θερμό ρεύμα ανόδου επιβάλλεται ρύθμιση των ταχυτήτων ανόδου. Ο χρόνος παραμονής αυξάνεται καθώς και η πιθανότητα δέσμευσης των μικρότερων σωματιδίων από άλλα μεγαλύτερα. Τα μικρά σωματίδια μπορούν να προσκολληθούν σε μεγαλύτερα, γεγονός εξαιρετικά σημαντικό από τεχνική άποψη, αφού υπό διαφορετικές συνθήκες θα λαμβάνονταν υψηλά ποσά σκόνης.

Για υψηλή ταχύτητα ρευστοαιώρησης οι δυνάμεις διάσπασης των σωματιδίων είναι υψηλότερες από τις δυνάμεις συσσωμάτωσής τους. Για λειτουργία της κλίνης ως μια συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας, η συσσωμάτωση είναι έντονη και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της. Η ακριβής τιμή της παραπάνω ταχύτητας εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των στερεών σωματιδίων καθώς και από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Στην περίπτωση φτωχής ανάμειξης το παραπάνω συμβαίνει τοπικά στον αντιδραστήρα και επομένως απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός του.

Προκειμένου να επιτευχθεί ρευστοποιημένη κλίνη με ανακυκλοφορία η ταχύτητα του ρευστού πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτυγχάνεται ανακυκλοφορία των σωματιδίων στην κλίνη. Τα σωματίδια μεταφέρονται από τη ροή, σπύγγονται σε κυκλώνα και επιστρέφουν στην κλίνη. Για να διατηρείται η ανακυκλοφορία στην κλίνη, τα σωματίδια πρέπει να κινούνται τουλάχιστον με μια ελάχιστη τιμή ταχύτητας. Για παράδειγμα, για σφαιρικά σωματίδια αλουμίνας με διάμετρο 100  $\mu\text{m}$  και πυκνότητα 3400  $\text{kg}/\text{m}^3$ , οι τιμές της παραπάνω ταχύτητας κυμαίνονται μεταξύ 5-20  $\text{cm}/\text{sec}$  και αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και την πτώση της πίεσης. Ο ελάχιστος ογκομετρικός ρυθμός ροής που απαιτείται για τη λειτουργία της ρευστοποιημένης κλίνης με ανακυκλοφορία υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την κάθετη διατομή του αντιδραστήρα με την παραπάνω τιμή ταχύτητας



#### 4.3.2.3 Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης με πίεση (Pressurized fluidized bed gasifiers)

Το σύστημα είναι το ίδιο, εκτός από την ύπαρξη αυξημένης πίεσης. Έτσι χρησιμοποιείται αεριοποιητής, ο οποίος είναι ένας αντιδραστήρας υπό πίεση, καθώς επίσης και όλο το βοηθητικό τμήμα του εξοπλισμού, όπως οι τροφοδότες καυσίμου και τα συστήματα απομάκρυνσης της στάχτης και καθαρισμού του παραγομένου αερίου [1]. Η χημεία της διεργασίας μεταβάλλεται σε κάποιο βαθμό με την πίεση. Επιρρέάζεται ο σχηματισμός αμμωνίας και πισσών, αλλά κυρίως καθορίζεται ο σχηματισμός μικρών ασβεστόλιθων και δολομίτη, ο οποίος αποτελεί εξ' αρχής συνήθως και το υλικό πλήρωσης της κλίνης, είτε είναι σε διάπυρη μορφή (έχει αποβάλλει το CO<sub>2</sub> που υπήρχε στο σώμα του) είτε όχι. Η πίεση στο σύστημα επιτυγχάνεται συνήθως από ένα αεριοστροβίλο.

Η ψύξη του παραγόμενου αερίου είναι απαραίτητη εξαιτίας: α) η θερμοκρασία του αερίου αυξάνει τη συμπίεση β) η θερμοκρασία αντοχής των συμπιεστών είναι περιορισμένη γ) θερμά αέρια καταλαμβάνουν μεγάλους όγκους απαιτώντας επιπλέον ενέργεια για συμπίεση.

Στην αεριοποίηση υπό συνθήκες πίεσης η πίεση του παραγόμενου αερίου εξισώνεται με την πίεση του αεροστροβίλου. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους αεριοποίησης είναι:

1. Χαμηλά επίπεδα εσωτερικής κατανάλωσης ενέργειας
2. Συμπαγής σχεδιασμός δηλαδή χαμηλό κόστος επένδυσης
3. Μείωση της τέφρας

Τα μειονεκτήματα είναι:

1. Πολύπλοκη διαδικασία τροφοδοσίας καυσίμου
2. Συσκευές υψηλής θερμοκρασίας καθαρισμού του παραγόμενου αερίου
3. Πολύπλοκη εγκατάσταση και επιπλέον κόστος

#### 4.3.2.4 Σύγκριση των συστημάτων ρευστοποιημένης κλίνης ατμοσφαιρικής και πιεστικής λειτουργίας

Οι αντιδραστήρες πιεστικής λειτουργίας παρουσιάζουν τα ακόλουθα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά:

- Η τροφοδοσία του καυσίμου στον αντιδραστήρα είναι περίπλοκη και έχει υψηλό κόστος



- Το κόστος κεφαλαίου για τους πιεστικούς αντιδραστήρες είναι υψηλό συγκρινόμενο με το αντίστοιχο για τους ατμοσφαιρικούς, παρότι οι διαστάσεις τους με τα παρεμφερή συστήματα είναι αρκετά μικρότερες από αυτές των ατμοσφαιρικών. Συγκριτικά, αναφέρεται ότι πιεστικά συστήματα αεριοποίησης μπορεί να κοστίζουν μέχρι και τέσσερις φορές περισσότερο απ' ό,τι τα αντίστοιχα ατμοσφαιρικά για παραγωγή ενέργειας μέχρι και 20 MW. Αυτό το μειονέκτημα ισοσκελίζεται από το γεγονός ότι για την ίδια ποσότητα παραγωγής ενέργειας οι πιεστικοί αντιδραστήρες έχουν μεγαλύτερο ποσοστό απόδοσης. Πρέπει να τονισθεί ότι αν και τα πιεστικής λειτουργίας συστήματα έχουν μικρότερο όγκο συγκρινόμενα με τα ατμοσφαιρικής λειτουργίας υπάρχει μικρό κέρδος από την επίδραση της πίεσης πάνω στην κινητική της αντίδρασης ή ελάχιστο θερμοδυναμικό πλεονέκτημα, επειδή η βιομάζα είναι δεκάδες φορές πιο ενεργή σε σύγκριση με τον άνθρακα, όπου τα πιεστικής λειτουργίας συστήματα προσφέρουν αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα λειτουργίας.
- Η παροχή του παραγομένου αερίου προς το θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου βρίσκεται ήδη υπό πίεση, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη συμπίεσης του αερίου πριν τον θάλαμο και επιτρέποντας κάποια υψηλότερα όρια στην ποσότητα πίεσης που θα δεχθεί ο αεριοστρόβιλος απ' ό,τι με τους ατμοσφαιρικούς αντιδραστήρες συνδεδεμένους με αεριοστρόβιλους.
- Το φιλτράρισμα εν θερμώ του αερίου με τους πιεστικούς αντιδραστήρες μειώνει τις απώλειες θερμότητας και πίεσης (απώλειες ενέργειας) και γίνεται ευκολότερα και απλούστερα συγκρινόμενο με εκείνο στους ατμοσφαιρικούς. Η χρήση φιλτραρίσματος εν θερμώ με τους πιεστικούς αντιδραστήρες αποδεικνύεται φθηνότερη από τη χρήση πλυντρίδας για τους ατμοσφαιρικούς για τον καθαρισμό του αερίου.
- Ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος εξαιτίας της κατακράτησης της λανθάνουσας θερμότητας και της χημικής ενέργειας των πηλοσωδών ουσιών που περιέχονται στο παραγόμενο καύσιμο αέριο και στην αποφυγή συμπίεσης του αερίου πριν από τον αεριοστρόβιλο. Οι μοναδικές αξιοσημείωτες απώλειες ενέργειας είναι αυτές προς το περιβάλλον και της τροφοδοσίας αδρανούς αερίου κατά την τροφοδοσία της βιομάζας, της τάξεως του 5-8 %, εξασφαλίζοντας έτσι ένα συντελεστή απόδοσης για τον αντιδραστήρα της τάξης του 92-95 %. Ένας ατμοσφαιρικός αντιδραστήρας χρησιμοποιώντας πλυντρίδα με νερό και συμπίεση

του παραγομένου και καθαρισμένου αερίου για να τροφοδοτήσει το θάλαμο καύσης ενός αεριοστρόβιλου δίνει ένα ανάλογο συντελεστή απόδοσης της τάξης του 82-85 %, εξαρτώμενο από το μέγεθος της μονάδας και το σχεδιασμό.

Οι αντιδραστήρες ατμοσφαιρικής λειτουργίας παρουσιάζουν τα ακόλουθα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά:

- Το παραγόμενο αέριο για χρήση του σαν καύσιμο αεριοστρόβιλου πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις, ενώ για εφαρμογές του αερίου σε MEK, οι όροι είναι ηπιότεροι και δεν απαιτείται πίεση.
- Το κόστος κεφαλαίου είναι αξιοσημείωτα χαμηλότερο για μεγέθη μέχρι και 30 MW.

Και για τους δύο τύπους αντιδραστήρων η σύσταση καθώς επίσης και η θερμογόνος δύναμη του παραγομένου αερίου δεν διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους.

#### **4.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα**

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αεριοποιητών σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης παρατίθενται παρακάτω [50] με βάση πέντε βασικά κριτήρια.

##### **1. Τεχνολογία:**

###### **Αεριοποιητές σταθερής κλίνης:**

Πλεονεκτήματα:

- απλή και στιβαρή κατασκευή
- χαμηλή πτώση πίεσης
- κατάλληλοι για ποικίλες εφαρμογές
- απλοί, αξιόπιστοι και κατάλληλοι για ορισμένα καύσιμα
- λειτουργία σε μερικό φορτίο (20-110 %)

Μειονεκτήματα:

- εσωτερικά κινούμενα μέρη, πολύπλοκα μηχανικά μέρη
- ανομοιογενής κατανομή θερμοκρασίας
- χαμηλή εναλλαγή θερμότητας
- πιθανή συσσώρευση στάχτης στη σχάρα
- χρόνος παραμονής για στερεά: ώρες έως μέρες/ για αέρια: δευτερόλεπτα
- υψηλός χρόνος παραμονής για στερεά

- ο χαμηλή ειδική χωρητικότητα
- ο περιορισμένη χωρητικότητα από το ρυθμό ροής αερίου
- ο υψηλός χρόνος προθέρμανσης
- ο περιορισμός στην εναλλαγή καυσίμων με διαφορετική θερμογόνο δύναμη
- ο ανομοιόμορφο θερμοκρασιακό προφίλ στην κλίνη

#### Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης

##### Πλεονεκτήματα:

- ο απλή τεχνολογία χωρίς κινούμενα μέρη
- ο ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή
- ο ικανοποιητική εναλλαγή θερμότητας
- ο εύκολη εκκίνηση και διακοπή
- ο λειτουργία σε μερικό φορτίο (50-120 %)
- ο εναλλαγή διαφορετικών
- ο ικανοποιητική ανάμειξη αερίου-στερεού
- ο χρόνος παραμονής για στερεά: δευτερόλεπτα έως λεπτά/ για αέρια: δευτερόλεπτα
- ο υψηλός ρυθμός αντίδρασης, μικρός χρόνος παραμονής των στερεών
- ο εμπορικά διαθέσιμοι αεριοποιητές
- ο υψηλή ειδική χωρητικότητα

##### Μειονεκτήματα:

- ο δυσκολότερη λειτουργία συγκριτικά με τους αεριοποιητές σταθερής κλίνης
- ο υψηλή πτώση πίεσης
- ο περιορισμένη χωρητικότητα σε υψηλές ταχύτητες αερίου καυσίμων

## 2. Χρήση υλικού

#### Αεριοποιητές σταθερής κλίνης:

##### Πλεονεκτήματα:

- ο δυνατότητα τροφοδοσίας με υψηλό περιεχόμενο στάχτης
- ο το παραγόμενο αέριο έχει μικρή περιεκτικότητα σε πίσσα και φανόλες (κατερχόμενης ροής)
- ο χαμηλό περιεχόμενο σκόνης στο παραγόμενο αέριο (ανερχόμενης ροής)
- ο σχετικά καθαρό παραγόμενο αέριο (κατερχόμενης ροής)

##### Μειονεκτήματα:

- ο κατάλληλοι μόνο για καταλύτες που απενεργοποιούνται πολύ αργά
- ο περιορισμένο μέγεθος τροφοδοσίας

- ομοιόμορφες πελέτες μεγέθους 8-50 mm απαιτούνται
- υπερβολική ποσότητα ατμού για έλεγχο θερμοκρασίας οδηγεί σε θερμικές απώλειες και απαιτεί ειδική επεξεργασία συμπύκνωσης
- το παραγόμενο αέριο περιέχει πίσσα, έλαια, φαινόλες, αμμωνία και απαιτείται διαχωρισμός και καθαρισμός (ανερχόμενης ροής)
- υψηλό περιεχόμενο σκόνης στο παραγόμενο αέριο (κατερχόμενης ροής)
- εκτεταμένος καθαρισμός του αερίου για χρήση σε μηχανές (ανερχόμενης ροής)

#### Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης

Προνεκτήματα:

- εύρος διακυμάνσεων στην ποιότητα του καυσίμου
- ποικιλία μεγέθους σωματιδίων
- μεγάλο εύρος κατανομής μεγέθους (0,2-50mm)
- χαμηλό ποσό πίσσας και φαινόλης στο παραγόμενο αέριο
- σταθερή σύνθεση αερίου εξαιτίας των ομοιόμορφων συνθηκών στην κλίνη

Μειονεκτήματα:

- μεγαλύτερα σωματίδια στο παραγόμενο αέριο απ' ότι στους αεριοποιητές σταθερής κλίνης
- αναπόφευκτη απώλεια άνθρακα στην ιπτάμενη τέφρα εξαιτίας της μη ομοιόμορφης σύνθεσης στερεών στην κλίνη
- υψηλή περιεκτικότητα σκόνης στην αέρια φάση

### 3. Χρήση ενέργειας

#### Αεριοποιητές σταθερής κλίνης:

Προνεκτήματα:

- υψηλή απόδοση μετατροπής άνθρακα
- υψηλή θερμική απόδοση
- χαμηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου

#### Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης

Προνεκτήματα:

- υψηλή απόδοση μετατροπής άνθρακα

Μειονεκτήματα:

- υψηλή απαίτηση ενέργειας λόγω ύπαρξης ανεμιστήρων για ανάμειξη του αέρα

#### 4. Περιβαλλοντικά κριτήρια

##### Αεριοποιητές σταθερής κλίνης:

Πλεονέκτημα:

- ο δυνατότητα τήξης υπολειμμάτων καύσης

##### Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης

Μειονέκτημα:

- ο παραμονή στάχτης (μη τήξη της)

#### 5. Οικονομικά κριτήρια

##### Αεριοποιητές σταθερής κλίνης:

Μειονέκτημα:

- ο υψηλό κόστος επένδυσης

##### Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης

Πλεονέκτημα:

- ο χαμηλό κόστος επένδυσης

Χαρακτηριστικά	Σταθερή κλίνη	Ρευστοποιημένη κλίνη
Μέγεθος καυσίμου (mm)	10-100	0-20
Στάχτη (% κ.β.)	<6	<25
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	800-1400	750-950
Έλεγχος	Απλός	Μέτριας δυσκολίας
Υλικό κατασκευής	Ήπιο	Ανθεκτικό ασάλι
Χωρητικότητα (MW)	<2,5	1-50
Χρόνος εκκίνησης	λεπτά	ώρες
Πίσσα (gr/Nm <sup>3</sup> )	<3	<5
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (MJ/Nm <sup>3</sup> )	4,5	5,1

Πίνακας 4-2: Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης.

Στον πίνακα 4-2 συγκεντρώνονται τεχνικές και λειτουργικές παράμετροι για τα συστήματα σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης.



#### 4.5 Άλλα είδη αεριοποιητών

Εκτός από τους αεριοποιητές σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης υπάρχουν και άλλες κατηγορίες αντιδραστήρων [44], οι οποίοι ταξινομούνται παρακάτω σύμφωνα με την αυξανόμενη τάση που παρουσιάζουν για ανάμειξη:

##### **1) Αεριοποιητής περιστρεφόμενης καμίνου (Rotary kiln gasifier)**

Σε αυτό τον αεριοποιητή η επαφή ανάμεσα στην αργά αναδύομενη βιομάζα και την αέρια φάση είναι σχετικά περιορισμένη. Έτσι, η αεριοποίηση των υπολειμμάτων άνθρακα δεν ολοκληρώνεται εκτός και αν επιτευχθούν μεγάλοι χρόνοι παραμονής. Η επιφάνεια επαφής μεταξύ στερεών και αερίου ανανεώνεται περιοδικά από μια ομάδα περιστροφικών βραχιόνων που λειτουργούν σε διαδοχικά στάδια.

##### **2) Αεριοποιητής πολλαπλών στομιών (Spouted bed gasifier)**

Αποτελεί μέρος των αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης. Μέσω ενός ή περισσότερων στομιών διοχετεύονται στην κλίνη τραχεία υλικά. Παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της ανάμειξης υλικών με διαφορετική πυκνότητα και μέγεθος σωματιδίων. Ο Tels και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν τέτοιου είδους αεριοποιητή για την πυρόλυση βιομάζας [51].

## 5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΧΥΡΟΥ ΣΙΤΗΡΩΝ

### 5.1 Μοντέλο

#### 5.1.1 Διακριτοποίηση του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης

Στην παρακάτω μελέτη [52] αναπτύχθηκε μοντέλο δύο φάσεων για την πρόβλεψη της λειτουργίας ρευστοποιημένης κλίνης αεριοποίησης αέρα-ατμού κατά τη διάρκεια σταθερών και δυναμικών συνθηκών λειτουργίας, το οποίο στηρίζεται στη θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης. Ισοζύγια ενέργειας και μάζας λαμβάνονται υπόψη καθώς και η ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας με σκοπό τον υπολογισμό των κλασμάτων mol του αερίου. Η ρευστοποιημένη κλίνη διαιρείται σε τρεις ζώνες (jetting, bubbling και slugging) και οι συντελεστές μεταφοράς μάζας και θερμότητας υπολογίστηκαν για κάθε ζώνη για τις φάσεις φυσαλίδας και γαλακτώματος. Το μοντέλο περιλαμβάνει τις θερμοδυναμικές και υδροδυναμικές ιδιότητες της κλίνης.

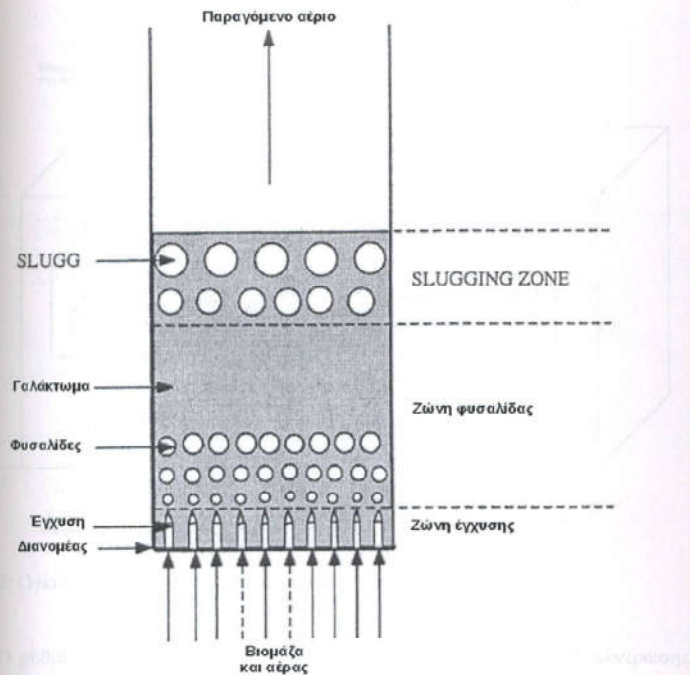
Το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο αποτελείται από δύο στάδια: α) ακαριαία εξαέρωση (devolatilization) του άχυρου και καύση του υπολειμματος άνθρακα στον πόθρα του αεριοποιητή και β) τη διαδικασία αεριοποίησης στην κλίνη. Επομένως, οι δύο φάσεις παρουσίαση της ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνει φαινόμενα έγχυσης, δημιουργίας φυσαλίδων, φάση slug και ισοζύγια ενέργειας. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει το διαχωρισμό της ρευστοποιημένης κλίνης σε τρεις περιοχές: έγχυση, φυσαλίδες και στερεά σωματίδια. Οι παρακάτω παραδοχές γίνονται για απλοποίηση του συστήματος.

- (α) η ρευστοποιημένη κλίνη αποτελείται από μια αραιή φάση (έγχυση, φυσαλίδες, και ή slug) και μια πυκνή φάση (φάση γαλακτώματος)
- (β) η φάση γαλακτώματος αποτελείται από δυο επιμέρους φάσεις: ενδιάμεση αέρια φάση (interstitial gas) και στερεή φάση (solid phase)
- (γ) φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας λαμβάνουν χώρα μεταξύ της αραιής φάσης και του αερίου καθώς και μεταξύ του αερίου και των στερεών
- (δ) ο αέρας εγχύεται ομοιόμορφα στην κλίνη μέσω ακροφυσίων ενσωματωμένων σε διανομέα και στη συνέχεια σχηματίζονται φυσαλίδες, οι οποίες κινούνται ανοδικά στην κλίνη και ενώνονται με άλλες φυσαλίδες προς σχηματισμό slugs
- (ε) η περιοχή slugging σχηματίζεται όταν η διάμετρος φυσαλίδας ξεπερνά το 1/3 της διαμέτρου της κλίνης

(στ) όλα τα αέρια της κλίνης είναι σε συνεχή ροή και τα αέρια της αραιής φάσης δεν περιέχουν στερεά σωματίδια (καθαρά αέρια φάση)

(ζ) τα αέρια θεωρούνται ιδανικά

(η) το παραγόμενο αέριο αποτελείται από CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>

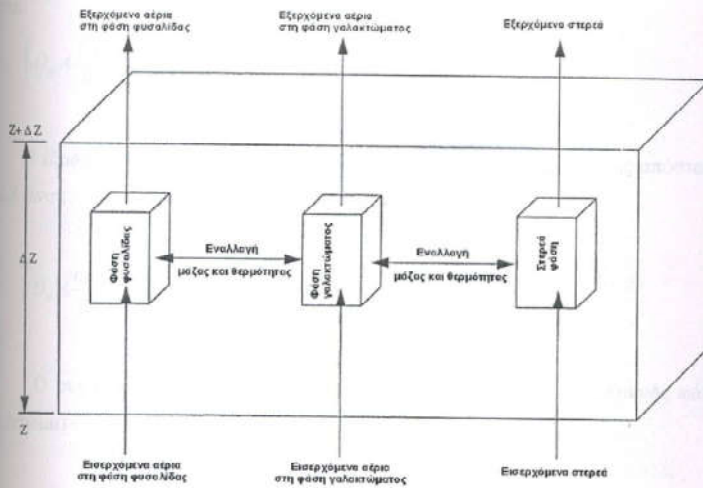


Σχήμα 5.1: Ζώνες του αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης

### 5.1.2 Ισοζύγιο μάζας

Στο σχήμα 5.2 απεικονίζεται ένας όγκος ελέγχου στη ρευστοποιημένη κλίνη ( $\Delta V = A \Delta Z$ ), μέσα στον οποίο αιωρείται μείγμα ι αερίων. Τα αέρια ι προκύπτουν (με ρυθμό R) από τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κλίνη. Το ισοζύγιο μάζας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \text{Ρυθμός} \\ \text{συσσώρευσης} \\ \text{μάζας} \\ \text{στοιχείων} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Ροή} \\ \text{μάζας} \\ \text{ι στοιχείων} \\ \text{μέσω ροής} \\ \text{αερίου} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Ροή} \\ \text{μάζας} \\ \text{ι στοιχείων} \\ \text{μέσω} \\ \text{διάχυσης} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Ρυθμός εναλλαγής} \\ \text{μάζας ι στοιχείων} \\ \text{μεταξιάφσεων} \\ \text{φυσάλιδας και} \\ \text{γαλακτώματος} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Ρυθμός} \\ \text{παραγωγής} \\ \text{ι στοιχείων} \\ \text{μέσω αντιδράσεων} \end{bmatrix} \quad (1)$$



Σχήμα 5.2: Όγκος ελέγχου στη ρευστοποιημένη κλίνη

Ο ρυθμός συσσώρευσης μάζας των  $i$  στοιχείων (μεταβολή συγκέντρωσης) υπολογίζεται στον όγκο ελέγχου στη φάση της φυσάλιδας και είναι:

$$\frac{\partial \rho_{ib}}{\partial t} A \Delta Z \quad (2)$$

Η παροχή των  $i$  στοιχείων μέσω της ροής αερίων κατά μήκος της κάθετης απόστασης  $Z$  είναι:

$$A(\rho_{ib} U_b)_z \quad (3)$$

Η έξοδος των  $i$  στοιχείων μέσω της ροής αερίων κατά μήκος της κάθετης απόστασης  $Z+\Delta Z$  είναι:

$$A(\rho_{ib} U_b)|_{Z+\Delta Z} \quad (4)$$

Η εισροή των  $i$  στοιχείων μέσω διάχυσης κατά μήκος της κάθετης απόστασης  $Z$  είναι:

$$\left( D_{ib} A \frac{\partial \rho_{ib}}{\partial Z} \right)_Z \quad (5)$$

Η έξοδος των  $i$  στοιχείων λόγω διάχυσης κατά μήκος της κάθετης απόστασης  $Z+\Delta Z$  είναι:

$$\left( D_{ib} A \frac{\partial \rho_{ib}}{\partial Z} \right)_{Z+\Delta Z} \quad (6)$$

Ο ρυθμός εναλλαγής αερίων μεταξύ αραιής (φυσαλίδα) και πυκνής φάσης (γυλάκτωμα) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$K_{be}(\rho_{ib} - \rho_{ie})A\Delta Z \quad (7)$$

Ο ρυθμός σχηματισμού των αερίων από τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κλίνη είναι:

$$R_{ib}A\Delta Z \quad (8)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (2) έως (8) στην εξίσωση (1), διαιρώντας με τον όρο  $(A \Delta Z)$ , πολλαπλασιάζοντας με τον αριθμό των mol/Kg και θεωρώντας όρια  $Z \rightarrow 0$  προκύπτει η παρακάτω εξίσωση.

$$\frac{\partial C_{ib}}{\partial t} = D_{ib} \frac{\partial^2 C_{ib}}{\partial Z^2} - \frac{\partial}{\partial Z} (C_{ib} U_b) + K_{je} (C_{ib} - C_{ie}) + R_{ij} \quad (9)$$



Ο Fitzgerald [53] αναφέρει ότι η ρευστοποιημένη κλίνη αποτελείται από δυο φάσεις: τη φάση γαλακτώματος (συνεχή φάση), στην οποία τα σωματίδια είναι ομοιόμορφα καταναμημένα στο ρεύμα αερίων και την αραιή φάση (ασυνεχή φάση), η οποία είναι καθαρά αέρια φάση, χωρίς σωματίδια, στη μορφή φυσαλίδων, καναλιών και slugs. Η πυκνότητα και ροή της φάσης γαλακτώματος είναι ανεξάρτητες από την εμφανειακή ταχύτητα αερίου.

Η εξίσωση (9) ισχύει και για τις τρεις ζώνες.

*Ισοζύγιο μάζας για περιοχή έγχυσης (jet region)*

$$\frac{\partial C_y}{\partial t} = D_y \frac{\partial^2 C_y}{\partial Z^2} - \frac{\partial}{\partial Z} (C_y U_j) + K_{je} (C_g - C_{ie}) + R_y \quad (10)$$

*Ισοζύγιο μάζας για slugging region*

$$\frac{\partial C_{is}}{\partial t} = D_{is} \frac{\partial^2 C_{is}}{\partial Z^2} - \frac{\partial}{\partial Z} (C_{is} U_s) + K_{se} (C_{is} - C_{ie}) + R_{is} \quad (11)$$

Ο διαχωρισμός των φάσεων φυσαλίδας και γαλακτώματος υφίσταται σύμφωνα με τη θεωρία δύο φάσεων της ρευστοποίησης. Επομένως, το ισοζύγιο μάζας για το ενδιάμεσο αέριο (interstitial gas) είναι [54]:

*Ισοζύγιο μάζας για φάση γαλακτώματος*

$$\varepsilon \frac{\partial C_{ie}}{\partial t} = D_{ie} \frac{\partial^2 C_{ie}}{\partial Z^2} - \frac{U_g}{\delta_e} \frac{\partial C_{ie}}{\partial Z} + \frac{\delta_b K_{be}}{\delta_e} (C_{ib} U_b) + K_{be} (C_{ib} - C_{ie}) + R_{ie} \quad (12)$$

Η εξίσωση (12) έχει την ίδια μορφή και για τις τρεις περιοχές έγχυσης, φυσαλίδας και slugging (jet, bubbling, slugging). Ο μοναδικός παράγοντας που διαφοροποιείται στην εξίσωση ανάλογα με την περιοχή είναι ο συντελεστής διάχυσης αερίων  $K_{je}$ ,  $K_{be}$  και  $K_{se}$ , για τις τρεις περιοχές αντίστοιχα.

Αντίστοιχα, προκύπτει το ισοζύγιο μάζας του υπολείμματος άνθρακα.

$$\beta \frac{\partial C_s}{\partial t} = W_m - W_{out} + R_s \quad (13)$$

- Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες είναι οι εξής:

$$C_{ij} = C_{i0}$$

$$C_{ib} = C_{i0}$$

$$C_{ic} = C_{i0} \quad \text{για } t=0 \text{ και } 0 \leq Z \leq H \quad (14)$$

$$C_{is} = C_{i0}$$

$$C_s = 0$$

- Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες είναι οι εξής:

$$C_{ib} - D_{ib} \frac{\partial C_{ib}}{\partial Z} = C_{i0}$$

$$\text{για } Z = 0 \text{ και } t \geq 0 \quad (15)$$

$$C_{ic} - D_{ic} \frac{\partial C_{ic}}{\partial Z} = C_{i0}$$

$$C_{ij} = C_{ib} \quad \text{για } Z = L_j \text{ και } t > 0 \quad (16)$$

$$C_{is} = C_{ib} \quad \text{για } Z = L_{sb} \text{ και } t > 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_{ib}}{\partial Z} = 0$$

$$\text{για } Z = H \text{ και } t > 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_{ib}}{\partial Z} = 0$$

Στις παραπάνω συνθήκες έχουν ληφθεί υπόψη τα πέντε αέρια ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CH}_4$ ) και το υπόλειμμα άνθρακα.

### 5.1.3 Ισοζύγιο ενέργειας

Το ισοζύγιο ενέργειας εφαρμόζεται για κάθε στοιχείο στις φάσεις φυσαλίδας, γαλακτώματος και στερεών, σύμφωνα με την ισορροπία αερίου και στερεών.

### 5.1.3.1 Φάση φυσαλίδας

Το ισοζύγιο ενέργειας στη φάση φυσαλίδας είναι το παρακάτω και προκύπτει για όγκο ελέγχου  $\Delta V$ .

$$\begin{bmatrix} \text{ροή} \\ \text{συσσώρευση} \\ \text{θερμότητας} \\ \text{στη φάση} \\ \text{φυσαλίδας} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{εισερχόμενη} \\ \text{θερμότητα} \\ \text{μέσω της ροής αερίου} \\ \text{στη φάση φυσαλίδας} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{εξερχόμενη} \\ \text{θερμότητα} \\ \text{μέσω της ροής αερίου} \\ \text{στη φάση φυσαλίδας} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{εναλλαγή} \\ \text{θερμότητας} \\ \text{μεταξύ} \\ \text{φάσης} \\ \text{φυσαλίδας -} \\ \text{γαλακτώματος} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \text{παραγόμενη} \\ \text{θερμότητα} \\ \text{μέσω χημικών} \\ \text{αντιδράσεων} \\ \text{στη φάση} \\ \text{φυσαλίδας} \end{bmatrix}$$

εξίσωση (19)

Η συσσώρευση θερμότητας στη φάση φυσαλίδας στον όγκο ελέγχου  $\Delta V$  περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$A\Delta Z \sum_{i=1}^7 \frac{\partial (C_{ib} C_{pb} T_b)}{\partial t} \quad (20)$$

Η εισροή θερμότητας μέσω της ροής αερίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$AU_b \sum_{i=1}^7 C_{ib} \Delta H|_z \quad (21)$$

Η εκροή θερμότητας μέσω της ροής αερίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$AU_b \sum_{i=1}^7 C_{ib} \Delta H|_{z+\Delta Z} \quad (22)$$

Η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ φάσης φυσαλίδας και γαλακτώματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta A \Delta Z (H_{bc}) (T_e - T_b) \quad (23)$$

Η παραγόμενη θερμότητα μέσω των χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στον αντιδραστήρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta A \Delta Z (R_i \Delta H_{ri}) \quad (24)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (20) έως (24) στην εξίσωση (19), με διαίρεση με τον όρο  $(A \Delta Z)$  και θεωρώντας τα όρια  $Z \rightarrow 0$  προκύπτει το ολικό ισοζύγιο ενέργειας στη φάση της φυσαλίδας.

$$\frac{\partial C_{ib} C_{pb} T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \sum_{i=1}^7 (U_b C_{ib} \Delta H_{ib}) + \delta H_{bc} (T_e - T_b) + \delta R_i \Delta H_{ri} \quad (25)$$

### 5.1.3.2 Φάση γαλακτώματος (α)

Η παραπάνω τεχνική εφαρμόστηκε για να περιγραφεί το ισοζύγιο ενέργειας και του ενδιάμεσου αερίου στη φάση γαλακτώματος και είναι το εξής:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{ροή} \\ \text{συσώρευσης} \\ \text{θερμότητας στη} \\ \text{φάση} \\ \text{γαλακτώματος} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{εισερχόμενη} \\ \text{θερμότητα} \\ \text{μέσω της ροής αερίου στη} \\ \text{φάση} \\ \text{γαλακτώματος} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{εξερχόμενη} \\ \text{θερμότητα} \\ \text{μέσω της ροής αερίου στη} \\ \text{φάση} \\ \text{γαλακτώματος} \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{εναλλαγή} \\ \text{θερμότητας} \\ \text{μεταξύ} \\ \text{φάσης φυσαλίδας} \\ \text{και} \\ \text{γαλακτώματος} \\ \text{στον όγκο ελέγχου} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{εναλλαγή} \\ \text{θερμότητας} \\ \text{μεταξύ} \\ \text{στερεού και} \\ \text{αερίου} \\ \text{στη φάση} \\ \text{γαλακτώματος} \end{array} \right] \pm \left[ \begin{array}{l} \text{παραγόμενη} \\ \text{θερμότητα} \\ \text{στη φάση} \\ \text{γαλακτώματος} \\ \text{μέσω} \\ \text{χημικών αντιδράσεων} \end{array} \right]$$

εξίσωση (26)

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (20) έως (24) στην εξίσωση (26), με διαίρεση με τον όρο  $(A \Delta Z)$  και θεωρώντας τα όρια  $Z \rightarrow 0$  προκύπτει το ολικό ισοζύγιο ενέργειας στη φάση γαλακτώματος.

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_{ic} C_{pe} T_e) = \frac{\partial}{\partial Z} \sum_{i=1}^7 (U_e C_{ie} \Delta H_{ie}) + (1-\delta)(H_{be})(T_b - T_e) + (1-\delta)(1-e_{mf})k_s \left( \frac{2k_g}{d_p} \right) (T_s - T_e) + \left( 1-\delta \sum_{i=1}^4 \Delta H_{ri}^0 \right) \quad (27)$$

### 5.1.3.3. Φάση γαλακτώματος (β)

Η κατανομή θερμοκρασίας των στερεών στην κλίνη προκύπτει από το παρακάτω ισοζύγιο ενέργειας.

$$\begin{bmatrix} \text{ρυθμός} \\ \text{συσσώρευση} \\ \text{θερμότητας} \\ \text{στα σωματίδια} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{εισερχόμενη} \\ \text{ενθαλπία} \\ \text{μέσω} \\ \text{αερίων} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{εξερχόμενη} \\ \text{ενθαλπία} \\ \text{μέσω} \\ \text{αερίων} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{εισερχόμενη} \\ \text{ενθαλπία} \\ \text{μέσω} \\ \text{χημικών} \\ \text{αντιδράσεων} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{απώλεια} \\ \text{θερμότητας} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας των σωματιδίων από την εξίσωση (28) προκύπτει ως εξής:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{W' C_{ps}} \left( \frac{\partial}{\partial Z} \left( U_b \sum_{i=1}^7 C_{ib} \Delta H_{ib} + U_e \sum_{i=1}^7 C_{ie} \Delta H_{ie} \right) + \delta R_1 \Delta H_{r1}^0 \right) + (1-\delta) \sum_{i=1}^4 R_i \Delta H_{ri}^0 - \left( \frac{T_s - T_e}{1/2\pi r_i h_c + \ln r_o / r_i / 2\pi_0 l + 1/2\pi_0 h_o} \right) \quad (29)$$

- **Αρχικές συνθήκες**

Οι αρχικές συνθήκες ορίζονται ως εξής:

$$T_j = T_{i0}$$

$$Tb = T_{i0}$$

$$\text{για } t=0 \text{ και } 0 \leq Z \leq H \quad (30)$$

$$Tb = T_{i0}$$

$$Tie = T_{i0}$$



- **Οριακές συνθήκες**

Οι οριακές συνθήκες ορίζονται ως εξής:

$$T_j = T_{g'} \quad \text{για } Z = 0 \text{ και } t \geq 0 \quad (31)$$

$$T_c = T_{g'}$$

$$T_j = T_b \quad \text{για } Z = L_j \text{ και } t > 0$$

$$T_s = T_b \quad \text{για } Z = L_{sb} \text{ και } t > 0$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial Z} = 0$$

$$\text{για } Z = H \text{ και } t > 0$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial Z} = 0$$

#### 5.1.4 Σχηματισμός πίσσας

Ο χημικός τύπος της πίσσας είναι  $CH_xO_y$ . Οι παράμετροι (x,y) εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό θέρμανσης. Άμεση εξαέρωση των πτητικών του άνθρακα παρατηρήθηκε σε διάφορες έρευνες για την αεριοποίηση ρευστοποιημένης κλίνης.[55], [56]. Ο Ergudenler [57] παρατήρησε ότι η αιωμάκρυνση της πίσσας καταλήγει σε βελτίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Από την απόδοση του άνθρακα σιτηρών σε πίσσα, με βάση τον Corella et al [58] προέκυψε η παρακάτω εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της παραγόμενης πίσσας.

$$TAR_y = 3598EXP^{-0.0029Ts}$$

#### 5.1.5 Εξαέρωση βιομάζας

Η εξαίτηση είναι πολύπλοκη διαδικασία και η κατανομή των παραγόμενων προϊόντων στην κλίνη ( $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$  και  $CH_4$ ) εξαρτώνται από το ρυθμό θέρμανσης και το χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα [59]. Η παραδοχή ότι τα παραγόμενα προϊόντα είναι μόνο τα παραπάνω, υποστηρίζεται από τα πειραματικά αποτελέσματα των πιλοτικών μονάδων [57],[60],[61,]. Στην πραγματικότητα, στο παραγόμενο αέριο υπήρχαν μικρές ποσότητες  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  οι οποίες θεωρούνται ως  $CH_4$  και δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μελέτης. Η απλοποιημένη αυτή σύνθεση του παραγόμενου αερίου θεωρείται μια πρώτη προσέγγιση. Για να εκτιμηθεί

η σύσταση των πτητικών θεωρείται ότι 1Kg άχυρο κατά την εξαέρωσή του απελευθερώνει  $n_{O_2}$ ,  $n_{H_2}$  και  $n_C$ , mol  $O_2$ , mol  $H_2$  και mol C αντίστοιχα.

#### Ισοζύγια μάζας

$$\text{Οξυγόνο: } n_{CO} + 2 n_{CO_2} + n_{H_2O} = n_O \quad (36)$$

$$\text{Άνθρακας: } n_{CO} + 2 n_{CO_2} + n_{CH_4} = n_C \quad (37)$$

$$\text{Υδρογόνο: } 2 n_{H_2O} + 4 n_{CH_4} + 2 n_{H_2} = n_H \quad (38)$$

Το υπόλειμμα άνθρακα θεωρείται ότι δεν περιέχει υδρογόνο ή οξυγόνο, παρά μόνο καθαρό άνθρακα. Από την παρακάτω εξίσωση προκύπτει ο αριθμός των mol C.

$$n_C = \frac{C_{\text{biomass}}(1 - R_s)}{12} \quad (39)$$

Για απλοποίηση ορίζονται τα παρακάτω κλάσματα:

$$R_{CO} = \frac{n_{CO}}{n_{CO_2}} \quad (40)$$

$$R_{CH} = \frac{n_{CH_4}}{n_{H_2}} \quad (41)$$

Επομένως, ο ακριβής αριθμός των mol από εξαέρωση 1Kg άχυρου μπορεί να υπολογιστεί.

#### **5.1.6 Ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας για υπολογισμό της σύνθεσης αερίου**

Τα mol  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$  και υπολείμματος άνθρακα αντιδρούν μεταξύ τους, ενώ το  $N_2$  θεωρείται αδρανές αέριο. Ο συνολικός αριθμός των mol στον αεριοποιητή είναι:

$$n_{total} = n_{CO} + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{H_2} + n_{CH_4} + n_{O_2} + n_{N_2} \quad (42)$$

Ο υπολογισμός της ελαχιστοποίησης της ελεύθερης ενέργειας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Smith και Vanness [62]).

$$\Delta G_f^0 + RT \ln(y_i P_i) + \sum_k \lambda_k \alpha_{ik} = 0 \quad (43)$$

Η εξίσωση (43) αντιπροσωπεύει N+W εξισώσεις, όπου N ο αριθμός των παραγόμενων αερίων και W τα ισοζύγια των στοιχείων. Δυο είναι τα αντιδρώντα συστήματα: η φάση φυσαλίδας (είναι καθαρά αέρια φάση που περιέχει CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>), η φάση γαλακτώματος (φάση στην οποία υπάρχουν στερεά σωματίδια άνθρακα) και η αέρια φάση στην οποία υπάρχουν όλα τα αέρια (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>). Το άζωτο είναι αδρανές αέριο και η αντίδρασή του με το αέριο δεν λαμβάνεται υπόψη. Σύμφωνα με την προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε από (Bacon et al.[63]) για τη λύση της εξίσωσης (43), απαιτείται αρχικά η γραμμικοποίηση του όρου ln(y<sub>i</sub>P) με τη χρήση εκθετών Taylor και ακολουθεί η λύση των γραμμικών εξισώσεων με διαδοχικές επαναλήψεις. Η λύση μπορεί να γραφεί με την παρακάτω γραμμική μορφή:

$$AX=B \quad (44)$$

### 3.1.7 Υδροδυναμικοί παράμετροι ρευστοποιημένης κλίνης

#### 3.1.7.1 Διάμετρος και πυκνότητα σωματιδίου

Για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί που προέρχονται από την ανομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στην κλίνη χρησιμοποιείται η μέση διάμετρος των σωματιδίων και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$d_p = \frac{1}{\sum_i^n x_i / d_{pi}} \quad (45)$$

Όλες οι υδροδυναμικές παράμετροι βασίζονται στο δυαδικό μείγμα των σωματιδίων του υπολείμματος άνθρακα (char) και του αδρανούς υλικού της κλίνης. Η

μέση διάμετρος ( $d_b$ ) και πυκνότητα ( $\rho_b$ ) των σωματιδίων του μείγματος υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις (46) και (47), αντίστοιχα.

$$d_b = \frac{d_c d_{cr} (m_c + m_{cr})}{d_c m_{cr} + d_{cr} m_c} \quad (46)$$

και

$$\rho_b = \frac{d_c d_{cr} (m_c + m_{cr})}{d_c m_{cr} / \rho_{cr} + d_{cr} m_c / \rho_c} \quad (47)$$

### 5.1.7.2 Κενό μεταξύ των σωματιδίων (voidage) στην ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης

Για την πρόβλεψη του ελάχιστου κενού μεταξύ των σωματιδίων ( $\epsilon_{mf}$ ) χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση των Abrahamssen και Geldart [64].

$$\epsilon_{mf} = 0,40025 + 603,7 d_p \quad (48)$$

### 5.1.7.3 Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης

Η ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης ( $U_{mf}$ ) είναι η ταχύτητα στην οποία η κλίνη περνά από την σταθερή κατάσταση στην ρευστοποιημένη. Η ( $U_{mf}$ ) είναι συνάρτηση του σχήματος, του μεγέθους, της πυκνότητας των σωματιδίων και των ιδιοτήτων του ρευστοποιημένου αερίου. Υπάρχει πλήθος εξισώσεων για τον υπολογισμό της  $U_{mf}$ . Για τον υπολογισμό της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοαιώρησης για άχρωρο σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοαιώρησης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που αναπτύχθηκε από τους Botterill και Bessant [65].

$$U_{mf} = \left( \frac{\mu}{\rho_g d_p} \right) \left[ \sqrt{(1135,7 + 0,0408 A_r)} - 33,7 \right] \quad (49)$$

Ο αριθμός Αρχιμήδη υπολογίζεται ως εξής:

$$A_r = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (50)$$

#### 5.1.7.4 Ταχύτητα φυσαλίδων

Η ταχύτητα φυσαλίδας ( $U_b$ ) υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης που αναπτύχθηκε από τους Davidson και Harison [66].

$$U_b = U - U_{mf} + 0,711\sqrt{gd_b} \quad (51)$$

Οι υδροδυναμικοί παράμετροι της κλίνης σχετίζονται με τη διάμετρο των φυσαλίδων στην περιοχή φυσαλίδας. Θεωρείται ότι οι φυσαλίδες έχουν ομοίμορφο μέγεθος σε οποιοδήποτε σημείο της κλίνης ενώ αυξάνουν σε μέγεθος αφού συσσωματωθούν με άλλες φυσαλίδες, καθώς κινούνται ανοδικά στην κλίση. Οι Mori και Wen [67] πρότειναν την παρακάτω εμπειρική σχέση για την αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων.

$$d_p = d_{bm} - (d_{bm} - d_{b0}) \exp\left(\frac{0,3Z}{d_i}\right) \quad (52)$$

Οι όροι  $d_{bm}$  και  $d_{b0}$  υπολογίζονται ως εξής:

$$d_{bm} = 1,64[A(U - U_{mf})]^{0,4} \quad (53)$$

$$d_{b0} = 0,872\left(\frac{A(U - U_{mf})}{n_d}\right)^{0,4} \quad (54)$$

#### 5.1.7.5 Ταχύτητα στην περιοχή slugging

Η ταχύτητα φυσαλίδας στην περιοχή slugging υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση κατά Mori και Wen [67].

$$U_s = U - U_{mf} + 0,35\sqrt{gd_b} \quad (55)$$

#### 5.1.7.6 Ταχύτητα στην περιοχή γαλακτώματος

Η ταχύτητα στην περιοχή γαλακτώματος ( $U_e$ ) υπολογίζεται ως εξής [66]:

$$U_e = \frac{U_{mf}}{(1 - \delta)} \quad (56)$$



Το κλάσμα όγκου στη φάση φυσαλίδας ( $\delta$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$\delta = \frac{(U - U_{mf})}{U_b} \quad (57)$$

### 5.1.8 Εισαγωγή αέρα (jet region)

Ο αέρας εισάγεται ομοιόμορφα στον αντιδραστήρα μέσω των ακροφυσίων του διανομέα.

#### 5.1.8.1 Βάθος εισαγωγής

Το βάθος εισαγωγής του αέρα στην κλίνη, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (Meiry [68]).

$$\frac{L_j}{d_\phi} = 5.2 \left( \frac{\rho_g d_\phi}{\rho_s d_p} \right)^{0.3} \left( 1.3 \left( \frac{U_\phi^2}{d_\phi g} \right) - 1 \right) \quad (58)$$

#### 5.1.8.2 Συντελεστής μεταφοράς μάζας στη ζώνη έγχυσης

Η μεταφορά μάζας μεταξύ της φάσης έγχυσης και γαλακτώματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [69].

$$(k_{jc})_j = \frac{4k_j}{d_\phi \rho_j} \quad (59)$$

#### 5.1.8.3 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη ζώνη έγχυσης

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της φάσης έγχυσης και γαλακτώματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [70].

$$(H_{jc})_j = \frac{4h_j}{d_\phi} \quad (60)$$

### 5.1.9 Φάση φυσαλίδας (bubble zone)

Η περιοχή φυσαλίδας ξεκινά όταν η διάμετρος φυσαλίδας ισοδυναμεί με το 1/3 της διαμέτρου της κλίνης.

### 5.1.9.1 Συντελεστής μεταφοράς μάζας στη φάση φυσαλίδας

Η μεταφορά μάζας μεταξύ των φάσεων φυσαλίδας και γαλακτώματος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [71].

$$(k_{bc})_b = \frac{0.11}{d_b} \quad (61)$$

### 5.1.9.2 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη φάση φυσαλίδας

Η φάση φυσαλίδας αποτελείται από πολυάριθμες ευδιάκριτες φυσαλίδες, οι οποίες πλαισιώνονται από ένα σύννεφο αερίου (cloud) που κινείται γύρω από τη φυσαλίδα ή πίσω της (wake). Η μεταφορά μάζας μεταξύ των φάσεων φυσαλίδας και γαλακτώματος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [72].

Φυσαλίδα-σύννεφο ( cloud/ wake)

$$(H_{bc})_b = 4.5 \left( \frac{U_{mf} CC_{PK}}{d_p} \right) + \frac{10.4 (k_g CC_{PK})^{0.5}}{d_b^{1.25}} \quad (62)$$

Σύννεφο (cloud / wake)-γαλάκτωμα

$$(H_{ce})_b = 6.78 \frac{(e_{mf} k_g CC_{PK} U_b)^{0.5}}{d_b^3} \quad (63)$$

Φυσαλίδα-γαλάκτωμα

$$\frac{1}{(H_{bc})_b} = \frac{1}{(H_{bc})_b} + \frac{1}{(H_{ce})_b} \quad (64)$$

## 5.1.10 Περιοχή slugging

### 5.1.10.1 Ύψος slugging

Η περιοχή slugging ξεκινά όταν η διάμετρος φυσαλίδας ισοδυναμεί με το 1/3 της διαμέτρου της κλίνης.

### 5.1.10.2 Συντελεστής μεταφοράς μάζας στην περιοχή slugging

Η μεταφορά μάζας των φάσεων slug-cloud στην οποία λαμβάνεται υπόψη η διάχυση των αερίων και η εξαναγκασμένη ροή λόγω του ανερχόμενου ρεύματος υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (Homeland και Davidson [73]).

$$(K_{bc})_s = \frac{1}{d_t m} \left( U_{mf} + \frac{16 e_{mf} I \left( \frac{D_g}{\pi} \right)^{0.5} \left( \frac{g}{d_t} \right)^{0.25}}{1 + e_{mf}} \right) \quad (65)$$

Οι όροι  $m$  και  $I$  υπολογίζονται ως εξής:

$$m = \frac{H - L_b - L_j}{d_t} - 0.495 \left( \frac{H - L_b - L_j}{d_t} \right)^{0.5} + 0.061 \quad (66)$$

$$I = \left( \frac{H - L_b - L_j}{d_t} \right)^{0.8625} \quad (67)$$

Οι παρακάτω εξισώσεις (Ragaman και Potter [74]) δίνουν το συντελεστή μεταφοράς μάζας μεταξύ σύννεφου-γαλακτώματος και slug-γαλακτώματος, αντίστοιχα.

$$(K_{cc})_s = \frac{1 - \delta}{TD d_t \delta} \left( 0.35 e_{mf} (g d_t)^{0.5} - U_{mf} \right) \quad (68)$$

$$\frac{1}{(K_{bc})_s} = \frac{1}{(K_{bc})_s} + \frac{1}{(K_{cc})_s} \quad (69)$$

### 5.1.10.3 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή slugging

Η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ της περιοχής slugging και της φάσης γαλακτώματος υπολογίζεται ως εξής [74]:

$$(H_{bc})_s = \frac{1}{d_t m} \left( U_{mf} CC_{pk} + \frac{16 e_{mf} \left( \frac{k_g CC_{pk}}{\pi} \right)^{0.5} \left( \frac{g}{d_t} \right)^{0.5}}{1 + e_{mf}} \right) \quad (70)$$

$$(H_{ce})_s = \frac{1-\delta}{TDd_i\delta} (0.35e_{mf}(gd_i)^{0.5} - U_{mf}) CC_{pg} \quad (71)$$

$$\frac{1}{(H_{bc})_s} = \frac{1}{(H_{bc})_s} + \frac{1}{(H_{ce})_s} \quad (72)$$

#### 5.1.11 Μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενδιάμεσου αερίου (interstitial gas)-στερεών

Η αντίσταση της μεταφοράς μάζας ανάμεσα στο ενδιάμεσο αέριο και στην επιφάνεια των στερεών περιλαμβάνεται στους νόμους που περιέχουν τους ρυθμούς των συγκεντρώσεων στις ετερογενείς αντιδράσεις. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $h_p$ ) αερίων και στερεών δίνεται από την παρακάτω σχέση (Ranz και Marshall [75]).

$$Nu = 2.0 + \alpha(Pr)^b (Re)^c \quad (73)$$

Οι αριθμοί Nusselt, Prandtl και Reynold's υπολογίζονται ως εξής:

$$Nu = \frac{h_p d_p}{k_g} \quad (74)$$

$$Pr = \frac{V}{A} \quad (75)$$

$$Re = \frac{\rho d_p U_b}{\mu} \quad (76)$$

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ σωματιδίων και ενδιάμεσου αερίου υπολογίζεται θεωρώντας κάθε σωματίδιο σφαιρικό και βυθισμένο σε αδρανές ρευστό.

$$h_p = \frac{2.0k_g}{d_p} \quad (77)$$

### 5.1.12 Μεταφορά και θερμοδυναμικές ιδιότητες

#### 5.1.12.1 Ιξώδες αερίων

Το ιξώδες των αερίων είναι πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ως προς τη θερμοκρασία και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση [76]

$$\mu = a_1 + b_1T + c_1T^2 + d_1T^3 + e_1T^4 + f_1T^5 \quad (78)$$

Το ιξώδες του ατμού δίνεται κατά Toulkian et al. [77] και είναι:

$$\mu_{H_2O} = [80.4 + 0.407(T - 273.15) \times 10^{-7}] \text{ με } 273 > T > 973(\text{K}) \quad (79)$$

#### 5.1.12.2 Ιξώδες του μίγματος αερίων

Το ιξώδες του μίγματος αερίων υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\mu_g = \sum_{i=1}^7 y_i \mu_i \quad (80)$$

#### 5.1.12.3 Θερμική αγωγιμότητα αερίων

Η θερμική αγωγιμότητα είναι πολυώνυμο τρίτου βαθμού ως προς τη θερμοκρασία και υπολογίζεται κατά Toulkian et al. [78] ως εξής:

$$K_{g,i} = a_2 + b_2T + c_2T^2 + d_2T^3 \quad (81)$$

#### 5.1.12.4 Θερμική αγωγιμότητα μίγματος αερίων

Η θερμική αγωγιμότητα του μίγματος αερίων υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$K_g = \sum_{i=1}^7 y_i K_{g,i} \quad (82)$$

#### 5.1.12.5 Θερμική χωρητικότητα

Η θερμική χωρητικότητα χρησιμοποιείται για να διορθώσει την ελεύθερη ενέργεια ( $G^0f$ ), τη θερμότητα σχηματισμού ( $H^0f$ ) και την ενθαλπία του μίγματος αερίων σε δεδομένη θερμοκρασία. Σε όλους τους υπολογισμούς τα αέρια και τα μείγματα αερίων θεωρούνται ιδανικά (η θερμότητα ανάμειξης των αερίων και η



επίδραση της πίεσης στην ενθαλπία θεωρούνται αμελητέα). Ως κατάσταση αναφοράς ορίζεται πίεση 1atm και θερμοκρασία 298 K.Επομένως, η μέση θερμική χωρητικότητα υπολογίζεται κατά Reid et al [79] με την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{p,i} = a_3 + b_3T + c_3T^2 + d_3T^3 \quad (83)$$

#### 5.1.12.6 Θερμική χωρητικότητα μίγματος αερίων

Η θερμική χωρητικότητα του μίγματος αερίων υπολογίζεται ως εξής [79].

$$C_{pR} = \sum_{i=1}^7 y_i C_{pR,i} \quad (84)$$

#### 5.1.12.7 Θερμότητα σχηματισμού

Η θερμότητα σχηματισμού των αερίων για θερμοκρασία αναφοράς 25 °C δίνεται κατά Reid και Prausnitz [79]. Η θερμότητα σχηματισμού της αντίδρασης στους 25 °C υπολογίζεται από τη θερμότητα σχηματισμού των αερίων ως εξής:

$$\Delta H_{\sigma}^0 = \sum_{i=1}^N V_i \Delta f_i^0 \quad (85)$$

#### 5.1.12.8 Ανώτερη θερμογόνος δύναμη

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται κατά [79] ως εξής:

$$HHV = \sum_{i=1}^7 \Delta H_{C_i} \quad (86)$$

## **5.2 Πείραμα**

### **5.2.1 Εισαγωγή**

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αεριοποίησης δύο φάσεων αέρα-ατμού πραγματοποιήθηκε πείραμα σε αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης με άχυρο σιτηρών ως βιομάζα και για ποικίλες τιμές ταχύτητας ρευστοαίωρησης, ρυθμού ροής ατμού και αναλογίας βιομάζας ατμού. Οι προβλέψεις του μοντέλου και τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσίασαν ομοιομορφία για όλες της εξεταζόμενες συνθήκες λειτουργίας. Ο ρυθμός συσχέτισης ( $R^2$ ) για την παραγωγή αερίου ήταν 0,75 γεγονός που οφείλεται στην υπόθεση ότι τα αέρια συμπεριφέρονται ιδανικά. Αντίθετα, προβλέψεις υψηλής ακριβείας (0,88-0,98) έγιναν όσον αφορά στη θερμοκρασία των φάσεων φυσαλίδας, γαλακτώματος και στερεών, τα κλάσματα mol των  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  και  $N_2$  καθώς και την ανώτερη θερμογόνο δύναμη του παραγόμενου αερίου.

### **5.2.2 Περιγραφή πειράματος**

Για την διεξαγωγή του πειράματος [80] απαιτήθηκε σύστημα προεπεξεργασίας και τροφοδοσίας της βιομάζας (άχυρο σιτηρών) καθώς και μονάδα αεριοποίησης ρευστοποιημένης κλίνης. Το σύστημα αεριοποίησης αποτελείται από μονάδα παροχής αέρα, μονάδα παροχής ατμού, μονάδα δειγματοληψίας των αερίων, αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης, μονάδα καθαρισμού του παραγόμενου αερίου, σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας και της πτώσης πίεσης και μονάδα μέτρησης των αερίων.

Θερμή άμμος αλουμίνας ( $1500\text{ }^{\circ}C$ ) σε σφαιρικό μέγεθος, χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές υλικό της κλίνης και τοποθετήθηκε στον αντιδραστήρα στο απαιτούμενο ύψος κλίνης. Τα κύρια χαρακτηριστικά και η χημική σύνθεση της αλουμίνας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Ως βιομάζα χρησιμοποιείται άχυρο σιτηρών σε μικρά δέματα ( $0.46m \times 0.48m \times 0.70m$ ), η οποία οδηγείται σε ξηραντήρα ( $50\text{ }^{\circ}C$ ) ώστε να αποκτήσει επιθυμητή υγρασία ( $10 \pm 1\%$ ) προκειμένου να τροφοδοτηθεί στον αντιδραστήρα.

Χαρακτηριστικά	Τιμή	Μονάδες
<b>Πυκνότητα</b>		
Σωματιδίου	3450	Kg/m <sup>3</sup>
Μέση	2000	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Μέγεθος σωματιδίου</b>		
Μέγιστο	500	μm
Μέσο	380	μm
Ελάχιστο	300	μm
Ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαίωρησης	0,15	m/s
<b>Χημική σύνθεση</b>		
Αλουμίνας (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8,50-90,00	%
Σίλικας (SiO <sub>2</sub> )	8,0-10,00	%
Μαγνήσιο (MgO)	0,5-2,0	%
Σόδα (Na <sub>2</sub> O)	0,1-0,4	%
Οξείδιο σιδήρου (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,1-0,3	%
Τιτάνια (TiO <sub>2</sub> )	0,05-0,15	%
Ποτάσιο (K <sub>2</sub> O)	0,01-0,05	%

Πίνακας 5.1: Κύρια χαρακτηριστικά της άμμου αλουμίνας

Στον πυθμένα του κυκλώνα τοποθετήθηκε κενός συλλέκτης σωματιδίων. Θερμοζεύγη συνδέθηκαν με τον αναλυτή δεδομένων και η τροφοδοσία νερού τέθηκε σε λειτουργία. Πρωτογενής αέρας, παροχής 0,56 Kg/min, διοχετεύεται στην κλίνη για να ρευστοποιήσει τα σωματίδια άμμου στην κύρια στήλη ρευστοαίωρησης. Μέσω βαλβίδας διοχετεύεται προπάνιο στη συσκευή και ανοίγει η κύρια βαλβίδα του συστήματος, το οποίο τίθεται σε λειτουργία. Στη συνέχεια, ο διακόπτης πίεσης και ο ανηγυτής φλόγας τίθενται σε λειτουργία ενώ οι ενδείξεις των μανομέτρων μηδενίζονται. Τα ηλεκτρόδια ανάφλεξης και η σωληνοειδής βαλβίδα (solenoid valve) ενεργοποιούνται αυτόματα μετά από 30 s. Στον ίδιο χρόνο, προπάνιο τροφοδοτείται στο σύστημα και καίγεται στη γραμμή πρωτογενούς αέρα. Ο ρυθμός παροχής προπανίου προσαρμόζεται ώστε να προκαλείται μπλε φλόγα για την ιδανική αναλογία αέρα-καυσίμου. Η θερμοκρασία της κλίνης αυξάνεται, ως αποτέλεσμα της θερμότητας που απελευθερώνεται λόγω της καύσης του μίγματος προπανίου-αέρα. Όταν η θερμοκρασία της κλίνης πλησιάσει τους 500 °C, διακόπτεται η λειτουργία του συστήματος εκκίνησης και το άχυρο εισάγεται στην κλίνη με ενεργοποίηση του συστήματος τροφοδοσίας και η παροχή πρωτογενούς αέρα συνεχίζεται για να ψύχεται ο πυθμένας της κλίνης. Η θερμοκρασία της κλίνης αυξάνεται άμεσα (750 °C) εξαιτίας

της θερμότητας που απελευθερώνεται από την καύση του άχρου στη ρεατοποιημένη κλίνη. Ο μετρητής νερού της μονάδας προσαρμόζεται ώστε να παρέχει τον απαιτούμενο ρυθμό ροής ατμού. Ο παραγόμενος ατμός ψύχεται ώστε η θερμοκρασία του να μην ξεπερνά τους 150 °C και στη συνέχεια ανοίγει η βάνα και ο ατμός εισάγεται στον αεριοποιητή.

Χαρακτηριστικά	Τιμή	Μονάδες
Περιεκτικό υγρασίας	10 ± 1	%
Μέσο μέγεθος σωματιδίου	15 × 2 × 0,3	mm
Μέση πυκνότητα	75-80	kg/m <sup>3</sup>
Κατώτερη Θερμότητα Δύναμη (ΚΘΔ)	18,71	MJ/kg
Προσεγγιστική ανάλυση		
Πτητική ύλη	78,80	%
Άνθρακας	17,61	%
Τέφρα	3,59	%
Στοιχειακή ανάλυση		
C	45,97	%
H	5,78	%
O	44,15	%
N	0,55	%
S	0,12	%
Cl	0,02	%
Τέφρα	3,41	%

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά του άχρου σιτηρών

Ο ρυθμός τροφοδοσίας βιομάζας, καθώς και οι ρυθμοί ροής ατμού και αέρα στη μονάδα προσαρμόζονται στα επιθυμητά επίπεδα. Το σύστημα λειτουργεί στις παραπάνω συνθήκες περίπου 50 min, με σκοπό να εξασφαλιστούν σταθερές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή σταθερή θερμοκρασία εντός της κλίνης και σταθερός ρυθμός ροής του παραγόμενου αερίου. Οι τιμές της θερμοκρασίας και του ρυθμού ροής τροφοδοσίας καταγράφονται σε υπολογιστή. Οι τιμές της πτώσης πίεσης κατά μήκος της επιφάνειας των στομιών του εγχυτήρα καταγράφονται από επικλινή μανόμετρα και οι τιμές της πτώσης πίεσης της κλίνης καταγράφονται με μανόμετρα τύπου U. Όταν ολοκληρώθηκε η δειγματοληψία αερίων και η καταγραφή των δεδομένων, η τροφοδοσία, η παροχή δευτερογενούς αέρα η παροχή ατμού καθώς και πρωτογενούς αέρα διακόπηκαν με την παραπάνω σειρά. Ο συλλέκτης τέφρας αντικαταστάθηκε από έναν κενό και η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα πειράματα.

Η δειγματοληψία αερίων πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των σταθερών συνθηκών λειτουργίας του αεριοποιητή. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία της μονάδας δειγματοληψίας εξασφαλίζει ότι τα ληφθέντα δείγματα αερίων είναι χωρίς προσμίξεις τέφρας και σωματιδίων. Τα δείγματα συλλέγονται από τη γραμμή δειγματοληψίας με αδική σύριγγα σε κενό σωλήνα. Δύο δείγματα λαμβάνονται από κάθε θέση. Όλα τα δείγματα αναλύθηκαν, όσον αφορά στη σύνθεσή τους, σε χρωματογράφο. Ο αέριος χρωματογράφος βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας standard αέρια και ως μεταφορέας των αερίων χρησιμοποιήθηκε το αργό. Η ανίχνευση όλων των αερίων σε ένα μόνο χρωματογράφημα από μια μονό δειγματοληψία δεν είναι δυνατή. Το παραγόμενο υδρογόνο και το μεθάνιο δεν ήταν δυνατόν να ανιχνευτούν στο χρωματογράφημα στις ίδιες συνθήκες διαχωρισμού. Οι χρόνοι ρύθμισης των βαλβίδων, ο ρυθμός ροής του αερίου (αργό) και η θερμοκρασία κλιβάνου είναι οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το χρόνο στον οποίο παρατηρείται η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης (peaks) των διαφόρων συστατικών. Δυο μέθοδοι εφαρμόζονται για τον καθορισμό της σύστασης των συστατικών. Και στις δυο μεθόδους, οι τιμές της θερμοκρασίας κλιβάνου, της θερμοκρασίας έγχυσης, της θερμοκρασίας του ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας φλόγας ιονισμού είναι 45 °C, 150 °C, 250 °C και 300 °C αντίστοιχα. Ο ρυθμός ροής αργού είναι 30 ml/min. Η πρώτη βαλβίδα είναι εκτός λειτουργίας και στις δυο μεθόδους. Κατά την ανίχνευση του μεθανίου, η δεύτερη βαλβίδα είναι on, off και on στις χρονικές στιγμές 0, 1,4 και 9,0 min αντίστοιχα. Κατά την ανίχνευση του υδρογόνου, η δεύτερη βαλβίδα είναι on, off και on στις χρονικές στιγμές 0, 1,8 και 9,0 min αντίστοιχα.

Στο τέλος κάθε ανίχνευσης, ο συλλέκτης σωματιδίων απομακρύνεται από τον πυθμένα του κυκλώνα, σκεπάζεται με καπάκι και αφήνεται να κρυώσει. Στη συνέχεια, τρία δείγματα όγκου 70-80 ml, λαμβάνονται από τρία διαφορετικά σημεία από την κορυφή ως τον πυθμένα του συλλέκτη σωματιδίων. Τα υπολείμματα άνθρακα λόγω βαρύτητας καταλήγουν στο συλλέκτη τέφρας, στον οποίο υπάρχει μικρή ποσότητα αέρα. Αντίστοιχες συνθήκες επικρατούν για όλα τα πειράματα. Τα δείγματα υπολείμματος άνθρακα αναλύονται ώστε να προσδιοριστεί η σύστασή τους σε πτητικά συστατικά, άνθρακα και τέφρα. Τα παραπάνω δείγματα υφίστανται επιπλέον στοιχειακή ανάλυση για να καθοριστεί η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, υδρογόνο, θείο και οξυγόνο. Θερμιδικά τεστ πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του παραγόμενου αερίου. Ο προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης των υπολειμμάτων άνθρακα καθώς και η



μέση πυκνότητα των δειγμάτων καθορίζονται προκειμένου να εξεταστεί το κλάσμα της άμμου στο μίγμα άμμου-υπολείμματος άνθρακα. Η ποσότητα του άνθρακα και των σωματιδίων άμμου στα δείγματα του υπολείμματος καθορίζονται μέσω της μέσης πυκνότητας. Τα δείγματα του υπολείμματος κοσκινίζονται (75μm) για να διαχωριστεί η άμμος από τα στερεά υπολείμματα άνθρακα. Στοιχειακή, προσεγγιστική και θερμιδική ανάλυση πραγματοποιούνται στα δείγματα υπολείμματος άνθρακα.

Ο άνθρακας, το υδρογόνο και το άζωτο ανιχνεύτηκαν με χρήση LECO CHN -αναλυτή. Η ανίχνευση του θείου πραγματοποιήθηκε σε αναλυτή LECO S. Η ανάλυση τέφρας καθορίστηκε από ASTM D 3714-73 [81] και η περιεκτικότητα σε οξυγόνο βρέθηκε από τη διαφορά του αθροίσματος των υπολοίπων στοιχείων από το συνολικά παραγόμενο αέριο. Η θερμιδική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε θερμιδόμετρο τύπου Par1261, σύμφωνα με ASTM D 3286-85. Τα πτητικά συστατικά στο δείγμα υπολείμματος άνθρακα ανιχνεύτηκαν σύμφωνα με ASTM D 3175-77 (ASTM 1986).

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 Αποτελέσματα μοντέλου

Είναι σκόπιμο να εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου σε μεταβολές των παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία του αεριοποιητή. Παρακάτω παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας για το μοντέλο δυο φάσεων αεριοποίησης [82] με σκοπό να εξεταστεί η απόκριση του σε μεταβολές τριών λειτουργικών παραμέτρων (ταχύτητα ρευστοαίωρησης, ρυθμός ροής ατμού, αναλογία βιομάζας/ατμού). Οι παραπάνω παράμετροι εξετάστηκαν όσον αφορά τη θερμοκρασία κλίνης, τη σύνθεση αερίων, την ανώτερη θερμογόνο δύναμη και τον ρυθμό παραγωγής αερίου.

Ταχύτητα Ρευστοαίωρησης (m/sec)	Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	Αναλογία βιομάζας ατμού (kg/kg)	Ρυθμός ροής αέρα (m <sup>3</sup> /min)	Ρυθμός ροής βιομάζας (kg/min)
0,30	0,25	4	0,40	1,00
0,35	0,25	4	0,56	1,00
0,40	0,25	4	0,72	1,00
0,45	0,25	4	0,87	1,00
0,50	0,25	4	1,02	1,00
0,40	0,15	4	0,92	1,00
0,40	0,20	4	0,82	1,00
0,40	0,25	4	0,72	1,00
0,40	0,30	4	0,61	1,00
0,40	0,35	4	0,51	1,00
0,40	0,25	2	0,72	0,50
0,40	0,25	3	0,72	0,75
0,40	0,25	4	0,72	1,00
0,40	0,25	5	0,72	1,25
0,40	0,25	6	0,72	1,50

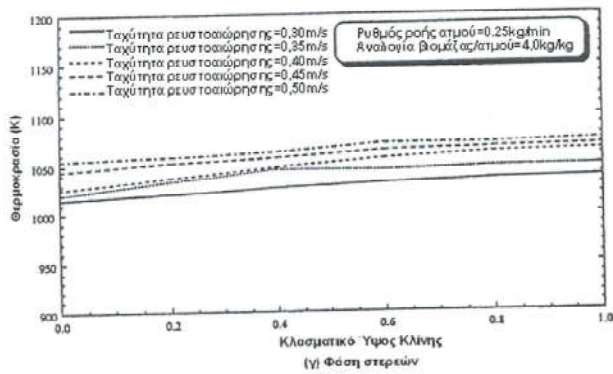
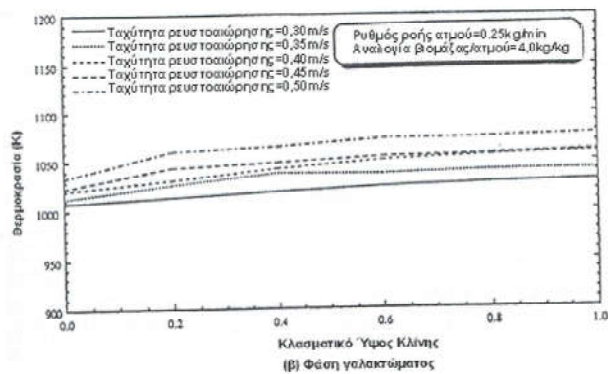
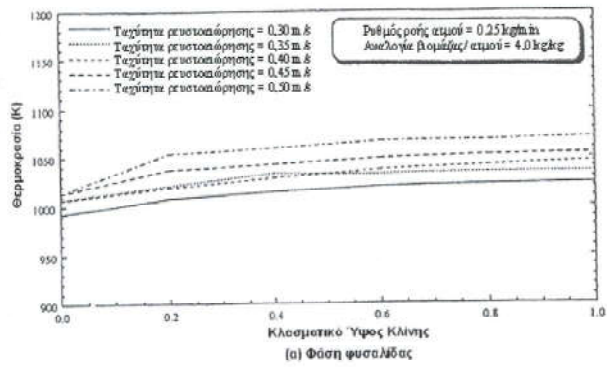
Πίνακας 6.1: Το εύρος των μεταβολών των παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας καθώς και οι τιμές του ρυθμού της ροής αέρα και βιομάζας

Κάθε παράμετρος μεταβάλλεται ανεξάρτητα, σε εύρος τιμών που παρουσιάζεται στον πίνακα 6.1. Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζεται επίσης ο ρυθμός ροής αέρα καθώς και ο ρυθμός τροφοδοσίας της βιομάζας. Αύξηση της ταχύτητας ρευστοαίωρησης σε δεδομένο ρυθμό ροής ατμού παρατηρείται με μεταβολή του ρυθμού ροής του εισαγόμενου αέρα. Αύξηση του ρυθμού ροής ατμού σε δεδομένη ταχύτητα ρευστοαίωρησης παρατηρείται με μείωση του ρυθμού ροής του εισαγόμενου αέρα.

### 6.1.1 Θερμοκρασία κλίνης

Τα προφίλ της θερμοκρασίας στη φάση φυσαλίδας, γαλακτώματος και στερεών είναι πολύ ευαίσθητα στην μεταβολή της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, στη ροή του ατμού και στην αναλογία βιομάζας/ ατμού. Στο σχήμα 6.1(α),(β),(γ), παρουσιάζεται η επίδραση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης στο θερμοκρασιακό προφίλ για τη φάση φυσαλίδας, γαλακτώματος και τη στερεή φάση. Ο πίνακας 6.2(α),(β) παρουσιάζει την μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της μεταβολής της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, της ροής του ατμού και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν ότι όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα ρευστοαιώρησης και/ ή χαμηλότερος ο ρυθμός ροής του ατμού και/ ή χαμηλότερη αναλογία βιομάζας/ ατμού τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία και στις τρεις φάσεις.

Αύξηση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης από 0,3 m/sec σε 0,5 m/sec (κατά 67%) αύξησε τη θερμοκρασία των φυσαλίδων κατά 47 K (κατά 4,59 %), τη θερμοκρασία του γαλακτώματος κατά 48 K (κατά 4,66 %) και τη θερμοκρασία των στερεών κατά 36 K (κατά 3,67 %). Η αύξηση της θερμοκρασίας με αύξηση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, που είναι το αποτέλεσμα της αύξησης του εισαγόμενου αέρα στην κλίνη, ο οποίος με τη σειρά του αυξάνει το ρυθμό των εξώθερμων αντιδράσεων (αντιδράσεις οξείδωσης) και απελευθερώνει ενέργεια. Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν από τους Ergudenler και Ghaly [83]. Η θερμοκρασία του γαλακτώματος είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία των στερεών και υψηλότερη από τη θερμοκρασία των φυσαλίδων επειδή η θερμότητα μεταφέρεται από τα στερεά (άμμος) στο γαλάκτωμα και μετά στις φυσαλίδες.



Σχήμα 6.1(α),(β),(γ): Επίδραση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης στη θερμοκρασία στις φάσεις φυσαλίδας, γαλακτώματος και στερεή.

Παράμετρος	Τιμή	Μεταβολή θερμοκρασίας			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		(K)	(%)	(K)	(%)
Ταχύτητα ρευστο- αιώρησης (m/s)	0,30	1023	0,00	1029	0,00
	0,35	1035	1,17	1041	1,66
	0,40	1045	2,15	1059	2,97
	0,45	1053	2,93	1060	3,01
	0,50	1070	4,59	1077	4,66
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	1079	0,00	1090	0,00
	0,20	1057	-2,04	1065	-2,29
	0,25	1045	-3,15	1059	-2,84
	0,30	961	-10,94	966	-11,38
	0,35	948	-12,14	956	-12,29
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	1090	0,00	1105	0,00
	3,00	1082	-0,73	1097	-0,72
	4,00	1045	-4,13	1059	-4,16
	5,00	1014	-6,97	1027	-7,06
	6,00	997	-8,53	1010	-8,60

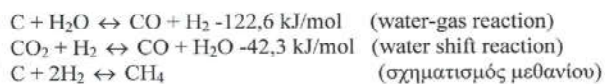
Πίνακας 6.2(α): Απόκριση της θερμοκρασίας στις μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος

Παράμετρος	Τιμή	Μεταβολή θερμοκρασίας	
		(K)	%
Ταχύτητα ρευστο- αιώρησης (m/s)	0,30	1036	0,00
	0,35	1048	1,16
	0,40	1064	2,70
	0,45	1068	3,09
	0,50	1074	3,67
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	1094	0,00
	0,20	1076	-1,65
	0,25	1064	-2,74
	0,30	975	-10,88
	0,35	964	-11,88
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	1111	0,00
	3,00	1094	-1,53
	4,00	1064	-4,23
	5,00	1032	-7,11
	6,00	1013	-8,82

Πίνακας 6.2(β): Απόκριση της θερμοκρασίας στις μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων στη στερεή φάση.



Αύξηση της ροής του ατμού από 0,15 kg/sec σε 0,35 kg/sec (κατά 135,35 %) μείωσε τη θερμοκρασία των φυσαλίδων κατά 131 K (-12,14 %), τη θερμοκρασία του γαλακτώματος κατά 134 K (-12,29 %) και τη θερμοκρασία των στερεών σωματιδίων κατά 130 K (-11,88 %). Οι σημαντικές μειώσεις που παρατηρήθηκαν στη θερμοκρασία λόγω της αύξησης της ροής του ατμού οφείλονται στις παρακάτω ενδόθερμες αντιδράσεις:



Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν από τους Singh et al.[84], Walawender et al. [85] και Corella et al. [86] για αεριοποίηση με ατμό του βαμβακιού, άχρου και διάφορων υπολειμμάτων φυτειών αντίστοιχα.

Όταν η αναλογία βιομάζας/ ατμού αυξήθηκε από 2,0 kg/kg σε 6,0 kg/kg (200 %), η θερμοκρασία των φυσαλίδων μειώθηκε κατά 93 K (-8,53 %), η θερμοκρασία του γαλακτώματος μειώθηκε κατά 95 K (-8,6 %) και η θερμοκρασία των στερεών σωματιδίων μειώθηκε κατά 98 K (-8,82 %). Η μείωση της θερμοκρασίας των στερεών σωματιδίων οφείλεται στην αύξηση των ενδόθερμων αντιδράσεων οι οποίες εγκλωβίζουν την ενέργεια της κλίνης και στην υψηλή ενέργεια που απαιτείται για την ξήρανση και την πυρόλυση της βιομάζας. Το οξυγόνο του τροφοδοτούμενου αέρα καταναλώνεται γρήγορα από τον άνθρακα που βρίσκεται στο υλικό τροφοδοσίας και η θερμότητα που απελευθερώνεται από την εξώθερμη διεργασία οξείδωσης χρησιμοποιείται για την πυρόλυση του εναπομείναντος στερεού υλικού, το οποίο συνεισφέρει στην μείωση της θερμοκρασίας της κλίνης. Ο Ergudenler[87] κατέγραψε όμοια αποτελέσματα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι με αύξηση της τάξης του 1 % σε κάθε μια από τις παραπάνω μεταβλητές, ο ρυθμός ροής του ατμού έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση της θερμοκρασίας της κλίνης, ακολουθεί η αναλογία βιομάζας/ ατμού και τέλος η ταχύτητα ρευστοαίωρησης.

## 6.1.2 Σύνθεση αερίου

### 6.1.2.1 Εύφλεκτα αέρια

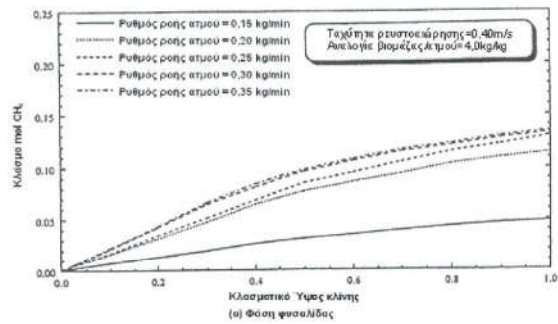
Τα σχήματα 6.2 έως 6.4 δείχνουν την επίδραση της ροής ατμού στα κλάσματα μάζας του CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> και CO στη φάση φυσαλίδας και στη φάση γαλακτώματος (όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του μοντέλου). Ο πίνακας 6.3(α),(β),(γ) παρουσιάζει την μεταβολή των αερίων στις διακυμάνσεις της ταχύτητας ρευστοαίωρησης, του ρυθμού

ροής ατμού και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν ότι όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα ρευστοαιώρησης και/ ή όσο υψηλότερη η αναλογία βιομάζας/ ατμού τόσο υψηλότερο είναι το κλάσμα μάζας των αερίων.

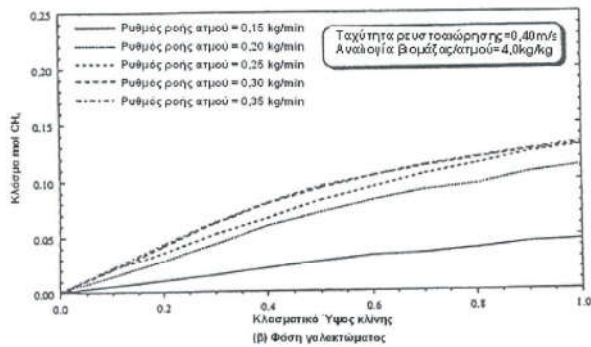
Αυξάνοντας την ταχύτητα ρευστοποίησης από 0,3 m/sec σε 0,5 m/sec (κατά 67 %) μειώνεται το κλάσμα mol των CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> και CO στη φάση φυσαλίδας κατά 0,09 (-60,81%), 0,020 (-15,50%) και 0,061 (-26,34 %) και στη φάση γαλακτώματος κατά 0,043 (-29,45 %), 0,021 (-16,94) και 0,060 (-29,29) αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται σε πλήθος λόγων: α) στο υψηλό ποσό οξυγόνου που εισάγεται στο σύστημα εξαιτίας του οποίου καίγονται ορισμένα από τα εύφλεκτα αέρια, β) ο μικρότερος χρόνος παραμονής του υπολείμματος άνθρακα στον αεριοποιητή που οδηγεί σε απόλεια του ενεργειακού του περιεχομένου όπως αναφέρθηκε από τους Beaumont και Schwob [88] και Ghaly et al.[89], γ) η αύξηση των κλασμάτων mol των μη εύφλεκτων συστατικών του παραγόμενου αερίου (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) εξαιτίας της υψηλής ποσότητας αέρα που εισάγεται στο σύστημα [83,90,91].

Αυξάνοντας το ρυθμό ροής ατμού από 0,15 σε 0,35 kg/min αυξάνεται το κλάσμα mol του CH<sub>4</sub> και H<sub>2</sub> στη φάση φυσαλίδας κατά 0,086 (179,17 %) και 0,065 (65 %) αντίστοιχα και στη φάση γαλακτώματος κατά 0,087 (193,33 %) και 0,058 (58 %) αντίστοιχα. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση στο κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> κατά 0,112 (-58,03 %) και 0,119 (-62,63 %) στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος αντίστοιχα. Η αύξηση στο κλάσμα mol H<sub>2</sub> και μείωση σε εκείνο του CO, λόγω αύξησης του ρυθμού ροής ατμού, αποδεικνύει ότι η αντίδραση gas shift επιδρά σημαντικά στην αεριοποίηση με ατμό. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Richard et al [92] και Hos και Groeneveld [93].

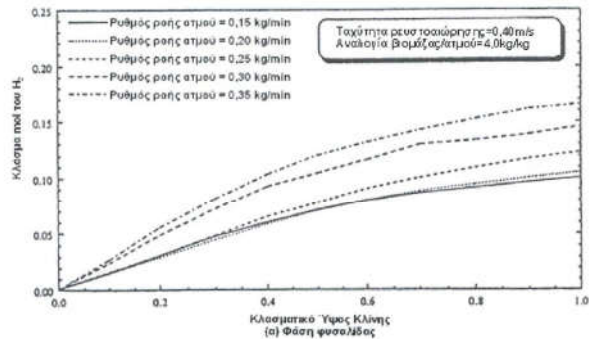
Αυξάνοντας την αναλογία βιομάζας/ ατμού από 2 σε 6 kg/kg αυξάνεται το κλάσμα mol CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> και CO κατά 0,063 (80,77 %), 0,053 (69,74 %) και 0,076 (69,09 %) στη φάση φυσαλίδας αντίστοιχα και κατά 0,053 (70,67 %), 0,045 (63,38 %) και 0,072 (66,06%) στη φάση γαλακτώματος αντίστοιχα. Για την υψηλότερη τιμή αναλογίας βιομάζας/ ατμού (6 kg/kg) τα κλάσματα mol των αερίων, εκτός του N<sub>2</sub>, παρουσιάζουν μέγιστες τιμές εξαιτίας της υψηλής ποσότητας βιομάζας που εισάγεται στο σύστημα.



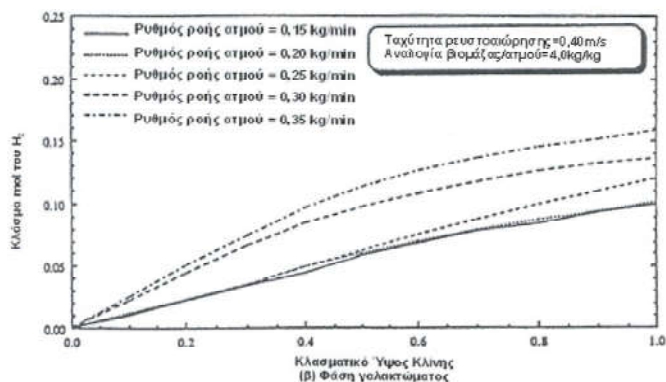
Σχήμα 6.2(α): Επίδραση του ρυθμού ροής του ατμού στη φάση φυσαλίδας



Σχήμα 6.2(β): Επίδραση του ρυθμού ροής του ατμού στη φάση γαλακτώματος

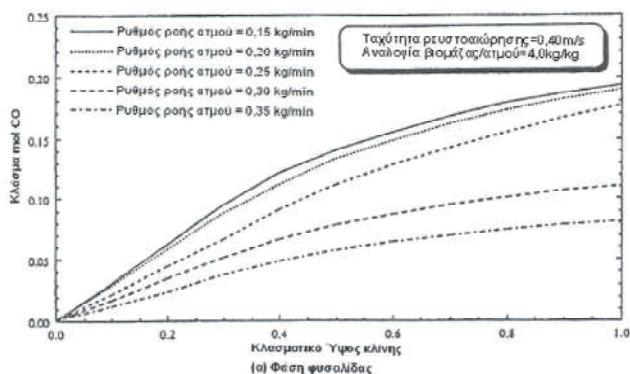


Σχήμα 6.3(α): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο κλάσμα mol του  $H_2$  στη φάση φυσαλίδας

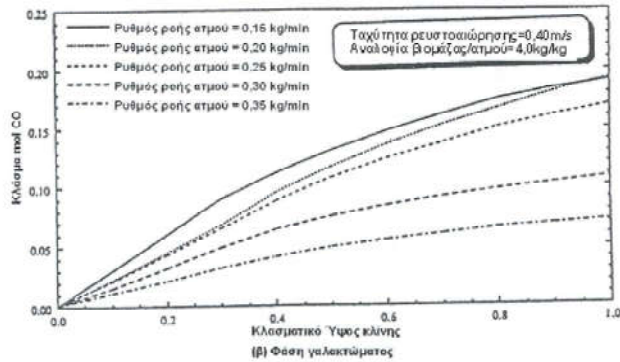


Σχήμα 6.3(β): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο κλάσμα mol του  $H_2$  στη φάση ουσάλιδας και γαλακτώματος.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι ο ρυθμός ροής ατμού επηρεάζει περισσότερο τα κλάσματα mol του  $CH_4$  και του  $CO_2$ , ακολουθεί η αναλογία βιομάζας/ατμού και στο τέλος η ταχύτητα ρευστοαιώρησης. Η αναλογία βιομάζας/ατμού επηρεάζει κυρίως το κλάσμα mol του  $H_2$ , ακολουθεί ο ρυθμός ροής ατμού και η ταχύτητα ρευστοαιώρησης.



Σχήμα 6.4(α): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο κλάσμα mol του  $CO$  στη φάση ουσάλιδας



Σχήμα 6.4(β): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο κλάσμα mol του CO στη φάση γαλακτώματος

Παράμετρος	Τιμή	Κλάσμα mol CH <sub>4</sub>			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		Αδιάστατη	%	Αδιάστατος	%
Ταχύτητα ρευστοποίησης (m/s)	0,30	0,148	0,00	0,146	0,00
	0,35	0,139	-6,08	0,137	-6,16
	0,40	0,129	-12,84	0,129	-11,64
	0,45	0,065	-56,08	0,114	-21,92
	0,50	0,058	-60,81	0,103	-29,65
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	0,048	0,00	0,045	0,00
	0,20	0,114	137,5	0,112	148,89
	0,25	0,129	168,75	0,129	186,67
	0,30	0,132	175,00	0,130	188,89
	0,35	0,134	179,19	0,132	193,33
Αναλογία βιομάζας/ατμού (kg/kg)	2,00	0,078	0,00	0,075	0,00
	3,00	0,116	48,72	0,106	14,33
	4,00	0,129	65,38	0,129	72,00
	5,00	0,131	67,95	0,119	58,67
	6,00	0,141	80,77	0,128	70,67

Πίνακας 6.3 (α): Απόκριση εύφλεκτων αερίων (CH<sub>4</sub>) σε μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων



Παράμετρος	Τιμή	Κλάσμα mol H <sub>2</sub>			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		Αδιάστατος	%	Αδιάστατος	%
Ταχύτητα ρευστο- πύρσης (m/s)	0,30	0,129	0,00	0,124	0,00
	0,35	0,125	-3,10	0,122	-1,61
	0,40	0,123	-4,65	0,120	-3,23
	0,45	0,114	-11,63	0,108	-12,90
	0,50	0,109	-15,5	0,103	-16,94
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	0,100	0,00	0,100	0,000
	0,20	0,105	5,00	0,102	2,00
	0,25	0,123	23,00	0,120	20,00
	0,30	0,145	45,00	0,136	36,00
	0,35	0,165	65,00	0,158	58,00
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	0,076	0,00	0,071	0,00
	3,00	0,099	30,26	0,092	29,58
	4,00	0,123	61,84	0,120	69,01
	5,00	0,125	64,47	0,120	69,01
	6,00	0,129	69,74	0,116	63,38

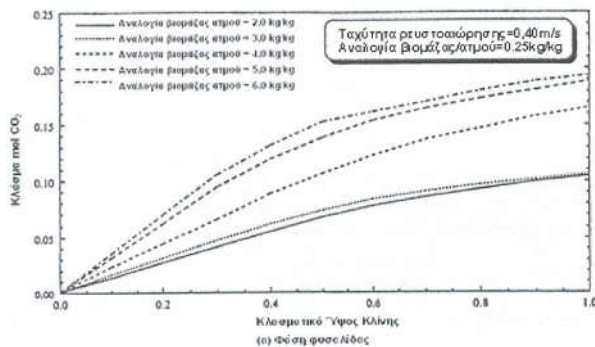
Πίνακας 6.3 (β): Απόκριση εύφλεκτων αερίων (H<sub>2</sub>) σε μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων

Παράμετρος	Τιμή	Κλάσμα mol CO			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		Αδιάστατος	%	Αδιάστατος	%
Ταχύτητα ρευστο- πύρσης (m/s)	0,30	0,224	0,00	0,205	0,00
	0,35	0,220	-1,79	0,198	-3,41
	0,40	0,176	-21,43	0,169	-17,56
	0,45	0,173	-22,77	0,175	-14,63
	0,50	0,163	-26,34	0,145	-29,29
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	0,193	0,00	0,190	0,00
	0,20	0,189	-2,07	0,192	1,05
	0,25	0,176	-8,81	0,169	-11,01
	0,30	0,110	-43,01	0,107	-43,68
	0,35	0,081	-58,03	0,071	-62,63
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	0,115	0,00	0,109	0,00
	3,00	0,158	37,39	0,150	37,61
	4,00	0,176	53,04	0,169	55,05
	5,00	0,185	60,87	0,176	61,47
	6,00	0,191	66,09	0,181	66,06

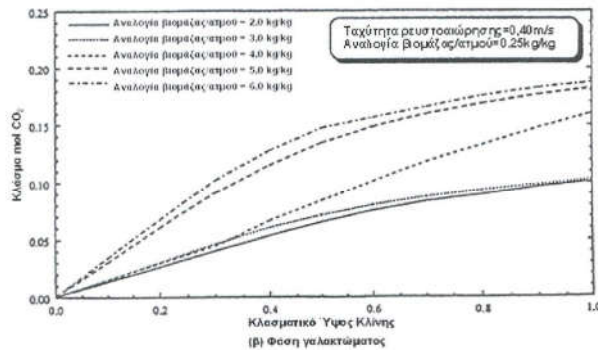
Πίνακας 6.3 (γ): Απόκριση εύφλεκτων αερίων (CO) σε μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων.

### 6.1.2.2 Μη εύφλεκτα αέρια

Τα σχήματα 6.5(α),(β) και 6.6(α),(β) δείχνουν την επίδραση της αναλογίας ατμού βιομάζας στο κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> και του N<sub>2</sub> στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος αντίστοιχα. Ο πίνακας 6.4(α),(β) παρουσιάζει την μεταβολή των μη εύφλεκτων αερίων σε αλλαγές στην ταχύτητα ρευστοαίωρησης στο ρυθμό ροής ατμού και στην αναλογία βιομάζας/ ατμού. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα ρευστοαίωρησης και/ ή όσο υψηλότερος ο ρυθμός ροής ατμού και/ ή όσο υψηλότερη η αναλογία βιομάζας/ ατμού, τόσο υψηλότερο προκύπτει το κλάσμα mol CO<sub>2</sub> και τόσο μικρότερο το κλάσμα mol του N<sub>2</sub>.

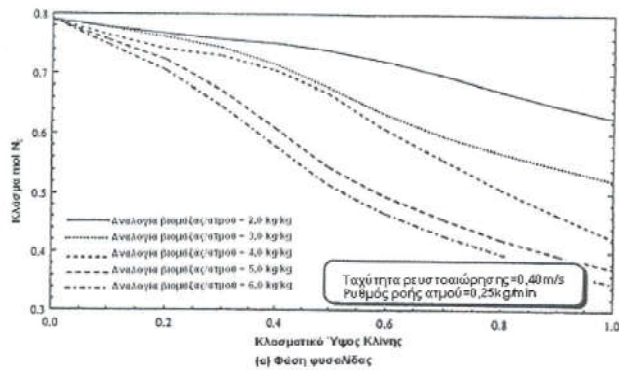


Σχήμα 6.5(α): Επίδραση της αναλογίας βιομάζας/ ατμού στο κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> στη φάση φυσαλίδας

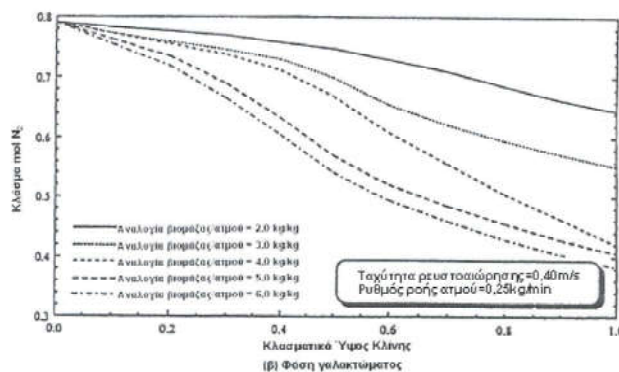


Σχήμα 6.5(β): Επίδραση της αναλογίας βιομάζας/ ατμού στο κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> στη φάση γαλακτώματος

Αυξάνοντας την ταχύτητα ρευστοαίωρησης από 0,3 σε 0,50 m/sec (κατά 67 %) παρατηρείται μείωση του κλάσματος mol του CO<sub>2</sub> κατά 0,027 (-15,17 %) και 0,048 (-26,82 %) και αύξηση του κλάσματος mol του N<sub>2</sub> κατά 0,196 (60,87 %) και 0,147 (42 %) στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος αντίστοιχα. Η μείωση στο κλάσμα mol CO<sub>2</sub> και η αύξηση στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> παρατηρούνται εξαιτίας της αύξησης του εισαγόμενου αέρα στον αντιδραστήρα και συνεπώς της αντίδρασης του O<sub>2</sub> με C και CO για σχηματισμό CO<sub>2</sub>.



Σχήμα 6.6(α): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> στη φάση φυσαλίδας



Σχήμα 6.6(β): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> στη φάση γαλακτώματος

Αυξάνοντας το ρυθμό ροής ατμού από 0,15 σε 0,35 kg/min (κατά 133 %) παρατηρείται αύξηση του κλάσματος mol του CO<sub>2</sub> κατά 0,124 (228,30 %) και 0,120 (244,90 %) και μείωση στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> κατά 0,160 (-26,40 %) και 0,179 (-23,21 %) στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος αντίστοιχα. Η αύξηση στο κλάσμα mol CO<sub>2</sub> οφείλεται στη μετατροπή του CO σε CO<sub>2</sub> (CO+H<sub>2</sub>O→CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>) ενώ η μείωση στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> οφείλεται στη σχετική αύξηση των εύφλεκτων αερίων.

Αυξάνοντας την αναλογία βιομάζας/ ατμού από 2 σε 6 kg/kg (κατά 200 %) παρατηρείται αύξηση στο κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> κατά 0,089 (85,58 %) και 0,086 (85,15 %) και μείωση στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> κατά 0,281 (-44,82 %) και 0,261 (-40,53 %) στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος αντίστοιχα. Η αύξηση στο κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> και η μείωση στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub> οφείλονται στην υψηλή ποσότητα βιομάζας (άνθρακα) που εισάγεται στο σύστημα και η οποία καταλήγει στην παραγωγή υψηλότερων κλασμάτων mol εύφλεκτων αερίων (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) καθώς και του CO<sub>2</sub>.

Παράμετρος	Τιμή	Κλάσμα mol CO <sub>2</sub>			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		Αδιάσπτος	%	Αδιάσπτος	%
Ταχύτητα ρευστο- αιώρησης (m/s)	0,30	0,178	0,00	0,179	0,00
	0,35	0,177	-0,56	0,174	-2,79
	0,40	0,165	-7,30	0,160	-10,61
	0,45	0,153	-14,04	0,136	-24,02
	0,50	0,151	-15,17	0,131	-26,82
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	0,053	0,00	0,049	0,00
	0,20	0,069	30,19	0,055	12,24
	0,25	0,165	211,32	0,160	226,53
	0,30	0,172	224,53	0,164	234,69
	0,35	0,174	228,30	0,169	244,90
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	0,104	0,00	0,101	0,00
	3,00	0,106	1,92	0,103	1,98
	4,00	0,165	58,65	0,160	58,42
	5,00	0,188	80,77	0,182	80,20
	6,00	0,193	85,58	0,187	85,15

Πίνακας 6.4(α): Απόκριση του CO<sub>2</sub> σε μεταβολές λειτουργικών παραμέτρων (μη εύφλεκτων αερίων)

Παράμετρος	Τιμή	Κλάσμα mol N <sub>2</sub>			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		Αδιάστατος	%	Αδιάστατος	%
Ταχύτητα ρευστο- αιώρησης (m/s)	0,30	0,322	0,00	0,350	0,00
	0,35	0,340	5,59	0,374	6,86
	0,40	0,407	26,40	0,421	20,29
	0,45	0,494	53,42	0,467	33,43
	0,50	0,518	60,87	0,497	42,00
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0,15	0,606	0,00	0,616	0,00
	0,20	0,523	-13,70	0,540	-12,34
	0,25	0,407	-32,84	0,421	-31,66
	0,30	0,441	-27,23	0,436	-29,22
	0,35	0,446	-26,40	0,473	-23,21
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	0,627	0,00	0,644	0,00
	3,00	0,521	-16,91	0,550	-14,60
	4,00	0,421	-32,85	0,421	-34,63
	5,00	0,371	-40,83	0,407	-38,80
	6,00	0,346	-44,82	0,383	-40,53

Πίνακας 6.4(β): Απόκριση του N<sub>2</sub> σε μεταβολές λειτουργικών παραμέτρων (μη εύφλεκτων αερίων)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι το κλάσμα mol του CO<sub>2</sub> επηρεάζεται κυρίως από το ρυθμό ροής ατμού και λιγότερο από την αναλογία βιομάζας/ατμού και την ταχύτητα ρευστοαιώρησης. Το κλάσμα mol του N<sub>2</sub> επηρεάζεται κυρίως από μεταβολές στην ταχύτητα ρευστοαιώρησης, ακολουθεί η αναλογία βιομάζας/ατμού και ο ρυθμός ροής ατμού στο σύστημα.

### 6.1.3 Ανώτερη θερμογόνος δύναμη των αερίων

Οι επιδράσεις του ρυθμού ροής ατμού στην ανώτερη θερμογόνου δύναμη του παραγόμενου αερίου, στις φάσεις φυσαλίδας και γαλακτώματος παρουσιάζονται γραφικά στο σχήμα 6.7(α),(β). Η απόκριση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του αερίου σε μεταβολές της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, του ρυθμού ροής ατμού και της αναλογίας βιομάζας/ατμού φαίνεται στον πίνακα 6.5(α),(β)).

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα ρευστοαιώρησης και/ή όσο υψηλότερος ο ρυθμός ροής ατμού και/ή όσο υψηλότερη η αναλογία βιομάζας/ατμού, τόσο υψηλότερη τιμή θερμογόνου δύναμης αερίου προκύπτει.

Αυξάνοντας την ταχύτητα ρευστοαιώρησης από 0,30 σε 0,50 m/s (κατά 67 %) μειώνεται η ανώτερη θερμογόνου δύναμη κατά 4,57 (-44,12 %) και 2,424 MJ/m<sup>3</sup> (-24,38

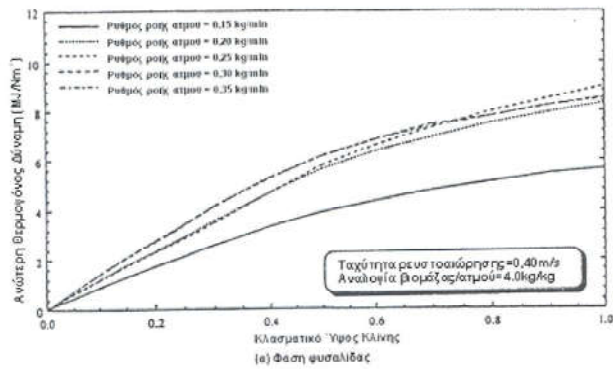


%) στην αραιή και πυκνή φάση, αντίστοιχα. Το παραπάνω οφείλεται στη μείωση των εύφλεκτων αερίων και στην αύξηση του κλάσματος mol του  $N_2$  που εισάγεται μέσω του αέρα στον αντιδραστήρα και που διαλύει περαιτέρω τα εύφλεκτα αέρια.

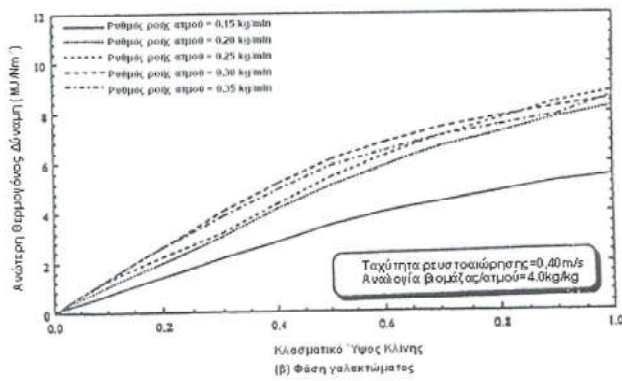
Αυξάνοντας το ρυθμό ροής ατμού από 0,15 σε 0,35 kg/min (κατά 133 %) αυξάνεται η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του αερίου κατά  $2,841 \text{ MJ/m}^3$  (50,46 %) και στην φάση γαλακτώματος κατά  $3,150 \text{ MJ/m}^3$  (57,58 %). Οι παραπάνω αυξήσεις προκύπτουν από την αντίδραση του CO προς σχηματισμό  $CO_2$  ( $CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$ ) καθώς και από την χαμηλή ποσότητα αζώτου που εισάγεται στο σύστημα. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από τους Maniatis et al [94] και Sadaka [95].

Αυξάνοντας την αναλογία βιομάζας ατμού από 2,0 σε 6,0 kg/kg (κατά 200 %) αυξάνεται η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του αερίου κατά  $4,184 \text{ MJ/m}^3$  (74,97 %) στη φάση φυσαλίδας και κατά  $3,666 \text{ MJ/m}^3$  (69,64 %) στη φάση γαλακτώματος. Οι παραπάνω αυξήσεις οφείλονται στην αύξηση του κλάσματος mol των εύφλεκτων αερίων ( $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ) που προέρχεται από τη διαδικασία πυρόλυσης και τη διάσπαση των υδρογονανθράκων. Οι Font et al [96] και Mudge et al [97] ανέφεραν αύξηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης με αύξηση της αναλογίας βιομάζας/ ατμού σαν αποτέλεσμα της αύξησης του κλάσματος mol των υδρογονανθράκων ( $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$  και  $C_2H_6$ ) οι οποίοι απελευθερώνονται από την πίσσα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι με ποσοστιαία αύξηση των λειτουργικών παραμέτρων, η αναλογία βιομάζας/ ατμού επηρεάζει περισσότερο την ανώτερη θερμογόνου δύναμη του αερίου, ακολουθούμενη από το ρυθμό ροής ατμού και την ταχύτητα ρευστοαιώρησης.



Σχήμα 6.7(α): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη στη φάση ψυσαλίδας



Σχήμα 6.7(β): Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη στη φάση γαλακτώματος

Παράμετρος	Τιμή	Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (MJ/Nm <sup>3</sup> )			
		Φάση φυσαλίδας		Φάση γαλακτώματος	
		Αδιάστατος	%	Αδιάστατος	%
Ταχύτητα ρευστο- αιώρησης (m/s)	0,30	10.357	0.00	9.942	0.00
	0,35	9.905	-4.36	9.457	-4.88
	0,40	8.932	-13.76	8.817	-11.32
	0,45	6.235	-39.80	8.135	-18.18
	0,50	5.787	-44.12	7.518	-24.38
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0.15	5.630	0.00	5.471	0.00
	0,20	8.273	46.94	8.173	49.39
	0,25	8.932	58.65	8.817	61.16
	0,30	8.503	51.03	8.535	56.00
	0,35	8.471	50.46	8.621	57.58
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	5.533	0.00	5.272	0.00
	3,00	7.885	42.51	7.279	38.07
	4,00	8.932	61.43	8.817	67.24
	5,00	9.152	65.41	8.855	67.96
	6,00	9.681	74.97	8.938	69.54

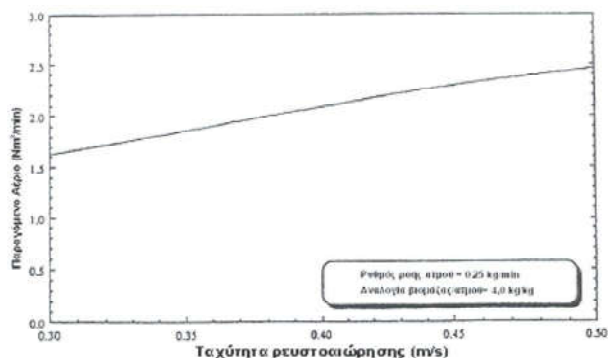
Πίνακας 6.5(α): Επίδραση των μεταβολών των λειτουργικών παραμέτρων στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη του παραγόμενου αερίου

Παράμετρος	Τιμή	Ρυθμός παραγωγής αερίου (Nm <sup>3</sup> /min)	
		Αδιάστατος	%
Ταχύτητα ρευστο- αιώρησης (m/s)	0,30	1.169	0.00
	0,35	1.857	14.70
	0,40	2.079	28.41
	0,45	2.281	40.89
	0,50	2.452	51.45
Ρυθμός ροής ατμού (kg/min)	0.15	1.753	0.00
	0,20	1.826	4.16
	0,25	2.079	18.60
	0,30	1.617	-7.76
	0,35	1.451	-17.23
Αναλογία βιομάζας/ ατμού (kg/kg)	2,00	1.300	0.00
	3,00	1.659	27.62
	4,00	2.079	59.92
	5,00	2.212	7.15
	6,00	2.572	97.85

Πίνακας 6.5(β) Επίδραση των μεταβολών των λειτουργικών παραμέτρων στο ρυθμό παραγωγής αερίου

#### 6.1.4 Ρυθμός παραγωγής αερίου

Τα σχήματα 6.8 έως 6.10 παρουσιάζουν τις επιδράσεις της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, του ρυθμού ροής ατμού και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού στον κανονικοποιημένο ρυθμό παραγωγής αερίου (normalized gas flow rate). Ο πίνακας 6.5 παρουσιάζει την απόκριση του ρυθμού παραγωγής αερίου σε μεταβολές της ταχύτητας ρευστοαιώρησης, του ρυθμού ροής ατμού και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού.



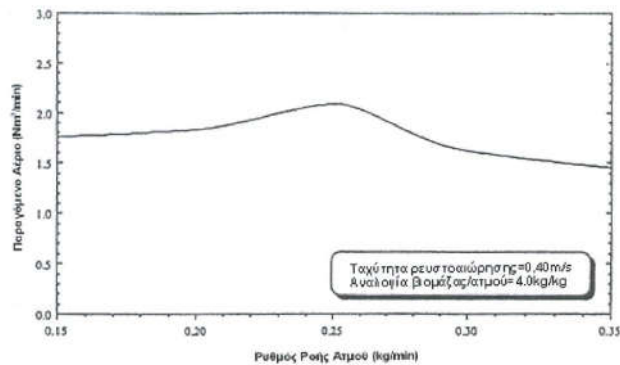
Σχήμα 6.8: Επίδραση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης στο κανονικοποιημένο παραγόμενο αέριο( normalized produced gas)

Αυξάνοντας την ταχύτητα ρευστοαιώρησης από 0,30 σε 0,50 m/s (κατά 67 %) και την αναλογία βιομάζας ατμού από 2,0 σε 6,0 kg/kg (200 %) αυξάνεται ο κανονικοποιημένος ρυθμός παραγωγής αερίου κατά 0,833 Nm<sup>3</sup>/min (51.45 %) και 1.272 Nm<sup>3</sup>/min (97.85 %), αντίστοιχα. Ο ρυθμός παραγωγής αερίου αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού, εξαιτίας της υψηλής ποσότητας πτητικών που προέρχονται από την εξαέρωση της βιομάζας. Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν το βαθμό μετατροπής πίσσας και υπολείμματος άνθρακα σε αέρια.

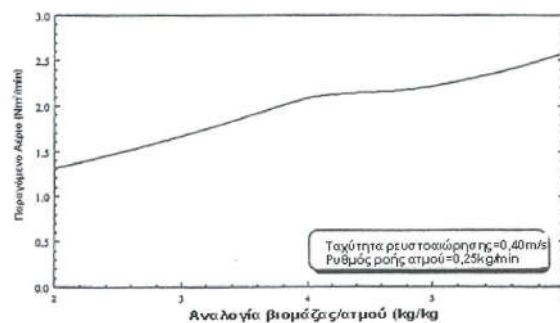
Αντίθετα, αυξάνοντας το ρυθμό ροής ατμού από 0,15 σε 0,25 kg/min (κατά 67 %) αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής αερίου από 1,753 σε 2,079 Nm<sup>3</sup>/min (18,60 %). Επιπλέον αύξηση στο ρυθμό ροής ατμού από 0,25 σε 0,35 kg/min (κατά 40 %) μειώνει τον κανονικοποιημένο ρυθμό παραγωγής αερίου σε 1,451 Nm<sup>3</sup>/min (κατά 30,20 %). Η αύξηση του ρυθμού ροής ατμού μειώνει απότομα τη θερμοκρασία αντιδραστήρα, η οποία με τη σειρά της μειώνει την απόδοση μετατροπής της πίσσας και του υπολείμματος

άνθρακα σε εύφλεκτα αέρια. Έχει αναφερθεί αύξηση της απόδοσης αερίου με αύξηση της θερμοκρασίας κλίνης [98].

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι για ποσοστιαία αύξηση των λειτουργικών παραμέτρων η αναλογία βιομάζας/ ατμού επιδρά περισσότερο στον κανονικοποιημένο ρυθμό παραγωγής αερίου, ακολουθεί η ταχύτητα ρευστοαίωρησης και ο ρυθμός ροής ατμού.



Σχήμα 6.9: Επίδραση του ρυθμού ροής ατμού στο παραγόμενο κανονικοποιημένο αέριο



Σχήμα 6.10: Επίδραση της αναλογίας βιομάζας/ ατμού στο παραγόμενο κανονικοποιημένο αέριο



## 6.2 Αποτελέσματα πειράματος

Τα πειραματικά αποτελέσματα από την αεριοποίηση άχρου σιτηρών με συνδυασμό αέρα-ατμού σε διάφορες τιμές ταχύτητας ρευστοαίωρησης, ρυθμού ροής ατμού καθώς και για διαφορετικές αναλογίες βιομάζας/ ατμού παρουσιάζονται στους πίνακες 6.6, 6.7. Η λειτουργία του αεριοποιητή, όπως καθορίζεται από τη θερμοκρασία κλίνης, τα κλάσματα mol, την ανώτερη θερμογόνο δύναμη και το ρυθμό παραγωγής αερίου, προσομοιώθηκε για διαφορετικές τιμές ταχύτητας ρευστοαίωρησης, ρυθμού ροής ατμού καθώς και για διαφορετικές αναλογίες βιομάζας/ ατμού με το μοντέλο αεριοποίησης δυο φάσεων αέρα-ατμού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα.

TR (m/s)	PPA (kg/min)	B/A (kg/kg)	Κλάσμα mol <sup>†</sup>							
			C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>‡</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
0.35	0.20	3.00	0.034	0.018	0.072	0.120	0.205	0.026	0.002	0.523
		4.00	0.035	0.018	0.072	0.125	0.029	0.080	0.002	0.458
		5.00	0.038	0.200	0.075	0.126	0.214	0.126	0.002	0.399
	0.25	3.00	0.030	0.016	0.090	0.120	0.179	0.125	0.003	0.437
		4.00	0.031	0.016	0.093	0.126	0.186	0.196	0.009	0.342
		5.00	0.035	0.019	0.093	0.131	0.190	0.220	0.006	0.306
	0.30	3.00	0.207	0.014	0.096	0.124	0.158	0.167	0.052	0.361
		4.00	0.027	0.014	0.104	0.145	0.162	0.201	0.033	0.314
		5.00	0.031	0.017	0.106	0.146	0.165	0.212	0.015	0.308
0.40	0.20	3.00	0.031	0.016	0.062	0.109	0.179	0.023	0.061	0.519
		4.00	0.031	0.017	0.066	0.107	0.190	0.066	0.065	0.459
		5.00	0.032	0.017	0.068	0.108	0.197	0.102	0.067	0.409
	0.25	3.00	0.028	0.015	0.073	0.113	0.164	0.101	0.068	0.438
		4.00	0.028	0.015	0.078	0.122	0.174	0.161	0.060	0.361
		5.00	0.029	0.015	0.080	0.123	0.177	0.198	0.043	0.334
	0.30	3.00	0.026	0.014	0.084	0.118	0.127	0.134	0.041	0.457
		4.00	0.025	0.013	0.084	0.145	0.134	0.181	0.029	0.389
		5.00	0.026	0.014	0.088	0.142	0.133	0.205	0.055	0.338
0.45	0.20	3.00	0.029	0.016	0.050	0.103	0.166	0.010	0.070	0.557
		4.00	0.030	0.016	0.054	0.100	0.164	0.072	0.071	0.494
		5.00	0.031	0.016	0.058	0.103	0.165	0.106	0.015	0.505
	0.25	3.00	0.025	0.013	0.069	0.110	0.160	0.082	0.033	0.507
		4.00	0.026	0.014	0.072	0.116	0.161	0.146	0.011	0.455
		5.00	0.026	0.014	0.075	0.118	0.155	0.185	0.048	0.381
	0.30	3.00	0.021	0.011	0.075	0.116	0.152	0.151	0.064	0.410
		4.00	0.022	0.012	0.079	0.139	0.127	0.212	0.012	0.398
		5.00	0.023	0.012	0.082	0.141	0.126	0.260	0.024	0.331

<sup>‡</sup>Ξηρή βάση

<sup>†</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

TR: ταχύτητα ρευστοαίωρησης, PPA: ρυθμός ροής ατμού,

B/A: αναλογία βιομάζας ατμού

Πίνακας 6.6: Σύνθεση του παραγόμενου αερίου

ΤΡ (m/s)	ΡΡΑ (kg/min)	Β/Α (kg/kg)	ΚΡΠΑ* (N m <sup>3</sup> /min)	ΑΘΔ (MJ/N m <sup>3</sup> )	ΕΘΔ (MJ/kg <sub>gas</sub> )
0.35	0.20	3.00	0.91	9.08	13.82
		4.00	1.07	9.25	12.40
		5.00	1.22	9.63	11.74
	0.25	3.00	0.98	9.22	12.06
		4.00	1.21	9.54	11.54
		5.00	1.37	9.94	10.86
	0.30	3.00	1.03	9.07	10.36
		4.00	1.07	9.69	8.66
		5.00	1.14	10.10	7.70
0.40	0.20	3.00	1.07	8.01	14.31
		4.00	1.23	8.32	12.82
		5.00	1.39	8.53	11.87
	0.25	3.00	1.14	8.15	12.41
		4.00	1.35	8.60	11.63
		5.00	1.52	8.78	10.70
	0.30	3.00	1.03	8.01	9.13
		4.00	1.16	8.43	8.13
		5.00	1.32	8.57	7.56
0.45	0.20	3.00	1.18	7.19	14.19
		4.00	1.36	7.30	12.42
		5.00	1.51	7.62	11.49
	0.25	3.00	1.22	7.72	12.59
		4.00	1.40	7.95	11.14
		5.00	1.62	8.00	10.34
	0.30	3.00	1.33	7.66	11.31
		4.00	1.53	7.87	10.02
		5.00	1.77	8.09	9.52

\*βασισμένος στη μέση τιμή του ρυθμού ροής διαμέσου των ακροφυσίων.  
 ΤΡ: ταχύτητα ρευστοαίωρησης, ΡΡΑ: ρυθμός ροής ατμού, Β/Α: αναλογία βιομάζας ατμού.  
 ΚΡΠΑ: κανονικοποιημένος ρυθμός παραγωγής αερίου, (στους 25°C και 101,3kPa),  
 ΑΘΔ: ανώτερη θερμότητα δύναμη, ΕΘΔ: ειδική θερμότητα δύναμη

Πίνακας 6.7: Κανονικοποιημένος ρυθμός παραγωγής αερίου και ανώτερη θερμότητα δύναμη του παραγόμενου αερίου

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο προέβλεψε τις θερμοκρασίες στις φάσεις φυσαλίδας, γαλακτώματος και στερεών, τα κλάσματα mol του CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub> καθώς και την ανώτερη θερμογόνο δύναμη του παραγόμενου αερίου με υψηλή ακρίβεια συγκριτικά με τα αποτελέσματα του πειράματος ( $R_2=0,88-0,98$ ). Ο συντελεστής συσχέτισης  $R_2$  για την παραγωγή αερίου ήταν χαμηλότερος (0,75), γεγονός που οφείλεται στην υπόθεση ότι τα αέρια συμπεριφέρονται ιδανικά.

Η θερμοκρασία της κλίνης, η σύνθεση του αερίου, η ανώτερη θερμογόνο δύναμη και το παραγόμενο αέριο είναι στοιχεία που επηρεάζονται από τις διαφορετικές συνθήκες λειτουργία που εξετάστηκαν σε αυτή τη μελέτη. Η προβλεπόμενη θερμοκρασία στη φάση φυσαλίδας, στη φάση γαλακτώματος και στη στερεά φάση παρατηρήθηκε ότι ήταν πιο ευαίσθητες στην αλλαγή της ροής ατμού παρά στο λόγο ατμού βιομάζας και στην ταχύτητα ρευστοαιώρησης. Οι αλλαγές στη ροή ατμού έχουν τα δραστικότερα αποτελέσματα στα κλάσματα mol του CH<sub>4</sub> και CO<sub>2</sub> ενώ ακολουθεί ο λόγος βιομάζας/ ατμού και η ταχύτητα ρευστοαιώρησης. Στην περίπτωση του H<sub>2</sub> και του CO, η αναλογία βιομάζας/ ατμού επιδρά περισσότερο στο κλάσμα mol των παραπάνω στοιχείων ακολουθούμενη από το ρυθμό ροής ατμού και την ταχύτητα ρευστοαιώρησης. Η ταχύτητα ρευστοαιώρησης επιδρά κυρίως στο κλάσμα mol του N<sub>2</sub>. Η αναλογία βιομάζας/ ατμού επιδρά κυρίως στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη του αερίου και το ρυθμό παραγωγής του.

Θερμοκρασία κλίνης: Το μοντέλο πρόβλεψε μέση θερμοκρασία κλίνης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας με υψηλή ακρίβεια ( $R^2 = 0.92$ ), όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.1. Το παραπάνω μπορεί να αποδοθεί στις παραδοχές του μοντέλου ότι η ρευστοποιημένη κλίνη αποτελείται από μια αραιή φάση (έγχυση, φυσαλίδες, slugs) και μια πυκνή φάση (emulsion phase), η οποία υποδιαιρείται σε αέρια (interstitial gas) και στερεή φάση (solids). Η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ αραιής φάσης και του ενδιάμεσου αερίου, μεταξύ του ενδιάμεσου αερίου και των στερεών καθώς και η εναλλαγή θερμότητας λόγω αγωγής μεταξύ των στερεών πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό έτσι ώστε η κατανομή θερμοκρασίας να θεωρείται ομοιόμορφη εντός των σωματιδίων. Το μοντέλο απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα από εκείνα των Sundaresen και Amundson [98] για αεριοποίηση άνθρακα και από εκείνα των Bacon et al. [99] για αεριοποίηση ξύλου.

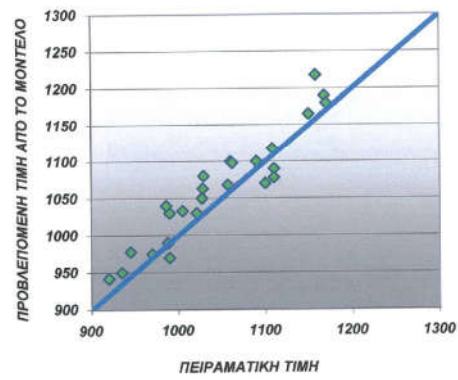
Σύνθεση αερίου: Από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου [83] προέκυψε ότι η ταχύτητα ρευστοαιώρησης, ο ρυθμός ροής ατμού καθώς και η αναλογία βιομάζας/ ατμού επηρεάζουν τη σύνθεση αερίου. Τα προβλεπόμενα αποτελέσματα του μοντέλου συμπίπτουν με τα πειραματικά στη συγκεκριμένη περίπτωση. Ο βαθμός συσχέτισης των προβλεπόμενων και παρατηρούμενων συγκεντρώσεων για τα κλάσματα mol του H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub> είναι 0,96, 0,94, 0,93, 0,97 και 0,88 αντίστοιχα.(διαγράμματα 7.2(α),(β),(γ) και 7.3(α),(β)). Το μοντέλο κατέληξε σε καλύτερα αποτελέσματα από εκείνα των Raman et al. [100], το οποίο πρόβλεψε μικρότερες παραγόμενες ποσότητες H<sub>2</sub>, CO και CH<sub>4</sub> και μεγαλύτερες ποσότητες για CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> και υπολείμματος άνθρακα. Το μοντέλο υπερτερεί από εκείνο των Chang et al [101], το οποίο κατέληξε σε μικρότερες παραγόμενες ποσότητες για όλα τα αέρια, παρόμοιες με εκείνες του μοντέλου Van den Aarsen [102].

Ανώτερη θερμογόνο δύναμη: Από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου [83] προέκυψε ότι ο ρυθμός ροής ατμού καθώς και η αναλογία βιομάζας/ ατμού επηρεάζουν θετικά την ανώτερη θερμογόνο δύναμη, σε αντίθεση με την ταχύτητα ρευστοαιώρησης που επηρεάζει αρνητικά τη σύσταση του παραγόμενου αερίου. Το διάγραμμα 7.4 παρουσιάζει την ομοιομορφία των πειραματικών αποτελεσμάτων και εκείνων του μοντέλου ( $R^2=0.98$ ).

Παραγωγή αερίου: Το μοντέλο προέβλεψε το ρυθμό παραγωγής αερίου σε διάφορες λειτουργικές συνθήκες με σχετικά υψηλή ακρίβεια ( $R^2=0.75$ ), όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.5. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στην παραδοχή ότι το αέριο είναι ιδανικό. Ο ρυθμός παραγωγής αερίου αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης και της αναλογίας βιομάζας/ ατμού, ενώ αύξηση του ρυθμού ροής ατμού σε τιμή μεγαλύτερη από 0,25 Kg/min μειώνει το ρυθμό παραγωγής αερίου, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας της κλίνης.

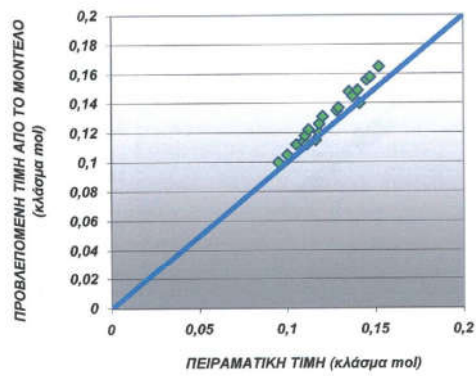
Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι το μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους και το παραγόμενο κλάσμα mol του H<sub>2</sub>.

ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΛΙΝΗΣ)



Διάγραμμα 7.1: Προβλεπόμενη και πειραματική μέση θερμοκρασία κλίνης

ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ( $CH_4$ )

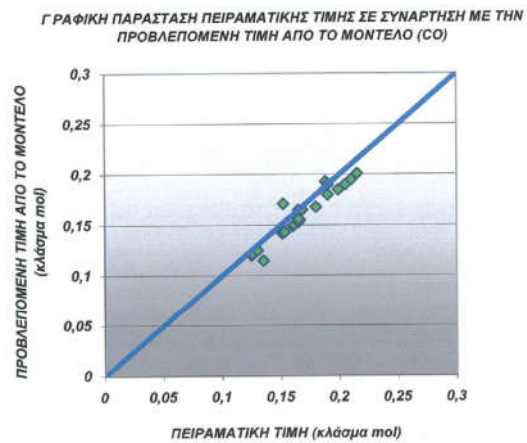


Διάγραμμα 7.2(α): Προβλεπόμενο και πειραματικό κλάσμα mol του  $CH_4$

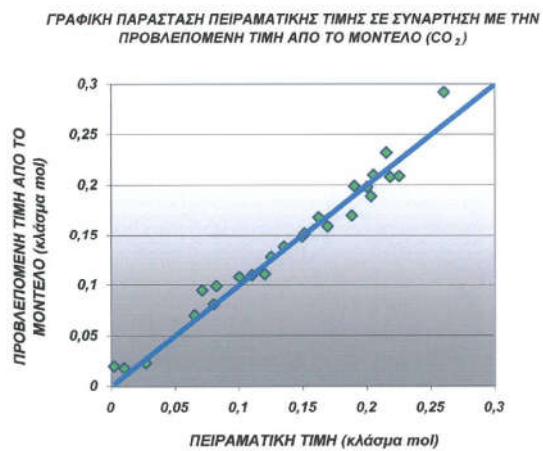




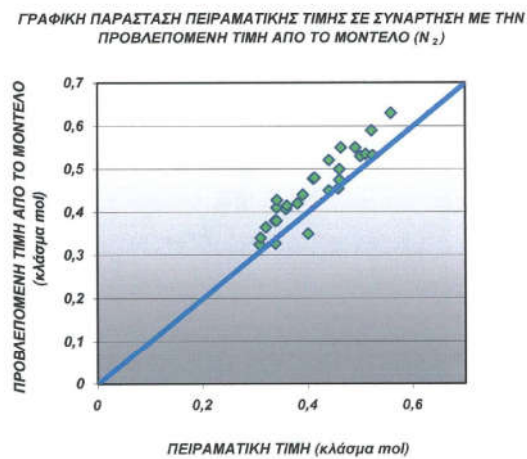
Διάγραμμα 7.2(β): Προβλεπόμενο και πειραματικό κλάσμα mol του H<sub>2</sub>



Διάγραμμα 7.2(γ): Προβλεπόμενο και πειραματικό κλάσμα mol του CO

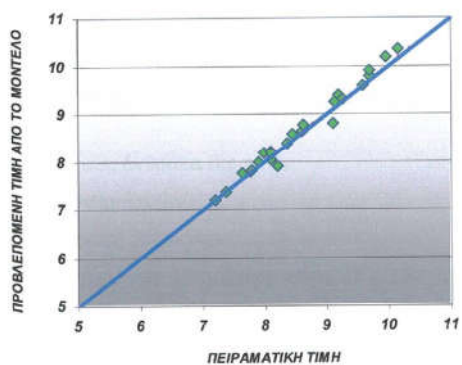


Διάγραμμα 7.3(α): Προβλεπόμενο και πειραματικό κλάσμα mol του CO<sub>2</sub>



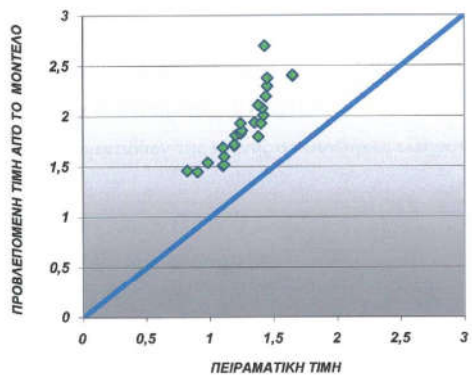
Διάγραμμα 7.3(β): Προβλεπόμενο και πειραματικό κλάσμα mol του N<sub>2</sub>

ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΑΘΔ)



Διάγραμμα 7.4: Προβλεπόμενη και πειραματική ανώτερη θερμογόνος δύναμη (ΑΘΔ)

ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΑΕΡΙΟ)



Διάγραμμα 7.5: Προβλεπόμενος και πειραματικός κανονικοποιημένος ρυθμός παραγόμενου αερίου

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- $\epsilon$ : κλάσμα κενού μεταξύ των σωματιδίων στην κλίνη (αδιάστατο)
- $\beta$ : βάρος άχυρου στον αντιδραστήρα (kg)
- $\rho_b$ : πυκνότητα δυαδικού μίγματος ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\rho_c$ : πυκνότητα άμμου ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $m_c$ : μάζα άμμου (kg)
- $\rho_{cr}$ : πυκνότητα υπολείμματος άνθρακα ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $m_{cr}$ : μάζα υπολείμματος άνθρακα (kg)
- $\delta, \delta_c$ : κλάσμα όγκου στη φάση γαλακτώματος (αδιάστατο)
- $\Delta f^0_i$ : θερμότητα σχηματισμού των  $i$  στοιχείων στους  $25^0\text{C}$  ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )
- $\rho_g$ : πυκνότητα αερίου ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\Delta G_{fi}^0$ : ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του συστατικού  $i$  σε θερμοκρασία  $T$  ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- $\Delta H$ : ενθαλπία αερίου ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )
- $\Delta H_{ie}$ : αισθητή θερμότητα των αερίων συστατικών στη φάση γαλακτώματος ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )
- $\Delta H_{ib}$ : αισθητή θερμότητα των αερίων συστατικών στη φάση φυσαλίδας ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )
- $\Delta H_j^0$ : θερμότητα της  $j$  αντίδρασης στους  $25^0\text{C}$  ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )
- $\Delta H_{r1}$ : θερμότητα της αντίδρασης (1) σε θερμοκρασία αναφοράς ( $298,15\text{K}$ ) ( $\text{kJ kmol}^{-1}$ )
- $\rho_{ib}$ : πυκνότητα αερίου στη φάση φυσαλίδας ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\rho_{ie}$ : πυκνότητα αερίου στη φάση γαλακτώματος ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\rho_j$ : πυκνότητα εισερχόμενου αέρα από το ακροφύσιο ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\lambda_k$ : λανθάνουσα θερμότητα αντίδρασης ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
- $\epsilon_{mf}$ : κενό μεταξύ των σωματιδίων της κλίνης σε συνθήκες ελάχιστης ρευστοαιώρησης (αδιάστατο)
- $\rho_s$ : πυκνότητα σωματιδίων άμμου ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $\Delta Z$ : προσάυξηση στην κάθετη διεύθυνση (m)
- $\mu$ : ιξώδες αερίου ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
- $\mu_i$ : ιξώδες ( $\text{N s m}^{-2}$ )
- $\nu$ : κινηματικό ιξώδες ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\Lambda$ : κάθετη διατομή της κλίνης ( $\text{m}^2$ )
- $a_{ik}$ : αριθμός ατόμων του  $k$  στοιχείου σε κάθε χημικό μόριο (αδιάστατος)
- $A_r$ : αριθμός Αρχιμήδη (αδιάστατος)

$C_{biomass}$ : βάρος άνθρακα στο άχυρο (kg)  
 $C_{ib}$ : συγκέντρωση των  $i$  στοιχείων στη φάση φυσαλίδας ( $kmol m^{-3}$ )  
 $C_{ic}$ : συγκέντρωση των  $i$  στοιχείων στη φάση γαλακτώματος ( $kmol m^{-3}$ )  
 $C_{ij}$ : συγκέντρωση των  $i$  στοιχείων στην περιοχή έγχυσης ( $kmol m^{-3}$ )  
 $C_{i0}$ : αρχική συγκέντρωση των  $i$  στοιχείων ( $kmol m^{-3}$ )  
 $C_{is}$ : συγκέντρωση των  $i$  στοιχείων στην περιοχή slugging ( $kmol m^{-3}$ )  
 $C_{pb}$ : ειδική θερμότητα μίγματος αερίου στη φάση φυσαλίδας ( $kJ kmol K^{-1}$ )  
 $C_{pc}$ : ειδική θερμότητα μίγματος αερίου στη φάση γαλακτώματος ( $kJ kmol K^{-1}$ )  
 $C_{pg}$ : μέση θερμική χωρητικότητα του μίγματος αερίου ( $kJ kmol K^{-1}$ )  
 $C_{pg,i}$ : θερμική χωρητικότητα του εισερχόμενου αέρα ( $kJ kmol K^{-1}$ )  
 $C_{pg,i}$ : θερμική χωρητικότητα του αερίου  $i$  ( $kJ kmol K^{-1}$ )  
 $C_{ps}$ : ειδική θερμότητα σωματιδίων ( $kJ kg^{-1} K^{-1}$ )  
 $C_s$ : συγκέντρωση υπολείμματος άνθρακα ( $kg$  υπολείμματος  $kg$  σωματιδίων $^{-1}$ )  
 $d_p$ : διάμετρος ακροφυσίου (m)  
 $d_{bm}$ : μέγιστη διάμετρος φυσαλίδας (m)  
 $d_{b0}$ : αρχική διάμετρος φυσαλίδας (m)  
 $d_c$ : διάμετρος της άμμου αλουμίνιας (m)  
 $d_{cr}$ : διάμετρος υπολείμματος άνθρακα (m)  
 $D_{ib}$ : συντελεστής διασποράς των  $i$  στοιχείων στη φάση φυσαλίδας ( $m^2 s^{-1}$ )  
 $D_{ic}$ : συντελεστής διασποράς των  $i$  στοιχείων στη φάση γαλακτώματος ( $m^2 s^{-1}$ )  
 $D_{ij}$ : συντελεστής διασποράς των  $i$  στοιχείων στην περιοχή έγχυσης ( $m^2 s^{-1}$ )  
 $D_{is}$ : συντελεστής διασποράς των  $i$  στοιχείων στην περιοχή slugging ( $m^2 s^{-1}$ )  
 $d_b$ : διάμετρος φυσαλίδας (m)  
 $d_p$ : μέση διάμετρος σωματιδίου (m)  
 $d_{pi}$ : μέση διάμετρος σωματιδίων που προκύπτει από το  $i$  κόσκινο (m)  
 $d_c$ : διάμετρος κλίνης (m)  
 $g$ : επιτάχυνση βαρύτητας ( $9,807 m s^{-2}$ )  
 $H$ : ύψος κλίνης (m)  
 $H_{bc}$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στις φάσεις φυσαλίδας και γαλακτώματος ( $kJ m^{-3} s^{-1} K^{-1}$ )  
 $HHV$ : ανώτερη θερμογόνο δύναμη αερίου ( $kJ m^{-3}$ )  
 $h_i$ : εσωτερικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ( $kJ m^{-2} s^{-1} K^{-1}$ )  
 $h_j$ : συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ανάμεσα στις φάσεις έγχυσης και γαλακτώματος ( $kJ m^{-2} s^{-1} K^{-1}$ )



$h_0$ : εξωτερικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ( $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $h_p$ : συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ( $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{bc})_b$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στη φάση φυσαλίδας και το cloud ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{bc})_s$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στην περιοχή slugging και το cloud ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{be})_b$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στη φάση φυσαλίδας και γαλακτώματος ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{be})_s$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στη φάση γαλακτώματος και την περιοχή slugging ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{ce})_b$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στη φάση γαλακτώματος και το cloud ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{ce})_s$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στη φάση γαλακτώματος και το cloud ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $(H_{je})_j$ : συντελεστής εναλλαγής θερμότητας ( $\text{kJ m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $K_{bc}$ : συντελεστής εναλλαγής όγκου ανάμεσα στις φάσεις φυσαλίδας και γαλακτώματος ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3} (\text{φυσαλίδα}) \text{s}^{-1}$ )  
 $k_g$ : θερμική αγωγιμότητα του μίγματος αερίου ( $\text{kJ m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $k_j$ : συντελεστής μεταφοράς μάζας ανάμεσα στις περιοχές έγχυσης και γαλακτώματος ( $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ )  
 $K_{je}$ : συντελεστής εναλλαγής αερίου ανάμεσα στις περιοχές έγχυσης και γαλακτώματος ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $K_{se}$ : συντελεστής εναλλαγής αερίου ανάμεσα στις περιοχές γαλακτώματος και slugging ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $L_j$ : βάθος διείσδυσης εισερχόμενου αέρα από το ακροφύσιο (m)  
 $L_{sb}$ : ύψος μετάβασης από την περιοχή φυσαλίδας στην περιοχή slugging (m)  
 $l_{sb}$ : ύψος μετάβασης από την περιοχή φυσαλίδας στην περιοχή slugging (m)  
 $n$ : αριθμός κόσκινων (αδιάστατος)  
 $n_C$ : αριθμός mol άνθρακα στο άχυρο (αδιάστατος)  
 $n_{CH_4}$ : αριθμός mol μεθανίου (αδιάστατος)  
 $n_{CO}$ : αριθμός mol μονοξειδίου του άνθρακα (αδιάστατος)  
 $n_{CO_2}$ : αριθμός mol διοξειδίου του άνθρακα (αδιάστατος)  
 $n_d$ : αριθμός ακροφυσίων (αδιάστατος)  
 $n_H$ : αριθμός mol υδρογόνου στο άχυρο (αδιάστατος)

$n_{H_2}$ : αριθμός mol υδρογόνου (αδιάστατος)  
 $n_{H_2O}$ : αριθμός mol νερού (αδιάστατος)  
 $n_{N_2}$ : αριθμός mol αζώτου (αδιάστατος)  
 $n_O$ : αριθμός mol οξυγόνου στο άχυρο (αδιάστατος)  
 $n_{O_2}$ : αριθμός mol οξυγόνου(αδιάστατος)  
 $n_{tot}$ : συνολικός αριθμός mol (αδιάστατος)  
 $Nu$ : αριθμός Nusselt's (αδιάστατος)  
 $P$ : μερική πίεση (kPa)  
 $Pr$ : αριθμός Prantl (αδιάστατος)  
 $R$ : παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,314 kJ kmol k<sup>-1</sup>)  
 $Re$ : αριθμός Reynolds (αδιάστατος)  
 $r_i$ : εσωτερική ακτίνα της κλίνης (m)  
 $r_o$ : εξωτερική ακτίνα της κλίνης (m)  
 $R_{ib}$ : ρυθμός παραγωγής i στοιχείων στη φάση φυσαλίδας ανά μονάδα όγκου και χρόνου (kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>)  
 $R_{ic}$ : ρυθμός παραγωγής i στοιχείων στη φάση γαλακτώματος ανά μονάδα όγκου και χρόνου (kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>)  
 $R_{ij}$ : ρυθμός παραγωγής i στοιχείων στην περιοχή έγχυσης ανά μονάδα όγκου και χρόνου (kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>)  
 $R_{is}$ : ρυθμός παραγωγής i στοιχείων στην περιοχή slugging ανά μονάδα όγκου και χρόνου (kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>)  
 $R_i$ : ρυθμός αντίδρασης (kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)  
 $R_s$ : ρυθμός παραγωγής υπολείμματος: ανά μονάδα χρόνου (kg s<sup>-1</sup>)  
 $t$ : χρόνος (s)  
 $TAR_y$ : κ.β. απόδοση σε πίσσα (%)  
 $T_c$ : θερμοκρασία γαλακτώματος (K)  
 $T_b$ : θερμοκρασία φυσαλίδας (K)  
 $T_g$ : θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα (K)  
 $T_{i0}$ : αρχική θερμοκρασία και θερμοκρασία εισαγωγής των στοιχείων i (K)  
 $T_r$ : θερμοκρασία αναφοράς (298,15 K)  
 $T_s$ : αρχική θερμοκρασία κλίνης (K)  
 $U$ : ταχύτητα εισόδου αερίου (m s<sup>-1</sup>)  
 $U_\phi$ : ταχύτητα έγχυσης αέρα στην έξοδο του ακροφυσίου (m s<sup>-1</sup>)

- $U_b$ : ταχύτητα ανόδου ( $m s^{-1}$ )
- $U_j$ : ταχύτητα ανόδου αέρα μετά το ακροφύσιο ( $m s^{-1}$ )
- $U_{mf}$ : ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης του άχυρου ( $m s^{-1}$ )
- $U_s$ : ταχύτητα ανόδου αέρα στην περιοχή slugging ( $m s^{-1}$ )
- $V_{ij}$ : στοιχειομετρικός συντελεστής των στοιχείων  $i$  στην αντίδραση  $j$ , θετικός για το προϊόν
- $W'$ : βάρος των σωματιδίων ανά όγκο ελέγχου ( $kg m^{-3}$ )
- $W_{in}$ : ρυθμός εισαγωγής υπολείμματος άνθρακα στον αντιδραστήρα ( $kg s^{-1}$ )
- $W_{out}$ : ρυθμός εξαγωγής υπολείμματος άνθρακα από τον αντιδραστήρα ( $kg s^{-1}$ )
- $x_i$ : κλάσμα μάζας των σωματιδίων που συγκρατήθηκαν στο  $i$  κόσκινο (αδιάστατο)
- $y_i$ : κλάσμα mol του συστατικού (αριθμός mol του στοιχείου  $i$  / ολικό αριθμό moles)
- $y_i$ : κλάσμα mol των αερίων
- $Z$ : κάθετη απόσταση από το διανομέα (m)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Διεύρυνση δυνατοτήτων αξιοποίησης βιομάζας για την παραγωγή Η/Ε από τη ΔΕΗ, ΚΑΠΕ. Δεκέμβριος 1996.
2. "Ενεργειακές καλλιέργειες για την παραγωγή υγρών και στερεών βιοκαυσίμων στην Ελλάδα", ΚΑΠΕ.
3. "Combustion characteristics of different biomass fuels "Ayhan Demirbas, Department of Chemical Engineering, Selcuk University Turkey, October 2003.
4. Charles Y. Wereko Brobbay and Essel B., Hang., 'Biomass conversion and technology', published Chichester: John Wiley&Sons., c1996, pp.230.
5. <http://www.google.com/search>.
6. Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας/ Ενέργεια από βιομάζα ΚΑΠΕ, Αθήνα Σεπτέμβριος 1998.
7. Alexopoulou E., Nikolaou A. and Pannoutsos C. 1999. *National Report on Biomass in Greece*. ΑΙ. 4.1030/D/97-029/ AFB IV-Bioguide III, CRES.
8. CRES 2002. *Renewable Energy Sources Statistics for 2000 in Greece*. Information Systems Division. Diamantidis.N.D., Koukios E.G. 2000. Agricultural crops and residues as feedstocks for non food products in Western Europe. *Industrial Crops and Products* 11 97-106.
9. FAO 2000. *The energy and agriculture nexus*. Environment and natural resources service. Sustainable Development Department Working Paper No. 4. <http://www.fao.org/sd/EGdirect/EGre0058.htm>.
10. Blassi C., Tanzi V. and Lanzetta M. 1997. A study on the production of agricultural residues in Italy. *Biomass and Bioenergy*. 12(5):321-331.
11. DALIANIS C., DJOURAS N. and SOOTER CH., 1996. Very short rotation and dense eucalypt plantations for energy. In. 'Biomass for energy. Industry and environment' Proc. 9<sup>th</sup> European Bioenergy conference. Ed.Chartier et al., Pergamon Press UK. Pp.663-668.
12. Metro A., 1969. Ερευνα επί της καλλιέργειας των ευκαλύπτων εν Ελλάδι. Έργο UNSF/FAO/CRE-20/230 'Ενίσχυσης του Ινστιτούτου δασικών Ερευνών. Ηνωμένα Έθνη και Ελλάς'.
13. Μαντζίρης Δ.,1980. Επιτυχία αύξηση και αντοχή στους παγετούς ειδών ευκαλύπτου ηλικίας οκτώ ετών στη Βατεράδα Αιτωλοακαρνανίας και Προκόπιο Ευβοίας. ΔΑΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (1) 1σ.59-86.
14. Πανέτσος ΚΑΠΕ., 1975. Είδη ευκαλύπτου εις ευκαλυπτόνα Λάππα. Αύξηση-προσαρμογή αυτοτελείς εκδόσεις Ινστιτούτου Δασικών Ερευνών No.65,σελ.26.
15. CHRISTOU M.,PAPAVASSILIOU D., ALEXOPOULOU E. AND CHATZIATHANASSIOU A.,1998:<<Comparative studies of two potential energy crops in Greece>>In <<Biomass for Energy and Industry>>,Presented in 10<sup>th</sup> European Conference. Ed. Chartier et al., C.A.R.M.E.N. Press. Germany.pp.935-938.
16. CHRISTOU M., ALEXOPOULOU E., MARDIKIS M.,2000a <<Propagation material and plant density effects on the Arundo Donax yields>>,In Kiritsis.S, Beenackers. A.A.C.M. Helm P.,Grassi .A., and D. Chiaramonti, Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Seville, Spain ,5-9/6/2000. James and James Ltd, pp.1622-1625.
17. CHRISTOU M.,ALEXOPOULOU E.,MARDIKIS M.,2000b <<Giant Reed(Arundo donax L) Network Improvement, Productivity and Biomass Quality>>,In Kiritsis S, Beenackers, A.A.C.M. Helm P., Grassi A. and D.



- Chiaromonti, Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Seville, Spain, 5-9/6/2000. James and James Ltd, pp.1803-1806.
18. DALIANIS C., PANOUTSOU C., N.DERCAS, 1996: 'Spanish Thistle Artichoke, *Cynara cardunculus* L., under Greek Conditions', In. 'Biomass for energy and environment'. Proc. 9<sup>th</sup> European Bioenergy Conference, Ed. Chartier et al, Pergamon Press U.K. pp.666-668.
  19. CHRISTOU M., ALEXOPOULOU E., ZAFIRIS C., CHATZIATHANASSIOU A. AND D. PAPA VASSILIOU, 1999, <<Miscanthus growing experience in Greece>>, 6<sup>th</sup> Symposium on Renewable Resources and 4<sup>th</sup> European Symposium on Industrial Crops and Products, pp.356-367.
  20. ELBERSEN, H.W., CHRISTIAN, D.G., BACHER, W., ALEXOPOULOU E., PIGNIATELLI, V. and VAN DEN BERG, 2000: 'Switchgrass variety choice in Europe'. In Kyritsis, S., Beenackers, A.A.C.M, Helm, P., Grassi, A, and D.Chiaromonti, D.(Eds), Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Seville, Spain, 5-9/6/2000. James and James Ltd. pp205-205.
  21. ELBERSEN, H.W., CHRISTIAN, D.G., BACHER, W., ALEXOPOULOU E., PIGNIATELLI, V. and VAN DEN BERG, 2000: 'The European switchgrass project in Europe'. In Kyritsis, S., Beenackers, A.A.C.M, Helm, P., Grassi, A, and D.Chiaromonti, D.(Eds), Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Seville, Spain, 5-9/6/2000. James and James Ltd. Pp379-380.
  22. ΝΙΚΟΛΑΟΥ Α., ΝΑΜΑΤΟΒ Ε., ΚΑΒΑΔΑΚΗΣ Γ., ΤΣΙΩΤΑΣ Κ., ΠΑΝΟΥΤΣΟΥ Κ., ΔΑΝΑΛΑΤΟΣ Ν., 2000: 'Αξιολόγηση της ανάπτυξης και παραγωγικότητας οκτώ γενοτύπων σόργου για παραγωγή βιομάζας και ενέργειας'. Βόλος, 2<sup>ο</sup> Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής.
  23. ΝΙΚΟΛΑΟΥ Α., ΚΑΒΑΔΑΚΗΣ Γ., ΠΑΝΟΥΤΣΟΥ Κ., ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ Ε., ΜΑΝΙΩΤΗ Ε., ΜΗΤΣΙΟΥ Χ., ΔΑΝΑΛΑΤΟΣ Ν., 2000: 'Ανάπτυξη και παραγωγικότητα βιομάζας και σακχάρων καλλιέργειας γλυκού σόργου (cv. Keller) στην Κεντρική Ελλάδα'. Βόλος, 2<sup>ο</sup> Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής.
  24. ALEXOPOULOY E., KIPRIOTIS E., GEORGIADIS S. AND M.CHRISTOU. 2002a: <<Effect of variety, plant density and irrigation on kenaf bark and core yields>>. Presented in the 12<sup>th</sup> European Biomass Conference, 17-21 June 2002, Amsterdam, Volume I, 345-348.
  25. ALEXOPOULOY E., KIPRIOTIS E., GEORGIADIS S. AND M.CHRISTOU. 2002b: <<Effect of year and site in the productivity of three late-maturity kenaf varieties>>. Presented in the 12<sup>th</sup> European Biomass Conference, 17-21 June 2002, Amsterdam, Volume I, 349-352.
  26. ALEXOPOULOY E. AND M. CHRISTOU. 2002c: <<Nitrogen effects on kenaf varieties grown in central Greece>>. Presented in the 12<sup>th</sup> European Biomass Conference, 17-21 June 2002, Amsterdam, Volume I, 357-360.
  27. Αγροτική Τράπεζα Ελλάδας 1996. Απογραφή Ζωικών Μονάδων στην Ελλάδα.
  28. *Hydrogen from biomass*, Kaushik Nath and Debabrata Das (e-mail: ddas@hijli.iitkgp.ernet.in), Department of Biotechnology, Indian Institute of Technology, Kharagpur 721 302, India.
  29. Cocco G and Costantinides A, Riv.Combust., 1988,42,255-264.
  30. Aznar M.P et al, Biomass gasification with steam and oxygen mixture at pilot scale. In. Developments in Thermochemical Biomass Conversion, 1997, vol.2. pp1994-1208.



31. Caglar A. and Demirbas A., *Energy Sources*, 2001, 23, 739-746.
32. Abedi J., Yebooh Y.D. and Scahill J. Production of primary pyrolysis oil in a vortex reactor in: *Pyrolysis Oils from Biomass: Producing, Analysing and Upgrading* (eds Soltes E.J and Milne, T. A.), American Chemical Society, Washington DC, 1988, pp.31-40.
33. Yogeve A., Kribus A., Epstein M. and Kogan A., *Int.J.Hydrogen Energy*, 1998, 23, 239-245.
34. Thakur L. Advances in hydrogen energy. *Hydrogen Energy Progress*, IAHE, FL, 1980, vol.3, pp.1725-1726.
35. Antal M.J., Hydrogen and food production from nuclear heat and municipal waste. *Hydrogen Energy (Part A)* (Ed.Veziroglu T.N.), Plenum, New York, 1974. pp331-338.
36. Friedrich K., Kordesch K., Simader G. and Selan M. The process cycle sponge-iron/hydrogen/iron oxide used for fuel conditioning in fuel cells. Proceedings. of International Symposium on Fuel Cell System, NY, 1995, pp.239-248.
37. Modell M. Gasification and liquefaction of forest products in supercritical water. *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion* (eds Overend R.P., Milne T.A. and Mudge L.R.), Elsevier Applied Science, 1985, pp.95-119.
38. Fascetti E. and Todini O., *Appl.Microbiol.Biotechnol.*, 1995, 44, 300-305.
39. N.N.Greenwood and A.Earnshaw, *Chemistry of the elements*, Pergamon, Oxford, 1984, Chapter 3.
40. *Overview of Small Scale Biomass Gasification*, H>A>M> Knoef, Biomass Technology Group (BTG), P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands.
41. U.S. Department of energy, energy efficiency and renewable energy *Biomass today*.  
File://C:\Documents%20and%20Settings\User\Desktop\Biomass%20Today.htm.
42. <http://www.cosmopowertech.com/updraft.html>
43. <http://www.cosmopowertech.com/dndraft.html>
44. Modelling of Biomass Gasification, A.G.Buekens and J.G. Schoters, *Fundamentals of Thermo chemical Biomass Conversion*, Edited by R.P. Overend, T.A. Milne, L.K. Mudge, Elsevier Applied Science Publishers.
45. Kunli.D. and Levenspiel O. (1969) *Fluidization Engineering*, Wiley, New York.
46. Leva M.(1959) *Fluidization* McGraw-Hill, New York.
47. Nienow A. and Rowe D.(1976) *Proceedings on the first International Symposium on Materials and Energy From Refuse*, Antwerp, October.
48. Masson H. et al.(1981), *Presented on the second International Symposium on Materials and Energy From Refuse*, Antwerp, October.
49. <http://www.mdh.se/ist/kurser/distans/Ericz/energisystemebok28aug02/blg-cogen-bok.html>.
50. *Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier*, Ragnar Warnecke, Noell-KRC Energie and Umwelttechnik, Department of Process Development, Alfred-Nobel-Straße 20, 97 080, Wurzburg, Germany.
51. Van Ginniken C. and Tels M.(1981) *Presented on the second International Symposium on Materials and Energy From Refuse*, Antwerp, October.

52. Sadaka SS, Ghaly AE, Sabbah MA. Two phase biomass air steam gasification model for fluidized bed reactor, Part I-model development, *Biomass and Bioenergy* 2002,22(6):439-62.
53. Fitzrerald TJ. Coarse particle systems. In: Davidson JF, Clift R, Harisson D, editors. *Fluidization*. New York: Academic press, 1985.
54. Raman KP, Walawender WP, Fan LT, Chang CC. Mathematical model for fluid bed gasification of biomass material. Application to feedlot manures. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development* 1981;20:686-92.
55. Ergudenler A, Hamdullahpur F, Al-Taweel AM. Mathematical modelling of a fluidized bed falsifier. Part I-model development. *Energy Source* 1997;19:1065-84.
56. Sadaka SS. Air steam gasification of wheat straw in a fluidized bed reactor. Unpublished thesis, Egypt, Alexandria University, 1994.
57. Ergudenler A. Gasification of wheat straw in a dual distributor type fluidized bed reactor. Unpublished Ph.D. thesis, Technical University of Nova Scotia, NS Canada 1993.
58. Corella J, Herguido J, Gonzalez-Saiz J. Steam gasification of Biomass in fluidized bed effect of the type of feedstock. In: Ferrero GL, Maniatis K, Buekens A, Bridgwater AV, editors. *Pyrolysis and gasifications*. London: Elsevier Applied Science, 1989. p. 618-23.
59. Milne T, *Pyrolysis- The thermal behaviour of biomass below 600<sup>0</sup>C. A survey of biomass gasification, 1979. vol.II. SERI/TR-33-239[Chapter 5].*
60. Black JW, Bircher KG, Chisholm KA. Fluidized bed gasification of solid wastes and biomass-The C.I.L. program. Symposium on Thermal Conversion of Solid Waste and Biomass. Washington DC. American Chemical Society, 1979.
61. Mansary KG. Gasification of rice husk in a fluidized bed reactor. Unpublished Ph.D. thesis, Dalhousie University, Nova Scotia, Canada, 1998.
62. Smith JM, Van Ness HC. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill. 1976. p. 426.
63. Bacon DW, Downie J, Hsu JC, Peters JA. Modelling of fluidized bed wood gasifiers. In: Ocerend RP, Milne TA, Mudge KL., editors. *Fundamentals of thermochemical biomass conversion*. London, UK: Elsevier Applied Publishers, 1985. p. 717-32.
64. Abrahamsen AR, Geldart D. Behaviour of gas-fluidized beds of fine powders part I. homogenous expansion. *Power Technology* 1980, 26:35-42.
65. Botterill JS, Bessant DJ. The flow properties of fluidized solids. *Power Technology* 1976, 14:131-7.
66. Davidson JF, Harrison D. *Fluidised particles*, Cambridge University Press 1963.
67. Mori S, Wen CY. Estimation of bubble diameter in gaseous fluidized beds. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 1975, 21(1):109-15.
68. Merry JM. Penetration of vertical jets into fluidized beds. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 1975, 21(3):507-10.
69. Behie LA, Bergougnou MA, Baker CG. Mass transfer from a grid jet in a large gas fluidized bed. In: Keairns DL, editor. *Fluidization technology, vol. I*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1976. p. 261-78.
70. Behie LA, Bergougnou MA, Baker CG. Heat transfer from a grid jet in a large fluidized bed *Canadian Journal of Chemical Engineers* 1975, 53(2):25-30.

71. Wen CY, Fan LT. Heterogeneous models. In: Albright LF, Maddox RN, McKetta JJ, editors. Models for flow systems and chemical reactors. Chemical processing and engineering, vol. 3. New York: Marcel Dekker, Inc., 1975.
72. Kunii D, Levenspiel O. Fluidization Engineering. New York: Wiley, 1969.
73. Homeland S, Davidson JF. Chemical conversion in a slugging fluidized bed. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 46T 1968:190-203.
74. Ragraman J, Potter OE. Counter current back mixing model for slugging fluidized bed reactors. American Institute of Chemical Engineers Journal 1978, 24(4):698-704.
75. Ranz WE, Marshall WR. Evaporation from drops, Part II. Chemical Engineering Progress 1952, 48(4):173-80.
76. Rohsnow MW, Hatnett JP. Handbook of heat transfer. New York: McGraw-Hill Book Company, 1973.
77. Toulkian YS, Saxena SC. Thermophysical properties of matter, vol. II. Viscosity. New York: LFL / Plenum Press, 1970.
78. Toulkian YS, Liley YS, Saxena SC. Thermophysical properties of matter, vol. III. Thermal Conductivity. New York: LFL / Plenum Press, 1970.
79. Reid CR, Prausnitz JM, Sherwood CK. The properties of gases and liquids. New York: McGraw-Hill, 1977.
80. Sadaka SS, Ghaly AE, Sabbah MA. Two phase biomass air steam gasification model for fluidized bed reactor, Part III-model validation, Biomass and Bioenergy 2002.
81. Walawender WP, Hoveland DA, Fan LT. Steam gasification of alpha cellulose in a fluid bed reactor. Presented at Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion Conference, Estes Park, CO, 1982.
82. Sadaka SS, Ghaly AE, Sabbah MA. Two phase biomass air steam gasification model for fluidized bed reactor, Part I-model development, Biomass and Bioenergy 2002, 22(6):439-62.
83. Ergudenler A, Ghaly AE. Quality of gas produced from wheat straw in a dual distributor type fluidized bed gasifier. Biomass Bio energy J 1992, 3(6):419-30.
84. Singh SK, Walawender WP, Fan LT, Geyer WA. Steam gasification of cotton wood (Branches) in a fluidized bed. Wood Fiber Science 1986, 18:327-44.
85. Walawender WP, Hoveland DA, Fan LT. Steam gasification of alpha cellulose in a fluid bed reactor. Presented at Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion Conference, Estes Park, CO, 1982.
86. Corella J, Herguido J, Gonzalez-Saiz J. Steam gasification of biomass in fluidized bed-effect of the type of feedstock. In: Ferrero GL, Maniatis K, Buekens A, Bridgwater AV. Editors. Pyrolysis and gasification, London: Elsevier Applied Science, 1989 p.618-23.
87. Ergudenler A. Gasification of wheat straw in a dual-distributor type fluidized bed reactor. Unpublished Ph.D.thesis. Technical University of Nova Scotia, Nova Scotia, Canada, 1993.
88. Beaumont O, Schwob Y. Influence of physical and chemical parameters on wood pyrolysis. Industrial Engineering Chemical Process Design and Development 1984, 23:637-41.
89. Ghaly AE, Ergudenler A, Ugwu I. Mixing patterns and residence time determination in a fluidized bed system. ASAE Paper No. 89-6086, St. Joseph, Michigan, 1989.
90. Raissi AR, Trezek GJ. Parameters governing biomass gasification. Ind Eng Chem Res 1987, 26(2) :221-8.



91. Schoeters J. Maniatis K. Buekens A. The fluidized bed gasification of biomass: experimental studies on bench scale reactor. *Biomass* 1989,19:129-43.
92. Richard JR. Cathonnet M. Rowan JP. Gasification of charcoal: influence of water vapour. In: Overend RP. Milne TA. Mudge KL. Editors. *Fundamentals of thermo chemical biomass conversion*. London, UK: Elsevier Applied Science Publishers, 1985 p.589-99.
93. Hos JJ. Groeneveld MJ. Biomass gasification, In: Hall DO. Overend RP. Editors. *Biomass: regenerable energy*. New York: Wiley, 1987 p.237-55.
94. Maniatis K. Bridgwater AV. Buekens A. Fluidized bed gasification of wood: performance of a demonstration plant. In: Ferrero GL. Maniatis K. Buekens A. Bridgwater AV. Editors. *Pyrolysis and gasification*. London. UK: Elsevier Applied Science, 1989 p.274-81.
95. Sadaka SS. Air steam gasification of wheat straw in a fluidized bed reactor. Unpublished thesis. Alexandria University, Egypt 1994.
96. Font R, Marcilla A. Deversa J. Verdu E. Gaseous hydrocarbons from flash pyrolysis of almond shells. *Industrial Engineering Chemical Research* 1988,27:1143-9.
97. Mudge LK. Brown MD. Wilcox WA. Bench scale studies on fluid bed pyrolysis of wood. Report PNL-6114, Pacific Northwest Laboratory, Richland WA, 1988.
98. Corella J. Herguido J. Gonzalez-Saiz J. Steam gasification of biomass in fluidized bed-effect of the type of feedstock. In: Ferrero GL. Maniatis K. Buekens A. Bridgwater AV. Editors. *Pyrolysis and gasification*, London: Elsevier Applied Science, 1989 p.618-23.
99. Ergudenler A. Gasification of wheat straw in a dual-distributor type fluidized bed reactor. Unpublished Ph.D.thesis. Technical University of Nova Scotia, Nova Scotia, Canada, 1993.
100. Beaumont O. Schwob Y. Influence of physical and chemical parameters on wood pyrolysis. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development* 1984, 23:637-41.
101. Ghaly AE. Ergudenler A. Ugwu I. Mixing patterns and residence time determination in a fluidized bed system. ASAE Paper No. 89-6086, St. Joseph, Michigan, 1989.
102. Raissi AR. Trezek GJ. 'Parameters governing biomass gasification'. *Ind Eng Chem Res* 1987, 26(2) :221-8.
103. Kunii and Levenspiel, *Fluidization Engineering*, Wiley, New York, 1969, and Krieger, Malabar, Fla., 1977).