

Παραγωγή Ηλεκτρικής  
Ενέργειας και Θερμότητας  
μέσω της Αναερόβιας  
Χώνευσης κτηνοτροφικών  
απορριμμάτων / υπολειμμάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Φουρκιώτης Ηλίας

ΑΕΜ

335

# Περίληψη

Η παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (και όχι μόνο) από βιομάζα θα παίξει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα τα επόμενα χρόνια. Τα βιοκαύσιμα έχουν πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Κυρίως περιβαλλοντικά και οικονομικά αλλά και κοινωνικά. Έχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα που είναι ο λόγος που δεν έχει αξιοποιηθεί ενεργειακά όσο θα έπρεπε η βιομάζα. Ένα σοβαρό μειονέκτημα είναι η διασπορά και η εποχικότητα της βιομάζας, το οποίο μπορεί να λυθεί με μικρές μονάδες παραγωγής με εναλλακτική πρώτη ύλη. Επίσης το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα μπορεί να ξεπεραστεί με τυχόν επιχορηγήσεις και επιπλέον οικονομικά κίνητρα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρωνόμαστε κυρίως στην βιομάζα, την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή βιοαερίου, στις αποδόσεις των κτηνοτροφικών αποβλήτων προς βιοκαύσιμα και στην συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε αντίστοιχες μονάδες.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο ασχολούμαστε με την βιομάζα. Ο ορισμός της, το ενεργειακό δυναμικό, τα είδη βιομάζας, οι τρόποι αξιοποίησης της, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από την αξιοποίηση της, οι εφαρμογές και οι προοπτικές της αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό. Στη συνέχεια, αναλύονται οι μέθοδοι μετατροπής της βιομάζας όπως η καύση, η πυρόλυση και, φυσικά, η αεριοποίηση και η αναερόβια χώνευση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος της Αναερόβιας Χώνευσης (ΑΧ). Η ιστορική εξέλιξη, τα υποστρώματα για την ΑΧ, τι είναι η ΑΧ, η μικροβιολογία της, παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία, τα συστήματα για την ΑΧ, καθώς και τα προϊόντα που προκύπτουν.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με τα κτηνοτροφικά απόβλητα. Παρουσιάζει διάφορες αποδόσεις προς παραγωγή βιοαερίου από την ΑΧ των κτηνοτροφικών αποβλήτων καθώς και την συν-χώνευση αυτών των αποβλήτων με άλλα υποστρώματα που πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές. Επίσης παρουσιάζει και το θεωρητικό ενεργειακό δυναμικό για την Ελλάδα από την εκμετάλλευση του βιοαερίου.

Τέλος το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με την συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (ΣΗΘ). Μιλάει γενικά για την ΣΗΘ, τους τρόπους λειτουργίας και φυσικά, για τις βασικές αρχές της συμπαραγωγής.

# Περιεχόμενα

Λίστα πινάκων

Λίστα εικόνων

Λίστα σχημάτων

<b>1. Βιομάζα.....</b>	<b>13</b>
1.1 Τι είναι βιομάζα.....	13
1.2 Ενεργειακό δυναμικό.....	17
1.2.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα .....	20
1.2.2 Αγροτικά υπολείμματα .....	21
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας.....	24
1.4 Ενεργειακές καλλιέργειες.....	27
1.4.1 Αγριαγκινάρα .....	28
1.4.2 Switchgrass. ....	29
1.4.3 Μίσχανθος .....	29
1.4.4 Καλάμι.....	29
1.4.5 Ευκάλυπτος.....	30
1.4.6 Ψευδακακία .....	30
1.4.7 Κενάφ.....	31
1.4.8 Γλυκό σόργο .....	31
1.4.9 Ελαιοκάμβη .....	31
1.4.10 Σιτάρι- Κριθάρι.....	32

1.4.11 Αραβόσιπος .....	33
1.4.12 Ηλίανθος .....	33
1.4.13 Ζαχαρότευτλα.....	33
1.5 Απόβλητα και λύματα .....	34
1.5.1 Άχυρο.....	35
1.5.2 Κλαδέματα.....	36
1.5.3 Καυσόξυλα- Ξυλεία.....	36
1.5.4 Ελαιουργεία .....	37
1.5.5 Πυρηνόξυλο .....	37
1.5.5.1 Ενεργειακή αξιοποίηση πυρηνόξυλου.....	37
1.5.5.2 Παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα ελαιουργείων.....	39
1.5.6 Από τη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων .....	39
1.5.7 Κτηνοτροφικά .....	40
1.5.7.1 Πτηνά.....	41
1.5.7.2 Χοίροι .....	42
1.5.7.3 Βοοειδή.....	43
1.5.8 Τυροκομικά.....	43
1.5.9 Αστικά απορρίμματα και βιολογικοί καθαρισμοί .....	44
1.5.9.1 Βιολογικοί καθαρισμοί .....	44
1.5.9.2 Στάδια επεξεργασίας των λυμάτων .....	44
1.5.9.3 Υγρά απόβλητα .....	46

1.6 Περιεκτικότητα σε υγρασία .....	46
1.7 Ενεργειακή αξιοποίηση της Βιομάζας- Εφαρμογές.....	48
1.7.1 Κάλυψη των αναγκών θέρμανσης- ψύξης ή/και ηλεκτρισμού σε γεωργικές και άλλες βιομηχανίες .....	48
1.7.2 Τηλεθέρμανση κατοικημένων περιοχών .....	50
1.7.3 Θέρμανση θερμοκηπίων .....	51
1.7.4 Παραγωγή υγρών καυσίμων με βιομηχανική μετατροπή βιομάζας .....	52
1.7.5 Παραγωγή υγρών καυσίμων με θερμοχημική μετατροπή βιομάζας .....	52
1.7.6 Βιοαέριο .....	53
1.7.7 Παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων από πτηνοτροφικά απόβλητα.....	54
1.8 Επεξεργασία της βιομάζας .....	55
1.8.1 Καύση.....	55
1.8.2 Πυρόλυση.....	57
1.8.3 Ανθρακοποίηση .....	59
1.8.4 Παραγωγή Αιθανόλης .....	60
1.8.5 Παραγωγή φυτικών ελαίων .....	62
1.8.6 Αεριοποίηση .....	63
1.8.7 Παραγωγή βιοαερίου .....	66
<b>2. Αναερόβια χώνευση .....</b>	<b>67</b>
2.1 Ιστορική αναδρομή .....	67
2.2 Υποστρώματα αναερόβιας χώνευσης .....	68

2.2.1 Ενεργειακές καλλιέργειες- Γεωργικά υπολείμματα .....	69
2.2.2 Στερεή και υδαρής κοπριά .....	70
2.2.3 Οργανικό κλάσμα αστικών αποβλήτων και απόβλητα τροφίμων .....	70
2.2.4 Λυματολάσπη .....	70
2.3 Αναερόβια χώνευση (ΑΧ) .....	72
2.4 Μικροβιολογία της αναερόβιας χώνευσης.....	75
2.4.1 Υδρόλυση .....	76
2.4.2 Οξειογένεση .....	77
2.4.3 Οξικογένεση .....	78
2.4.4 Μεθανογένεση .....	79
2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση .....	82
2.5.1 Αναερόβιες συνθήκες .....	82
2.5.2 Θερμοκρασία .....	82
2.5.3 pH .....	83
2.5.4 Αλκαλικότητα .....	84
2.5.5 Χημική σύσταση του υποστρώματος .....	85
2.5.6 Οργανική φόρτιση και υδραυλικός χρόνος παραμονής .....	86
2.5.7 Τοξικότητα και παρεμπόδιση .....	87
2.5.8 Οξυγόνο .....	87
2.5.9 Αμμωνία .....	87
2.5.10 Θειούχα και θειικά ανιόντα .....	88

2.5.11 Βαρέα μέταλλα .....	88
2.5.12 Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες .....	89
2.5.13 Φορμαλδεΐδη .....	89
2.5.14 Αρωματικές ενώσεις .....	89
2.5.15 Ανόργανα στοιχεία .....	90
2.5.16 Ανώτερα λιπαρά οξέα και πτητικά λιπαρά οξέα .....	90
2.6 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης .....	91
2.6.1 Συμβατική αναερόβια χώνευση.....	91
2.6.2 Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων .....	92
2.6.3 Ταχύρυθμες και υβριδικές διατάξεις αναερόβιας χώνευσης .....	93
2.6.4 Αναερόβια φίλτρα .....	93
2.6.5 Διαστελλόμενες και ρευστοποιημένες κλίνες .....	94
2.6.6 Καλυμμένη αναερόβια λεκάνη .....	95
2.6.7 Χωνευτήρας ανοδικής ροής μέσο στρώματος λάσπης .....	95
2.6.8 Αναερόβιος χωνευτήρας με ανακλαστήρες .....	99
2.6.9 Χωνευτήρας πλήρους ανάδευσης .....	100
2.6.10 Χωνευτήρας εμβολικής ροής .....	101
2.7 Προϊόντα αναερόβιας χώνευσης .....	102
2.7.1 Βιοαέριο .....	102
2.7.2 Τα υπολείμματα χώνευσης .....	105



### **3.Κτηνοτροφικά απόβλητα .....107**

3.1 Αναερόβια χώνευση ζωικών απορριμμάτων για την παραγωγή βιοαερίου107

3.2 Λειτουργία και απόδοση διάφορων βιοαντιδραστήρων για την ΑΧ ζωικών απορριμμάτων και αποβλήτων .....110

3.2.1 Αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την χώνεψη (CM) κοπριάς βοοειδών .....110

3.2.2 Αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την χώνεψη (SM) κοπριάς χοίρων .....119

3.2.3 Αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την χώνεψη κοπριάς πουλερικών .....125

3.2.4 Συμπερασματικά σχόλια .....128

3.3 Ενεργειακό και θρεπτικό δυναμικό των ζωικών αποβλήτων στην Ελλάδα 130

3.3.1 Εισαγωγή .....130

3.3.2 Αποτελέσματα .....131

3.3.3 Συμπεράσματα .....138

### **4. ΣΗΘ (Συνδυασμένη παραγωγή Ηλεκτρικής και Θερμικής ενέργειας) .....140**

4.1 Γενικά .....140

4.2 Τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής .....144

4.3 Τύποι σχημάτων συμπαραγωγής .....148

4.4 Βασικές αρχές της συμπαραγωγής .....150

4.4.1 Μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ).....151

4.4.2 Αεριοστρόβιλοι .....	154
4.4.3 Ατμοστρόβιλοι .....	157
4.4.4 Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης .....	160
4.4.5 Ατμοστρόβιλος απομάστευσης .....	161
4.4.6 Ατμοστρόβιλος σε κύκλο βάσης .....	162
4.4.7 Συνδυασμένος κύκλος .....	162
4.4.8 Τυποποιημένες μονάδες παραγωγής (πακέτα) .....	164
4.4.9 Κυψέλες καυσίμου .....	164
4.4.10 Μηχανές Stirling .....	167
4.4.11 Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά .....	169
Βιβλιογραφία .....	170

## Λίστα πινάκων

Πίνακας 1. Ετήσιο παγκόσμιο δυναμικό βιομάζας

Πίνακας 2. Συμμετοχή της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Πίνακας 3. Στρεμματικές αποδόσεις και ενεργειακό περιεχόμενο ενεργειακών καλλιεργειών για την παραγωγή στερεών καυσίμων

Πίνακας 4. Παραγόμενα βιοκαύσιμα από διάφορα φυτά και οι αποδόσεις τους ανά στρέμμα σε σπόρο και καύσιμο

Πίνακας 5. Συνήθης υγρασία για διάφορες πηγές βιομάζας (σε υγρή βάση)

Πίνακας 6. Πρώτες ύλες για παραγωγή βιοαερίου με ΑΧ

Πίνακας 7. Παραγωγή μεθανίου σε  $m^3/tVS$  (πτητικών στερεών)

Πίνακας 8. Μια γενική κατάταξη των κυριότερων υδρολυτικών ενζύμων

Πίνακας 9. Μετατροπή της γλυκόζης σε μείγμα πτητικών λιπαρών οξέων

Πίνακας 10. Υποστρώματα που χρησιμοποιούνται από τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς

Πίνακας 11. Αντιδράσεις παραγωγής μεθανίου και οι αντίστοιχες μεταβολές της ελεύθερης ενέργειας

Πίνακας 12. Παραγωγή μεθανίου από γλυκόζη

Πίνακας 13. Η επίδραση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου ( $NH_3-N$ ) στην αναερόβια διεργασία

Πίνακας 14. Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή ή στερεή μορφή), που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια διεργασία

Πίνακας 15. Συγκεντρώσεις ανόργανων συστατικών που δρουν παρεμποδιστικά στη διεργασία της ΑΧ

Πίνακας 16. Τυπική χημική σύσταση του βιοαερίου

Πίνακας 17. Αποδόσεις διάφορων αντιδραστήρων και διάφορων συνθηκών CM

Πίνακας 18. Αποδόσεις διάφορων αντιδραστήρων και διάφορων συνθηκών SM

Πίνακας 19. Αποδόσεις διάφορων αντιδραστήρων και διάφορων συνθηκών CHM

Πίνακας 20. Συνολικός αριθμός μεσαίου-μεγάλου μεγέθους μονάδων, εκτρεφόμενα ζώα και ημερήσια παραγωγή αποβλήτων και θρεπτικών στοιχείων

## **Λίστα εικόνων**

Εικόνα 1. Βιομάζα

Εικόνα 2. Ο κύκλος του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα

Εικόνα 3. MEK

Εικόνα 4. Αεριοστρόβιλος

Εικόνα 5. Ατμοστρόβιλος

Εικόνα 6. Κυψέλη καυσίμου

Εικόνα 7. Μηχανή Stirling

## Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1. Ποσοστό συμμετοχής της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Σχήμα 2. Ετήσιο ενεργειακό δυναμικό βιομάζας

Σχήμα 3. Βασικά αγροτικά απόβλητα στην Ελλάδα (t/έτος)

Σχήμα 4. Κατανομή ετήσιας παραγωγής βιομάζας σε τόνους ανά κατηγορία αγροτικού υπολείμματος στην Ελλάδα (ΚΑΠΕ 2007)

Σχήμα 5. Πιθανή παραγωγή μεθανίου

Σχήμα 6. Διάγραμμα ροής αναερόβιας χώνευσης

Σχήμα 7. Αναλυτικό διάγραμμα ροής της ΑΧ

Σχήμα 8. Συνεργατική λειτουργία των μικροβιακών ομάδων που λαμβάνουν μέρος στην ΑΧ

Σχήμα 9. Αειφόρος κύκλος παραγωγής βιοαερίου

Σχήμα 10. Κατανομή μεσαίου- μεγάλου μεγέθους κτηνοτροφικών και πτηνοτροφικών μονάδων

Σχήμα 11. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής ζωικών αποβλήτων ( $m^3$ /ημέρα) ανά νομό

Σχήμα 12. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής ασώτου N (kgN/ημέρα)

Σχήμα 13. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής φωσφόρου P(kgP/ημέρα)

Σχήμα 14. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής καλίου K (kgK/ημέρα)

- Σχήμα 15. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου ( $\text{m}^3/\text{ημέρα}$ )
- Σχήμα 16. Ημερήσιο ενεργειακό δυναμικό ( $\text{MJ}/\text{ημέρα}$ )
- Σχήμα 17. Συμβατικό ενεργειακό σύστημα σε σύγκριση με σύστημα ΣΗΘ
- Σχήμα 18. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Otto
- Σχήμα 19. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Diesel
- Σχήμα 20. Σύστημα αεροστροβίλου
- Σχήμα 21. Διάγραμμα θερμοκρασίας- εντροπίας αεριοστροβίλου ανοιχτού κύκλου
- Σχήμα 22. Σύστημα αεριοστροβίλου ανοιχτού κύκλου
- Σχήμα 23. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Brayton ή Joule
- Σχήμα 24. Σύστημα ατμοστροβίλου
- Σχήμα 25. Σύστημα με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης
- Σχήμα 26. Σύστημα με ατμοστρόβιλο απομάστευσης
- Σχήμα 27. Σύστημα με κύκλο βάσης ατμού
- Σχήμα 28. Σύστημα συνδυασμένου κύκλου

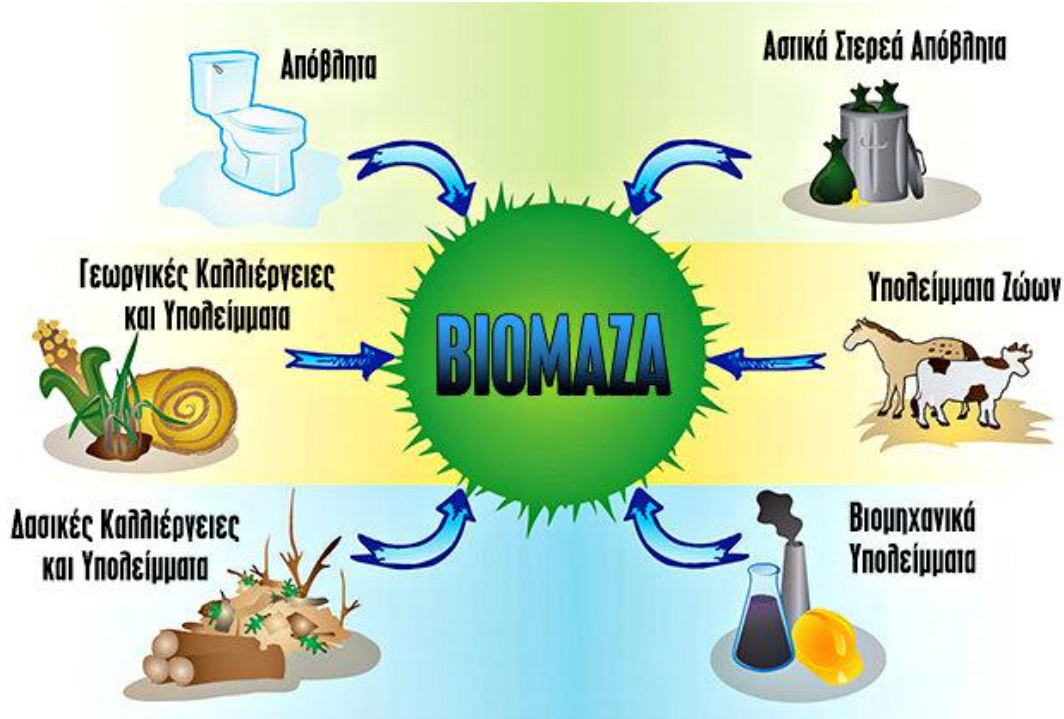
# 1. Βιομάζα

## 1.1 Τι είναι βιομάζα

Σύμφωνα με τον ορισμό της οδηγίας 2009/28/EK βιομάζα είναι "το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και ζωικών ουσιών), τη δασοπονία και τις συναφείς τους βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων, της αλιείας και των υδατοκαλλιεργειών, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων" [4].

Βιομάζα θεωρείται κάθε οργανική ύλη που είναι διαθέσιμη σε ανανεώσιμη βάση, συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών καλλιεργειών, των υποπροϊόντων ή καταλοίπων των δασικών προϊόντων, των παραπροϊόντων ή των υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών, των ζωικών αποβλήτων, του οργανικού κλάσματος των αστικών απορριμμάτων και των υδρόβιων φυτών. Πιο συγκεκριμένα, σ' αυτήν περιλαμβάνονται [2]:

- Οι φυτικές ύλες που προέρχονται είτε από φυσικά οικοσυστήματα, όπως π.χ. τα αυτοφυή φυτά και δάση, είτε από τις ενεργειακές καλλιέργειες (έτσι ονομάζονται τα φυτά που καλλιεργούνται ειδικά με σκοπό την παραγωγή βιομάζας για παραγωγή ενέργειας) γεωργικών και δασικών ειδών, όπως π.χ. το σόργο το σακχαρούχο, το καλάμι, ο ευκάλυπτος κ.ά.,
- τα υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, όπως π.χ. τα άχυρα, στελέχη αραβόσιτου, στελέχη βαμβακιάς, κλαδοδέματα, κλαδιά δένδρων, φύκι, κτηνοτροφικά απόβλητα, οι κληματίδες κ.ά.,
- τα υποπροϊόντα που προέρχονται από τη μεταποίηση ή επεξεργασία των υλικών αυτών, όπως π.χ. τα ελαιοπυρηνόξυλα, υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, το πριονίδι κ.ά., καθώς και
- το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και σκουπιδιών.



Εικόνα 1. Πηγές προέλευσης βιομάζας

Η βιομάζα αποτελεί μία δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Κατ' αυτήν, η χλωροφύλλη των φυτών μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα καθώς και νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος. Η διεργασία αυτή μπορεί να παρασταθεί ως εξής [2]:

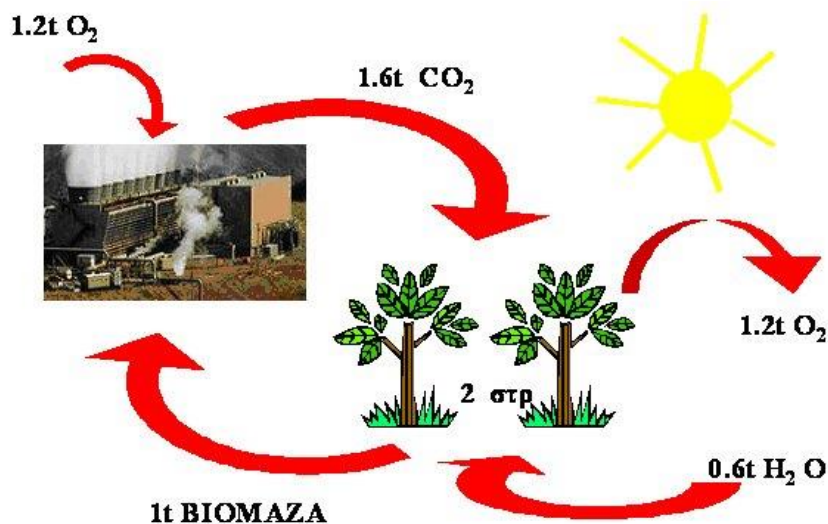
Νερό + Διοξείδιο του άνθρακα + Ηλιακή ενέργεια (φωτόνια) + Ανόργανα στοιχεία  
 $\Rightarrow$  Βιομάζα + Οξυγόνο

Από τη στιγμή που σχηματίζεται η βιομάζα, μπορεί πλέον κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Η βιομάζα αποτελεί μια σημαντική, ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας, η οποία είναι δυνατό να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή επάρκεια, αντικαθιστώντας τα συνεχώς εξαντλούμενα αποθέματα ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο κ.ά.). Είναι η 4η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας στον πλανήτη. Η χρήση της βιομάζας ως πηγής ενέργειας δεν είναι νέα. Σ' αυτήν, εξάλλου, συγκαταλέγονται τα



καυσόξυλα και οι ξυλάνθρακες που, μέχρι της αρχής του περασμένου αιώνα, κάλυπταν το 97% των ενεργειακών αναγκών της χώρας [2].

Η Βιομάζα ως καύσιμο δεν επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με CO<sub>2</sub>, διότι η Βιομάζα στη διάρκεια του κύκλου ζωής της έχει ήδη απορροφήσει περίπου την ίδια ή και μεγαλύτερη ποσότητα CO<sub>2</sub>. Άλλωστε η Ελληνική πολιτεία, ορίζει μηδενικούς εκλυόμενους ρύπους για τη Βιομάζα ανά μονάδα ενέργειας (0KgCO<sub>2</sub>/KWh) [4].



Εικόνα 2. Ο κύκλος του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και η συμβολή της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας με μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα

## 1.2 Ενεργειακό δυναμικό

Η βιομάζα που παράγεται κάθε χρόνο στον πλανήτη μας υπολογίζεται ότι ανέρχεται σε 146 δισεκατομμύρια τόνους ξηρού υλικού, με ενεργειακό περιεχόμενο δεκαπλάσιο της ενέργειας που καταναλίσκείται παγκοσμίως στο ίδιο διάστημα. Το τεράστιο αυτό ενεργειακό δυναμικό παραμένει κατά το μεγαλύτερο μέρος του ανεκμετάλλευτο, καθώς, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, μόνο το 1/7 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τη βιομάζα [2].

Πίνακας 1. Ετήσιο παγκόσμιο δυναμικό βιομάζας [3]

---

**Ετήσιο Δυναμικό Βιομάζας Παγκοσμίως : 146.000.000.000 τν**  
**Ενεργειακό Περιεχόμενο : 8 MJ/kg (υγρή φυτική ύλη), 20 MJ/kg (ξηρή φυτική ύλη) (~27 MJ/kg άνθρακας), (~30 MJ/kg αργό)**  
**80.000.000.000 =  $(8 \times 10^{10})$  τν ισοδύναμου άνθρακα**  
**72.000.000.000 =  $(7.2 \times 10^{10})$  τΙΠ (1 τΙΠ =  $4.19 \times 10^{10}$  J)**  
**3.000.000.000.000.000.000 =  $(3 \times 10^{21})$  Joule**

---

Πίνακας 2. Συμμετοχή της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας [3]

---

**Συμμετοχή στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας :**  
**(παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας:  $1.1 \times 10^{10}$  τια,  $1.0 \times 10^{10}$  τΙΠ,  $0.4 \times 10^{20}$  Joule)**  
**αναπτυγμένες χώρες (50 % παγκ. πληθυσμού) : 3 %**  
**αναπτυσσόμενες χώρες (50 % παγκ. πληθυσμού) : 35 %**  
**στο σύνολο της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης : 14 %**

---



Σχήμα 1. Ποσοστό συμμετοχής της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας [2].

Στην Ελλάδα, τα κατ' έτος διαθέσιμα γεωργικά και δασικά υπολείμματα ισοδυναμούν ενεργειακά με 3-4 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου, ενώ το δυναμικό των ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί, με τα σημερινά δεδομένα, να ξεπεράσει άνετα εκείνο των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί ενεργειακά στο 30-40% της ποσότητας του πετρελαίου που καταναλώνεται ετησίως στη χώρα μας. Σημειώνεται ότι 1 τόνος βιομάζας ισοδυναμεί με περίπου 0.4 τόνους πετρελαίου. Εντούτοις, με τα σημερινά δεδομένα, καλύπτεται μόλις το 3% περίπου των ενεργειακών αναγκών της με τη χρήση της διαθέσιμης βιομάζας [2].

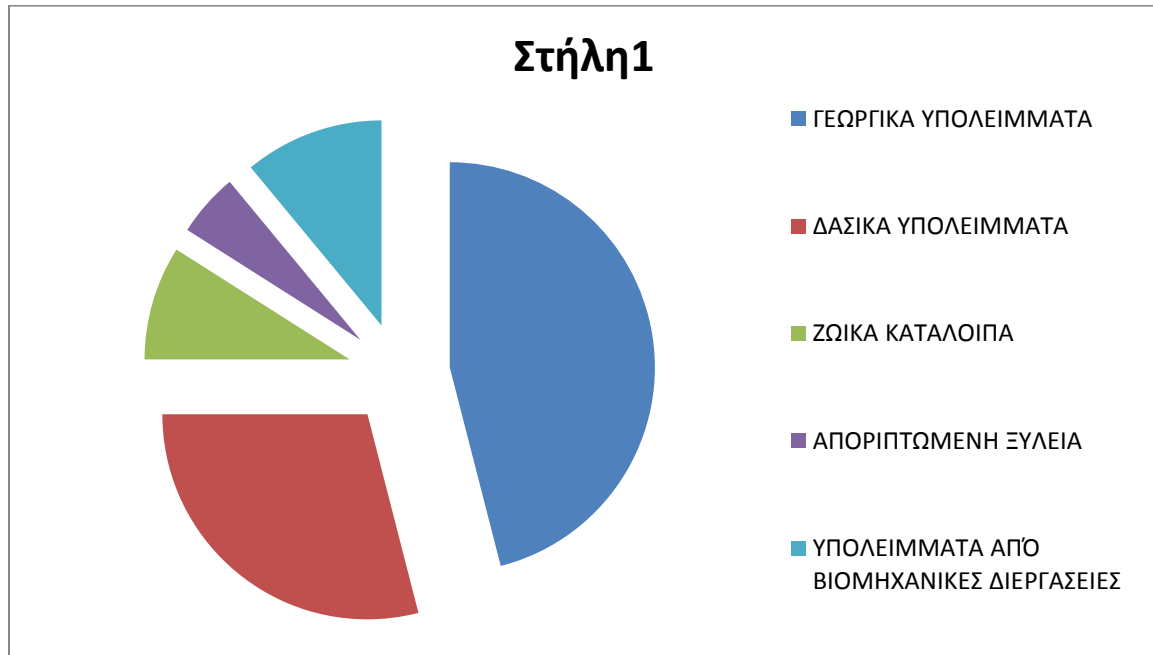
Η βιομάζα στη χώρα μας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή, κατά τον παραδοσιακό τρόπο, θερμότητας στον οικιακό τομέα (μαγειρική, θέρμανση), για τη θέρμανση θερμοκηπίων, σε ελαιουργεία, καθώς και με τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, στη βιομηχανία (εκκοκκιστήρια βαμβακιού, παραγωγή προϊόντων ξυλείας, ασβεστοκάμινοι κ.ά.), σε περιορισμένη, όμως, κλίμακα. Ως πρώτη ύλη σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται υποπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου, ελαιοπυρηνόξυλα, κουκούτσια ροδάκινων και άλλων φρούτων, τσόφλια αμυγδάλων, βιομάζα δασικής προέλευσης, άχυρο σιτηρών, υπολείμματα εκκοκκισμού κ.ά.

Παρ' όλα αυτά, οι προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας στη χώρα μας είναι εξαιρετικά ευοίωνες, καθώς υπάρχει σημαντικό δυναμικό, μεγάλο μέρος του οποίου είναι άμεσα διαθέσιμο. Παράλληλα, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι, σε πολλές περιπτώσεις, οικονομικά ανταγωνιστική αυτής που παράγεται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

Από πρόσφατη απογραφή, έχει εκτιμηθεί ότι το σύνολο της άμεσα διαθέσιμης βιομάζας στην Ελλάδα συνίσταται από 7500000 περίπου τόνους υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών (σιτηρών, αραβόσιτου, βαμβακιού, καπνού, ηλίανθου, κλαδοδεμάτων, κληματίδων, πυρηνόξυλου κ.ά.), καθώς και από 2700000 τόνους δασικών υπολειμμάτων υλοτομίας (κλάδοι, φλοιοί κ.ά.) [2]. Πέραν του ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της βιομάζας δυστυχώς παραμένει αναξιοποίητο, πολλές φορές αποτελεί αιτία πολλών δυσάρεστων καταστάσεων (πυρκαγιές, δυσκολία στην εκτέλεση εργασιών, διάδοση ασθενειών κ.ά.).

Από τις παραπάνω ποσότητες βιομάζας, το ποσοστό τους εκείνο που προκύπτει σε μορφή υπολειμμάτων κατά τη δευτερογενή παραγωγή προϊόντων (εκκοκκισμός βαμβακιού, μεταποίηση γεωργικών προϊόντων, επεξεργασία ξύλου κ.ά.) είναι άμεσα διαθέσιμο, δεν απαιτεί ιδιαίτερη φροντίδα συλλογής, δεν παρουσιάζει προβλήματα μεταφοράς και μπορεί να τροφοδοτήσει απ' ευθείας

διάφορα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Μπορεί, δηλαδή, η εκμετάλλευσή του να καταστεί οικονομικά συμφέρουσα.



Σχήμα 2. Ετήσιο ενεργειακό δυναμικό βιομάζας: ~ 4.4 Mtoe/έτος στην Ελλάδα [3]

### 1.2.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα

Στην ελληνική κτηνοτροφία, εφόσον είναι αναπτυγμένη, παράγεται αξιοσημείωτη ποσότητα αποβλήτων. Με βάση μετριοπαθείς υπολογισμούς, εξαιτίας της κτηνοτροφικής δραστηριότητας, 4550m<sup>3</sup> κοπριάς από χοίρους, βοοειδή και πουλερικά παράγονται σε καθημερινή βάση, αριθμός που οδηγεί σε ετήσια αποτελέσματα της τάξης των 1661000m<sup>3</sup> κοπριάς ως απόθεμα. Αυτά τα ζωικά απόβλητα βρίσκονται διασκορπισμένα σε όλες τις κτηνοτροφικές περιοχές της χώρας και προέρχονται κυρίως από μέσου και μεγάλου μεγέθους μονάδες κτηνοτροφίας. Επιπλέον, παραδοσιακά, οι μικρού μεγέθους φάρμες στην ελληνική περιφέρεια δεν μπορούν να αγνοηθούν και, κατά πως φαίνεται, οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται σε κεντρική Μακεδονία, Ήπειρο, Θεσσαλία, Εύβοια και Αττική, περιοχές στις οποίες αντιστοιχεί το 55.6% της συνολικής εγχώριας ζωικής βιομάζας.

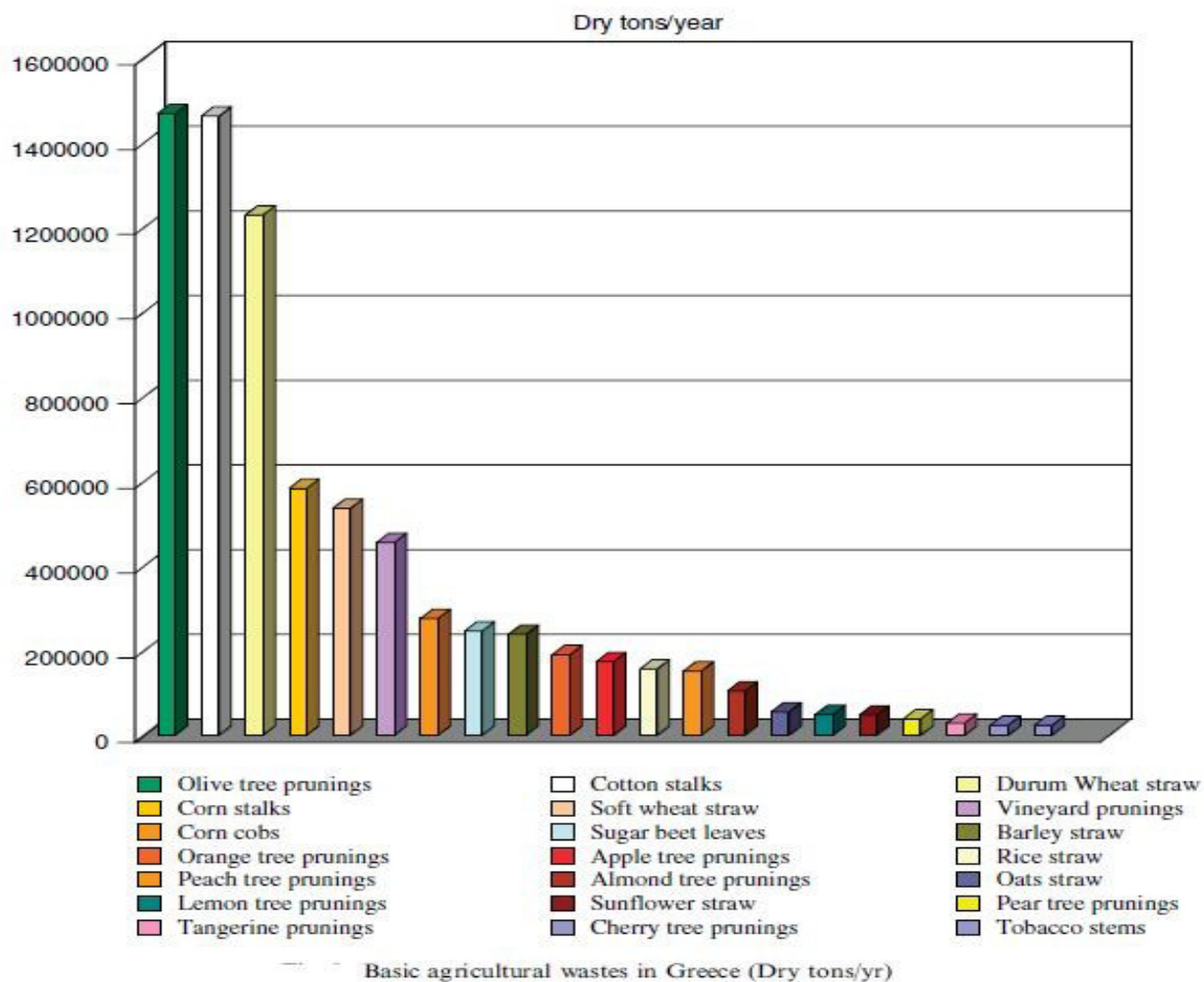
Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία (1/5/2003), εισήλθαν αυστηρότεροι όροι όσον αφορά τις συνθήκες ασφαλούς συλλογής, μεταφοράς, αποθήκευσης, διαχείρισης, επεξεργασίας και απόρριψης ζωικών υποπροϊόντων. Επίσης, όπως είναι γνωστό, οι κοπριές και τα ζωικά απόβλητα περιέχουν παθογόνους οργανισμούς και είναι πηγή προβλημάτων όπως εκπομπές οσμών, ρύπανση και πρόκληση ασθενειών. Ως αποτέλεσμα, πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή, ως υποχρέωση απέναντι στην δημόσια υγεία και την γενικότερη προστασία του περιβάλλοντος. Η σαλμονέλα και τα καμπυλοβακτηρίδια είναι υπεύθυνα για την μόλυνση κρέατος και κοπριών από πουλερικά, ενώ η *Escherichiacoli* γίνεται πιο ανθεκτική εξαιτίας των αντιβιοτικών που ταΐζονται σε βοοειδή και χοιρινά. Γίνεται ξεκάθαρο πως οι διαδικασίες θέρμανσης είναι πιο αποτελεσματικές στο να θανατώνουν τους παθογόνους οργανισμούς, από την συσσώρευση ή την ζύμωση. Με την αναερόβια χώνευση η βιωσιμότητα της αξιοποίησης τέτοιων υπολειμμάτων μπορεί να εξασφαλιστεί μόνο σε μεσαίου και μεγάλου μεγέθους μονάδες, όπου η παραγωγή αποβλήτων είναι σημαντική και συγκεντρωμένη. Η συνολική παραγωγή μεθανίου από τέτοια απόβλητα θα μπορούσε να φτάσει τα 500000 m<sup>3</sup>/μέρα με ενεργειακό δυναμικό 400 toe(Τόνους Ισοδύναμου Πετρελαίου). Με ευρωπαϊκή οδηγία (1774/2002 EC), εισήχθησαν νέες πρακτικές στην αντιμετώπιση ζωικών αποβλήτων, σύμφωνα με τις οποίες οι ζωοτροφές δεν πρέπει να περιέχουν οστά και κρέας ζώων, γεγονός που μεγαλώνει τις ποσότητες ζωικών αποβλήτων στην Ελλάδα.

### **1.2.2 Αγροτικά υπολείμματα**

Ο αγροτικός τομέας αποτελεί σημαντική πηγή βιομάζας για παραγωγή ενέργειας με τη μορφή υπολειμμάτων καλλιέργειών, κτηνοτροφικών αποβλήτων, υπολειμμάτων επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων κι ενεργειακών καλλιέργειών [16].

Τα αγροτικά υπολείμματα στην Ελλάδα συνιστούν ως τώρα μια βασική πηγή ενέργειας στις γεωργικές περιοχές της Ελλάδας, κυρίως με την καύση ξύλου. Οι

βασικές μορφές αγροτικής βιομάζας στις γεωργικές περιοχές που χαρακτηρίζουν την ελληνική αγροτική δραστηριότητα, φαίνονται παρακάτω.

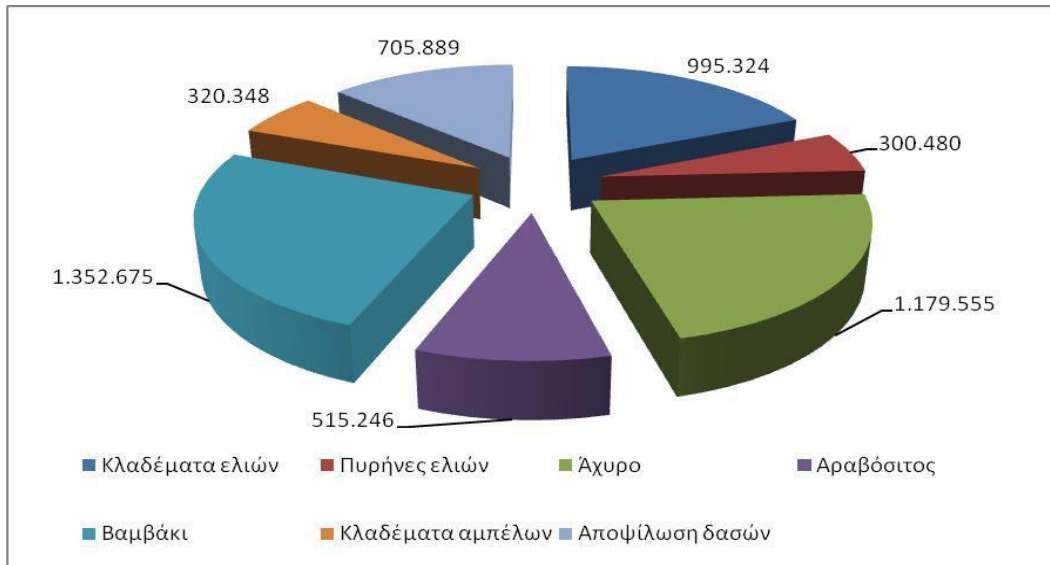


Σχήμα 3. Βασικά αγροτικά απόβλητα στην Ελλάδα (t/έτος)

Η εκτίμηση του δυναμικού των υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών για παραγωγή ενέργειας έχει αποτελέσει αντικείμενο αρκετών μελετών [16]. Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η βιομάζα ως πηγή ενέργειας είναι πρωταρχικά η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και ως εκ τούτου η συμβολή στην αποτροπή της κλιματικής αλλαγής, η αποφυγή ενεργειακής εξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, η ενίσχυση της εργασίας σε αποκεντρωμένες περιοχές και η συμβολή στην επίτευξη των στόχων παραγωγής πράσινης ενέργειας. Τα μειονεκτήματα της αξιοποίησης της

βιομάζας για παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα έγκεινται περισσότερο στον μεγάλο όγκο των αντίστοιχων υλικών, στις δυσκολίες συλλογής και μεταφοράς από απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές και νησιά, στα υψηλά επίπεδα υγρασίας στην βιομάζα (που μειώνουν την ενεργειακή της απόδοση), στον εποχιακό χαρακτήρα της παραγωγής πολλών ειδών και στη μεγάλη διαφοροποίηση στην ποιότητα, ακόμα και για το ίδιο δείγμα βιομάζας. Όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες οδηγούν σε μεγάλες επενδύσεις όταν η βιομάζα αξιοποιείται με κάποια θερμοχημική μέθοδο, ενώ, στην περίπτωση της καύσης, είναι ενθαρρυντικός και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης (ακόμα και έως 3 χρόνια). Επιπροσθέτως, τελευταία πραγματοποιήθηκαν και μεγάλες επενδύσεις στον τομέα παραγωγής βιοντήζελ, ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει η Ελλάδα στις ευρωπαϊκές οδηγίες για αξιοποίηση στον τομέα μεταφορών.

Το βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση μιας μεθόδου αντιμετώπισης αγροτικής βιομάζας είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία και η στοιχειομετρική σχέση C/N (άνθρακας, άζωτο). Για περιεκτικότητες υγρασίας και λόγους C/N>30, η θερμοχημική μετατροπή είναι εφαρμόσιμη με τη μορφή άμεσης καύσης, πυρολύσεως ή αεριοποίησης, αλλιώς είναι προτιμότερη η βιοχημική διεργασία (αερόβια, αναερόβια χώνευση κλπ). Οι περιοχές όπου αγροτικά υπολείμματα παράγονται σε μεγαλύτερο βαθμό είναι η Θεσσαλία, η ανατολική Μακεδονία, η Πελοπόννησος και το νησί της Κρήτης.



Σχήμα 4. Κατανομή ετήσιας παραγωγής βιομάζας σε τόνους ανά κατηγορία αγροτικού υπολείμματος στην Ελλάδα (ΚΑΠΕ 2007) [4].

### 1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας

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

- Η βιομάζα είναι ανανεώσιμο υλικό, ενώ τα ορυκτά δεν ανανεώνονται και εξαντλούνται συνεχώς.
- Η βιομάζα παράγεται σε όλες τις χώρες του κόσμου και είναι εύκολα προσιτή, ενώ τα ορυκτά καύσιμα παράγονται μόνον σε λίγες χώρες και η διαθεσιμότητά των εξαρτάται από διεθνείς πολιτικές, στρατιωτικές, και οικονομικές συνθήκες.
- Αντικατάσταση εισαγόμενων ορυκτών καυσίμων με μία εγχώρια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με αντίστοιχη εξοικονόμηση συναλλάγματος
- Η αποτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) που παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η βιομάζα δεν συνεισφέρει στην αύξηση της συγκέντρωσης του ρύπου αυτού στην ατμόσφαιρα γιατί, ενώ κατά την καύση της παράγεται  $CO_2$ , κατά την παραγωγή της και μέσω της φωτοσύνθεσης επαναδεσμεύονται σημαντικές ποσότητες αυτού του ρύπου.



- Η αποφυγή της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας με το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) που παράγεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων και συντελεί στο φαινόμενο της “όξινης βροχής”. Η περιεκτικότητα της βιομάζας σε θείο είναι πρακτικά αμελητέα.
- Αποτροπή περιβαλλοντικής επιβάρυνσης μέσω ορθής διαχείρισης υπολειμμάτων φυτικής ή ζωικής παραγωγής (κλαδοδέματα, απόβλητα ελαιοτριβείων, τυροκομείων κλπ).
- Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, που είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής καυσίμων από τρίτες χώρες, με αντίστοιχη εξοικονόμηση συναλλάγματος.
- Δημιουργία χιλιάδων θέσεων εργασίας(η βιομάζα έρχεται πάντα πρώτη από όλες τις ΑΠΕ στον αριθμό νέων άμεσων και έμμεσων θέσεων εργασίας που δημιουργούνται).
- Τα συγκροτήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού καύσεως βιομάζας έχουν πολύ μικρό χρόνο απόσβεσης από 1 έως 3 χρόνια συνέπεια της εξοικονόμησης ενέργειας σε αντίθεση με τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό των ορυκτών καυσίμων που δεν αποσβένονται ποτέ αφού καταναλώνουν και δεν εξοικονομούν ενέργεια.
- Συγκράτηση αγροτικών πληθυσμών στις παραμεθόριες και τις άλλες γεωργικές περιοχές
- Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και μάλιστα ως μονάδες βάσης με τη δημιουργία μικρών διεσπαρμένων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής (αποσυμφόρηση του Εθνικού Δικτύου μεταφοράς Η.Ε, μείωση απωλειών ενέργειας κλπ).
- Σημαντικό περιθώριο περαιτέρω ανάπτυξης εγχώριου εξοπλισμού και τεχνογνωσίας
- Μπορεί να προσφέρει μέσω εφαρμογών θερμότητας και στην ανάπτυξη παράπλευρων οικονομικών δραστηριοτήτων(θερμοκήπια, τηλεθέρμανση, ξηραντήρια, ιχθυοκαλλιέργειες κλπ).

- Ενίσχυση της οικονομικής δραστηριότητας μικρομεσαίων επιχειρήσεων (εφοδιαστικής αλυσίδας, εγχώριας βιομηχανίας, αλλά και λαμπρό πεδίο δραστηριοτήτων για τους Γεωργικούς και Δασικούς Συνεταιρισμούς).
- Τόνωση οικονομίας με νέες επενδύσεις (Μόνο για ηλεκτροπαραγωγή απαιτούνται επενδύσεις 1δισ € έως το 2020 για την επίτευξη του εθνικού στόχου).
- Μέχρι και το 60% των εσόδων επιστρέφει ως εισόδημα στον αγροτικό πληθυσμό.

Τα μειονεκτήματα που συνδέονται με τη χρησιμοποίηση της βιομάζας, είναι τα εξής:

- Ο μεγάλος όγκος της και η μεγάλη περιεκτικότητά της σε υγρασία, ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.
- Το βασικό μειονέκτημα της βιομάζας ως καύσιμο, είναι ότι έχει χαμηλή θερμαντική αξία ανά μονάδα βάρους και ακόμη μικρότερη κατά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, η δε περιεχόμενη υγρασία μειώνει ακόμη περισσότερο τη διαθέσιμη θερμαντική αξία, όταν αυτή υπολογίζεται με βάση το υγρό βάρος της. Το μειονέκτημα αυτό περιορίζει τη χρήση της βιομάζας για ενεργειακούς σκοπούς στον τόπο παραγωγής της και συνεπώς η εκμετάλλευσή της περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο.
- Παρά το μικρό χρόνο απόσβεσης που έχει μία μονάδα καύσεως βιομάζας, έχει μεγαλύτερο αρχικό κόστος εγκατάστασης, σε αντίθεση με μια μονάδα καύσεως ορυκτών καυσίμων. Αυτό είναι δυνατόν να αναστείλει την απόφαση του χρήστη προσωρινά για την επιλογή υπέρ της βιομάζας, μέχρις ότου βελτιωθούν τα οικονομικά της επιχείρησης.
- Η συσχέτιση του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού της βιομάζας, με τους τόνους ισοδύναμου πετρελαίου, αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης των δύο πηγών ενέργειας, καθιστώντας εφικτή την εκτίμηση του ενεργειακού και οικονομικού οφέλους από τη χρήση της βιομάζας. Κάθε ολοκληρωμένος στρατηγικός σχεδιασμός ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας, θα πρέπει να

συνεκτιμά τόσο τα συγκριτικά πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα της βιομάζας έναντι των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, γαιάνθρακας, φυσικό αέριο).

- Η μεγάλη διασπορά και η εποχιακή παραγωγή της.

## 1.4 Ενεργειακές καλλιέργειες

Περιλαμβάνει οποιαδήποτε καλλιέργεια προορίζεται για παραγωγή ενέργειας: δασικές καλλιέργειες μικρού κύκλου, φυλλώδεις δασικές καλλιέργειες, μονοετείς μη-ξυλώδεις καλλιέργειες δημητριακά, σακχαρώδεις καλλιέργειες (τεύτλα, ζαχαρόχορτο, ζαχαροκάλαμο) κτηνοτροφικές καλλιέργειες (τριφύλλι, βοσκότοποι), ελαιούχες καλλιέργειες (κράμβη, σόγια, ηλιάνθος), υδρόβια φυτά (άλγες, καλαμιώνες, υδρόβιος υάκινθος).

Οι κυριότεροι τομείς στους οποίους επικεντρώνεται η έρευνα στον τομέα των ενεργειακών καλλιεργειών είναι: α) η αποδοτικότητα και προσαρμοστικότητα κάτω από διάφορες εδαφοκλιματικές συνθήκες, β) η κατάλληλη καλλιεργητική τεχνική (εποχή σποράς, αποστάσεις φύτευσης, επίπεδα άρδευσης και λίπανσης, εποχή και τεχνική συγκομιδής), γ) οι επιπτώσεις των φυτών αυτών στο περιβάλλον (επίδραση στους υδατικούς και εδαφικούς πόρους επιπτώσεις στη ρύπανση των υπογείων υδροφορέων και της ατμόσφαιρας).

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ενεργειακές καλλιέργειες αποκτούν τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη σημασία για τις ανεπτυγμένες χώρες, που προσπαθούν, μέσω των καλλιεργειών αυτών, να περιορίσουν, πέραν των περιβαλλοντικών και ενεργειακών τους προβλημάτων, και το πρόβλημα των γεωργικών πλεονασμάτων. Όπως είναι γνωστό, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης τα γεωργικά πλεονάσματα, και τα οικονομικά προβλήματα που αυτά δημιουργούν, οδηγούν αναπόφευκτα στη μείωση της γεωργικής γης και της αγροτικής παραγωγής. Υπολογίζεται ότι, την προσεχή δεκαετία, θα μπορούσαν να αποδοθούν στις ενεργειακές καλλιέργειες 100-150 εκατ. στρέμματα γεωργικής

γης, προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα των επιδοτήσεων των γεωργικών πλεονασμάτων και της απόρριψης αυτών στις χωματερές, με ταυτόχρονη αύξηση των ευρωπαϊκών ενεργειακών πόρων.

Στη χώρα μας, για τους ίδιους λόγους, 10 εκατομμύρια στρέμματα καλλιεργήσιμης γης έχουν ήδη περιθωριοποιηθεί ή προβλέπεται να εγκαταλειφθούν στο άμεσο μέλλον. Εάν η έκταση αυτή αποδοθεί για την ανάπτυξη ενεργειακών καλλιεργειών, το καθαρό όφελος σε ενέργεια που μπορεί να αναμένεται υπολογίζεται σε 5-6 ΜΤΙΠ (1 ΜΤΙΠ=  $10^6$  ΤΙΠ, όπου ΤΙΠ σημαίνει: Τόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου) δηλαδή στο 50-60% της ετήσιας κατανάλωσης πετρελαίου στην Ελλάδα. Στον ελληνικό χώρο έχει αποκτηθεί σημαντική εμπειρία στον τομέα των ενεργειακών καλλιεργειών. Από την πραγματοποίηση σχετικών πειραμάτων και πιλοτικών εφαρμογών, προέκυψαν τα εξής σημαντικά στοιχεία [2]:

- Η ποσότητα βιομάζας που μπορεί να παραχθεί ανά ποτιστικό στρέμμα ανέρχεται σε 3-4 τόνους ξηρής ουσίας, ήτοι 1-1.6 ΤΙΠ.
- Η ποσότητα βιομάζας, που μπορεί να παραχθεί ανά ξερικό στρέμμα μπορεί να φτάσει τους 2-3 τόνους ξηρής ουσίας, ήτοι 0.7-1.2 ΤΙΠ.

Ορισμένες ενεργειακές καλλιέργειες είναι οι εξής:

#### **1.4.1 Αγριαγκινάρα**

Η αγριαγκινάρα παράγει 1 με 2 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι πολυετές είδος αγκαθίου που καλλιεργείται παραδοσιακά σε κάποιες περιοχές της μεσογειακής ζώνης. Προσαρμόζεται πολύ καλά στο ξηρό κλίμα των μεσογειακών χωρών. Ως χειμερινό φυτό έχει την δυνατότητα να εκμεταλλεύεται τις βροχοπτώσεις και να δίνει το μέγιστο των αποδόσεων ακόμα και χωρίς άρδευση. Λόγο του εύρωστου ριζικού συστήματος που διαθέτει προστατεύει από τη διάβρωση τα επικλινή και άγονα εδάφη. Η σπορά της πραγματοποιείται άνοιξη- φθινόπωρο, ενώ η συγκομιδή το καλοκαίρι [1].

### **1.4.2 Switchgrass**

Το Switchgrass παράγει 1.4 με 2.5 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι πολυετές ριζωματώδες φυτό που ανήκει στα αγρωστώδη. Παραδοσιακά καλλιεργείται στις ΗΠΑ σε βοσκότοπους και λειμώνες τα τελευταία 50 χρόνια. Η καλλιέργεια του παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (λίπανση, ζιζανιοκτόνα). Έχει χαμηλές αρδευτικές ανάγκες αφού χαρακτηρίζεται από αποδοτική χρήση του νερού. Η σπορά του πραγματοποιείται την άνοιξη, ενώ η συγκομιδή του από Νοέμβριο έως Φεβρουάριο [1].

### **1.4.3 Μίσχανθος**

Ο μίσχανθος παράγει 1 με 3 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι πολυετές ριζωματώδες φυτό που ανήκει στα αγρωστώδη. Η καλλιέργεια του παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (λίπανση, ζιζανιοκτόνα). Προέρχεται από την ανατολική Ασία, όπου συναντάται σε περιοχές με τροπικό, υποτροπικό έως εύκρατο κλίμα. Ο γονότυπος που χρησιμοποιείτε εισήχθη από την Ιαπωνία το 1930. Μπαίνει σε υψηλή παραγωγικότητα από τον 3 χρόνο καλλιέργειας του. Η σπορά του πραγματοποιείται στα τέλη Φεβρουαρίου, ενώ η συγκομιδή του γίνεται από τον Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο [1].

### **1.4.4 Καλάμι**

Το καλάμι παράγει 2 με 3 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι πολυετές ριζωματώδες φυτό που ανήκει στα αγρωστώδη. Η καλλιέργεια του παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (άρδευση,

λίπανση, ζιζανιοκτόνα).Αυτόχθονο στις χώρες της μεσογείου. Πιστεύετε ότι προέρχεται από την Ασία αλλά συναντάτε σε όλο τον κόσμο σε μεγάλο εύρος κλιματικών και εδαφικών συνθηκών. Η σπορά του πραγματοποιείται Νοέμβριο με Φεβρουάριο, ενώ η συγκομιδή του Ιανουάριο με Φεβρουάριο [1].

#### **1.4.5 Ευκάλυπτος**

Ο ευκάλυπτος παράγει περισσότερο από 3.5 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Το globulus είναι καλλιεργούμενο είδος σε πολλές μεσογειακές χώρες για την παραγωγή χαρτοπολλτού, είναι απαιτητικός σε νερό και ευαίσθητος στο ασβέστιο και για αυτό το λόγο περιορίζετε το εύρος καλλιέργειας του(σε περιοχές με πολλές βροχοπτώσεις και όξινο έδαφος). Το camaldulensis χρησιμοποιείτε επίσης για την παραγωγή χαρτοπολλτού στο Μαρόκο και λιγότερο στην Ισπανία και την Πορτογαλία, είναι διαδεδομένο είδος στις περιοχές της νότιας Ευρώπης λόγω της ανθεκτικότητας του στην ξηρασία και στις υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου που χαρακτηρίζουν τα εδάφη της νότιας Ευρώπης [1].

#### **1.4.6 Ψευδακακία**

Η ψευδακακία παράγει 0.6 με 1.7 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι φυτό ψυχανθές, πολυετές, δενδρώδες που χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα ανάπτυξης του υπογείου μέρους, σημαντική παραγωγή βιομάζας και εξαιρετική αναβλάστηση μετά την κοπή του. Βρίσκεται τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ασία. Εξαιτίας του ταχύτατου ρυθμού ανάπτυξης, της υψηλής πυκνότητας του ξύλου και της χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία σε σχέση με άλλα είδη θεωρείτε πολύ παραγωγικό φυτό σε βιομάζα [1].

#### **1.4.7 Κενάφ**

Το κενάφ παράγει 1.5 τόνο ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι ετήσιο αγρωστώδες φυτό. Είναι φυτό τροπικών και υποτροπικών κλιμάτων, μπορεί να προσαρμοστεί σε μεγάλο εύρος κλιματικών και εδαφικών συνθηκών. Τα στελέχη του αποτελούνται από ένα μικρό δακτύλιο με ίνες μικρού μήκους και φλοιό από ίνες μεγάλου μήκους, από τις τελευταίες μπορεί να παραχθεί χαρτί υψηλής ποιότητας. Η καλλιέργεια του παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (λίπανση, ζιζανιοκτόνα). Η σπορά του πραγματοποιείται τον Μάιο, ενώ η συγκομιδή του Οκτώβριο με Δεκέμβριο [1].

#### **1.4.8 Γλυκό σόργο**

Το γλυκό σόργο παράγει 1 με 4 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι ετήσιο αγρωστώδες φυτό. Προέρχεται από την Ασία και συναντάτε σε περιοχές με υποτροπικό και εύκρατο κλίμα. Η καλλιέργεια του παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα αφού μπορούν να παραχθούν σημαντικές ποσότητες βιομάζας ακόμη και σε συνθήκες μειωμένων εισροών (άρδευση, λίπανση, ζιζανιοκτόνα). Έχει μεγάλη φωτοσυνθετική ικανότητα, υψηλές αποδόσεις βιομάζας, υψηλό ποσοστό σε διαλυτά σάκχαρα και κυτταρίνες. Τα τελευταία χρόνια μελετάται τόσο στην Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ η παράγωγη αλκοόλης από τα στελέχη του. Η σπορά του πραγματοποιείται τον Μάιο, ενώ η συγκομιδή του τον Οκτώβριο [1].

#### **1.4.9 Ελαιοκάμβη**

Η ελαιοκάμβη παράγει 0.3 με 0.8 τόνους ξηράς ουσίας ανά στρέμμα το χρόνο. Είναι ετήσιο φυτό που ανήκει στην οικογένεια των σταυρανθών. Καλλιεργείται κυρίως για παραγωγή ελαίου για ανθρώπινη χρήση, ζωοτροφή και λίπανση. Μετά την εξαγωγή του ελαίου τα υπολείμματα χρησιμοποιούνται στην

κτηνοτροφία λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη. Θεωρείτε παγκοσμίως το 3 σημαντικότερο ελαιοπαραγωγό φυτό μετά τη σόγια φοινικέλαιο, ο σπόρος του έχει κατά μέσο όρο (30-50%) περιεκτικότητα σε λάδι και τα υπολείμματα (15-45%) σε πρωτεΐνη. Οι τεχνικές καλλιέργειας είναι ίδιες με εκείνες των χειμερινών σιτηρών. Η σπορά του πραγματοποιείται Σεπτέμβριο με Οκτώβριο για την χειμερινή ποικιλία και Μάρτιο με Απρίλιο για την καλοκαιρινή ποικιλία, ενώ η συγκομιδή του γίνεται τον Ιούλιο [1].

Πίνακας 3. Στρεμματικές αποδόσεις και ενεργειακό περιεχόμενο ενεργειακών καλλιεργειών για την παραγωγή στερεών καυσίμων

Ενεργειακή καλλιέργεια	Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	Απόδοση σε ξηρή βιομάζα (τόνοι/στρέμμα)	Ενεργειακό δυναμικό (ΤΙΠ/στρέμμα)
Ευκάλυπτος	19	1.8-3.2	0.8-1.3
Ψευδακακία	19.4	0.24-1.34	0.1-0.6
Καλάμι	18.6	2-3	0.9-1.3
Μίσχανθος	17.3	0.8-3	0.3-1.2
Αγριαγκινάρα	14.5	1.7-3.3	0.6-1.1
Switchgrass	17.4	2.6	1.1

#### 1.4.10 Σιτάρι-Κριθάρι

Πρόκειται για ετήσια φυτά, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια των δημητριακών. Το σιτάρι θεωρείται παγκοσμίως ως το σημαντικότερο φυτό μεταξύ των υπόλοιπων δημητριακών. Το κριθάρι χρησιμοποιείται κυρίως σα ζωοτροφή και στην παραγωγή αλκοολούχων ποτών. Η χρήση του σιταριού και του κριθαριού τα τελευταία χρόνια είναι ευρεία για την παραγωγή βιοαιθανόλης.

Και τα δύο είναι ετήσια φυτά και ανήκουν στην οικογένεια των δημητριακών (Graminae). Το σιτάρι θεωρείται παγκοσμίως ως το σημαντικότερο φυτό μεταξύ των άλλων δημητριακών, με συνολική παραγωγή 537.5 εκατομμύριων τόνων το 2002. Το κριθάρι από την άλλη, χρησιμοποιείται κυρίως ως ζωοτροφή και στην παραγωγή αλκοολούχων ποτών. Η παραγωγή του για το 2002 έφτασε τα 136.5 εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως [15].



Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη δραστηριότητα στη χρήση του σιταριού και του κριθαριού ως πρώτη ύλη για παραγωγή βιοαιθανόλης. Υπολογίζεται ότι ένα στρέμμα σιταριού μπορεί να παράγει κατά μέσο όρο 150 με 800 kg σπόρου, από τα οποία μπορούν να παραχθούν 45 με 240 λίτρα βιοαιθανόλης [15].

#### 1.4.11 Αραβόσιτος

Στην Ελλάδα η καλλιέργεια αραβόσιτου είναι εκτεταμένη σε όλη τη χώρα. Τα τελευταία χρόνια, ο αραβόσιτος χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης με πρώτη παραγωγό χώρα τις ΗΠΑ [15].

#### 1.4.12 Ηλίανθος

Ο ηλίανθος είναι ετήσιο φυτό, το οποίο ανήκει στην οικογένεια Compositae. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ. Στην Ελλάδα, η καλλιέργεια του ηλίανθου συγκεντρώνεται κυρίως στο βόρειο-ανατολικό μέρος της χώρας. Καλλιεργείται κυρίως ως πηγή φυτικού-ελαίου διατροφής [15].

#### 1.4.13 Ζαχαρότευτλα

Τα ζαχαρότευτλα είναι ένας διετής τύπος τεύτλου λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των ριζών σε σάκχαρα. Στην Ελλάδα, η καλλιέργεια ζαχαρότευτλων είναι διάσπαρτη σε όλη τη χώρα. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και για την παραγωγή βιοαιθανόλης [15].

Πίνακας 4. Παραγόμενα βιοκαύσιμα από διάφορα φυτά και οι αποδόσεις τους ανά στρέμμα σε σπόρο και καύσιμο [14]

Βιοκαύσιμο	Πρώτη Ύλη	Απόδοση (kg/στρέμμα)	Απόδοση σε βιοκαύσιμο (lt/στρέμμα)
Βιοντίζελ	Ηλίανθος	120-210	43-75
	Ελαιοκράμβη	120-250	43-90
Βιοαιθανόλη	Βαμβάκι.	120-160	18-25
	Σόγια	160-240	29-44
	Σιτάρι	150-800	45-240

	Αραβόσιπος	900	270
	Τεύτλα	6000	600
	Σόργο	7000-10000	675-900

## 1.5 Απόβλητα και λύματα

Η παραγωγή υγρών και στερεών αποβλήτων, ως αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος, η οποία δε γνωρίζει σύνορα, έχει μετατοπίσει το παγκόσμιο ενδιαφέρον από την άνευ ορίων βιομηχανική ανάπτυξη στην ανάπτυξη τεχνικών και μεθόδων για μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, αλλά και για αξιοποίηση των πάσης φύσεως αποβλήτων.

Τα απόβλητα ορίζονται ως "παραπροϊόντα" των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, τα οποία αφού δεν έχουν άμεση πλέον χρησιμότητα για τον άνθρωπο, θα πρέπει να διατεθούν στο φυσικό περιβάλλον με ασφαλή τρόπο για το τελευταίο. Τα απόβλητα διαχωρίζονται σε υγρά και στερεά, ανάλογα με τη βασική τους φάση (στερεή ή υγρή) και προέρχονται από βιομηχανικές - επαγγελματικές, οικιακές, αγροτικές καθώς και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Η επεξεργασία, τόσο των υγρών όσο και των στερεών αποβλήτων, πριν τη διάθεσή τους στους φυσικούς υδάτινους αποδέκτες (θάλασσα, ποτάμια, λίμνες) ή στο υπέδαφος είναι απαραίτητη διαδικασία και πρέπει να γίνεται με τέτοιες προδιαγραφές οι οποίες θα εξασφαλίζουν την ομαλή βιοαποικοδόμησή τους.

Τα αγροτοβιομηχανικά απόβλητα είναι μία κατηγορία αποβλήτων που δημιουργούν τεράστια προβλήματα περιβαλλοντικά, κυρίως λόγω της αυξημένης παραγόμενης ποσότητας τους και της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε οργανικό φορτίο. Οι αγροτοβιομηχανίες είναι συνήθως μικρές μονάδες, οι οποίες επεξεργάζονται αγροτικά προϊόντα με στόχο την παραγωγή χρήσιμων αγαθών. Ανάλογα με το είδος των παραγόμενων αγαθών γίνεται η κατηγοριοποίησή τους ως εξής:

- α) γαλακτοβιομηχανίες
- β) κονσερβοποιείες
- γ) ζυθοποιείες και οινοποιείες

- δ) βιομηχανίες παραγωγής και συσκευασίας κρέατος (συμπεριλαμβανομένων των κτηνοτροφικών μονάδων και των ορνιθοτροφείων)
- ε) βιομηχανίες παραγωγής ζάχαρης
- στ) βιομηχανίες παραγωγής ποικίλων τροφών όπως καφές, ρύζι, κλπ.
- η) βιομηχανίες παραγωγής μέσω ελαιοκαλλιεργειών, κατσίγαροι.

Η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως ένα αρχικό στάδιο καθαρισμού της πρώτης ύλης, στάδιο απομάκρυνσης των προσμίξεων, το στάδιο της κύριας επεξεργασίας για την παραγωγή του προϊόντος και το τελικό στάδιο της συσκευασίας. Ταυτόχρονα παράγονται απόβλητα τα οποία προέρχονται από απώλειες πρώτης ύλης, απώλειες προϊόντος, νερά πλύσης, συμπύκνωσης και ψύξης και κυρίως από τα υπολείμματα τα οποία προκύπτουν κατά της επεξεργασία της πρώτης ύλης.

### **1.5.1 Άχυρο**

Το άχυρο κανονικά περιέχει 14-20% νερό, που εξατμίζεται κατά την καύση. Η ξηρά ουσία περιέχει περίπου 50% άνθρακα, υδρογόνο 6%, 42% οξυγόνο καθώς και μικρές ποσότητες αζώτου, θείου, πυριτίου, αλκαλίων, χλωρίου και άλλων [15]. Στο άχυρο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, η περιεκτικότητα σε νερό δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% γιατί υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης της μονάδας από τις συμπαγείς μπάλες άχυρου.

Άχυρο από καλλιέργεια συνήθως χρησιμοποιείται για την συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για τηλεθέρμανση στη Δανία με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνολογία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το άχυρο χρησιμοποιείται μαζί με ροκανίδια, αστικά απόβλητα και άνθρακα. Υπήρξε μια συνολική παραγωγή άχυρου των 5.5 εκατομμύρια τόνων ανά έτος μεταξύ 2004-2008, κατά μέσο όρο, εκ των οποίων 3.4 εκατομμύρια τόνοι ήταν που χρησιμοποιήθηκαν στη γεωργία και για ενεργειακούς σκοπούς.

Ως αποτέλεσμα, υπάρχει ένα ετήσιο πλεόνασμα από άχυρο, περίπου 2.1 εκατομμύρια τόνους. Εγκαταστάσεις θέρμανσης από άχυρο, έχουν κατασκευαστεί στη Δανία από 1980, και μέχρι σήμερα, υπάρχουν περίπου 55 μονάδες σε λειτουργία. Αρκετές από τις μονάδες έχουν δημιουργηθεί σε συνεργασία με τοπικούς αγρότες. Η εγκατεστημένη ισχύς κυμαίνεται από περίπου 500 kW έως 12 MW [15].

### **1.5.2 Κλαδοδέματα**

Πρόκειται για γεωργικά υποπροϊόντα που είναι ενεργειακά αξιοποιήσιμα. Προέρχονται κατά κύριο λόγο από τη κλάδευση καλλιεργειών εσπεριδοειδών (λεμόνια, πορτοκάλια, μανταρίνια). Χρησιμοποιούνται κυρίως ως καυσόξυλα για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, είτε των ίδιων των παραγωγών (τζάκια σπιτιών), είτε άλλων επαγγελματικών αναγκών (αρτοποιεία, φούρνοι) και για μαγείρεμα [15].

### **1.5.3 Καυσόξυλα-Ξυλεία**

Αποτελούν την αρχική πηγή καυσίμων από το 1800, όταν μετατοπίστηκε από τον άνθρακα στην αρχή και στη συνέχεια από το πετρέλαιο. Τα τεμάχια συμπαγούς ξύλου (κούτσουρα) είναι τα τεμάχια ξύλου ενός μήκους που ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του λέβητα. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι είναι υλικό που είναι διαθέσιμο παντού. Τα ξυλώδη υπολείμματα που λαμβάνονται από την επεξεργασία του ξύλου (πριονίδι, ροκανίδι, θρύμματα ξύλου, κλπ.), καθώς και υπολείμματα ξυλείας που παράγονται κατά την υλοτόμηση των δέντρων και είναι ακατάλληλα για περαιτέρω επεξεργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους για την παραγωγή βιοενέργειας, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή για να καλύψει ανάγκες θέρμανσης. Έτσι, όταν αναφερόμαστε στο ξύλο ως ανανεώσιμο καύσιμο δεν εννοούμε, φυσικά, την αλόγιστη υλοτόμηση των δασών, αλλά την ενεργειακή αξιοποίηση παραπροϊόντων ξύλου, τα οποία παραμένουν, συνήθως, ανεκμετάλλευτα.

Μερικά από τα μειονεκτήματα που έχει το κούτσουρο είναι ότι η αυτοματοποίηση του καθίσταται δύσκολη λόγω της χειρωνακτικής φόρτωσης που απαιτείται και της δυσκολίας αποθήκευσής του, ενώ η απόδοση της καύσης του δε ξεπερνά το 75%. Γενικότερα, το ποσοστό ανακτώμενης ενέργειας από τη χρήση καυσόξυλων είναι της τάξης των 3-70 kW [15].

#### **1.5.4 Ελαιουργεία**

Κατά τη διαδικασία της παραγωγής του ελαιόλαδου παράγονται κυρίως τρία είδη αποβλήτων: τα φύλλα και άλλα μέρη του δένδρου τα οποία μεταφέρονται στο ελαιοτριβείο μαζί με τον καρπό, ο πυρήνας μαζί με ένα τμήμα από το αλεσμένο μέρος του καρπού και το υδάτινο μέρος του αποβλήτου το οποίο αποτελείται από λάδι, στερεά από τον καρπό και νερό από τον καρπό αλλά και νερό το οποίο εισήχθη κατά την προετοιμασία του καρπού και κατά την παραγωγή. Ο ελαιοπυρήνας συνίσταται από τα αλεσμένα στερεά του καρπού της ελιάς, δηλαδή από το εξωκάρπιο, το σαρκώδες μεσοκάρπιο και το αποξυλωμένο ενδοκάρπιο [15].

#### **1.5.5 Πυρηνόξυλο**

Το πυρηνόξυλο αποτελεί ένα σημαντικό ενεργειακό πόρο για τις περιοχές που καλλιεργείται η ελιά. Από 100kg ελιάς παράγονται 20–25 kg ελαιόλαδο, 37–40 kg ελαιοπυρήνα, 5 kg φύλλα και 40–44 kg υγρών αποβλήτων. Το πυρηνόξυλο είναι παραπροϊόν της εξαγωγής πυρηνελαίου από τον ελαιοπυρήνα [15].

##### **1.5.5.1 Ενεργειακή αξιοποίηση πυρηνόξυλου**

Μπορεί να αναμιχθεί με υγρά απόβλητα ελαιουργείων και να αποτελέσει ένα αποδοτικό καύσιμο, μειώνοντας παράλληλα και τις επιπτώσεις απόρριψης των υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον. Η πυρόλυση και η αναερόβια αποσύνθεση

με ταυτόχρονη εκμετάλλευση του παραγόμενου βιοαερίου αποτελούν εναλλακτικούς τρόπους εκμετάλλευσης του παραπροϊόντος αυτού. Μία σχετικά νέα μέθοδος θέρμανσης θερμοκηπίων με χρήση βιομάζας αποτελεί η θέρμανση με ελαιοπυρηνόξυλο. Το πυρηνόξυλο από κατάλληλα σιλό μεταφέρεται σε ένα καυστήρα/λέβητα, και το θερμό νερό που παράγεται κυκλοφορώντας σε επιδαπέδιο σύστημα σωληνώσεων που βρίσκεται εντός του θερμοκηπίου θερμαίνει το χώρο. Η μέθοδος αυτή θέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν τα θερμοκήπια βρίσκονται κοντά σε ελαιοπαραγωγικές περιοχές, που υπάρχει διαθέσιμο ελαιοπυρηνόξυλο, διαφορετικά η μεταφορά του κοστίζει αρκετά.

Αυτά τα συστήματα θέρμανσης βρίσκουν τελευταία πολλές εφαρμογές στην Κρήτη αλλά και αλλού για θέρμανση κτιρίων και θερμοκηπίων, καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Χαμηλό κόστος καυσίμου
- Δυνατότητα πλήρους αυτοματισμού
- Ύπαρξη τοπικά της ενεργειακής πρώτης ύλης.

Παρατηρούμε ότι στα βόρεια διαμερίσματα της χώρας, Ήπειρο, Μακεδονία, Θράκη, όπου το κλίμα είναι πιο ψυχρό και απαιτείται πιο συστηματική θέρμανση των θερμοκηπίων απ' ό,τι στην Κρήτη, η παραγωγή του ελαιοπυρηνόξυλου είναι χαμηλή και συνεπώς η μέθοδος θέρμανσης με το καύσιμο αυτό δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη.

Τα απόβλητα διαφέρουν ως προς τη σύσταση τους ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για να παραχθεί το προϊόν αλλά και από την ποικιλία της ελιάς. Τα περισσότερα από τα προϊόντα που παράγονται κατά την καλλιέργεια και επεξεργασία της ελιάς (φύλλα, κλαδιά, ρίζες, πυρηνόξυλο κ.α.) είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια μπορεί να παραχθεί είτε με απευθείας καύση των υλικών, είτε με καύση του παραγόμενου βιοαερίου από την σήψη της βιομάζας [15].

Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων των ελαιοτριβείων είναι δύσκολη λόγω της εποχικότητας της παραγωγής τους από Οκτώβριο έως Φεβρουάριο. Οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής για αυτήν την επεξεργασία χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες:

- Βιολογικές
- Χημικές
- Βιοχημικές

#### **1.5.5.2 Παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα ελαιοργίων**

Τα απόβλητα των ελαιοργείων έχουν υψηλό ρυπαντικό φορτίο, είναι δύσκολα επεξεργάσιμα με συμβατικά συστήματα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας, περιέχουν πολλές οργανικές ουσίες και είναι κατάλληλα για παραγωγή βιοαερίου με αναερόβια χώνευση. Σε μία πιλοτική εγκατάσταση επεξεργασίας ελαιοργικών αποβλήτων στην Κάνδανο Χανίων τα απόβλητα καθιζάνουν με την παραμονή τους σε μεγάλες δεξαμενές για ορισμένο χρονικό διάστημα. Το υπερκείμενο υγρό και το υπόλειμμα υφίστανται αναερόβια χώνευση σε διαφορετικούς χωνευτές με διαφορετικούς χρόνους παραμονής. Το παραγόμενο βιοαέριο οδηγείται σε αεριοφυλάκιο, από όπου στη συγκεκριμένη εγκατάσταση καίγεται ελεύθερα [15].

#### **1.5.6 Από τη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων**

Τα απόβλητα των βιομηχανιών παραγωγής τροφίμων, είτε βρίσκονται σε στερεά ή σε υγρή μορφή, μπορούν να αξιοποιηθούν ενεργειακά, επίσης μέσω της τεχνολογίας της αναερόβιας χώνευσης και της παραγωγής βιοαερίου.

Έτσι, υγρά απόβλητα που φημίζονται για το υψηλό ρυπαντικό τους φορτίο (π.χ. τυρόγαλα, κασίγαρος, απόβλητα σφαγείων, απόβλητα χυμοποιείων, ζυθοποιείων και βιομηχανιών επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών) και την έντονη ρύπανση που προκαλούν κατά την ανεξέλεγκτη διάθεση τους, σταματούν, πλέον, να αποτελούν πρόβλημα για τους παραγωγούς καθώς μετατρέπονται σε

ηλεκτρική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων προκύπτουν πολλαπλά οφέλη: διακόπτεται η περιβαλλοντική υποβάθμιση των υδάτινων αποδεκτών από την λειτουργία των ρυπογόνων βιομηχανιών με τρόπο που όχι μόνο δεν κοστίζει στον παραγωγό του αποβλήτου, αλλά του προσφέρει επιπλέον έσοδα από την πώληση της εναλλακτικής ενέργειας και την αποφυγή των υψηλών προστίμων που οφείλει να πληρώνει για την ακατάλληλη διάθεση των αποβλήτων του. Αντιστοίχως και για τα στερεά οργανικά απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων, υπάρχουν αποτελεσματικές τεχνολογίες χρήσης τους για την παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την εγκατάσταση μιας τεχνολογικά άρτιας μονάδας παραγωγής βιοενέργειας είναι, συνήθως, αναγκαία η συνεργασία των παραγωγών των ζωικών αποβλήτων με εκείνους των οργανικών βιομηχανικών αποβλήτων για την κατασκευή μονάδας συνδυασμένης αναερόβιας χώνευσης. Πέραν των περιβαλλοντικών, και τα οικονομικά οφέλη του φορέα που θα επενδύσει στην υλοποίηση μιας τέτοιας μονάδας εναλλακτικής ηλεκτροπαραγωγής, είναι σημαντικά υψηλότερα.

### **1.5.7 Κτηνοτροφικά**

Σύμφωνα με την εργασία της κ. Ρογκακου τα απορρίμματα από κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις χωρίζονται ανάλογα με τη μορφή που συναντώνται σε:

- Υγρά-Ημιυγρά: χοιροστάσια, βουστάσια
- Ημιστερεά: βουστάσια, πτηνοτροφεία παραγωγής αυγών, κονικλοτροφεία
- Στερεά: Βουστάσια, πτηνοτροφεία παραγωγής κρέατος, αιγοπροβοστάσια

Η επεξεργασία των αποβλήτων που προέρχονται από ζώα, στοχεύει στην παραγωγή ενέργειας και στη βελτίωση των λιπαντικών ιδιοτήτων των αποβλήτων. Πλούσια σε ινώδη κυτταρινούχα συστατικά, αμμωνιακό άζωτο και οργανική ουσία (80-90% των ολικών τους στερεών) με pH σταθερά πάνω από 7.0. Εξαιρετικά κατάλληλα για σταθερή και 'αυθόρμητη' παραγωγή βιοαερίου.



Η παραγωγή βιοαερίου από υγρά κτηνοτροφικά απόβλητα είναι μια διαδικασία με πολλές προοπτικές στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι αγροτικές μονάδες βιοαερίου επεξεργάζονται τα υποστρώματα πρώτης ύλης που κυρίως προέρχονται από την αγροτική παραγωγή. Τα συνηθέστερα είδη πρώτης ύλης για αυτές τις εγκαταστάσεις είναι η ζωική στερεή και η υδαρής κοπριά, τα υπολείμματα και τα υποπροϊόντα από τη συγκομιδή λαχανικών και άλλων αγροτικών προϊόντων και οι ενεργειακές καλλιέργειες. Η στερεή και η υδαρής κοπριά από βοοειδή και χοίρους είναι η κύρια πρώτη ύλη των περισσότερων αγροτικών μονάδων βιοαερίου αν και ο αριθμός των εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη τις ενεργειακές καλλιέργειες αυξάνεται τα τελευταία χρόνια.

Ένα σύστημα διαχείρισης ζωικών λυμάτων με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος θεωρείται επιτυχημένο όταν αποτελείται από τα παρακάτω στάδια, τα οποία είναι:

- η ελαχιστοποίηση του όγκου των λυμάτων
- η συλλογή -απομάκρυνση των λυμάτων
- η μεταφορά των λυμάτων
- η αποθήκευση των λυμάτων
- η επεξεργασία των λυμάτων
- η διάθεση των λυμάτων

#### **1.5.7.1 Πτηνά**

Σχεδόν σε όλα τα στάδια λειτουργίας παράγονται απόβλητα ως εξής:

1. Υγρά απόβλητα:

- Μικρές ποσότητες λυμάτων από την έκπλυση των υποστατικών.

2. Στερεά απόβλητα:

- Κοπριά
- Νεκρά πτηνά

· Υλικά συσκευασιών

3. Αέριες εκπομπές, Σκόνες, Θόρυβοι:

· Εκπομπή αέριων ρύπων από την κοπριά (δύσσομες ουσίες, αμμωνία)

· Θόρυβος και εκπομπή ρύπων από την κίνηση των οχημάτων από και προς το πτηνοτροφείο.

· Θόρυβος και σκόνες κατά την διάρκεια της διαδικασίας συλλογής και μεταφοράς των πτηνών στο σφαγείο.

### **1.5.7.2 Χοίροι**

Για να καλυφθούν οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες σε χοιρινό κρέας, έχει αλλάξει ουσιωδώς ο τρόπος εκτροφής των χοίρων. Βασικό χαρακτηριστικό της νέας αυτής μορφής εκτροφής είναι η αύξηση του μεγέθους των μονάδων, η υψηλή συγκέντρωση των ζώων ανά μονάδα επιφάνειας και η ολοένα και μεγαλύτερη παραγωγή λυμάτων.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οξύνουν το πρόβλημα της διάθεσης των λυμάτων χοιροστασιών, τα οποία μάλιστα χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής λόγω του γεγονότος ότι τόσο η οργανική ουσία όσο και τα θρεπτικά συστατικά που εμπεριέχονται σε αυτά απαντώνται σε μεγάλη ποσότητα. Τα απόβλητα χοιροστασιών είναι συνήθως υγρής μορφής και αποτελούνται από:

- Νερό
- Οργανική ουσία
- Θρεπτικά στοιχεία
- Άλατα
- Παθογόνους μικροοργανισμούς

### 1.5.7.3 Βοοειδή

Βοοτροφία ορίζεται ο κλάδος της Κτηνοτροφίας ο οποίος έχει ως αντικείμενο την εκτροφή των βοοειδών, για την παραγωγή κυρίως γάλακτος, κρέατος και δέρματος. Οι κοπριές των ζώων αποθηκεύονται συνήθως στις περιοχές γύρω από μεσαίου και μεγάλου μεγέθους κτηνοτροφικές μονάδες και δημιουργούν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα όπως μόλυνση υπόγειων υδάτων ή εκπομπή αερίων και οσμών. Οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί πλέον συνιστούν για την διαχείριση των αποβλήτων είτε κομποστοποίηση είτε παραγωγή βιοαερίου.

### 1.5.8 Τυροκομικά

Λόγω του υψηλού ρυπαντικού φορτίου και της ποσότητας παραγόμενου αποβλήτου η πιο συνηθισμένη μέθοδος διαχείρισης των αποβλήτων των τυροκομείων είναι η αναερόβια χώνευση ή για την αποφυγή προβλημάτων υπερφόρτισης των δεξαμενών επεξεργασίας η αναερόβια συγχώνευση με άλλα απόβλητα που παράγονται στην περιοχή.

Εκτός από τη χρήση τους σε ανάμειξη με άλλα απόβλητα κτηνοτροφικών διαδικασιών, η αξιοποίηση του τυρογάλακτος στην παραγωγή βιοαερίου οδηγεί επιπλέον και στην επίλυση του προβλήματος των αποβλήτων των τυροκομείων.

Μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών είναι οι ακόλουθες:

- 1) Αναερόβια χώνευση
- 2) Αερόβια επεξεργασία
- 3) Αναερόβια –αερόβια-Επιπλεόντων φυτών

Σε σύγκριση με τα περισσότερα αγροτοβιομηχανικά απόβλητα το απόβλητο των τυροκομικών προϊόντων είναι ένα υποπροϊόν που παράγεται καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, οπότε μπορεί να διατίθεται για επεξεργασία συνεχώς [15].

### **1.5.9 Αστικά Απορρίμματα και βιολογικοί καθαρισμοί**

Όπως αναφέρει η κ. Ρογκακου στην εργασία της η άνοδος του βιοτικού επιπέδου που συνεχώς αυξάνεται σε συνάρτηση με την οικονομική ανάπτυξη των τελευταίων χρόνων φέρει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας των σκουπιδιών καθώς και τη διαφοροποίηση της σύστασης τους. Η ανάγκη επεξεργασίας καθαρισμού των αποβλήτων έγινε αισθητή μετά την επέκταση των δικτύων υπονόμων και την αποχέτευση σε αυτά των λυμάτων. Για να αντιμετωπισθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη διάθεση των αποβλήτων σε μεγάλες εκτάσεις, αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι καθαρισμού των αποβλήτων με επιτάχυνση του ρυθμού μέσα σε ευνοϊκό τεχνητό περιβάλλον.

#### **1.5.9.1 Βιολογικοί Καθαρισμοί**

Η επεξεργασία των λυμάτων γίνεται μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται βιολογικός καθαρισμός και έχει σκοπό τη μείωση του οργανικού φορτίου και τον καθαρισμό των λυμάτων.

Κατά το βιολογικό καθαρισμό γίνεται η αερόβια επεξεργασία των λυμάτων και η διάσπαση των διαλυμένων οργανικών υλικών με τη συμμετοχή μικροοργανισμών. Αποτελεί τη δευτεροβάθμια επεξεργασία λυμάτων, καθώς έπεται συνήθως της πρωτοβάθμιας μηχανικής επεξεργασίας και ακολουθείται, όταν αυτό είναι απαραίτητο, από τριτοβάθμια φυσικοχημική επεξεργασία.

#### **1.5.9.2 Στάδια επεξεργασίας των λυμάτων**

Η βιολογική διεργασία πραγματοποιείται μέσα σε μία δεξαμενή, το βιοαντιδραστήρα, όπου διοχετεύονται τα απόβλητα, αφού σε προηγούμενη βαθμίδα έχει γίνει κατακράτηση των στερεών υλών που περιέχονται σε αυτά. Μέσα στο βιοαντιδραστήρα υπάρχει μεγάλος αριθμός ετεροτροφικών μικροοργανισμών, που αποτελούν τη βιολογική ιλύς (λάσπη), ενώ παράλληλα,

μέσω ενός συστήματος αερισμού, διοχετεύεται στη μάζα των αποβλήτων αέρας, που είναι απαραίτητος για τη διεργασία, και γίνεται συνεχής ανάδευση του νερού και της βιολογικής μάζας. Συχνά, αντί για αέρας διοχετεύεται στα απόβλητα καθαρό οξυγόνο, που αυξάνει την απόδοση του βιοαντιδραστήρα, δηλαδή την ικανότητα επεξεργασίας αποβλήτων ανά μονάδα όγκου του.

Οι μικροοργανισμοί διασπούν τους οργανικούς ρύπους και τρέφονται από αυτούς, ενώ ταυτόχρονα πολλαπλασιάζονται. Όταν πλέον οι μικροοργανισμοί καταναλώσουν όλη την ποσότητα των οργανικών ουσιών που έχουν την ικανότητα να διασπάσουν και ολοκληρωθεί η βιολογική διεργασία, αρχίζουν να καταναλώνουν το δικό τους οργανικό υλικό, οπότε μειώνεται η συνολική τους μάζα.

Τότε τα απόβλητα διοχετεύονται σε μία δεξαμενή καθίζησης, όπου οι εναπομείναντες ζώντες μικροοργανισμοί διαχωρίζονται και αναδιοχετεύονται στο βιοαντιδραστήρα, ενώ το καθαρισμένο νερό μπορεί να μεταβιβαστεί σε υδάτινους αποδέκτες στο περιβάλλον ή να περάσει από τρίτη βαθμίδα επεξεργασίας.

Μετά το διαχωρισμό των μικροοργανισμών, στη δεξαμενή καθίζησης παραμένει ένα υπόλειμμα (ιλύς) από στερεά υλικά, οργανικές ουσίες που δεν αποικοδομήθηκαν, νεκρούς μικροοργανισμούς κ.λπ. Η ιλύς αυτή πρέπει να αδρανοποιηθεί πριν απορριφθεί στο περιβάλλον, πρέπει επομένως να υποστεί επεξεργασία-συμπύκνωση (πάχυνση), αερόβια ή αναερόβια ζύμωση για τη διάσπαση των οργανικών ενώσεων, αφυδάτωση και τελικά απόθεση στο περιβάλλον ή καύση. Πρόσφατα, άρχισαν να εφαρμόζονται δύο μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας της ιλύος, η θέρμανση υπό πίεση και η υγρή οξειδωση. Η ανάγκη επεξεργασίας της ιλύος εισάγει γενικά ένα επιπλέον κόστος στη διαδικασία του βιολογικού καθαρισμού.

### 1.5.9.3 Υγρά Απόβλητα

Ορίζεται ως το νερό που έχει επηρεαστεί αρνητικά στη σύσταση του ύστερα από την ανθρώπινη ή περιβαλλοντική παρέμβαση. Αποτελούνται από υγρά απόβλητα που συναντώνται σε βιομηχανία, γεωργία, οικιακά ακίνητα, εμπορικά ακίνητα και μπορούν να είναι αιτία πληθώρας ρύπων και πολλών περιβαλλοντικών άσχημων επιπτώσεων. Χαρακτηριστικά είδη υγρών αποβλήτων αναφέρονται παρακάτω:

- Ανθρώπινα απόβλητα, συνήθως από αποχωρητήρια, γνωστά και ως Blackwater
- Νερά πλύσης (πλυντήριο, διαδικασία προσωπικού πλυσίματος ή αντικειμένων) γνωστά και ως sullage ή greywater
- Διείσδυση θαλασσινού νερού (αλάτι ή μικροοργανισμοί)
- Εισροή υδάτων ποταμών (περιεκτικότητα σε πιθανώς μεγάλη ποσότητα ζωντανών μικροοργανισμών)
- Βιομηχανικά απόβλητα
- Αποστράγγιση βιομηχανικών εργοταξίων (λάσπη, άμμος, χημικά κατάλοιπα, πετρέλαιο)
- Αστική απορροή από βροχοπτώσεις σε δρόμους, σπίτια κλπ.
- Υπόλοιπα πλεονάζοντα υγρά από διάφορες οικιακές χρήσεις( μαγειρικό λάδι, ποτά, υγρά καθαρισμού, λιπάσματα κλπ.)
- Σύνολο αποχετεύσεων δημοσίων και ιδιωτικών
- Υπόγεια ύδατα που εισρέουν στις αποχετεύσεις

## 1.6 Περιεκτικότητα σε υγρασία

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ορίζεται ως η ποσότητα νερού που βρίσκεται στη βιομάζα και μετράται ως ποσοστό επί του βάρους του υλικού. Η περιεκτικότητα σε υγρασία έχει πολύ βασική επίδραση στην ενεργειακή μετατροπή της βιομάζα,

είτε πρόκειται για θερμοχημική μετατροπή (π.χ. καύση) ή για βιοχημική (π.χ. ζύμωση). Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση της συγκεκριμένης ιδιότητας στην ποιότητα της βιομάζας σημειώνεται ότι η αύξηση της από το 0 μέχρι το 40% μειώνει την θερμογόνο δύναμή της κατά 66% [18].

Η υγρασία μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο του 10%, για κάποια αγροτικά υπολείμματα όπως το άχυρο και τα τσόφλια, μέχρι πάνω από 60%, π.χ. για την βαγιάση. Το ξύλο, το οποίο είναι βασική πηγή μεγάλων ποσοτήτων βιομάζας, έχει κατά μέσο όρο υγρασία μεταξύ 40 και 50% [18]. Η βιομάζα που προέρχεται από κτηνοτροφικά απόβλητα (π.χ. κοπριά) ή από οργανικά υγρά απόβλητα (π.χ. τυρόγαλα) έχει γενικά πολύ υψηλή υγρασία, γεγονός που την καθιστά ευκολότερη στην μεταφορά της μέσω αντλιών.

Η σύγχυση στη χρήση της περιεκτικότητας σε υγρασία προέρχεται από τους διαφορετικούς τρόπους που μπορεί να εκφραστεί: είτε σε υγρή βάση ή σε ξηρή βάση. Καθώς η υγρασία έχει επιδρά σημαντικά στις διεργασίες ενεργειακής μετατροπής της βιομάζας, η βάση επί της οποίας μετράται πρέπει να δηλώνεται πάντα ξεκάθαρα. Ο συχνότερος τρόπος έκφρασης της υγρασίας της βιομάζας είναι σε υγρή βάση.

Οι βιοχημικές διεργασίες (π.χ. αναερόβια χώνευση) απαιτούν υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία ώστε να επιτύχουν την αποδοτική μετατροπή τους σε ενέργεια, σε αντίθεση με τις θερμοχημικές (π.χ. καύση) όπου η υψηλή υγρασία έχει αρνητική επίδραση στην ενεργειακή τους απόδοση. Η αεριοποίηση, αν και κατατάσσεται στις θερμοχημικές διεργασίες, απαιτεί κάποια υγρασία από την πρώτη ύλη, καθώς με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η περιεκτικότητα του υδρογόνου στο τελικό προϊόν (αέριο σύνθεσης). Καθώς το υδρογόνο εκλύει σημαντική ενέργεια κατά την καύση του, είναι επιθυμητό σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αναλογία στο αέριο σύνθεσης. Εκτιμάται ότι βιομάζα με περιεκτικότητα σε υγρασία μικρότερη από 30% αυξάνει ελάχιστα, μόνο, την συνολική απόδοση.

Αναφορικά με τη βιομάζα που λαμβάνεται από τη γεωργία (είτε αυτούσια ή ως παραπροϊόν) η περιεκτικότητα σε υγρασία της βιομάζας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες κατά την περίοδο συλλογής της.

Πίνακας 5. Συνήθης υγρασία για διάφορες πηγές βιομάζας (σε υγρή βάση) [18]

Πηγή Βιομάζας	Περιεκτικότητα σε υγρασία (υγρή βάση)
Θρύμματα ξύλου	10-60 %
Pellets ξύλου	8-12 %
Άχυρο	20-30 %
Πριονίδι	15-60 %
Υπολείμματα βαμβακιού	10-20 %
Switchgrass	30-70 %
Βαγάσση	40-60 %
Κοπριά αγελάδας	88-94 %
Κοπριά χοίρου	90-97 %
Κοπριά πουλερικού	75-80 %
Τυρόγαλα	93-97 %
Ενσίρωμα καλαμποκιού	65-75 %
Γλυκό σόργο	20-70 %
Αγριαγκινάρα	15-20 %

## 1.7 Ενεργειακή αξιοποίηση της Βιομάζας-Εφαρμογές

### 1.7.1 Κάλυψη των αναγκών θέρμανσης-ψύξης ή/και ηλεκτρισμού σε γεωργικές και άλλες βιομηχανίες

Με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλες ποσότητες θερμότητας απορρίπτονται στο περιβάλλον, είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων, είτε μέσω των καυσαερίων. Με τη συμπαραγωγή, όπως ονομάζεται η συνδυασμένη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από την ίδια ενεργειακή πηγή, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας αυτής ανακτάται και χρησιμοποιείται επωφελώς. Έτσι, αφ' ενός επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς αυξάνεται ο βαθμός ενεργειακής μετατροπής του καυσίμου σε ωφέλιμη ενέργεια, αφ' ετέρου μειώνονται αντίστοιχα και οι εκπομπές ρύπων.



Επίσης, ελαττώνονται οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς τα συστήματα συμπαραγωγής είναι συνήθως αποκεντρωμένα και βρίσκονται πιο κοντά στους καταναλωτές από ότι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Πράγματι, οι συμβατικοί σταθμοί παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης 15-40%, ενώ στα συστήματα συμπαραγωγής αυτός φθάνει μέχρι και 75-85% [2].

Η συμπαραγωγή από βιομάζα στην Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον σε αστικό-περιφερειακό επίπεδο. Η εξάπλωση της εφαρμογής της πρέπει να εξετασθεί με βασικό στόχο τη δημιουργία πολλών μικρών αποκεντρωμένων σταθμών συμπαραγωγής. Αυτοί θα πρέπει να εγκατασταθούν σε περιοχές της χώρας με σημαντικές ποσότητες διαθέσιμης βιομάζας, οι οποίες να βρίσκονται συγχρόνως κοντά σε καταναλωτές θερμότητας, καθώς η μεταφορά της θερμότητας παρουσιάζει υψηλές απώλειες και αυξημένο κόστος.

Οι καταναλωτές της παραγόμενης θερμότητας των προαναφερθέντων σταθμών συμπαραγωγής μπορεί να είναι χωριά ή πόλεις, τα οποία θα θερμαίνονται μέσω κάποιας εγκατάστασης συστήματος τηλεθέρμανσης, θερμοκήπια, βιομηχανικές μονάδες με αυξημένες απαιτήσεις σε θερμότητα κ.ά. Η παραγόμενη από τα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρική ενέργεια είναι δυνατό είτε να ιδιο καταναλώνεται είτε να πωλείται στη ΔΕΗ, σύμφωνα με όσα ορίζονται από το νόμο.

Σύμφωνα με το ΚΑΠΕ [2] ένα παράδειγμα βιομηχανίας όπου με την εγκατάσταση μονάδας συμπαραγωγής υποκαταστάθηκαν, πολύ επιτυχώς, συμβατικά καύσιμα από βιομάζα, είναι ένα εκκοκκιστήριο στην περιοχή της Βοιωτίας. Σ' αυτό εκκοκκίζονται ετησίως 40000-50000 τόνοι βαμβακιού και, από την παραγωγική αυτή διαδικασία, προκύπτουν ετησίως 4000-5000 τόνοι υπολειμμάτων, τα οποία στο παρελθόν καίγονταν σε πύργους αποτέφρωσης, χωρίς ιδιαίτερο έλεγχο, δημιουργώντας έτσι κινδύνους αναφλέξεως. Η απαραίτητη ξήρανση του βαμβακιού πριν τον εκκοκκισμό παλαιότερα γινόταν με

την καύση πετρελαίου και διοχέτευση των καυσαερίων στο προς ξήρανση βαμβάκι, μέχρι που εγκαταστάθηκε σύστημα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, το οποίο αξιοποιεί, μέσω καύσης, τα υπολείμματα του εκκοκκισμού.

Η ισχύς του λέβητα βιομάζας είναι 4000000 kcal/h και ο παραγόμενος ατμός έχει πίεση 10 bar. Το έργο που παράγεται, κατά την εκτόνωση του ατμού σε ένα στρόβιλο, μετατρέπεται στη γεννήτρια σε ηλεκτρική ενέργεια ισχύος 500 kW. Μετά την εκτόνωσή του, ο ατμός οδηγείται, μέσω σωληνώσεων, αφ' ενός σε εναλλάκτες θερμότητας, όπου θερμαίνεται ο αέρας σε θερμοκρασία 130°C, ο οποίος, εν συνεχεία, χρησιμοποιείται για την ξήρανση του βαμβακιού σε ειδικούς γι' αυτό το σκοπό πύργους, αφ' ετέρου στο σπορελαιουργείο, όπου χρησιμοποιείται στις πρέσες ατμού για την εξαγωγή του βαμβακόλαδου.

Με την εγκατάσταση του παραπάνω συστήματος, καλύπτεται το σύνολο των αναγκών σε θερμότητα του εκκοκκιστηρίου, καθώς και μέρος των αναγκών του σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων που επιτυγχάνεται ετησίως φθάνει τους 630 τόνους πετρελαίου. Έτσι, η αρχική επένδυση, συνολικού ύψους 300000000 δρχ., αποσβέσθηκε σε μόλις 6-7 εκκοκκιστικές περιόδους. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι ανάλογες μονάδες, μόνο για παραγωγή θερμότητας όμως, έχουν ήδη εγκατασταθεί και λειτουργούν σε 17 εκκοκκιστήρια βαμβακιού στη χώρα μας, στα οποία αντικαταστάθηκε πλήρως η χρήση του πετρελαίου και του μαζούτ από αυτή των υπολειμμάτων του εκκοκκισμού.

### **1.7.2 Τηλεθέρμανση κατοικημένων περιοχών**

Τηλεθέρμανση ονομάζεται η εξασφάλιση ζεστού νερού τόσο για τη θέρμανση των χώρων, όσο και για την απευθείας χρήση του σε ένα σύνολο κτιρίων, έναν οικισμό, ένα χωριό ή μία πόλη, από έναν κεντρικό σταθμό παραγωγής θερμότητας. Η παραγόμενη θερμότητα μεταφέρεται με δίκτυο αγωγών από το σταθμό προς τα θερμαινόμενα κτίρια. Η τηλεθέρμανση παρουσιάζει μεγάλη

ανάπτυξη σε πολλές χώρες, καθώς εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η επίτευξη υψηλότερου βαθμού απόδοσης, ο περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος και η δυνατότητα χρησιμοποίησης μη συμβατικών καυσίμων, οπότε προκύπτουν επιπλέον οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη [2].

Στην Ελλάδα, όπως αναφέρεται από το ΚΑΠΕ έχει ήδη εγκατασταθεί η πρώτη μονάδα τηλεθέρμανσης με χρήση βιομάζας. Η μονάδα αυτή, που βρίσκεται στην κοινότητα Νυμφασίας του Νομού Αρκαδίας, έχει ονομαστική ισχύ 1200000 kcal/h και καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης 80 κατοικιών και 600 m<sup>2</sup> κοινοτικών χώρων. Ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιούνται τρίμματα ξύλου, τα οποία προέρχονται από τεμαχισμό σε ειδικό μηχάνημα υπολειμμάτων υλοτομίας από γειτονικό δάσος ελάτων. Το έργο αυτό αποτελεί πρότυπο για την ανάπτυξη παρόμοιων εφαρμογών σε κοινότητες και δήμους της χώρας, δεδομένου ότι εξασφαλίζει σημαντική εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων, αξιοποίηση των τοπικών ενεργειακών πόρων και συνεισφέρει στη βελτίωση του περιβάλλοντος.

### **1.7.3 Θέρμανση θερμοκηπίων**

Η αξιοποίηση της βιομάζας σε μονάδες παραγωγής θερμότητας για τη θέρμανση θερμοκηπίων αποτελεί μία ενδιαφέρουσα και οικονομικά συμφέρουσα προοπτική για τους ιδιοκτήτες τους. Ήδη, στο 10% περίπου της συνολικής έκτασης των θερμαινόμενων θερμοκηπίων της χώρας, αξιοποιούνται διάφορα είδη βιομάζας [2].

Ένα παράδειγμα [2] αυτού του είδους χρήσης της βιομάζας αποτελεί μία θερμοκηπιακή μονάδα έκτασης 2 στρεμμάτων, στο Νομό Σερρών, στην οποία καλλιεργούνται οπωροκηπευτικά. Σε αυτή τη μονάδα έχει εγκατασταθεί σύστημα παραγωγής θερμότητας, συνολικής θερμικής ισχύος 400000 kcal/h, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο άχυρο σιτηρών. Η ετήσια εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων που επιτυγχάνεται φθάνει τους 40 τόνους πετρελαίου.

#### 1.7.4 Παραγωγή υγρών καυσίμων με βιοχημική μετατροπή βιομάζας

Η παραγωγή υγρών καυσίμων με βιοχημική διεργασία επικεντρώνεται, κυρίως, στην παραγωγή βιοαιθανόλης (οινοπνεύματος) με ζύμωση σακχάρων, αμύλου, κυτταρινών και ημικυτταρινών που προέρχονται από διάφορα είδη βιομάζας (αραβόσιτος, σόργο το σακχαρούχο κ.ά.). Η τεχνολογία ζύμωσης των σακχάρων είναι σήμερα γνωστή και ανεπτυγμένη, ενώ εκείνη της ζύμωσης των κυτταρινών και ημικυτταρινών βρίσκεται υπό εξέλιξη. Η βιοαιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες οχημάτων, ως έχει ή σε πρόσμιξη με βενζίνη, ως καύσιμο κίνησης [2].

Παρά το γεγονός ότι, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων (π.χ. αντικατάσταση αεροπορικής βενζίνης), το κόστος της βιοαιθανόλης είναι υψηλότερο εκείνου της βενζίνης, η χρήση της ως καύσιμο κίνησης αυξάνει συνεχώς ανά τον κόσμο, με προεξάρχουσες τη Βραζιλία και τις ΗΠΑ. Αυτό συμβαίνει διότι αφ' ενός η βιοαιθανόλη είναι καθαρότερο καύσιμο από περιβαλλοντικής πλευράς και αφ' ετέρου δίνει διέξοδο στα γεωργικά προβλήματα. Για τους λόγους αυτούς η παραγωγή και χρήση της βιοαιθανόλης παρουσιάζουν εξαιρετικά ευνοϊκές προοπτικές για το μέλλον [2].

#### 1.7.5 Παραγωγή υγρών καυσίμων με θερμοχημική μετατροπή βιομάζας

Η θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας οδηγεί είτε στην απ' ευθείας παραγωγή ενέργειας (καύση), είτε στην παραγωγή καυσίμου, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα. Η τεχνολογία της *αστραπιαίας πυρόλυσης* αποτελεί μία από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις για την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας. Κατ' αυτήν, τα ογκώδη δασικά και αγροτικά υπολείμματα, αφού τεμαχισθούν, μετατρέπονται, με τη βοήθεια ειδικού αντιδραστήρα, σε υγρό καύσιμο υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, το βιοέλαιο [2].

Το βιοέλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του πετρελαίου (έχει λίγο μικρότερη από τη μισή θερμογόνο δύναμη του πετρελαίου) σε εφαρμογές

θέρμανσης(λέβητες, φούρνους κ.λ.π.) αλλά και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (μηχανές εσωτερικής καύσης κ.ά.). Η αστραπιαία πυρόλυση της βιομάζας αποτελεί την οικονομικότερη διεργασία ηλεκτροπαραγωγής, ιδίως στην περιοχή μικρής κλίμακας ισχύος (<5MWe) [2].

Το ΚΑΠΕ, σε συνεργασία με διεθνώς αναγνωρισμένα Πανεπιστήμια και Εταιρείες Παραγωγής Ηλεκτρικού Ρεύματος, αναπτύσσει από το 1991 μία πρότυπη πιλοτική μονάδα αστραπιαίας πυρόλυσης, δυναμικότητας 10 kg/h. Εκτιμάται ότι, σύντομα, θα καταστεί δυνατή (δηλ. Οικονομικά συμφέρουσα) η μετάβαση από τις πιλοτικές σε επιδεικτικές μονάδες πυρόλυσης βιομάζας μεγαλύτερης δυναμικότητας.

Με την αεριοποίηση παράγεται αέριο καύσιμο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καυστήρες αερίου για την παραγωγή ενέργειας. Οι σχετικές τεχνολογίες όμως βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και θα απαιτηθεί σημαντική περαιτέρω προσπάθεια προκειμένου να μπορέσουν τα πιλοτικά προγράμματα να φτάσουν σε σημείο να είναι οικονομικά συμφέρουσα η εφαρμογή τους σε ευρεία κλίμακα.

### **1.7.6 Βιοαέριο**

Σημαντικές ενεργειακές ανάγκες μπορούν επίσης να καλυφθούν με τη χρήση του βιοαερίου ως καυσίμου σε μηχανές εσωτερικής καύσης, για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Αυτό αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα και παράγεται από την αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών κυρίως αποβλήτων, όπως είναι τα λήμματα των χοιροστασίων, πτηνοτροφιών, βουστασίων, καθώς και βιομηχανικών και αστικών οργανικών απορριμμάτων [2].

Στην περίπτωση των κτηνοτροφικών αποβλήτων, η παραγωγή του βιοαερίου γίνεται σε ειδικές εγκαταστάσεις, απλούστερες ή συνθετότερες, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Σ' αυτές, εκτός από το βιοαέριο, παράγεται και πολύ καλής

ποιότητας οργανικό λίπασμα, του οποίου η διάθεση στην αγορά μπορεί να συμβάλλει στην οικονομική βιωσιμότητα μίας εφαρμογής αυτού του είδους [2].

Στην περίπτωση των αστικών απορριμμάτων, το βιοαέριο παράγεται στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Η μάστευση του μπορεί να αρχίσει μετά από το δεύτερο ή τρίτο χρόνο της απόθεσης των απορριμμάτων αυτών και εξαρτάται από την ποσότητά τους. Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα του βιοαερίου που μαστεύεται εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα των αποτιθεμένων απορριμμάτων σε οργανικά υλικά, καθώς και από την ποιότητα του υλικού επικάλυψης των στρώσεων. Αυτό θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο στεγανό, ώστε να επιτυγχάνεται η αναερόβια χώνευση, εμποδίζοντας, ταυτόχρονα, την απαέρωση του παραγόμενου βιοαερίου [2].

#### **1.7.7 Παραγωγή οργανοχουμικών λιπασμάτων από πτηνοτροφικά απόβλητα.**

Στην περιοχή των Μεγάρων [2], εγκαταστάθηκε μονάδα παραγωγής οργανικών λιπασμάτων από την επεξεργασία των αποβλήτων των πολυάριθμων πτηνοτροφείων της περιοχής. Μια τέτοια μονάδα έχει σημαντικές ευνοϊκές επιπτώσεις στο περιβάλλον, δεδομένου ότι η περιοχή απαλλάσσεται από σημαντικές ποσότητες πτηνοτροφικών αποβλήτων, που προκαλούν προβλήματα στους κατοίκους λόγω της τοξικότητάς τους και του κινδύνου διάδοσης μολυσματικών ασθενειών.

Συμβάλλει, όμως, και στην εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, τα οποία θα απαιτούνταν για την κατ' άλλο τρόπο παραγωγή ανόργανων λιπασμάτων ίσης λιπαντικής αξίας. Η μονάδα έχει δυναμικότητα επεξεργασίας 30000 τόνων πτηνοτροφικών αποβλήτων ετησίως και η ηλεκτρική ενέργεια που εξοικονομείται, στο ίδιο διάστημα, φθάνει περίπου τις 500 MWh.

## 1.8 Επεξεργασία της βιομάζας

Μόνο λίγοι τύποι της βιομάζας όπως το ξύλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας με καύση για παραγωγή ενέργειας. Συνήθως απαιτείται η επεξεργασία και ο εξευγενισμός της βιομάζας για τη μετατροπή της σε χρήσιμο καύσιμο. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες διεργασιών επεξεργασίας της βιομάζας [5]:

### ΤΗ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

- Ανθρακοποίηση π.χ. παραγωγή κάρβουνου.
- Πυρόλυση π.χ. παραγωγή υδρολυτικών ελαίων.
- Αεριοποίηση π.χ. παραγωγή αερίου.

### ΤΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

- Αναερόβια χώνευση π.χ. παραγωγή βιοαερίου.
- Υδρόλυση-Αναερόβια ζύμωση π.χ. παραγωγή αιθανόλης.

### ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

- Εκχύλιση ελαίων και εστεροποίηση των τριγλυκεριδίων π.χ. παραγωγή βιολογικού καυσίμου.

#### 1.8.1 Καύση

Όπως αναφέρετε στο εγχειρίδιο η χρήση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας [5] η απ' ευθείας καύση της βιομάζας για παραγωγή θερμότητας είναι ο απλούστερος τρόπος για την ενεργειακή αξιοποίησή της. Για την επίτευξη καλύτερων βαθμών απόδοσης στη καύση είναι επιθυμητό η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία να είναι χαμηλή συνήθως κάτω του 20%. Πολλές φορές απαιτείται τεμαχισμός της βιομάζας σε μικρά κομμάτια για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες συσκευές και φούρνους για καύση. Όταν η βιομάζα βρίσκεται υπό μορφή πολύ μικρών κόκκων είναι επιθυμητό πολλές φορές να μετατραπεί σε μπριγκέτες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μορφοποίησή της σε

κατάλληλα μηχανήματα με υψηλή πίεση. Για την παραγωγή ατμού η βιομάζα καίγεται σε κατάλληλους καυστήρες και βραστήρες με ειδικούς εναλλάκτες θερμότητας.

Οι περισσότερες μορφές βιομάζας συνίστανται από τρεις σύνθετες χημικές ενώσεις : κυτταρίνες, ημικυτταρίνες και λιγνίτες. Περιέχουν επίσης νερό, μικρές ποσότητες ρητινών και άλατα.

Η τυπική σύνθεση της βιομάζας είναι :

- 50% άνθρακας
- 43% οξυγόνο
- 6% υδρογόνο

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος καύσης της βιομάζας πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι η φωτιά απαιτεί τρεις παράγοντες για να αρχίσει και να συνεχίσει να υπάρχει δηλαδή καύσιμο, οξυγόνο και θερμότητα. Ο έλεγχος της φωτιάς γίνεται με τον έλεγχο των τριών αυτών παραγόντων.

Η θερμότητα που παράγεται κατά τη καύση της βιομάζας διαδίδεται με τρεις τρόπους και μηχανισμούς

α) Με αγωγιμότητα

β) Με ακτινοβολία

γ) Με μεταφορά

Η καύση του ξύλου έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

1. Το ξύλο καίγεται σε δύο φάσεις

Κατ' αρχάς παράγονται πτητικά αέρια που καίγονται, δημιουργώντας το κάρβουνο που καίγεται στη συνέχεια.

2. Οξυγόνο θα πρέπει να μεταφερθεί από το περιβάλλον στη ζώνη καύσης



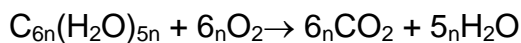
3. Το μέγεθος, η πυκνότητα και η τοποθέτηση του ξύλου στην εστία της φωτιάς επηρεάζουν τη ταχύτητα και τη πληρότητα της καύσης.

Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον μπορούν να ελαχιστοποιηθούν κατά τη καύση της βιομάζας, εφόσον η εστία καύσης περικλείεται σε κάποια τοιχώματα. Έτσι ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας με μεταφορά. Ταυτόχρονα τα τοιχώματα θα πρέπει να απορροφούν την ακτινοβολούμενη θερμότητα, μέρος της οποίας θα πρέπει να ακτινοβολούν πάλι.

Η θερμότητα που χάνεται με τα αέρια καύσης μπορεί να ανακτηθεί σε σημαντικό βαθμό, εφόσον χρησιμοποιηθεί κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας.

Σήμερα υπάρχουν σόμπες και τζάκια που επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης από 20% έως 80%, ανάλογα με το βαθμό που εξοικονομούν θερμότητα.

Η τυπική χημική αντίδραση κατά τη καύση της βιομάζας είναι :



↓

(τυπική βιομάζα)

Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνεται η καύση της βιομάζας κυμαίνονται στους 1000-1500°C.

### 1.8.2 Πυρόλυση

Η ταχεία πυρόλυση της βιομάζας (biomass fast pyrolysis) είναι μια διεργασία κατά την οποία η πρώτη ύλη θερμαίνεται ταχύτατα σε θερμοκρασίες 450-500 °C, σε συνθήκες έλλειψης αέρα (οπότε και οξυγόνου). Σε αυτές τις συνθήκες παράγονται, ατμοί οργανικών ενώσεων, μη συμπυκνώσιμα αέρια και ρευστή πίσσα. Οι ατμοί των οργανικών ενώσεων στη συνέχεια συμπυκνώνονται, παράγοντας το έλαιο πυρόλυσης (pyrolysisoil) ή βιοέλαιο (bio-oil). Στις συνήθεις περιπτώσεις, περίπου 50-75% κατά βάρος της τροφοδοτούμενης βιομάζας μετατρέπεται σε έλαιο πυρόλυσης.

Το τεράστιο πλεονέκτημα της διεργασίας είναι ότι μετατρέπει οποιαδήποτε προβληματική στη διαχείριση βιομάζα, διαφορετικής προέλευσης, σε ένα καθαρό και ομοιογενές υγρό καύσιμο. Το έλαιο πυρόλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, καυσίμων ή χημικών προϊόντων. Η ενεργειακή πυκνότητα του ελαίου (δηλαδή η ενέργεια που αποδίδει ανά μονάδα όγκου του) είναι έως 5 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της αρχικής βιομάζας, γεγονός που προσφέρει ουσιαστικά διαχειριστικά πλεονεκτήματα. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης του ελαίου σε υψηλότερης απόδοσης στροβίλους παραγωγής ενέργειας. Τέλος, η δυνατότητα μεταφοράς του καυσίμου από το σημείο παραγωγής του σε διαφορετικό σημείο παραγωγής ενέργειας παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας αποφασιστικά τις απώλειες του δικτύου.

Μεγάλη ποικιλία διαφορετικών ειδών βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διεργασία. Για την επιτυχημένη μετατροπή της βιομάζας είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία της: τεμαχισμός της σε ομοιόμορφα μικρά κομμάτια (μικρότερα από 10 mm) και ξήρανση της ώστε η υγρασία της να είναι μικρότερη από 10%. Με ορθό ενεργειακό σχεδιασμό της μονάδας πυρόλυσης, η απαιτούμενη θερμότητα για την ξήρανση της βιομάζας μπορεί να προέλθει από την ίδια την μονάδα, μειώνοντας έτσι τα λειτουργικά της κόστη και ενισχύοντας το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα.

Τα πλεονεκτήματα που συνοδεύουν την τεχνολογία ταχείας πυρόλυσης της βιομάζας έχουν οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση των ερευνητικών προσπαθειών στο αντικείμενο. Ως επιστέγασμα των προσπαθειών αυτών, έρχεται η εμφάνιση των πρώτων μονάδων πυρόλυσης της βιομάζας σε εμπορική, πλέον, κλίμακα. Στην Αλμπέρτα του Καναδά, για παράδειγμα, βρίσκεται στη φάση του σχεδιασμού και της αδειοδότησης η μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής ενέργειας από πυρόλυση βιομάζας. Η συγκεκριμένη μονάδα θα επεξεργάζεται 400 τόνους βιομάζας ημερησίως (κυρίως πριονίδι και chips ξύλου) ενώ αναμένεται ότι θα παράγει

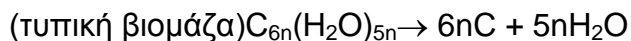
αρκετή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να καλυφθούν πλήρως οι ετήσιες ανάγκες 3800 κατοικιών.

### 1.8.3 Ανθρακοποίηση

Το κάρβουνο που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις αναπτυσσόμενες χώρες σαν καύσιμο παράγεται με την ανθρακοποίηση της βιομάζας. Η ανθρακοποίηση είναι μία διεργασία όπου το ξύλο θερμαίνεται παρουσία αέρα σε αναλογία μικρότερη από τη στοιχειομετρική, και σαν προϊόν παράγεται το κάρβουνο καθώς και υγρά και αέρια παραπροϊόντα [5].

*Η διεργασία της ανθρακοποίησης γίνεται σε 4 στάδια[5].*

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη ξήρανση του ξύλου που πρόκειται να ανθρακοποιηθεί και καταναλώνει ενέργεια. Η θερμοκρασία είναι περίπου 200°C. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη φάση της προανθρακοποίησης και γίνεται σε θερμοκρασίες 170-300°C, ενώ παράγονται υγρά και αέρια προϊόντα. Το στάδιο αυτό απαιτεί επίσης τη κατανάλωση ενέργειας. Το τρίτο στάδιο που παράγει ενέργεια γίνεται σε θερμοκρασίες 250-300°C. Στο στάδιο αυτό εκλύονται υγρά και αέρια παραπροϊόντα, ενώ το ξύλο ανθρακοποιείται πλήρως. Στο τέταρτο στάδιο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300°C απομακρύνονται όλες οι πτητικές ουσίες από το κάρβουνο και το προϊόν είναι τώρα έτοιμο. Η βασική χημική αντίδραση κατά την ανθρακοποίηση της βιομάζας είναι :



ενώ ταυτόχρονα γίνονται και παράλληλες αντιδράσεις.

Μετά το πέρας της ανθρακοποίησης το κάρβουνο ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι ιδιότητες του κάρβουνου εξαρτώνται από [5]:

α) Την υγρασία της βιομάζας

β) Τον τύπο του ξύλου και τη χημική του σύσταση

γ) Τη θερμοκρασία της ανθρακοποίησης

Η σύσταση κάρβουνου ικανοποιητικής ποιότητας είναι :

Άνθρακας περισσότερο από 70%

Πτητικές ουσίες 25%

Στάχτη 5%

Η πυκνότητά του κυμαίνεται περίπου 250-300 kg/m<sup>3</sup>, ενώ η θερμιδική του αξία είναι 25 MJ/kg σε σύγκριση με τα 15 MJ/kg του ξύλου [5].

Ο τελικός όγκος του παραγόμενου κάρβουνου είναι περίπου το μισό του αρχικού όγκου του ανθρακοποιημένου ξύλου. Υπάρχουν διάφορα συστήματα για την ανθρακοποίηση της βιομάζας, τα οποία είναι συνήθως απλής κατασκευής. Η διάρκεια της διαδικασίας ανθρακοποίησης είναι συνήθως 2-20 ημέρες, ενώ η απόδοση κυμαίνεται σε 15-25% [5].

#### 1.8.4 Παραγωγή Αιθανόλης

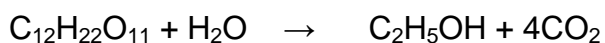
Αιθανόλη μπορεί να παραχθεί από διάφορους τύπους βιομάζας με χημικές και βιολογικές διεργασίες και η παραγόμενη αιθανόλη αποτελεί άριστο καύσιμο. Τρεις τύποι βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό [5]:

α) Σακχαρούχες ύλες

β) Αμυλούχες ύλες

γ) Κυτταρινούχες ύλες.

Οι σακχαρούχες ύλες είναι οι πιο ελκυστικές για την παραγωγή αιθανόλης, καθώς περιέχουν σάκχαρα ζυμώσιμα σε αλκοόλη. Η μετατροπή της σουκρόζης σε αλκοόλη γίνεται σύμφωνα με τη σχέση [5]:



Η αναερόβια ζύμωση γίνεται κυρίως από τη ζύμη *Saccharomyces cerevisiae*.

Σύμφωνα με τον κ Γιάννη Βουρδουμπα [5] η ζύμωση σταματά σε κάποιο σημείο καθώς συγκεντρώσεις αλκοόλης στο ζυμούμενο διάλυμα πάνω από 10-12% καθιστούν απαγορευτικό τον μεταβολισμό των ζυμών και συνεπώς υψηλότερες συγκεντρώσεις αλκοόλης μέχρι 95% επιτυγχάνονται με απόσταξη. Στη συγκέντρωση 95% αιθανόλη και 5% νερό σχηματίζεται αζεοτροπικό μίγμα και συνεπώς με απόσταξη δεν μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες συγκεντρώσεις αιθανόλης. Διάφορες γεωργικές πρώτες ύλες με υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παραγωγή αιθανόλης.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα τεύτλα, το σακχαροκάλαμο, το γλυκό σόργο κ.ά. Παραπροϊόντα ή απόβλητα επίσης της βιομηχανίας τροφίμων πλούσια σε σάκχαρα όπως οι μελάσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παραγωγή αιθανόλης.

Σήμερα το σακχαροκάλαμο αποτελεί την κύρια πρώτη ύλη που παράγονται μεγάλες ποσότητες αιθανόλης παγκοσμίως. Έτσι στη Βραζιλία από δεκαετίες χρησιμοποιείται το γεωργικό αυτό προϊόν για τη παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αιθανόλης και αυτή για τη κίνηση εκατομμυρίων αυτοκινήτων.

Αμυλούχες πρώτες ύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή αιθανόλης αφού πρώτα υδρολυθεί το άμυλο σε σάκχαρα και στη συνέχεια ζυμωθούν τα σάκχαρα. Η υδρόλυση του αμύλου μπορεί να είναι είτε ενζυματική παρουσία κατάλληλων μικροοργανισμών είτε όξινη σε pH 1.5 και στις 2 atm.

Κυτταρινούχες πρώτες ύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή αιθανόλης αφού πρώτα υδρολυθεί η κυτταρίνη σε σάκχαρα. Η υδρόλυση μπορεί να είναι όξινη ή ενζυματική όπως στην περίπτωση του αμύλου, είναι όμως πιο δύσκολη και πιο δαπανηρή.

Κατά τη ζύμωση των σακχάρων το pH πρέπει να είναι περίπου 4-5 και η θερμοκρασία 30-32°C. Η αλκοολική ζύμωση μπορεί να είναι διαλείπωντος έργου,

ημισυνεχής ή συνεχής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός οκτανίων της καθαρής αιθανόλης όταν χρησιμοποιείται σαν καύσιμο οχημάτων είναι 106 σε σύγκριση με 90-92 της απλής βενζίνης και 97-99 της σούπερ. Η παραγωγή αιθανόλης από σακχαρούχες γεωργικές πρώτες ύλες συνεπάγεται τη δέσμευση σημαντικών εκτάσεων γης που διαφορετικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή τροφίμων.

Σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης παρουσιάζουν τα απόβλητα της ζύμωσης και της απόσταξης. Έχουν υψηλό ρυπαντικό φορτίο και είναι δύσκολα επεξεργάσιμα. Στη Βραζιλία έχουν σήμερα υιοθετηθεί δύο πρακτικές για την επεξεργασία των αποβλήτων της επεξεργασίας του σακχαροκάλαμου για παραγωγή αιθανόλης.

Η πρώτη εξάτμιση αφορά τη συλλογή τους σε δεξαμενές και την εξάτμιση του νερού. Η δεύτερη αφορά τη διασπορά τους υπό μορφή σπρέι σε καλλιέργειες σακχαροκάλαμου.

Ανάμιξη της αιθανόλης με βενζίνη σε ποσοστό μέχρι 20% δεν συνεπάγεται αλλαγές στο κινητήρα του αυτοκινήτου. Εφόσον αναμιχθεί η αιθανόλη σε μεγαλύτερο ποσοστό ή χρησιμοποιηθεί καθαρή αιθανόλη, απαιτούνται όμως μικρές αλλαγές στο κινητήρα του αυτοκινήτου. Η χρήση της αιθανόλης σαν καύσιμο στα οχήματα μειώνει τις αέριες εκπομπές υδρογονανθράκων και οξειδίων του Αζώτου [5].

#### **1.8.5 Παραγωγή φυτικών ελαίων**

Στο ίδιο εγχειρίδιο αναφέρετε ότι [5] υπάρχουν διάφορα δένδρα, οι καρποί των οποίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ελαίων. Οι περισσότερες γεωργικές φυτείες έχουν παραγωγικότητα 30-80 χλγ. ελαίου / στρέμμα. Υπάρχουν όμως δένδρα όπως ο φοίνικας στην Αφρική που έχουν αποδόσεις 300 περίπου χλγ. ελαίου / στρέμμα. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη λήψη ελαίου από τους καρπούς είναι η ίδια είτε το λάδι χρησιμοποιείται για βρώσιμο είτε για καύσιμο.

Για τη λήψη των ελαίων από τους καρπούς χρησιμοποιούνται δύο είδη τεχνολογιών. Η πρώτη αφορά τη μηχανική συμπίεση των καρπών για τη λήψη των ελαίων, η οποία μπορεί να γίνει σε δύο στάδια για την επίτευξη καλύτερων αποδόσεων. Πάντως μικρές ποσότητες λαδιού παραμένουν στο υπόλειμμα που είναι δυνατόν να ληφθούν με εκχύλιση. Οι μονάδες παραγωγής λαδιού με συμπίεση μπορεί να είναι σχετικά μικρής δυναμικότητας και είναι απλής τεχνολογίας. Η δεύτερη αφορά την εκχύλιση του ελαίου από τους καρπούς με κάποιο διαλύτη συνήθως εξάνιο. Προηγουμένως έχει αφαιρεθεί η υγρασία από τους καρπούς και το υπόλειμμα που παραμένει περιέχει πολύ μικρές ποσότητες ελαίων. Η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής απαιτεί μονάδες με μεγαλύτερη δυναμικότητα από αυτές που το έλαιο λαμβάνεται με συμπίεση, ενώ η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι πιο πολύπλοκη.

Τα φυτικά έλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν καύσιμα σε οχήματα που χρησιμοποιούν πετρέλαιο ντήζελ όπως η αιθανόλη μπορεί να υποκαταστήσει τη βενζίνη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαρό λάδι ή μίγμα ελαίου - ντήζελ.

### **1.8.6 Αεριοποίηση**

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια ενδόθερμη θερμική διεργασία κατά την οποία η στερεή βιομάζα μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο. Το παραγόμενο αυτό αέριο αποτελεί μίγμα πολλών καυσίμων (και μη) αερίων: μονοξειδίο και διοξειδίο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), υδρογόνο ( $\text{H}_2$ ), μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ίχνη υδρογονανθράκων (π.χ.  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) και άζωτο ( $\text{N}_2$ , σε περίπτωση που για την διεργασία χρησιμοποιείται αέρας και όχι καθαρό οξυγόνο). Πέραν των παραπάνω ενώσεων στο αέριο προϊόν εμφανίζονται και διάφοροι επί μολυντές κυριότεροι εκ των οποίων είναι σωματίδια πίσσας, τέφρα, αμμωνία, οξέα και σύνθετοι υδρογονάνθρακες.

Το καύσιμο προϊόν της διεργασίας αεριοποίησης ονομάζεται αέριο σύνθεσης (syngas). Σε περίπτωση που η διεργασία γίνει με τη χρήση αέρα (η πιο οικονομική και συνήθης επιλογή), το αέριο σύνθεσης έχει καθαρή θερμογόνο δύναμη περίπου  $4.6 \text{ MJ/ m}^3$  (περίπου το 1/7 εκείνης του φυσικού αερίου). Όταν

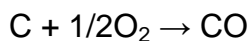
χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο αντί για αέρας, η θερμογόνος δύναμη του αερίου μπορεί ακόμα και να τριπλασιασθεί. Και στις δυο περιπτώσεις, πάντως, η θερμογόνος δύναμη κάνει το αέριο σύνθεσης κατάλληλο για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού, με κατάλληλη χρήση του σε καυστήρες και αεριοστρόβιλους.

Από χημικής πλευράς, η διεργασία της αεριοποίησης της βιομάζας είναι αρκετά σύνθετη και περιλαμβάνει, κατά σειρά, τα ακόλουθα επιμέρους στάδια: αποσύνθεση της οργανικής βιομάζας σε μη συμπυκνώσιμο αέριο, υδρατμούς και πίσσα, θερμική διάσπαση των ατμών σε αέριο σύνθεσης και πίσσα, αεριοποίηση της πίσσας και μερική οξειδωση του αερίου σύνθεσης, των ατμών και της πίσσας. Η απαιτούμενη θερμότητα για την αεριοποίηση της βιομάζας παρέχεται από την καύση μέρους της αρχικής ποσότητας της βιομάζας.

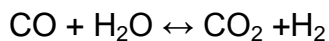
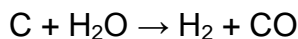
Η βασική διαδικασία που ακολουθείται κατά την αεριοποίηση είναι η τοποθέτηση του στερεού καυσίμου σε υψηλή θερμοκρασία της τάξης των 1000 °C παρουσία οξυγόνου και ατμού. Η πίεση μπορεί να κυμαίνεται από τιμές λίγο μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική πίεση μέχρι τριάντα φορές πάνω από την ατμοσφαιρική. Αρχικά απελευθερώνονται τα πτητικά υλικά. Η αλληλεπίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο και τον ατμό έχει σαν συνέπεια την παραγωγή ενός μείγματος αερίου αποτελούμενου κατά κύριο λόγο από μονοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο, κάποια ποσότητα μεθανίου, άλλων υδρογονανθράκων αλλά και πίσσας. Παράλληλα παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Περαιτέρω συνέχιση της διαδικασίας θα έχει σαν συνέπεια την παραγωγή καθαρότερου αερίου προϊόντος. Αν αντί για οξυγόνο χρησιμοποιηθεί αέρας, θα υπάρχει επίσης άζωτο στο παραγόμενο αέριο με αποτέλεσμα το αέριο καύσιμο που θα παραχθεί να έχει ενεργειακό περιεχόμενο της τάξης του 3-5 MJ/m<sup>3</sup>. Η χρήση καθαρού οξυγόνου έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή καλύτερου καυσίμου, έχει όμως αυξημένο κόστος, επομένως συμφέρει να χρησιμοποιηθεί μόνο αν γίνεται παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα. Πιο αναλυτικά, κατά την αεριοποίηση λαμβάνουν χώρα διαδοχικές χημικές διεργασίες.



Αρχικά, καθώς ζεσταίνεται το στερεό καύσιμο απελευθερώνονται τα πτητικά υλικά και στη συνέχεια πυρόλυση και το καύσιμο χάνει το 70% του βάρους του. Στη συνέχεια πραγματοποιείται καύση με λ μικρότερο από το στοιχειομετρικό. Τα πτητικά προϊόντα και μέρος του στερεού καυσίμου αντιδρούν με το οξυγόνο παράγοντας διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα παρέχοντας την απαραίτητη θερμότητα για τη συνέχιση των αντιδράσεων της αεριοποίησης. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο στάδιο αυτό, αν αναπαραστήσουμε το καύσιμο με έναν άνθρακα είναι η ακόλουθη:



Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η αεριοποίηση του στερεού καυσίμου όπου έχουμε τις παρακάτω αντιδράσεις:



Αυτό που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας στη ουσία είναι ότι επιτρέπουμε σε μικρή ποσότητα οξυγόνου να αντιδράσει με το καύσιμο, πραγματοποιώντας ατελή καύση, με αποτέλεσμα την παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα και ενέργειας που έχει σαν συνέπεια την πρόκληση περεταίρω αντιδράσεων που καταλήγουν στην παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Στο τέλος της διαδικασίας το αέριο που παράγεται έχει βρεθεί σε μια ισορροπία με συγκεκριμένες συγκεντρώσεις από όλα τα παραπάνω συστατικά. Καθοριστικό ρόλο στη διεργασία αεριοποίησης έχει και το είδος της φυτικής βιομάζας. Οι ιδιότητες της μπορεί να διαφέρουν σημαντικά αναλόγως την προέλευση της βιομάζας, με άμεση συνέπεια στην τεχνολογία της διεργασίας και την βιωσιμότητα της μονάδας. Οι παράμετροι της βιομάζας που εξετάζονται περισσότερο είναι η υγρασία του υλικού, η περιεκτικότητα της σε τέφρα, η στοιχειακή της ανάλυση, η θερμογόνο δύναμή της, η πυκνότητα και η κοκκομετρία της.

Πρέπει να τονισθεί ότι το αέριο σύνθεσης δεν χρησιμοποιείται απευθείας, καθώς εξέρχεται από τον αντιδραστήρα, στις μηχανές παραγωγής ενέργειας.

Είναι απαιτούμενη η προεπεξεργασία του ώστε να μειωθούν οι ποσότητες των ακαθαρσιών που περιέχονται σε αυτό (πίσσα, αμμωνία, θείο, κ.λπ.) καθώς και η ψύξη του. Παράλληλα, εκτός του αερίου σύνθεσης, η διεργασία παράγει και κάποιες ποσότητες πίσσας (η ποσότητας της οποίας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως π.χ. το είδος της βιομάζας). Εξαιτίας της υψηλής θερμογόνου δύναμης της, ως βέλτιστος τρόπος διαχείρισής της πίσσας θεωρείται η ενεργειακή εκμετάλλευσή της εντός της μονάδας αεριοποίησης. Αναμφίβολα η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια τεχνολογία πιο πολύπλοκη και με λιγότερες εμπορικές εφαρμογές, σε σχέση με την συνήθη καύση της βιομάζας. Τα πλεονεκτήματα, όμως, που παρουσιάζει, με κυριότερο όλων την πολύ μεγάλη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της μονάδας, έχει οδηγήσει στον διαρκή πολλαπλασιασμό τέτοιου είδους μονάδων στην «αιχμή της τεχνολογίας», τα τελευταία χρόνια.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της εξέλιξης είναι ότι το 2008, η μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας μέσω αεριοποίησης βιομάζας στην Yamagata της Ιαπωνίας, βραβεύθηκε ως η καλύτερη μονάδα παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές παγκοσμίως, στα πλαίσια της φημισμένου συνεδρίου Power Gen Asia. Η συγκεκριμένη μονάδα έχει ισχύ 2 MWe και επεξεργάζεται 60 τόνους chips ξύλου ημερησίως.

### **1.8.7 Παραγωγή βιοαερίου**

Η Αναερόβια Χώνευση είναι μια βιοχημική διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας σύνθετα οργανικά στοιχεία αποσυντίθεται απουσία οξυγόνου, από διάφορους τύπους αναερόβιων μικροοργανισμών και μετατρέπονται σε βιοαέριο.

## 2. Αναερόβια χώνευση

### 2.1 Ιστορική αναδρομή

Η αναερόβια χώνευση ως μέθοδος εφαρμόζεται εδώ και χρόνια παρόλο που δεν είναι ευρέως γνωστή σε πολλές χώρες παγκοσμίως. Ιστορικά ξεκινάει στην Ασσυρία τον 10ο αι. π.Χ. όπου οι κάτοικοί της την χρησιμοποιούσαν για να ζεστάνουν νερό [8]. Τον 18ο αι. π.Χ. χρησιμοποιήθηκε για τον ίδιο σκοπό και στην Περσία. Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος ήταν ο πρώτος που ανέφερε το 1764 ότι μπορούσε να βάλει φωτιά σε μια μεγάλη επιφάνεια ρηχής λασπώδους λίμνης στο New Jersey των ΗΠΑ. Τον 17ο αιώνα, όταν ο Alessandro Volta περιέγραψε για πρώτη φορά επιστημονικά τη παραγωγή βιοαερίου, καθώς παρατήρησε την εκπομπή από τα ιζήματα του πυθμένα μιας βαλτώδους λίμνης αερίων, τα οποία συνέλεξε και απέδειξε ότι ήταν εύφλεκτα [8]. Το 1804 ο Dalton έδωσε το χημικό τύπο του μεθανίου. Η βιολογική παραγωγή μεθανίου με τις πρώτες αναερόβιες εγκαταστάσεις εμφανίζονται στην Ινδία το 1859 όπου χρησιμοποιήθηκαν ζωικά απόβλητα. Ο Poroff το 1875 ανέφερε ότι η σύνθεση του μεθανίου μένει σταθερή με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η πρώτη εφαρμογή ευρείας κλίμακας, πραγματοποιήθηκε το 1890 στη Μεγάλη Βρετανία στη περιοχή του Exeter, όπου χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων [8]. Μεταξύ 1914 και 1921 οι Imhoff και Blunk μελέτησαν τη δυνατότητα θέρμανσης των χωνευτήρων από το παραγόμενο βιοαέριο. Το 1926 εγκαταστάθηκε στη Γερμανία ο πρώτος χωνευτήρας ο οποίος λειτουργούσε με συνεχή θέρμανση και ο οποίος σήμανε την αρχή της συστηματικής βιομηχανικής παραγωγής βιοαερίου κάτω από αυξανόμενες θερμοκρασίες. Ωστόσο, ως θεμελιωτής της αναερόβιας χώνευσης θεωρείται ο Buswell ο οποίος το 1936 χρησιμοποίησε ζωικά απόβλητα, ως βασικό υπόστρωμα για τη παραγωγή βιοαερίου, σε συνδυασμό με άλλα οργανικά απόβλητα.

Κατά τα τελευταία έτη οι παγκόσμιες αγορές για το βιοαέριο αυξήθηκαν κατά 20 ως 30% το χρόνο και πολλές χώρες έχουν αναπτύξει σύγχρονες τεχνολογίες

βιοαερίου και έχουν πετύχει να καθιερώσουν ανταγωνιστικές εθνικές αγορές βιοαερίου. Περεταίρω ερευνητικές προσπάθειες ξεκίνησαν σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες της Ευρώπης μετά την πετρελαϊκή κρίση το 1973 όπου με την πάροδο των ετών η τεχνολογία εξελίχθηκε και πολλά προβλήματα ξεπεράστηκαν. Μετά την έναρξη της συστηματικής βιομηχανικής χρήσης της μεθόδου σε διάφορες χώρες, λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων της, μεγάλη ανταπόκριση βρήκε στην Ασία όπου για τη παραγωγή βιοαερίου γινόταν επεξεργασία ζωικών αποβλήτων. Στη Κίνα σύμφωνα με το Υπουργείο Γεωργίας μέχρι το 2010, 37 εκατομμύρια χωνευτήρες χαμηλής ωστόσο τεχνολογίας (οικιακοί) βρίσκονταν σε λειτουργία με σκοπό την κάλυψη αναγκών επιβίωσης σε διάφορες κοινότητες. Στην Ινδία την ίδια περίοδο βρίσκονται σε λειτουργία περίπου 5 εκατομμύρια εγκαταστάσεις βιοαερίου μικρής κλίμακας. Άλλες χώρες όπως το Νεπάλ, το Βιετνάμ, έχουν σημαντικούς αριθμούς εγκαταστάσεων βιοαερίου μικρής κλίμακας. Γενικότερα, στην Ασία οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι απλές και εύκολες στην εφαρμογή τους πράγμα που δικαιολογεί τον μεγάλο αριθμό τους. Στην Ευρώπη κλειστά συστήματα αναερόβιας χώνευσης κτηνοτροφικών αποβλήτων εφαρμόζονται στη Γερμανία, την Αυστρία, τη Δανία, τη Σουηδία, την Ιταλία, την Ολλανδία και την Ισπανία. Οι ΗΠΑ, ο Καναδάς και πολλές χώρες της Λατινικής Αμερικής έχουν ξεκινήσει την ανάπτυξη σύγχρονων τομέων βιοαερίου και παράλληλα εφαρμόζονται ευνοϊκά πολιτικά πλαίσια, για την υποστήριξη αυτής της ανάπτυξης.

## **2.2 Υποστρώματα αναερόβιας χώνευσης**

Στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια πληθώρα υποστρωμάτων (πρώτων υλών) για τη παραγωγή βιοαερίου. Οι πιο κοινές πρώτες ύλες είναι τα απόβλητα τροφίμων (σε οικιακό και βιομηχανικό επίπεδο), η κοπριά και η λυματολάσπη καθώς και οι ενεργειακές καλλιέργειες.

Τα υποστρώματα της ΑΧ μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με διάφορα κριτήρια: την προέλευσή τους, το περιεχόμενό τους σε ξηρή ουσία (ΞΟ), την παραγωγή μεθανίου κ.λπ. Τα υποστρώματα με περιεκτικότητα ΞΟ χαμηλότερη

από 20% χρησιμοποιούνται για τη λεγόμενη υγρή χώνευση (υγρή ζύμωση). Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τις ζωικές στερεές και υδαρείς κοπριές καθώς επίσης και διάφορα υγρά οργανικά απόβλητα από βιομηχανίες τροφίμων. Όταν η περιεκτικότητα σε ΞΟ είναι αρκετά υψηλή (π.χ. 35%), τότε μιλάμε για ξηρή χώνευση (ξηρή ζύμωση), που είναι χαρακτηριστική για τις ενεργειακές καλλιέργειες και τις χορτονομές. Η επιλογή του τύπου και της ποσότητας της πρώτης ύλης για το μείγμα του υποστρώματος της ΑΧ εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε ΞΟ καθώς επίσης και από την περιεκτικότητα σε σάκχαρα, λιπίδια και πρωτεΐνες [9].

Πίνακας 6. Πρώτες ύλες για παραγωγή βιοαερίου με αναερόβια χώνευση [7].

Κτηνοτροφικά απόβλητα, Σφαγεία	Ζωικά περιττώματα, εντόσθια, αίμα, λίπη
Απόβλητα από Ελαιοτριβεία-επεξεργασία ελαιόλαδου	Κασίγαρος, Λιπαρά οξέα, Λεκιθίνες, %ιαυγαστικά υγρά
Απόβλητα από Τυροκομεία	Τυρόγαλο, νερά πλύσης & ψύξης
Ενεργειακά Φυτά	Καλαμπόκι, Αραβόσιτος
Παραπροϊόν από παραγωγή biodiesel	Γλυκερίνη, Μεθανόλη
αστικών αποβλήτων και απόβλητα τροφίμων	Φούτα, ζυθοποιείο, χαρτικά, λύματα

### 2.2.1 Ενεργειακές καλλιέργειες - Γεωργικά υπολείμματα

Υπάρχουν πολλές καλλιέργειες οι οποίες είναι κατάλληλες για τη παραγωγή βιοαερίου. Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνονται το ζαχαροκάλαμο, το σόργο, το χορτάρι, ο μίσχανθος, καθώς και δενδρώδεις καλλιέργειες. Οι καλύτερες καλλιέργειες θα πρέπει να έχουν μικρές απαιτήσεις γονιμότητας και χαμηλό ενεργειακό κόστος συγκομιδής και φύτευσης. Η πιο σημαντική παράμετρος στην επιλογή καλλιεργειών για τη παραγωγή μεθανίου είναι η καθαρή ενεργειακή απόδοση ανά εκτάριο. Πληθώρα φυτών και φυτικών υλικών έχουν εξετασθεί για

τη δυνατότητα σχηματισμού μεθανίου. Πολλές ποικιλίες γρασιδιού, δημητριακών και αραβόσιτου έχουν αποδειχθεί βιώσιμες για τη παραγωγή μεθανίου [18].

### **2.2.2 Στερεή και υδαρής κοπριά**

Η κοπριά είναι πολύτιμη πηγή θρεπτικών συστατικών για τις καλλιέργειες και αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πηγή βιοενέργειας εφόσον επεξεργαστούν με τη μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης. Στην αναερόβια χώνευση τα θρεπτικά συστατικά συντηρούνται, οι παθογόνοι οργανισμοί μειώνονται και οι εκπομπές του θερμοκηπίου εξαλείφονται, ενώ ένα σημαντικό ποσό ενέργειας ανακτάται με το βιοαέριο. Επιπλέον, η αναερόβια χώνευση προσφέρει μία βιώσιμη περιβαλλοντικά λύση για τη διαχείριση των κτηνοτροφικών αποβλήτων. Το χωνεμένο υπόλειμμα μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί ως ένα ομοιογενές οργανικό λίπασμα, σε σχέση με τη αρχική μη επεξεργασμένη κοπριά [18].

### **2.2.3 Οργανικό κλάσμα αστικών αποβλήτων και απόβλητα τροφίμων**

Η αναερόβια χώνευση είναι η πιο σημαντική επιλογή για τη διαχείριση και τη σταθεροποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των συγκεκριμένων αποβλήτων, λόγω της τεχνο-οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Παρέχει μια ιδιαίτερα ελεγχόμενη διαδικασία δέσμευσης μεθανίου, συγκρινόμενη με τη δέσμευση του μεθανίου κατά την αποδόμηση απορριμμάτων από τους ΧΥΤΑ. Η τάση σήμερα είναι η αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος απορριμμάτων, τα οποία διαχωρίζονται στη πηγή, όπως τα απόβλητα τροφίμων, τα απόβλητα κήπου και του χαρτιού [18].

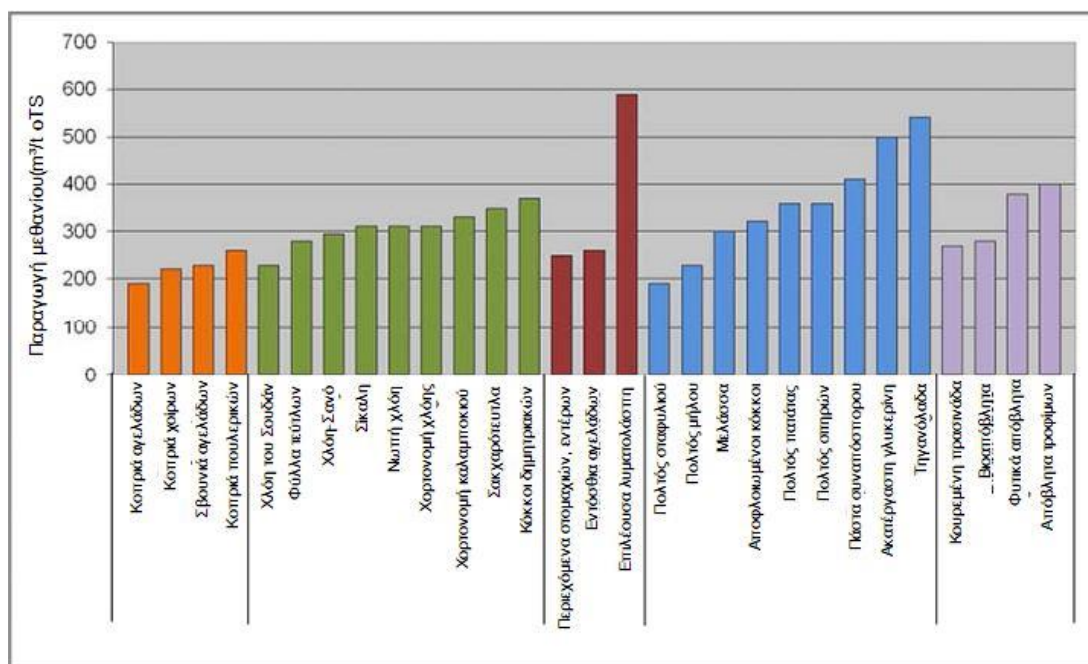
### **2.2.4 Λυματολάσπη**

Η αύξηση της παραγωγής λυματολάσπης και ο κίνδυνος που εμπεριέχει για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία έχουν κάνει αναγκαιότητα την εξεύρεση αποδοτικού τρόπου διαχείρισής της καθώς και μείωσης του όγκου της. Η

αναερόβια χώνευση είναι η συνήθης διαδικασία για τη επεξεργασία της – μείωση της μάζας, παραγωγή μεθανίου και βελτιωμένες ιδιότητες [18].

Πίνακας 7. Παραγωγή μεθανίου σε m<sup>3</sup>/t πτητικών στερεών VS[18]

Α' Υλη	Παραγωγή μεθανίου (m <sup>3</sup> /t ΠΣ)
Αραβόσιτος	205-450
Μίσχανθος	179-218
Σόργο	295-372
Άχυρο	242-324
Ζαχαρότευτλο	236-381
Σιτάρι	384-426
Βοοειδών	100
Χοίρων	130
Γαλακτοπαραγωγής	240
Πουλερικών	245
Σφαγείο βοοειδών	400
Σφαγείο πουλερικών	610
Ιχθυέλαιο	360
Φιλετάρισμα ψαριών	450
Φρούτα	250-500
Ζυθοποιία	260
Εφημερίδες	61
Χαρτόνια	125
Κατάλοιπα κουζίνας (τρόφιμα)	115
Κηπευτικά απόβλητα	200
Λυματολάσπη	360-750



Σχήμα 5. Πιθανή παραγωγή μεθανίου [27]

## 2.3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ (ΑΧ)

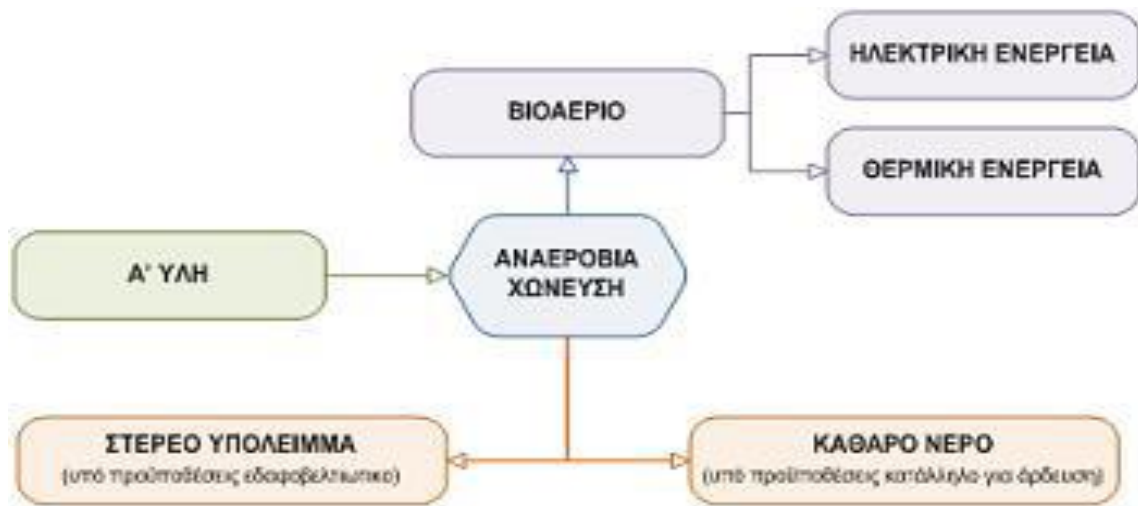
Η αναερόβια χώνευση, δηλαδή η αναερόβια μετατροπή οργανικών υποστρωμάτων σε μεθάνιο, αποτελεί μια πολύπλοκη βιοχημική διεργασία. Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό μικροβιακών πληθυσμών, οι οποίοι συνδέονται μέσω των διάφορων υποστρωμάτων και των ιδιαίτερων προϊόντων τους. Παρόλο που αυτές οι σχέσεις έχουν αποδοθεί με πολλούς τρόπους, η συνολική διεργασία μπορεί να αποδοθεί μέσα από εννέα (9) διακριτά βήματα, για κάθε ένα από τα οποία είναι υπεύθυνη συγκεκριμένη ομάδα μικροοργανισμών και των ενζυμικών βοηθημάτων τους. Τα βήματα αυτά έχουν ως εξής [12]:

- Ενζυμική υδρόλυση των οργανικών πολυμερών σε ενδιάμεσα οργανικά μονομερή, όπως σάκχαρα, λιπαρά οξέα και αμινοξέα
- Ζύμωση των οργανικών μονομερών για τη παραγωγή υδρογόνου (ή μυρμηκικού οξέος), διτανθρακικού οξέος, πυροσταφυλικού οξέος,

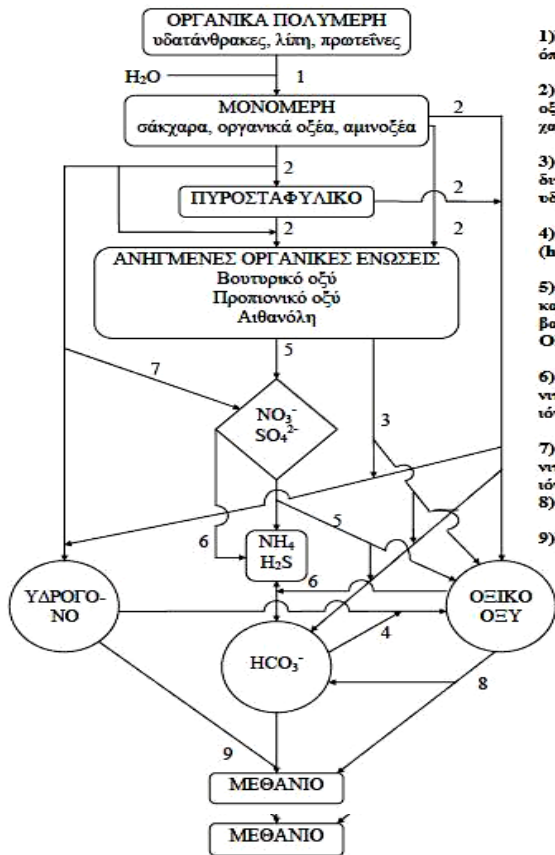


- αλκοολών, και λιπαρών οξέων χαμηλού μοριακού βάρους (οξικού, βουτυρικού και προπιονικού)
- Οξειδωση των ανηγμένων οργανικών προϊόντων σε υδρογόνο (ή μυρμηκικό οξύ), διτανθρακικό οξύ και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηριών που παράγουν υδρογόνο (obligate hydrogen-producing acetogens , OHPA)
  - Οξικογόνος αναπνοή του διτανθρακικού από ομοοξικούς μικροοργανισμούς (homocetogens, HA)
  - Οξειδωση των ανηγμένων οργανικών προϊόντων σε υδρογόνο (αλκοόλες, βουτυρικό και προπιονικό οξύ ) σε διτανθρακικό οξύ και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηριών που παράγουν υδρογόνο (obligate hydrogen-producing acetogens , OHPA)
  - Οξειδωση του οξικού οξέος προς διτανθρακικό οξύ από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα (nitrate-reducing bacteria, NRB) και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα (sulfate-reducing bacteria, SRB)
  - Οξειδωση του υδρογόνου (ή του μυρμηκικού οξέος) από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα (nitrate-reducing bacteria, NRB) και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα (sulfate-reducing bacteria, SRB)
  - Οξικοχρηστική ζύμωση μεθανίου
  - Μεθενογενής αναπνοή του διτανθρακικού οξέος

Η διαδικασία μπορεί να είναι είτε θερμόφιλη χώνευση, στην οποία η λάσπη βρίσκεται υπό ζύμωση μέσα σε δεξαμενές σε θερμοκρασία 55° C. Ονομάζεται θερμόφιλη εξαιτίας των μικροοργανισμών που παίρνουν μέρος στην διαδικασία, οι οποίοι περιέχουν ένζυμα τα οποία λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα ένζυμα έχουν μεγάλη σημασία σε πολλές εφαρμογές της βιοτεχνολογίας. Επίσης, η διαδικασία μπορεί να είναι και μεσόφιλη δηλαδή σε θερμοκρασία 36° C. Κατά την αναερόβια χώνευση παράγεται βιοαέριο, το οποίο είναι ένα καύσιμο αέριο μίγμα αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο(CH<sub>4</sub>) και διοξείδιο άνθρακα(CO<sub>2</sub>). Η ακριβής του σύσταση εξαρτάται από το είδος της οργανικής ουσίας που αποσυντίθεται.



Σχήμα6. Διάγραμμα ροής αναερόβιας χώνευσης [20].



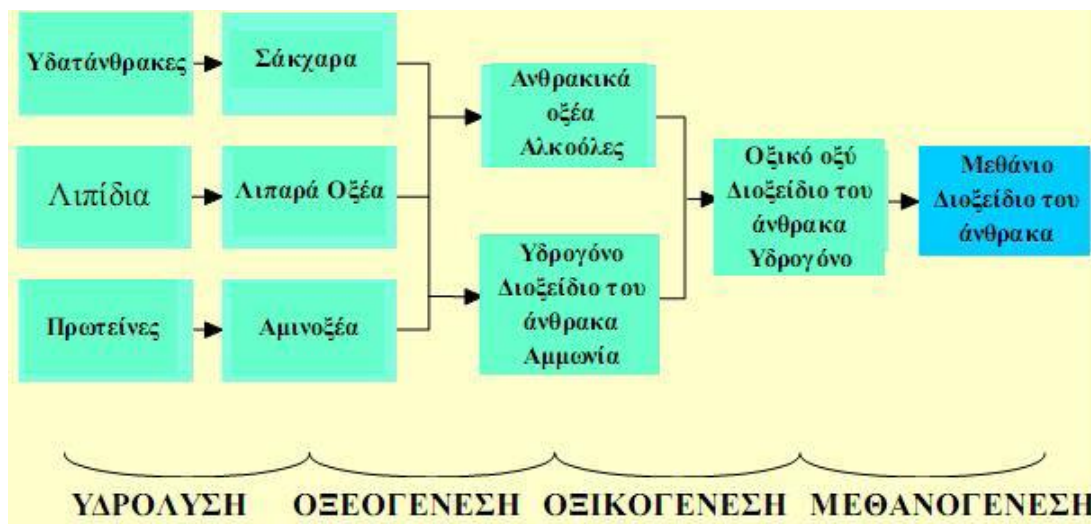
- 1) Ενζυμική υδρόλυση των οργανικών πολυμερών σε ενδιάμεσα οργανικά μονομερή, όπως σάκχαρα, λιπαρά οξέα και αμινοξέα
- 2) Ζύμωση των οργανικών μονομερών για τη παραγωγή υδρογόνου (ή μυρμηκικού οξέος), διτανθρακικού οξέος, πυροσταφυλικού οξέος, αλκοολών, και λιπαρών οξέων χαμηλού μοριακού βάρους (οξικού, βουτυρικού και προπιονικού)
- 3) Οξείδωση των ανηγμένων οργανικών προϊόντων σε υδρογόνο (ή μυρμηκικού οξέος), διτανθρακικού οξέος και οξικού οξέος μέσω των οξικογόνων βακτηρίων που παράγουν υδρογόνο (obligate hydrogen-producing acetogens, OHPA)
- 4) Οξικογόνος αναγωγή του διτανθρακικού από ομοοξικούς μικροοργανισμούς (homocetogens, HA)
- 5) Οξείδωση των ανηγμένων οργανικών προϊόντων σε υδρογόνο (αλκοόλες, βουτυρικό και προπιονικό οξύ) σε διτανθρακικό οξύ και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηρίων που παράγουν υδρογόνο (obligate hydrogen-producing acetogens, OHPA)
- 6) Οξείδωση του οξικού οξέος προς διτανθρακικό οξύ από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα (nitrate-reducing bacteria, NRB) και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα (sulfate-reducing bacteria, SRB)
- 7) Οξείδωση του υδρογόνου (ή του μυρμηκικού οξέος) από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα (nitrate-reducing bacteria, NRB) και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα (sulfate-reducing bacteria, SRB)
- 8) Οξικοχρηστική ζύμωση μεθανίου
- 9) Μεθενογενής αναγωγή του διτανθρακικού οξέος

Σχήμα7. Αναλυτικό διάγραμμα για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης [12]

### 2.4 Μικροβιολογία της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση συνήθως θεωρείται πως είναι μια διεργασία τριών σταδίων, δηλαδή 1) την υδρόλυση, 2) την οξεογένεση και 3) την μεθανογένεση. Στο πρώτο στάδιο, μια ετερογενής ομάδα μικροοργανισμών μετατρέπουν τις πρωτεΐνες, τους υδατάνθρακες και τα λιπίδια, κυρίως σε μονομερή μέσω υδρόλυσης. Στο δεύτερο στάδιο τα μονομερή μετατρέπονται σε οργανικά οξέα, αλκοόλες και κετόνες μέσω ζύμωσης και έπειτα με τη βοήθεια των οξικογόνων βακτηρίων σε οξικό οξύ, διοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο. Στο τρίτο στάδιο, τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού των μικροοργανισμών του δεύτερου σταδίου μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξειδίο του άνθρακα από μία ομάδα αυστηρά υποχρεωτικών αναερόβιων βακτηρίων που ονομάζονται μεθανογόνα βακτήρια.

Οι συνεργιστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων ομάδων των μικροοργανισμών είναι απαραίτητες στην αναερόβια χώνευση των αποβλήτων. Αν και ορισμένοι μύκητες και πρωτόζωα (αναερόβια πρωτόζωα έχουν βρεθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής) μπορεί να βρεθούν σε αναερόβιους χωνευτήρες, τα βακτήρια και ιδιαίτερα τα μεθανογόνα βακτήρια είναι αναμφισβήτητα οι κυρίαρχοι μικροοργανισμοί. Μεγάλος αριθμός των αυστηρών και προαιρετικά αναερόβιων βακτηρίων (π.χ., Bacteroides, Bifidobacterium, Clostridium, Lactobacillus, Streptococcus) λαμβάνουν μέρος στην υδρόλυση και ζύμωση των οργανικών ενώσεων. Τέσσερις κατηγορίες μικροοργανισμών λαμβάνουν μέρος στην αναερόβια χώνευση [12].



Σχήμα 8. Συνεργατική λειτουργία των μικροβιακών ομάδων που λαμβάνουν μέρος στην αναερόβια χώνευση [27]

### 2.4.1 Υδρόλυση

Οι μικροοργανισμοί δεν μπορούν να μεταβολίσουν απευθείας οργανικό υλικό σε μορφή σωματιδίων καθώς είναι αδιαπέραστο από τη κυτταρική τους μεμβράνη. Κατά την υδρόλυση των οργανικών πολυμερών τα οργανικά μακρομόρια διασπώνται σε διαλυτά διμερή και μονομερή, τα οποία έτσι εισέρχονται στο εσωτερικό του κυττάρου διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης [8].

Σύνθετοι υδατάνθρακες - Απλά σάκχαρα

Λίπη - Λιπαρά οξέα

Πρωτεΐνες -Αμινοξέα

Νουκλεϊνικά οξέα - Πουρίνες-πυριμιδίνες

Η υδρόλυση των μακρομορίων γίνεται από τα υδρολυτικά βακτήρια και καταλύεται από τα εξωκυτταρικά ένζυμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση της υδρόλυσης του μη διαλυτού σωματιδιακού υλικού δεν λαμβάνει χώρα πάντοτε ενζυματική δράση. Πολλές φορές αυτή είναι εφικτή λόγω φυσικοχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στα διάφορα συστήματα. Η υδρόλυση είναι μια σχετικά αργή διαδικασία και μπορεί να παρεμποδιστεί από παράγοντες όπως το είδος του υποστρώματος, η τιμή του pH, το σωματιδιακό μέγεθος, παραγωγή ενζύμων, προσρόφηση των ενζύμων στην επιφάνεια των σωματιδίων, φαινόμενα διάχυσης κ.α. (Andersonetal., 2003).

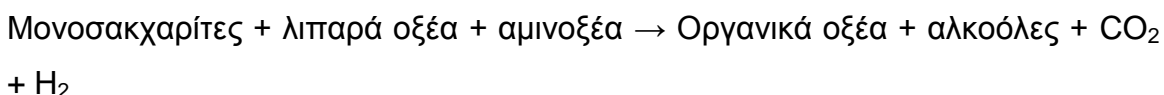
Πίνακας 8. Μία γενική κατάταξη των κυριότερων υδρολυτικών ενζύμων [8]

Υπόστρωμα	Ένζυμα	Προϊών υδρόλυσης
Κυτταρίνη	Κυτταρινάση	Κελλοβιόζη
Άμυλο	Αμυλάσες	Μαλτόζη ή γλυκόζη
Λακτόζη	Λακτάση	Γλυκόζη και γαλακτόζη
Μαλτόζη	Μαλτάση	Δύο μόρια γλυκόζης
Σουκρόζη	Σουκράση	Γλυκόζη και φρουκτόζη
Πρωτεΐνες	Πρωτεάσες	Πεπτίδια και αμινοξέα
Ζελατίνη	Ζελατινάσες	Πεπτίδια και αμινοξέα
Λίπη	Λιπάσες	Γλυκερόλη + λιπαρά οξέα
Καρβοξυλομάδα (COOH <sup>-</sup> )	Καρβοξυπεπτιδάσες	Αμινοξέα
Αμινομάδα (NH <sub>2</sub> <sup>+</sup> )	Αμινοπεπτιδάσες	Αμινοξέα
Κελλοβιόζη	B-γλυκοσιδάση	Γλυκόζη
Λεκιθίνη	Λεκιθινάση	φωσφορικό οξύ + λίπος
Μεθυλεστέρας πηκτίνης	Εστεράση πηκτίνης	Μεθανόλη+πολυγαλακτουρονικό οξύ

#### 2.4.2 Οξεόγνευση

Τα οργανικά μονομερή που έχουν προκύψει από το στάδιο της υδρόλυσης χρησιμοποιούνται από τα οξεογόνα κυρίως βακτήρια προς σχηματισμό πτητικών

λιπαρών οξέων, αλκοολών CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>[8].



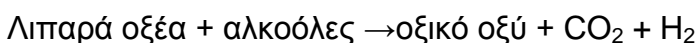
Η αποικοδόμηση των ενώσεων αυτών καταλήγει στην παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, αέριου υδρογόνου, αλκοολών, οργανικών οξέων, σε ορισμένες οργανικές ενώσεις του αζώτου, και σε ορισμένες οργανικές ενώσεις του θείου. Το πιο σημαντικό από τα οξέα είναι το οξικό. Το οξικό είναι και το κύριο οργανικό οξύ που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα από τα μεθανογόνα βακτήρια. Μερικές από τις οργανικές ενώσεις μετατρέπονται σε οργανικά οξέα και αλκοόλες, και ορισμένες από αυτές μετατρέπονται σε νέα βακτηριακά κύτταρα. Από τις παραπάνω ουσίες, ορισμένες (οξικό οξύ, μυρμηκικό οξύ, μεθανόλη και μεθυλαμίνη) μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως υπόστρωμα από τα μεθανογόνα βακτήρια και ορισμένες (αιθανόλη, βουτυρικό και προπιονικό οξύ) εφόσον αποδομηθούν σε οξικό οξύ από τα ζυμωτικά βακτήρια [12]. Τα προϊόντα της οξεογένεσης ποικίλουν ανάλογα με το τύπο των μικροοργανισμών καθώς επίσης και των συνθηκών καλλιέργειας (θερμοκρασία, οξειδοαναγωγικό δυναμικό, pH) [8]. Ο οξεογόνος πληθυσμός αποτελεί περίπου το 90% του συνολικού μικροβιακού πληθυσμού σε ένα αναερόβιο χωνευτήρα.

Πίνακας 9. Μετατροπή της γλυκόζης σε μείγμα πτητικών λιπαρών οξέων [13]

Οξεογόνες αντιδράσεις
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2$
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$

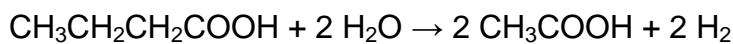
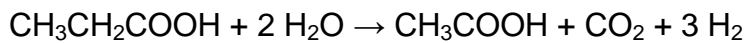
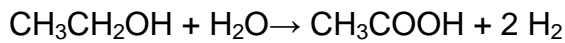
### 2.4.3 Οξικογένεση

Τα οξικογόνα βακτήρια μετατρέπουν τα λιπαρά οξέα και τις αλκοόλες που παρήχθησαν κατά την οξεογένεση σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία χρησιμοποιούνται από τους μεθανογόνους [8].

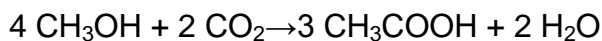
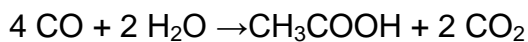
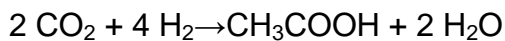


Τα οξικογόνα βακτήρια, όπως για παράδειγμα τα *Syntrobacter wolinii*, και *Syntrophomonas wolfei*, αναπτύσσονται σε μια συμβιωτική σχέση με τα μεθανογόνα βακτήρια. Κάτω από υψηλή μερική πίεση υδρογόνου, οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί παρεμποδίζονται και αδυνατούν να μετατρέψουν τα πτητικά λιπαρά οξέα, με αποτέλεσμα οξέως και την εκτροπή της διεργασίας. Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί δρουν συνεργατικά επιτυγχάνοντας μείωση στη συγκέντρωση του υδρογόνου (Bjornssonetal.2001). Η αιθανόλη, το προπιονικό οξύ και το βουτυρικό οξύ, μετασχηματίζονται σε οξικό οξύ από τους οξικογόνους σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:

*Οξικογόνες υδρογονώσεις [13]*



*Οξικογόνες αφυδρογονώσεις [13]*



Οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί έχουν μέγιστο ειδικό ρυθμό αύξησης  $\mu_{\max}=1 \text{ g / h}$  σε αντίθεση με τους μεθανογόνους που αναπτύσσονται με πολύ βραδύτερους ρυθμούς  $\mu_{\max}=0.04 \text{ g / h}$  τη μείωση στο σχηματισμό οξικού [8].

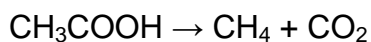
#### **2.4.4 Μεθανογένεση**

Τα μεθανογόνα βακτήρια ανήκουν στο βασίλειο των *Archaeobacteria*, μαζί με τα θερμόφιλα και τους υπερθερμόφιλα βακτήρια. Τα μεθανογόνα βακτήρια είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο και υποχρεωτικά αναερόβια και ζουν σε χερσαία και υδατικά οικοσυστήματα. Λόγω της σύστασης και της δομής της κυτταρικής τους μεμβράνης, είναι ευαίσθητοι σε διάφορες τοξικές ενώσεις. Ωστόσο ορισμένοι μεθανογόνοι έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε τοξικού παράγοντες λόγω της ύπαρξης μιας επιπλέον εξωκυτταρικής μεμβράνης που προστατεύει τα κύτταρα.

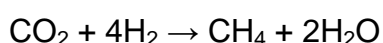
Τα μεθανογόνα βακτήρια βρίσκονται σε περιβάλλοντα τα οποία είναι πλούσια σε αποικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις και το οξυγόνο απομακρύνεται γρήγορα μέσω της μικροβιακής δραστηριότητας. Πολλοί μεθανογόνοι ζουν συμβιωτικά στις μεταβολικές οδούς των ζώων και είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή μεθανίου. Κανένας άλλος οργανισμός δεν παράγει μεθάνιο. Τα μεθανογόνα βακτήρια που παράγουν ενέργεια με τη αναγωγή απλών ενώσεων ή υποστρωμάτων όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το οξικό οξύ. Τα μεθανογόνα βακτήρια ταξινομούνται ανάλογα με τη δομή τους, τα είδη των ενζύμων που παράγονται και το εύρος θερμοκρασίας ανάπτυξης τους. Υπάρχουν περίπου 50 είδη μεθανογόνων βακτηρίων που ταξινομούνται σε τρεις τάξεις και τέσσερις οικογένειες [12].

Στη μεθανογένεση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μεθάνιο σχηματίζεται κυρίως από οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και αέριο υδρογόνο. Μεθάνιο σχηματίζεται επίσης και από ορισμένες οργανικές ενώσεις εκτός από το οξικό οξύ (οξικό οξύ, μυρμηκικό οξύ, μεθανόλη και μεθυλαμίνη), οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα μεθανογόνα βακτήρια ως υπόστρωμα. Στη μεθανογένεση τρεις διαφορετικές ομάδες μεθανογόνων μικροοργανισμών συμμετέχουν. Οι ομάδες αυτές χωρίζονται α) στους οξικολυτικούς μεθανογόνους, οι οποίοι καταναλώνουν το οξικό οξύ, β) στους υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους, οι οποίοι χρησιμοποιούν το υδρογόνο για την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα σε μεθάνιο και γ) στους μεθυλοτροφικούς μεθανογόνους, όπου αφαιρούν τη μεθυλομάδα ( $-CH_3$ ) από απλές ενώσεις.

1) *Οξικοτροφικά μεθανογόνα*, που ονομάζονται επίσης και οξικοκλαστικά (acetoclastic), μετατρέπουν οξικό σε μεθάνιο και  $CO_2$  :



2) *Υδρογονοτροφικά μεθανογόνα* (δηλαδή, βακτήρια που χρησιμοποιούν ως υπόστρωμα υδρογόνο) μετατρέπουν το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα σε μεθάνιο





Τα περισσότερα από τα *Methanococcales* και τα *Methanobacteriales* είναι υδρογονοτροφικά.



Σχεδόν τα 2/3 του μεθανίου που παράγεται κατά τη μεθανογένεση οφείλεται στους οξικολυτικούς μεθανογόνους και το υπόλοιπο στους υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους. Η συνεισφορά των μεθυλοτροφικών μεθανογόνων στον συνολικό όγκο του μεθανίου που παράγεται σε ένα σύστημα αναερόβιας χώνευσης είναι πολύ μικρή.

Πίνακας 10. Υποστρώματα που χρησιμοποιούνται από τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς [8]

Υπόστρωμα	Χημικός τύπος
Οξικό οξύ	$\text{CH}_3\text{COOH}$
Διοξειδίο του άνθρακα	$\text{CO}_2$
Μονοξειδίο του άνθρακα	$\text{CO}$
Μυρμηκικό οξύ	$\text{HCOOH}$
Υδρογόνο	$\text{H}_2$
Μεθανόλη	$\text{CH}_3\text{OH}$
Μεθυλαμίνες	$\text{CH}_3\text{NH}_2$

Πίνακας 11. Αντιδράσεις παραγωγής μεθανίου και οι αντίστοιχες μεταβολές της ελεύθερης ενέργειας [13]

Αντιδράσεις	$\Delta G_o'$ (KJ /mol $\text{CH}_4$ )
$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-131
$4 \text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-304
$4 \text{CO} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2$	-210
$4 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-319
$4 \text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{NH}_4\text{Cl}$	-230
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-113
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	-31

Πίνακας 12. Παραγωγή μεθανίου από γλυκόζη [13]

Αντιδράσεις
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COCOOH} + 2 \text{H}_2$
$2 \text{CH}_3\text{COCOOH} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COOH} + 2 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$
$4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
$2 \text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 2 \text{CH}_4 + 2 \text{CO}_2$
Συνολικά
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 3 \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2$

## **2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση**

Η αναερόβια χώνευση είναι μια σύνθετη βιολογική διεργασία. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται στην αλληλεξάρτηση των μικροοργανισμών και στους παράγοντες που τους επηρεάζουν.

### **2.5.1 Αναερόβιες συνθήκες**

Ο πιο βασικός παράγοντας ελέγχου της διεργασίας έχει να κάνει με την εξασφάλιση των αναερόβιων συνθηκών. Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί απαιτούν την ύπαρξη ενός αυστηρά αναερόβιου ανοξικού περιβάλλοντος για την επιβίωσή τους. Κάθε χωνευτήρας βιοαερίου πρέπει να εξασφαλίζει ένα τέτοιο περιβάλλον. Οι μικρές ποσότητες οξυγόνου που υπάρχουν διαλυμένες στην οργανική ύλη, καταναλώνονται άμεσα στο πρώτο στάδιο από τους υπάρχοντες αερόβιους μικροοργανισμούς, οι οποίοι στη συνέχεια εξαφανίζονται λόγω της έλλειψης οξυγόνου.

### **2.5.2 Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία αποτελεί το κύριο περιβαλλοντικό παράγοντα που επηρεάζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Διακρίνουμε πέντε θερμοκρασιακές περιοχές για τη βέλτιστη ανάπτυξη των μικροοργανισμών: α) Υπερθερμόφιλοι  $T > 80$  °C, θερμόφιλοι 65-75 °C, μεσόφιλοι 30-40 °C, ψυχροαυτοθεκτικοί 20-30 °C, ψυχρόφιλοι 10-20 °C (Καραγκούνη-Κύρτσου, 1999). Η επεξεργασία των αποβλήτων στην αναερόβια χώνευση γίνεται κυρίως σε μεσόφιλες και σε θερμόφιλες συνθήκες λόγω της υψηλής απόδοσής τους. Ακόμα και μικρές θερμοκρασιακές αλλαγές κατά τη λειτουργία ενός συστήματος αναερόβιας χώνευσης μπορεί να αποβούν μοιραίες και αυτό γιατί οι μεθανογόνοι κυρίως μικροοργανισμοί που είναι και η πιο ευαίσθητοι της διεργασίας εισέρχονται σε

λανθάνουσα φάση ώστε να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες. Αυτό γίνεται ακόμα πιο σημαντικό συμπεριλαμβανομένου του μικρού μέγιστου ειδικού ρυθμού αύξησης των μεθανογόνων σε σχέση με τους οξικογόνους. Συνολικά η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση φαίνεται να υπερτερεί της μεσόφιλης, αφού παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως [8]: α) μικρότερο όγκο εγκαταστάσεων, β) μεγαλύτερο ποσοστό αποδόμησης των οργανικών και ως εκ τούτου αύξηση του ρυθμού παραγωγή βιοαερίου, γ) ταχύτερη υδρόλυση και δ) καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών. Οι υψηλές όμως απαιτήσεις σε ενέργεια, σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε τοξικές ενώσεις, καθώς και με τη μειωμένη ευστάθεια των συστημάτων αυτών καθιστούν συνήθως την θερμόφιλη αναερόβια χώνευση οικονομικά ασύμφορη και δύσκολα εφαρμόσιμη (Ward, 2007, Κάλφας, 2007).

### 2.5.3 pH

Η ενζυμική λειτουργία και διεργασία της αναερόβιας χώνευσης επηρεάζονται από το pH. Οι ζυμωτικοί μικροοργανισμοί έχουν ικανοποιητική ενζυμική λειτουργία ακόμα και σε τιμές pH 5, κάτι που δεν ισχύει για τους μεθανογόνους οι οποίοι αναπτύσσονται με πολύ αργούς ρυθμούς σε τιμές pH κάτω του 6.6 (Angelidaki, et al., 2003)

Οι περισσότεροι μεθανογόνοι αναπτύσσονται και λειτουργούν χωρίς προβλήματα, για pH μεταξύ 6.8 και 7.4, υπάρχουν όμως και αναφορές για μεθανογόνους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε ακραίες συνθήκες όπως σε τιμή pH 3.5. Κατά την αναερόβια χώνευση δύνανται να παρατηρηθούν διαφοροποιήσεις από αυτή την περιοχή λόγω της συσσώρευσης όξινων ή βασικών μεταβολικών προϊόντων όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα ή αμμωνία, αντίστοιχα.

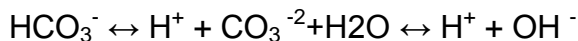
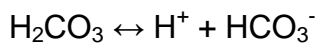
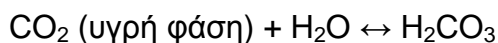
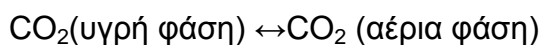
Η αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών λιπαρών οξέων είναι από τα πιο κοινά προβλήματα των αναερόβιων συστημάτων και συμβαίνει συνήθως όταν οι

οξικογόνοι ή οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν παρεμποδιστεί με αποτέλεσμα τα οξέα να μην καταναλώνονται και να συσσωρεύονται στον χωνευτήρα. Αυτό οδηγεί στην εκτροπή της διεργασίας [8].

#### 2.5.4 Αλκαλικότητα

Υπό φυσιολογικές συνθήκες η πτώση στο pH του συστήματος ρυθμίζεται από τα  $\text{HCO}_3^-$  ιόντα (η αλκαλικότητα οφείλεται κυρίως στα  $\text{HCO}_3^-$  ιόντα), και στη κατανάλωση των οξέων κατά τη μεθανογένεση. Συνήθως μία σημαντική μείωση στην αλκαλικότητα οδηγεί σε αλλαγή του pH. Η ολική αλκαλικότητα κατά την αναερόβια χώνευση, η οποία εκφράζεται  $\text{mgCaCO}_3/\text{l}$  πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 3000-6000  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  (Standards Methods for the Examination of Water and Waste water) [8].

Συνηθέστερα χημικά που προσθέτονται για την ρύθμιση της αλκαλικότητας σε σύστημα είναι ασβέστης  $\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$ , υδροξείδιο του νατρίου ( $\text{NaOH}$ ), όξινο ανθρακικό νάτριο ( $\text{NaHCO}_3$ ), άνυδρη αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), όξινο ανθρακικό αμμώνιο ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ), όξινο ανθρακικό κάλιο ( $\text{KHCO}_3$ ). Η ευαισθησία στη μείωση του pH είναι μεγαλύτερη για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς απ' ό τι για τους ζυμωτικούς [8]. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος διατήρησης του pH στα επιθυμητά όρια είναι η διατήρηση της αλκαλικότητας σε υψηλά επίπεδα. Η συσχέτιση μεταξύ pH και αλκαλικότητας φαίνεται από τις παρακάτω αντιδράσεις, που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αναερόβια χώνευση [13].



Βασική αιτία κατανάλωσης της αλκαλικότητας σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα είναι το διοξείδιο του άνθρακα που διαλυτοποιείται, από την αέρια στην υγρή φάση και όχι τα πτητικά λιπαρά οξέα που θεωρούνταν μέχρι πρότινος.

### 2.5.5 Χημική σύσταση του υποστρώματος

Η χημική σύσταση του υποστρώματος είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε ένα αναερόβιο χωνευτήρα. Επικρατούν οι μικροοργανισμοί εκείνοι που μπορούν να μεταβολίσουν τα ανόργανα και οργανικά συστατικά της τροφοδοσίας. Κάποια συστατικά πολυσύνθετων υποστρωμάτων όπως για παράδειγμα η λιγνίνη, μπορεί να είναι μη βιοαποδομήσιμα, οπότε δεν έχουμε πλήρη απομάκρυνση του οργανικού υλικού. Η γνώση λοιπόν των χαρακτηριστικών του διαθέσιμου υλικού είναι ουσιαστικής σημασίας, για την κατανόηση της συμπεριφοράς ενός χωνευτήρα, αλλά και για το σχεδιασμό διεργασιών αναερόβιας χώνευσης (Bitton, 2005).

Το προς επεξεργασία απόβλητο πρέπει να έχει επαρκείς ποσότητες σε άζωτο (N) και φώσφορο (P) (τα οποία καλούνται και θρεπτικά), καθώς και θείου (S). Αν το υλικό δεν περιέχει τις απαιτούμενες ποσότητες, η εξισορρόπηση με τη προσθήκη θρεπτικών είναι αναγκαία.

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί λόγω του περίπλοκου ενζυμικού συστήματος τους και για τη σωστή τους λειτουργία έχουν απαιτήσεις σε ιχνοστοιχεία όπως ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co), το μολυβδαίνιο (Mo), το νικέλιο (Ni), το μαγνήσιο (Mg), το ασβέστιο (Ca), το νάτριο (Na), χαλκός (Cu), το βάριο (Ba), το σελήνιο (Se) και ο ψευδάργυρος (Zn). Ο ρόλος όλων των ιχνοστοιχείων είναι πολύ σημαντικός για την σωστή ενζυμική λειτουργία και ιδιαίτερα για τη μετατροπή του οξικού οξέος σε μεθάνιο (Gerardi, 2003). Τα χαρακτηριστικά και η σύνθεση του υποστρώματος, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό και σωστή λειτουργία της αναερόβιας διεργασίας.

## 2.5.6 Οργανική φόρτιση και υδραυλικός χρόνος παραμονής

Ως υδραυλικό χρόνο παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT ή ΥΧΠ) ορίζεται το χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το διαθέσιμο προς χώνευση υλικό παραμένει σ' αυτόν και δίνεται από τη σχέση:  $HRT = VR/Fw$  όπου VR είναι ο όγκος του χωνευτήρα και Fw η ημερήσια ογκομετρική παροχή απόβλητου [8].

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ενός χωνευτήρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει στους αναερόβιους μικροοργανισμούς να ολοκληρώσουν το κυτταρικό τους κύκλο. Η επιβολή μικρών χρόνων παραμονής επιφέρει μικρή απόδοση στην βιοαποδόμηση του υλικού τροφοδοσίας, ενώ οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής έχουν υψηλό λειτουργικό κόστος. Έτσι οι χρόνοι παραμονής των μεσόφιλων και των θερμόφιλων αντιδραστήρων κυμαίνονται μεταξύ 15-30 ημερών, γίνεται δηλαδή ένας συμβιβασμός μεταξύ απόδοσης και οικονομίας. Τυπικές τιμές υδραυλικού χρόνου παραμονής για χωνευτήρες που η λειτουργία τους βασίζεται σε ανάπτυξη βακτηρίων προσκολλημένων σε κάποιο μέσο είναι 1-10 ημέρες (ταχύρρυθμα συστήματα). Οι χωνευτήρες των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε ανάπτυξη αιωρούμενων βακτηρίων σε υγρό μέσο (συμβατικά συστήματα), λειτουργούν σε μεγαλύτερους υδραυλικούς χρόνους παραμονής, από 10 ως 60 ημέρες. Ο ρυθμός με τον οποίο το οργανικό υλικό παρέχεται σε ένα σύστημα αναερόβιας χώνευσης, είναι καθοριστικής σημασίας για τη σταθερότητα της διεργασίας. Εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο παρέχεται το υπόστρωμα (σε υγρή ή και στερεή μορφή) στους μικροοργανισμούς και ορίζεται ως η μάζα της οργανικής ύλης (εκφρασμένη σε κιλά πτητικών αιωρούμενων στερεών ή κιλά χημικά απαιτούμενου οξυγόνου) ανά μονάδα όγκου του αντιδραστήρα και ημέρα. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει καθορίζεται από τον αρχικό σχεδιασμό του αντιδραστήρα και από την σύσταση του απόβλητου. Διαφορετικές τροφοδοσίες μπορούν να επιτευχθούν με δύο τρόπους, είτε μεταβάλλοντας το ρυθμό ροής της στον χωνευτήρα, είτε μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας. Επειδή η συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο ενός απόβλητου σπάνια μεταβάλλεται,

συνήθως για την αλλαγή της φόρτισης του υποστρώματος χρησιμοποιείται αλλαγή της παροχής. Υψηλός ρυθμός οργανικής φόρτισης μπορεί να επιφέρει προβλήματα όπως τη συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων και άλλων παρεμποδιστών με αποτέλεσμα την εκτροπή της διεργασίας.

### **2.5.7 Τοξικότητα και παρεμπόδιση**

Πολλές ενώσεις και στοιχεία εκδηλώνουν τοξικότητα στην αναερόβια χώνευση. Η τοξικότητα μιας ουσίας μπορεί να εμφανιστεί γρήγορα ή με πιο αργούς ρυθμούς και αυτό εξαρτάται από το είδος της τοξικής ουσίας, τη συγκέντρωσή της, την ύπαρξη άλλης παρεμποδιστικής ουσίας όπου δρουν συνεργατικά και την προσαρμοστικότητα των μικροοργανισμών. Συνήθως οι μεθανογόνοι παρεμποδίζονται λόγω τοξικότητας καθ' ότι η πιο ευαίσθητη ομάδα της διεργασίας. Αυτό οδηγεί στη μείωση της παραγωγής μεθανίου και στη συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων [8].

### **2.5.8 Οξυγόνο**

Για τους αυστηρά αναερόβιους μικροοργανισμούς όπως είναι οι περισσότεροι μεθανογόνοι, παρουσία οξυγόνου ακόμα και σε ίχνη είναι παράγοντας παρεμπόδισης για την αναερόβια χώνευση [8].

### **2.5.9 Αμμωνία**

Η μη ιονισμένη αμμωνία έχει παρεμποδιστική δράση σε ποσότητες 1.5-3 g/l. Η τιμή της συγκέντρωσης που είναι τοξική στους μικροοργανισμούς εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι το pH. Γενικά συγκεντρώσεις αμμωνίας άνω των 4 g/l επιφέρουν αναστολή της διεργασίας ανεξαρτήτως pH. Σε Τιμές pH κοντά στο 8 σχηματίζεται περισσότερη ελεύθερη αμμωνία. Η θερμοφιλική αναερόβια χώνευση είναι πιο ευαίσθητη από τη μεσοφιλική. Οι οξικολυτικοί μεθανογόνοι είναι πιο ευαίσθητοι από τους υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους.

Έρευνες έχουν δείξει ότι έπειτα από κατάλληλη προσαρμογή για κάποιο χρονικό διάστημα (έξι μήνες), οι μικροοργανισμοί μπορούν να αντέξουν σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας (4-6 g/l)[8].

Πίνακας 13. Η επίδραση της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>3</sub>-N) στην αναερόβια διεργασία [12]

Συγκέντρωση Αμμωνιακού Αζώτου (NH <sub>3</sub> -N) σε mg/l	Επίδραση
50-200	Ευεργετική
200-300	Όχι αρνητική
1500-3000	Ανασταλτική για pH > 7.4
πάνω από 3000	Τοξική

### 2.5.10 Θειούχα και θειικά ανιόντα

Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται το θείο για την ανάπτυξή τους. Για την ικανοποίηση αυτής της ανάγκης, δεσμεύουν το διαλυτό θείο που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση (HS<sup>-</sup>). Ωστόσο σε συγκεντρώσεις άνω των 200 mg/l τα θειικά ανιόντα δύνανται να προκαλέσουν παρεμπόδιση (Σκιαδάς, 1998).

### 2.5.11 Βαρέα μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα διακρίνονται: α) σε αυτά που συναντώνται συχνότερα, όπως χαλκός (Cu<sup>2+</sup>), κάδμιο (Cd<sup>2+</sup>), χρώμιο (Cr<sup>6+</sup>) ή χρώμιο (Cr<sup>3+</sup>), μόλυβδος (Pb<sup>2+</sup>), νικέλιο (Ni<sup>2+</sup>) και ψευδάργυρος (Zn<sup>2+</sup>), β) σε αυτά που συναντώνται λιγότερο συχνά, όπως αρσενικό (As<sup>3+</sup>), σίδηρος (Fe<sup>3+</sup>), μαγγάνιο (Mn<sup>2+</sup>), υδράργυρος (Hg<sup>2+</sup>) και άργυρος (Ag<sup>+</sup>) και γ) σε αυτά που συναντώνται σπανιότερα, όπως κοβάλτιο (Co<sup>2+</sup>), μολυβδαίνιο (Mo<sup>6+</sup>), αλουμίνιο (Al<sup>3+</sup>), σελήνιο (Se<sup>2+</sup>) και κασσίτερος (Sn<sup>3+</sup>). Αυτά βρίσκονται σε βιομηχανικά κυρίως απόβλητα. Πολλά από αυτά τα ιχνοστοιχεία είναι απαραίτητα για τη σωστή ενζυμική λειτουργία των μεθανογόνων. Ωστόσο σε συγκεντρώσεις ανώτερες από τη συγκέντρωση ανάπτυξης, είναι τοξικά για την αναερόβια χώνευση [8].



Πίνακας 14. Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (σε διαλυτή ή στερεή μορφή), που δρουν παρεμποδιστικά στην αναερόβια διεργασία [13]

<b>Βαρέα μέταλλα</b>	<b>Συγκέντρωση σε mg/l</b>
Αρσενικό $As^{3+}$ διαλυτό	0,5-1
Κάδμιο $Cd^{2+}$ διαλυτό	0,01-0,02
Νικέλιο $Ni^{2+}$ διαλυτό	1-2
Χαλκός $Cu^+$ διαλυτό	0,5-1
Χρώμιο $Cr^{3+}$ διαλυτό	1-1,5
Ψευδάργυρος $Zn^{2+}$ διαλυτό	0,5-1
Χρώμιο $Cr^{6+}$ διαλυτό	3
Χρώμιο $Cr^{6+}$ στερεό	200-600
Χαλκός $Cu^+$ στερεό	50-70
Νικέλιο $Ni^{2+}$ στερεό	30
Χρώμιο $Cr^{3+}$ στερεό	180-420

### 2.5.12 Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες

Οι χλωριωμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες είναι ισχυροί παρεμποδιστές της μεθανογένεσης. Ειδικότερα το χλωροφόρμιο ( $CHCl_3$ ) είναι πολύ τοξικό ακόμη και σε ίχνη και οδηγεί σε πλήρη παρεμπόδιση του μεταβολισμού των μεθανογόνων βακτηρίων, όταν η συγκέντρωση του ξεπεράσει το 1 mg/l. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο εγκλιματισμός των μεθανογόνων μικροοργανισμών σ' αυτή την ένωση μπορεί να αυξήσει το όριο ανεκτικότητά τους, μέχρι και 15 mg/l. Έρευνες έχουν δείξει ότι ακόμα και σε συγκεντρώσεις κάτω των 18mg/l επέρχεται κατά 50% αναστολή της μεθανογένεσης (Σκιαδάς, 1998).

### 2.5.13 Φορμαλδεΐδη

Οι μεθανογόνοι παρεμποδίζονται σε συγκεντρώσεις φορμαλδεΐδης 100 mg/l. Η λειτουργία τους αποκαθίσταται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις .

### 2.5.14 Αρωματικές ενώσεις

Αρωματικές ενώσεις όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο και οι φαινόλες παρεμποδίζουν τη μεθανογένεση. Οι φαινολικές ενώσεις περιλαμβάνουν τις νιτροφαινόλες, τις χλωροφαινόλες και τις τανίνες. Συγκεκριμένα η χλωροφαινόλη

(Cl-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-OH) είναι η πιο τοξική απ' όλες τις αρωματικές ενώσεις των οποίων η τοξικότητα έχει ερευνηθεί μέχρι τώρα. Η σχετική τοξικότητα των φαινολικών ενώσεων για τη μεθανογένεση έχει ως εξής: νιτροφαινόλες > χλωροφαινόλες > υδροξυφαινόλες. Η ικανότητα των φαινολικών ενώσεων να δημιουργούν σύμπλοκα με μακρομόρια και μέταλλα είναι η κύρια αιτία της παρεμποδιστικής τους δράσης στους μικροοργανισμούς [8].

### 2.5.15 Ανόργανα στοιχεία

Τα ανόργανα κατιόντα Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>,Ca<sup>+2</sup> και Mg<sup>+2</sup> σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλούν παρεμπόδιση στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Πίνακας 15. Συγκεντρώσεις ανόργανων συστατικών που δρουν παρεμποδιστικά στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης [13]

Κατιόν	Συγκέντρωση ουσίας mg/l	
	Μέτρια παρεμπόδιση	Ισχυρή παρεμπόδιση
Na <sup>+</sup>	3500-5500	8000
K <sup>+</sup>	2500-4500	12000
Ca <sup>+2</sup>	2500-4500	8000
Mg <sup>+2</sup>	1000-1500	3000

### 2.5.16 Ανώτερα λιπαρά οξέα και πτητικά λιπαρά οξέα

Τα ανώτερα λιπαρά οξέα (π.χ ολεϊκό, καπρικό, μυριστικό, λαουρικό), έχουν στην αλυσίδα τους 8-18 άτομα άνθρακα. Είναι παρεμποδιστές για την αναερόβια χώνευση και ειδικότερα το λαουρικό εμφανίζει τη μεγαλύτερη τοξικότητα. Η χημική σύνθεσή τους και η δομή τους είναι παρόμοια με αυτή των λιπιδικών συστατικών της κυτταρικής μεμβράνης των οξικολυτικών μεθανογόνων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προσκολλώνται και να διαλύονται στη κυτταρική μεμβράνη των κυττάρων μειώνοντας έτσι τη δραστικότητα των κυττάρων (Gerardi, 2006) .

Τα πτητικά λιπαρά οξέα, όπως το οξικό και το βουτυρικό, όπως έχει αναφερθεί είναι ενδιάμεσα προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης και εμφανίζουν μικρή τοξικότητα όταν το pH είναι ουδέτερο. Αντίθετα, το προπιονικό οξύ σε υψηλές

συγκεντρώσεις, είναι τοξικό για όλο το μικροβιακό πληθυσμό της αναερόβιας χώνευσης.

## **2.6 Συστήματα αναερόβιας χώνευσης**

Από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης, είναι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος είναι το τεχνοοικονομικό κόστος και τα φυσικά, χημικά, βιολογικά χαρακτηριστικά του προς επεξεργασία αποβλήτου.

Ο Lettinga, προσδιόρισε τις συνθήκες που πρέπει να πληρεί ένα αποδοτικό αναερόβιο σύστημα (Lettinga, 1995):

- Υψηλή κατακράτηση της ενεργού βιομάζας στον αντιδραστήρα, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.
- Επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση απόβλητου.
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς.
- Ικανότητα προσαρμογής της βιομάζας σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων.
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για όλα τα είδη των μικροοργανισμών, στις επιβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες

### **2.6.1 Συμβατική αναερόβια χώνευση**

Είναι ο απλούστερος σχεδιασμός αναερόβιου χωνευτήρα και αποτελείται συνήθως από μια κυλινδρική δεξαμενή. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε αιώρημα και η ανάμιξη μπορεί να είναι πλήρης ή μερική. Γίνεται είτε με μηχανικό αναδευτήρα είτε με ανακυκλοφορία του παραγόμενου βιοαερίου ή και με ανακυκλοφορία υγρού μέσα από εναλλάκτες

θερμότητας. Η διεργασία συμβατικής αναερόβιας χώνευσης ενός σταδίου παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα(Hall, 1992):

- Είναι κατάλληλη για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών
- Είναι κατάλληλη για πολύ ισχυρά υγρά απόβλητα
- Η λειτουργία της και η παρακολούθησή της είναι απλή
- Η πλήρης ανάδευση ελαχιστοποιεί τους νεκρούς όγκους
- Δεν λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες καθίζησης της βιομάζας.

Τα μειονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι τα εξής:

- Απαιτούνται συνήθως μεγάλοι όγκοι αντιδραστήρων
- Η ανάμιξη είναι δύσκολη, για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών
- Η απόδοση μετατροπής του οργανικού υλικού σε βιοαέριο είναι χαμηλή και είναι ευαίσθητη σε τοξικές ουσίες και αιφνίδιες αυξήσεις της οργανικής φόρτισης.

### **2.6.2 Συμβατική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων**

Η συμβατική αναερόβια χώνευση των δύο σταδίων λαμβάνει χώρα σε δύο χωνευτήρες, εκ των οποίων θερμαίνεται συνήθως μόνο ο πρώτος,. Το κυριότερο μέρος της βιολογικής επεξεργασίας γίνεται στον πρώτο αντιδραστήρα, ενώ ο δεύτερος διαχωρίζει τα στερεά (βιομάζα και αιωρούμενα στερεά που δεν πρόλαβαν να υδρολυθούν) από το υγρό. Η λάσπη που συγκεντρώνεται επιστρέφει στον πρώτο αντιδραστήρα, αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών και μεθανογόνων μικροοργανισμών. Η διεργασία συμβατικής αναερόβιας χώνευσης δύο σταδίων παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα(Hall, 1992) :

- Είναι κατάλληλη για πολύ ισχυρά υγρά απόβλητα.
- Η λειτουργία της και η παρακολούθησή της είναι απλή.
- Η πλήρης ανάδευση ελαχιστοποιεί τις νεκρούς όγκους.
- Είναι εφικτή σχετικά υψηλότερη απόδοση μετατροπής οργανικού υλικού.
- Απαιτείται μικρότερος όγκος χωνευτήρων

Τα μειονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι τα εξής:

- Τα χαρακτηριστικά καθίζησης επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας.
- Δεν είναι κατάλληλη για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών.
- Μπορεί να είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία για την βελτίωση των χαρακτηριστικών καθίζησης της βιομάζας.

### **2.6.3 Ταχύρυθμες και υβριδικές διατάξεις αναερόβιας χώνευσης**

Η ταχύρυθμη αναερόβια χώνευση βασίζεται στην ανάπτυξη μικροοργανισμών προσκολλημένων σε στερεή επιφάνεια και παρουσιάζει πλεονεκτήματα στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μέτριας οργανικής ισχύος, με ελάχιστα αιωρούμενα στερεά. Οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού σχηματίζοντας έτσι βιολογικό στρώμα (biofilm) ή προσκολλώνται μεταξύ τους δημιουργώντας συσσωματώματα. Τα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν χαρακτηριστικά διαφόρων διατάξεων αναερόβιας χώνευσης, με σκοπό τη διατήρηση θετικών στοιχείων και την εξάλειψη των αδυναμιών.

### **2.6.4 Αναερόβια φίλτρα**

Στα αναερόβια φίλτρα, το προς επεξεργασία απόβλητο εισέρχεται κατακόρυφα είτε ανοδικά είτε καθοδικά σε μία στήλη που είναι γεμάτη με κάποιο αδρανές στερεό πληρωτικό υλικό όπως χαλίκι, γυάλινες χάντρες ή διάτρητο πολυεστέρα. Το πληρωτικό υλικό δρα ως μία επιφάνεια στην οποία προσκολλώνται οι μικροοργανισμοί. Μεγάλο μέρος της βιομάζας βρίσκεται στον χώρο ανάμεσα στα σωματίδια του πληρωτικού υλικού, όπου εγκλωβίζεται και συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αποδόμηση του οργανικού υλικού.

Συνοψίζοντας, τα αναερόβια φίλτρα παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Hall, 1992).

- Λειτουργούν με υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών

- Δέχονται υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης σε μικρού όγκου αντιδραστήρες
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διακυμάνσεις της τροφοδοσίας
- Δεν απαιτείται μηχανική ανάδευση
- Η έκλυση βιοαερίου και η ανακυκλοφορία εξασφαλίζουν ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό του φίλτρου.

Τα μειονεκτήματα των αναερόβιων φίλτρων είναι:

- Η υπερβολική συσσώρευση βιομάζας μπορεί να έχει αρνητικό αποτέλεσμα στην ομαλή λειτουργία του φίλτρου
- Είναι ακατάλληλα για επεξεργασία αποβλήτων με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών,
- Πρέπει να γίνεται περιοδική απομάκρυνση βιομάζας
- Η λήψη δειγμάτων από το εσωτερικό του φίλτρου είναι δύσκολη
- Το κόστος του πληρωτικού υλικού και της στήριξης του είναι υψηλό.

### **2.6.5 Διαστελλόμενες και ρευστοποιημένες κλίνες**

Στις διαστελλόμενες και ρευστοποιημένες κλίνες ο μικροβιακός πληθυσμός συγκρατείται από πληρωτικό υλικό μικρής διαμέτρου και συνεπώς μεγάλης ειδικής επιφάνειας, που επιτρέπει καλύτερη μεταφορά μάζας από την υγρή φάση προς την βιολογική μεμβράνη. Το συνηθέστερο πληρωτικό υλικό είναι σφαιρικοί κόκκοι πυριτικής άμμου διαμέτρου 0.2 έως 0.5 χιλιοστών. Σε διεργασίες διαστελλόμενης κλίνης αναπτύσσονται ταχύτητες ροής, ώστε η διαστολή της κλίνης να κυμαίνεται μεταξύ 15 % και 30 %, ενώ σε διεργασίες ρευστοποιημένης κλίνης ταχύτητες, η διαστολή της κλίνης κυμαίνεται μεταξύ 25 % και 300 % (Σταματελάτου 1999).

Ως πλεονεκτήματα των διαστελλόμενων και ρευστοποιημένων κλινών μπορούν να αναφερθούν τα παρακάτω (Hall, 1992):

- Λειτουργούν με υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και μεγάλους χρόνους παραμονής μικροοργανισμών

- Δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για μεταφορά μάζας
- Απαιτείται μικρός όγκος χωνευτήρων
- Είναι εφικτή μεγαλύτερη απόδοση αφαίρεσης οργανικού υλικού, σε σχέση με τα αναερόβια φίλτρα
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διακυμάνσεις της τροφοδοσίας
- Δεν απαιτείται μηχανική ανάδευση
- Η έκλυση βιοαερίου και η ανακυκλοφορία εξασφαλίζουν ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό της κλίνης.

Τα μειονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- Η εκκίνησή τους είναι δύσκολη
- Είναι ενεργοβόρες
- Ο έλεγχος και η εκτίμηση της συγκέντρωσης βιομάζας παρουσιάζει δυσκολίες
- Είναι πάντοτε υπαρκτός ο κίνδυνος έκπλυσης της ενεργού βιομάζας
- Είναι ακατάλληλες για επεξεργασία αποβλήτων με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών
- Πολύπλοκος σχεδιασμός
- Το κόστος του πληρωτικού υλικού είναι υψηλό.

### **2.6.6 Καλυμμένη αναερόβια λεκάνη**

Είναι μια βραδύρρυθμη διεργασία αναερόβιας χώνευσης, η οποία αποτελεί βελτιώσιμη μέθοδο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με αναερόβιες λίμνες (Hall, 1992). Το απόβλητο εισρέει από τη μια άκρη της μακρόστενης ορθογωνικής δεξαμενής και εκρέει από την άλλη.

### **2.6.7 Χωνευτήρας ανοδικής ροής μέσω στρώματος λάσπης**

Σύμφωνα με την μελέτη της εταιρίας του κ. Μ. Αντωνιάδη [6] ο αντιδραστήρας UASB (ανοδικής ροής στιβάδα οργανικής ιλύος) αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Gatze Letting και τους φοιτητές του στο πανεπιστήμιο Wageningen της Ολλανδίας, στα τέλη της δεκαετίας του 70. Ο συγκεκριμένος τύπος αντιδραστήρα

έχει τη δυνατότητα διαχείρισης ποικίλων βιομηχανικών και οικιακών αποβλήτων και τυγχάνει εκτεταμένης χρήσης ανά τον κόσμο, αφού το 72% των αντιδραστήρων βασίζεται σε UASB τεχνολογία.

Ο αντιδραστήρας UASB είναι τύπος αναερόβιου αντιδραστήρα με ανοδική ροή του αποβλήτου. Το υγρό απόβλητο εισάγεται στον πυθμένα του αντιδραστήρα και με εξαναγκασμένη ανοδική ροή διέρχεται μέσα από στιβάδα ιλύος. Η εν λόγω στιβάδα περιέχει μικτή καλλιέργεια αναερόβιων μικροοργανισμών σε αιώρηση. Η σπουδαιότητα της ιλύος έγκειται στη μετατροπή του οργανικού υποστρώματος σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Η τεχνολογία των συγκεκριμένων αντιδράσεων, σύμφωνα με τον Lim, έγκειται στη συσσωμάτωση της μικροβιακής μάζας, που δημιουργεί μια κοκκώδη ιλύς με αυξημένη οριακή ταχύτητα καθίζησης. Υπό την επίδραση της βαρύτητας, η κοκκώδης ιλύς κατακάθεται στον πυθμένα αντιδραστήρα και σχηματίζει μια κλίνη ιλύς. Η συγκέντρωση της ιλύς στην κλίνη είναι υψηλή και ανέρχεται στα 80 kgSS/m<sup>3</sup> και παραμένει αδιαφοροποίητη για μεγάλο εύρος λειτουργικών συνθηκών.

Όπως επισημαίνει ο Ghangrekar, για να παραταθεί η διάρκεια παραμονής του αποβλήτου στην κλίνη ιλύος και να αποτραπεί η υπερβολική συμπίκνωση της ιλύος, ένα ρεύμα επεξεργασμένου αποβλήτου οδηγείται εν νέου στον πυθμένα της δεξαμενής. Έτσι η συνολική ταχύτητα ανοδικής ροής του υγρού αποβλήτου διατηρείται μεταξύ 1 και 2 μέτρα ανά ώρα. Εφόσον επιτευχθεί η επιθυμητή κοκκώδη μορφή της ιλύος τότε δεν παρασύρεται από την ανοδική ροή και παραμένει στον αντιδραστήρα. Κατά την αποδόμηση του οργανικού υποστρώματος, παράγεται νέα μικροβιακή μάζα που είτε δημιουργεί νέους κόκκους, είτε συσσωματώνεται στους υφιστάμενους.

- Οι αντιδραστήρες UASB φέρουν στην κορυφή τους διαχωριστήρα τριών φάσεων, ο οποίος επιτελεί τις ακόλουθες σημαντικές λειτουργίες.
- Συλλέγει, διαχωρίζει και απομακρύνει το παραγόμενο βιοαέριο.
- Δρα περιοριστικά στη διαστολή της κλίνης ιλύος.



- Περιορίζει τις αναταραχές του υγρού κλάσματος ,που συνιστούν απώρροια της παραγωγής αερίου στην περιοχή καθίζησης.
- Αποτρέπει την έκλυση και τη συνακόλουθη διαφυγή ιλύος από το σύστημα.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση και η σταθερότητα της διεργασίας, ο αντιδραστήρας θα πρέπει να διαστασιολογηθεί και να σχεδιασθεί σύμφωνα με τις ακόλουθες παραμέτρους [6].

- Η συγκέντρωση βιομάζας στον αντιδραστήρα επιδιώκεται όπως είναι κατά το δυνατό υψηλότερη .
- Η βιολογική ενεργητικότητα της ιλύος επιδιώκεται όπως είναι κατά το δυνατών υψηλότερη η οποία συναρτάται της ποσότητας των περιεχόμενων στην ιλύ μικροοργανισμών.
- Ο χρόνος παραμονής της ιλύος θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 μερών για τα μεθανογενή βακτήρια.
- Ο χρόνος παραμονής του υγρού στον αντιδραστήρα επιδιώκεται να μειωθεί.

Ο αντιδραστήρας UASB συνιστά πρόσφορη τεχνολογία για την επεξεργασία βαρέων οργανικών αποβλήτων, αφενός μεν λόγω της υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας που διαθέτει και αφετέρου λόγω της πλούσιας μικροβιακής πυκνότητας. Η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας συντελεί στην ταχεία μεταφορά των ρυπαντών και ως εκ τούτου καθίσταται δυνατή η επεξεργασία αποβλήτων είτε υψηλών συγκεντρώσεων είτε μεγάλων όγκων εντός αντιδραστήρων περιορισμένου μεγέθους.

Ένα σύννηθες πρόβλημα των αντιδραστήρων UASB είναι η διάσπαση της ιλύος και η έκκλυση της από το σύστημα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οφείλεται στην υδραυλική τάση που αναπτύσσουν οι κόκκοι. Επίσης, η αύξηση της οργανικής φόρτισης προκαλεί γραμμική μείωση της αντοχής των κόκκων αναερόβιας ιλύος, γεγονός που επιδρά αρνητικά στην σταθερότητα της δομής των κόκκων. Οι κόκκοι ιλύος μειωμένης αντοχής, χάνουν εύκολα τη δομή τους και διασπώνται.

Μείζων μειονέκτημα των αντιδραστήρων UASB θεωρείται η παρατεταμένη χρονική διάρκεια ανάπτυξης των κόκκων αναερόβιας ιλύος, γεγονός που μεταθέτει χρονικά την εκκίνηση της κανονικής λειτουργίας του συστήματος κατά 2 έως 8 μήνες. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη των μεθανογενών οργανισμών καθυστερεί σημαντικά όταν στον αντιδραστήρα επικρατούν θερμοκρασίες μικρότερες των 30 °C [6].

Παρόμοιος τύπος αντιδραστήρα με τον UASBR είναι ο διασταλμένης κλίνης κοκκώδους ιλύος (Expanded Granular Sludge Bed Reactor, EGSR) όπου συγκριτικά με τον UASBR επιτυγχάνεται υψηλότερος ρυθμός οργανικής φόρτισης και καλύτερη ομογενοποίηση του υλικού. Μία σημαντική διαφορά με τον UASBR, είναι ότι λόγω της επιμήκους κατασκευής του, η υδροστατική πίεση στη λάσπη που βρίσκεται στο κάτω τμήμα είναι αυξημένη. Αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το μικροβιακό πληθυσμό .

Οι χωνευτήρες UASB παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Hall, 1992):

- Λειτουργούν με υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών.
- Ο σχεδιασμός τους είναι σχετικά απλός.
- Δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για μεταφορά μάζας.
- Απαιτείται μικρός όγκος χωνευτήρων.
- Είναι εφικτή υψηλή απόδοση αφαίρεσης οργανικού υλικού.
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διακυμάνσεις της τροφοδοσίας, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης βιομάζας.
- Η έκλυση βιοαερίου εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό του χωνευτήρα.
- Ευνοείται ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας.

Τα μειονεκτήματα των UASBR είναι τα εξής:

- Τα χαρακτηριστικά καθίζησης επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας.
- Δεν είναι κατάλληλοι για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών.
- Ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας απαιτεί τον έλεγχο και τη ρύθμιση

πολλών λειτουργικών παραμέτρων.

### 2.6.8 Αναερόβιος χωνευτήρας με ανακλαστήρες

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR), χωρίζεται σε διαμερίσματα με κατακόρυφους ανακλαστήρες και εξαναγκάζει το απόβλητο να ρέει πάνω και κάτω από αυτούς, καθώς κατευθύνεται από την είσοδο προς στην έξοδο. Οι μικροοργανισμοί ανυψώνονται και καθιζάνουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής και την παραγωγή βιοαερίου, τελικά όμως τείνουν να συσσωρεύονται στο κάτω τμήμα του χωνευτήρα. Με τον τρόπο αυτό το απόβλητο έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερη ποσότητα ενεργού λάσπης, καθώς διέρχεται μέσα από τον αντιδραστήρα.

Ένας αντιδραστήρας όπου η λειτουργία του βασίζεται σε αυτή του ABR, είναι ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες διαμοιρασμένης τροφοδοσίας (split feed anaerobic baffled reactor, SFABR). Στον αντιδραστήρα τύπου SFABR τροφοδοτούνται ταυτόχρονα όλα τα διαμερίσματα. Έτσι εξασφαλίζεται ο καλύτερος εγκλιματισμός και η ισοκατανομή της βιομάζας στα διαμερίσματα, υψηλό ποσοστό αποδόμησης οργανικού υλικού και μείωση της ευαισθησίας του συστήματος σε τοξικές ουσίες λόγω του διαμοιρασμού της τροφοδοσίας

Ο ABR έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Hall, 1992):

- Χαρακτηρίζεται από απλό σχεδιασμό και φθηνή κατασκευή.
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη κατασκευή για διαχωρισμό βιοαερίου -στερεών –υγρού.
- Η εναλλασσόμενα ανοδική και καθοδική ροή ελαχιστοποιεί την έκπλυση της βιομάζας.
- Μπορεί να λειτουργήσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς να είναι απαραίτητη η αφαίρεση περίσσειας λάσπης.
- Είναι σταθερός σε διαταραχές της οργανικής ή της υδραυλικής φόρτισης.

Τα μειονεκτήματα του ABR είναι ότι:

- Είναι κατάλληλος μόνο για την χώνευση αποβλήτων με μικρή συγκέντρωση στερεών.
- Η κατακράτηση βιομάζας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά καθίζησης.
- Ο χρόνος παραμονής στερεών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής.

### 2.6.9 Χωνευτήρας πλήρους ανάδευσης

Οι αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης (CSTR) χαρακτηρίζονται ως οι πρώτοι αντιδραστήρες αναερόβιας χώνευσης. Οι CSTR χρησιμοποιούνται εκτενώς για την αναερόβια χώνευση αποβλήτων που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις στερεών όπως οι βιολογικές λάσπες. ο χρόνος παραμονής των προς επεξεργασία αποβλήτων, σε αυτού του τύπου αντιδραστήρες εξαρτάτε από το είδος των μικροοργανισμών με τον αργότερο χρόνο ανάπτυξης. Για να επιτευχθούν αποδεκτά επίπεδα αποδόμησης επιβάλλεται σχετικά μεγαλύτερος χρόνος παραμονής των αποβλήτων σε σχέση με άλλους αντιδραστήρες που συνήθως ξεπερνά τις 25 ημέρες. Το γεγονός αυτό καθιστά προβληματική τη χρήση του CSTR για επεξεργασία αποβλήτων χαμηλού ρυπαντικού φορτίου [6].

Για να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής των ενεργών αιρούμενων στερεών (μικροβιακοί οργανισμοί) οι αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης εξελίχθηκαν σε πλήρους ανάδευσης με επανακυκλοφορία τις λάσπης. Σε αυτή την περίπτωση η βιολογική λάσπη που απομακρύνεται μαζί με το επεξεργασμένο απόβλητο, διαχωρίζεται σε δεξαμενή καθίζησης και επιστρέφεται στον κύριο χωνευτήρα. Παρόλα αυτά η μέγιστη συγκέντρωση της βιομάζας που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτά τα συστήματα δεν ξεπερνά  $4-6\text{kg/m}^3$ . Η σχετική αυτή χαμηλή συγκέντρωση, τις βιομάζας, έχει ως αποτέλεσμα να μην διαθέτει καλά χαρακτηριστικά καθίζησης, κυρίως λόγω του σχηματιζόμενου βιοαερίου στην δεξαμενή καθίζησης. Η τεχνολογία αυτή έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή για την επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων. Αντίθετα αποτελεί μια ικανοποιητική λύση για επεξεργασία αποβλήτων που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και λιπών [6].

### 2.6.10 Χωνευτήρας εμβολικής ροής

Οι αντιδραστήρες εμβολικής ροής (Plug Flow) θεωρούνται κατάλληλοι για τη διαχείριση μεγάλου όγκου αποβλήτων. Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών και αέριων αποβλήτων, αλλά και για τη διαχείριση κοπριάς. Οι αντιδραστήρες εμβολικής ροής τυγχάνουν ευρείας χρήσης σε περιπτώσεις [6].

- αντιδράσεων μεγάλης κλίμακας
- ταχέων αντιδράσεων
- ομογενών και ετερογενών αντιδράσεων
- αντιδράσεων συνεχούς παραγωγής
- ιδιαίτερα εξώθερμων αντιδράσεων

Οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα, αφού διαχειρίζονται τα εισερχόμενα απόβλητα παράγοντας υψηλότερο ποσοστό ωφέλιμων και αξιοποιήσιμων προϊόντων, συγκριτικά με τους αντιδραστήρες CSTR. Το δε κόστος λειτουργίας είναι χαμηλό. Ο ρυθμός διάδοσης- μεταφοράς θερμότητας μπορεί να βελτιστοποιηθεί είτε με τη χρήση λεπτότερων ή λιγότερων σωλήνων, είτε με τη χρήση σωλήνων μεγαλύτερης διαμέτρου, συνδεδεμένους όμως παράλληλα [6].

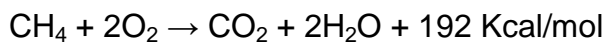
Το κατεξοχήν μειονέκτημα των αντιδραστήρων εμβολικής ροής είναι η δυσκολία ελέγχου των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εντός του αντιδραστήρα. Η δε συντήρησή τους είναι πιο δαπανηρή σε σύγκριση με τους αντιδραστήρες συνεχούς ανάδευσης CSTR. Ωστόσο οι αντιδραστήρες εμβολικής ροής λειτουργούν επί μακρά χρονικά διαστήματα χωρίς να χρειάζεται οποιαδήποτε συντήρηση. Σε εφαρμογές όπου οι μικροβιακοί οργανισμοί αυξάνονται εκθετικά, τότε προτιμούνται οι CSTR και όχι οι εμβολικής ροής [6].

## 2.7 Προϊόντα αναερόβιας χώνευσης

Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας είναι το βιοαέριο (ένα μίγμα διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου) και το χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο δύναται να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας αφού μπορεί να καεί απευθείας σε μηχανές συμπαραγωγής, είτε μπορεί να καθαριστεί και να αναβαθμιστεί με σκοπό τη τροφοδοσία του στο δίκτυο του φυσικού αερίου ή να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στις μεταφορές. Από την άλλη, το χωνεμένο υπόλειμμα είναι ένα εξαιρετικό εδαφοβελτιωτικό και παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι οσμές του υπολείμματος είναι κατά πολύ μειωμένες και τα θρεπτικά στοιχεία του για την ανάπτυξη των φυτών είναι βελτιωμένα, με αποτέλεσμα να αποτελεί ένα εξαιρετικό οργανικό εδαφοβελτιωτικό.

### 2.7.1 Βιοαέριο

Τι είναι το βιοαέριο - Κατά την αναερόβια χώνευση οργανικών υλικών που περιέχουν συγκεκριμένες ομάδες αναερόβιων μικροοργανισμών, γίνεται μετατροπή της οργανικής ύλης σε βιοαέριο, ένα αέριο καύσιμο μίγμα που έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε πολλές σημαντικές εφαρμογές για την παραγωγή ενέργειας. Η βασική ένωση που περιέχεται στο μίγμα του βιοαερίου και του προσδίδει ιδιότητες καυσίμου είναι το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>). Το μεθάνιο καίγεται με μεγάλη ευκολία σύμφωνα με την γνωστή εξώθερμη αντίδραση καύσης [18]:



Η τέλεια καύση 1 m<sup>3</sup> μεθανίου παράγει 8570 kcal θερμότητας. Κατά συνέπεια, το βιοαέριο μπορεί να έχει τις ακόλουθες χρήσεις [18]:

- Να καεί απευθείας σε λέβητες για την παραγωγή θερμότητας
- Να διοχετευθεί, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από το σύστημα συμπαραγωγής.

- Να αναμορφωθεί σε βιομεθάνιο και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο κίνησης οχημάτων. Εναλλακτικά ως αναμορφωμένο βιομεθάνιο μπορεί να αντικαταστήσει το φυσικό αέριο, που είναι μη ανανεώσιμο καύσιμο, στη χημική βιομηχανία.

Σύμφωνα με το [biomassenergy.gr](http://biomassenergy.gr) εκτός από μεθάνιο, το μίγμα του βιοαερίου περιέχει και σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το οποίο είναι μη καύσιμο αέριο, καθώς και μικρότερες ποσότητες και ίχνη από άλλες ενώσεις. Μια τυπική σύσταση του βιοαερίου δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 16. Τυπική χημική σύσταση του βιοαερίου [18]

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	55-70
Διοξείδιο του άνθρακα	CO <sub>2</sub>	30-45
Άζωτο	N <sub>2</sub>	0-5
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	<1
Υδρογονάνθρακες	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	<1
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	0-0.5
Αμμωνία	NH <sub>3</sub>	0-0.05
Υδρατμοί	H <sub>2</sub> O	1-5
Σιλοξάνες	C <sub>n</sub> H <sub>2n+1</sub> SiO	0-50 mg/m <sup>3</sup>

Το διοξείδιο του άνθρακα απομακρύνεται μόνο στις μονάδες αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο (σε ισοδύναμο φυσικού αερίου, δηλαδή). Στις συμβατικές μονάδες συμπαραγωγής με βιοαέριο δεν χρησιμοποιείται εξοπλισμός δέσμμευσης του CO<sub>2</sub>.

Το άζωτο και το οξυγόνο στο βιοαέριο βρίσκονται, συνήθως, σε αναλογία 4:1. Η παρουσία τους οφείλεται στην εσκεμμένη ανάμιξη του θερμού βιοαερίου με αέρα, για την απομάκρυνση του υδρόθειου.

Η περιεκτικότητα της αμμωνίας στο βιοαέριο είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ μικρή και δεν υπερβαίνει τα 0.1 mg/m<sup>3</sup>. Η ύπαρξη αυξημένων συγκεντρώσεων αμμωνίας υποδηλώνει ότι έχει χρησιμοποιηθεί κατά την αναερόβια χώνευση υλικό με υψηλή συγκέντρωση σε άζωτο (π.χ. κοπριά πουλερικών).

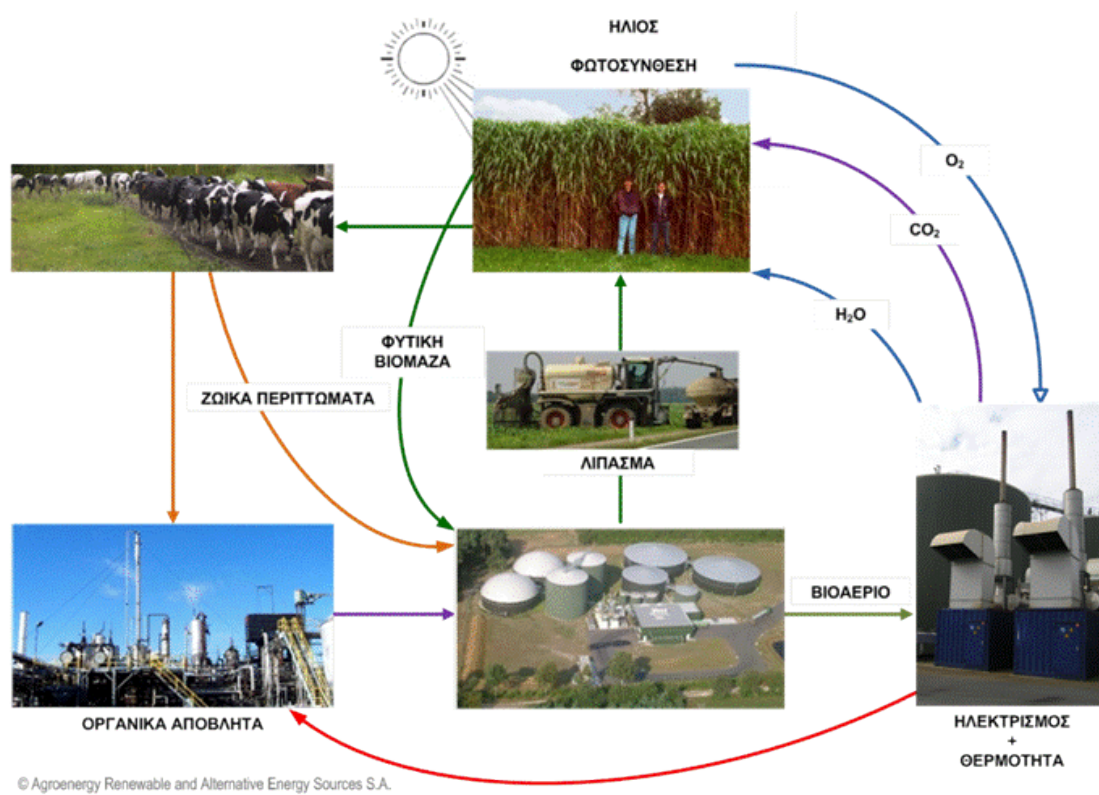
Αντιθέτως, η συγκέντρωση του υδρόθειου στο βιοαέριο είναι καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα του βιοαερίου. Χωρίς να χρησιμοποιηθεί κάποιο στάδιο αποθείωσης του βιοαερίου η συγκέντρωση του μπορεί να ξεπεράσει τα 0.2% κ.ο., ποσότητα ικανή για να δημιουργήσει σημαντικές φθορές λόγω διάβρωσης στις μετέπειτα σωληνώσεις και στην μηχανή συμπαραγωγής. Πολλοί κατασκευαστές μηχανών, μάλιστα, θέτουν ως ανώτατο όριο στην συγκέντρωση υδρόθειου στο βιοαέριο την τιμή του 0.05 % κ.ο. Ένα επιπλέον θέμα που προκύπτει από την ύπαρξη υδρόθειου σε υψηλά επίπεδα είναι οι αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) από την μονάδα.

Η παρουσία του νερού, υπό την μορφή υδρατμών, είναι αναπόφευκτη λόγω των βιοχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια χώνευση. Όπως και το υδρόθειο, έτσι και η παρουσία των υδρατμών είναι ανεπιθύμητη στο ρεύμα βιοαερίου που οδηγείται στη μηχανή συμπαραγωγής λόγω της διάβρωσης που μπορεί να προκαλέσει στον μηχανολογικό εξοπλισμό. Υψηλές συγκεντρώσεις υδρατμών καθιστούν ακόμα και το διοξείδιο του άνθρακα επιβλαβές, λόγω του σχηματισμού μικρών ποσοτήτων ανθρακικού οξέος. Κατά συνέπεια, η απομάκρυνση της υγρασίας είναι ένα ακόμα βήμα για την προεπεξεργασία του βιοαερίου, πριν την εισαγωγή του σε μηχανή συμπαραγωγής.

Οι σιλοζάνες, τέλος, είναι ενώσεις του πυριτίου και προέρχονται ως επί τω πλείστον από συγκεκριμένες κατηγορίες υλικών που συμμετάσχουν στην αναερόβια χώνευση. Τέτοια υλικά είναι τα αστικά στερεά ή υγρά απόβλητα. Έτσι



η παρουσία τους είναι έντονη στο βιοαέριο χωματερός ή εκείνο από βιολογικούς καθαρισμούς, ενώ δεν αποτελεί πρόβλημα για τις αγροτικές μονάδες βιοαερίου. Η παρουσία των σιλοξανών στο βιοαέριο είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη, καθώς έχουν την τάση, σε υψηλές θερμοκρασίες, να αντιδρούν με το οξυγόνο και να σχηματίζουν διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) το οποίο επικάθεται σε διάφορα μέρη του μηχανολογικού εξοπλισμού δημιουργώντας τους σοβαρότατες φθορές.



Σχήμα 9. Αειφόρος κύκλος παραγωγής βιοαερίου [20].

## 2.7.2 Τα υπολείμματα ζύμωσης / χώνευσης – χρήση στην κηπουρική και την γεωργία

Η εφαρμογή χωνευμένης ιλύος σε καλλιέργειες έχει διπλό σκοπό καθώς είναι ταυτόχρονα βελτιωτικό εδάφους και λίπασμα. Το χούμους της ιλύος, εκτός από τροφή για τα φυτά, ωφελεί και το έδαφος αυξάνοντας την ικανότητά του να

κατακρατά νερό και βελτιώνοντας τη δομή του. Προκαταρκτικά πειράματα με κηπευτικά και οικιακά φυτά έχουν δώσει εντυπωσιακά αποτελέσματα με τη χρήση ιλύος από χωνευτήρας αποβλήτων εκτροφής κοτόπουλων. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποια πράγματα που πρέπει πρώτα να ληφθούν υπόψη [64]:

**1.** Φρεσκοχωνευμένη ιλύς, ιδιαίτερα από κοπριά, περιέχει υψηλές ποσότητες αμμωνίας και, σε αυτή την κατάσταση, μπορεί να λειτουργήσει ως χημικό λίπασμα εισάγοντας με το ζόρι μεγάλες ποσότητες αζώτου στο φυτό και αυξάνοντας τη συσσώρευση τοξικών ενώσεων του αζώτου. Δεν υπάρχουν ξεκάθαρες αποδείξεις για κάτι τέτοιο, ωστόσο η πιθανότητα είναι υπαρκτή. Για το λόγο αυτό είναι πιθανότατα καλύτερο να αφηθεί η ιλύς να «ωριμάσει» κάποιες εβδομάδες σε ανοιχτό χώρο (βαρέλια λαδιού, πλαστικές δεξαμενές, κ.λπ.) ή σε ένα κλειστό δοχείο για κάποιους μήνες προτού χρησιμοποιηθεί σε καλλιέργειες. Όσο πιο φρέσκια είναι, τόσο περισσότερο θα πρέπει να αραιωθεί με νερό πριν τη χρήση της.

**2.** Η συνεχής χρήση χωνευμένης ιλύος σε οποιοδήποτε έδαφος τείνει να αυξάνει την οξύτητα του εδάφους. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκη μικρών ποσοτήτων δολομίτη ή ασβεστόλιθου σε τακτικά χρονικά διαστήματα στα χωράφια με την ιλύ, αφήνοντας τουλάχιστον 2 εβδομάδες μεταξύ των προσθηκών για να αποφευχθεί υπερβολική απώλεια αζώτου. Δυστυχώς, ο ασβεστόλιθος τείνει να εξατμίζει την αμμωνία, οπότε υπάρχει κίνδυνος να υπάρχει παροδική απώλεια αζώτου κάθε φορά που προστίθεται ασβεστόλιθος στα χωράφια.

**3.** Σε αντίθεση με την ιλύ από αστικά λύματα, αυτή από τα απόβλητα κτηνοτροφίας δεν περιέχει μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων ή αλάτων, συνεπώς ο κίνδυνος να χρησιμοποιηθούν επικίνδυνα μεγάλες ποσότητες είναι μικρός. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στη δομή του εδάφους. Αν έχει πολύ άργιλο, η ιλύς θα τείνει να συσσωρεύεται και είναι πιθανό να δημιουργήσει προβλήματα στις ρίζες των φυτών. Σε γενικές γραμμές θα πρέπει να παρακολουθούνται προσεκτικά τα χωράφια με την ιλύ την πρώτη περίοδο

χρήσης της και μέχρι η συμπεριφορά της ιλύος στο συγκεκριμένο έδαφος να έχει παρατηρηθεί επαρκώς.

## **3 Κτηνοτροφικά απόβλητα**

### **3.1 Αναερόβια χώνευση ζωικών απορριμμάτων για την παραγωγή βιοαερίου**

Αρχικά εξετάζετε η δυνατότητα της μεθόδου της ΑΧ για την παραγωγή βιοαερίου από ζωικά απόβλητα και απορρίμματα και στη συνέχεια πραγματοποιείται μία συγκριτική ανάλυση μεταξύ των διαφορετικών λειτουργικών συνθηκών και αποδόσεων για διάφορες παραλλαγές της μεθόδου της ΑΧ. Όπως φαίνεται παρακάτω, εξετάζονται διάφορα είδη απορριμμάτων και διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας των αποβλήτων καθώς και η επίδραση διάφορων παραμέτρων στον βαθμό απόδοσης προς παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου. Από την συγκριτική ανάλυση αναδεικνύεται ότι μια ποικιλία από διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες και διαφορετικούς τύπους αντιδραστήρων, όπως αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, αντιδραστήρες συνεχούς ροής και πλήρους ανάδευσης (CSTR), αντιδραστήρες εμβολικής ροής (PFR), κα, μπορούν να είναι αποτελεσματικοί για την ΑΧ των ζωικών απορριμμάτων και αποβλήτων.

Τον τελευταίο καιρό, μεγάλο ενδιαφέρον έχει παρουσιαστεί από τη χρήση κτηνοτροφικών απορριμμάτων ως εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στις συνεχείς οικονομικές και περιβαλλοντικές ανησυχίες που αντιμετωπίζουν όχι μόνο οι αγρότες αλλά και οι κυβερνήσεις [34]. Η εσφαλμένη διαχείριση των ζωικών αποβλήτων μπορεί να επιφέρει πολύ σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Εκτός των προβλημάτων δυσοσμίας πολύ επικίνδυνη είναι η προσέλκυση εντόμων, τρωκτικών και άλλων παράσιτων, καθώς και η ανάπτυξη και απελευθέρωση παθογόνων μικροοργανισμών που

ευθύνονται για μολύνσεις, οι οποίες μπορούν να επιδεινώσουν τη βιολογική δομή της Γής, τόσο στο έδαφος όσο και στο υπέδαφος [35]. Η ΑΧ θεωρείται μία από τις πλέον σημαντικές και ενδιαφέρουσες διεργασίες επεξεργασίας των ζωικών απορριμμάτων και αποβλήτων, γιατί εκμηδενίζει τους περιβαλλοντικούς κινδύνους ενώ την ίδια στιγμή πραγματοποιείται η παράγωγή βιοαερίου για την κάλυψη τυχόν ενεργειακών αναγκών [36].

Το βιοαέριο, αποτελεί το κατεξοχήν ενεργειακό προϊόν που προέρχονται από την αποδόμηση των οργανικών ουσιών που αποτελούν τη βιομάζα και παράγεται από αυτήν μέσω της διεργασίας της ΑΧ. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο, είναι το κριτήριο που καθορίζει την θερμογόνο δύναμη και κατά συνέπεια την απόδοση του ως καύσιμου και κατ' επέκταση την απόδοση μετατροπής του σε θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια [37].

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, έχουν γίνει σημαντικά βήματα τόσο στην κατανόηση, όσο και στην βελτιστοποίηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Οι πολυάριθμες μελέτες που έχουν εκπονηθεί, προτείνουν την χρήση διαφορετικών τύπων αντιδραστήρων ΑΧ, λειτουργικών συνθηκών και την επίτευξη φυσικά διαφορετικών αποδόσεων. Οι βασικές απαιτήσεις για την ΑΧ είναι να μεγιστοποιηθεί η μετατροπή των πτητικών στερεών (VS) και της απόδοσης προς παραγωγή μεθανίου, με λογική φόρτιση οργανικού φορτίου (OLR) και μικρό υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) για να ελαχιστοποιηθεί ο όγκος του αντιδραστήρα και παράλληλα να διασφαλίζετε πλήρης ανάμιξη για την πιο αποτελεσματική μεταφορά από το οργανικό υλικό στην ενεργό μικροβιακή βιομάζα, για να ελευθερωθούν οι παγιδευμένες αέριες φυσαλίδες από το μέσο και για την αποτροπή της καθίζησης [41]. Άλλες απαιτήσεις αφορούν στην μείωση των ενεργειακών και θερμικών απαιτήσεων, η διαδικασία ελέγχου των οσμών και τέλος η επίτευξη ενός αξιόπιστου συστήματος με το μικρότερο πάγιο κόστος εξοπλισμού και το ελάχιστο λειτουργικό κόστος [36].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αντιδραστήρων σε χρήση σήμερα και κάθε τύπος σχετίζεται με την ποιότητα της τροφοδοσία καθώς και με το κεφάλαιο της αρχικής επένδυσης κατασκευής αλλά και λειτουργίας τους [41]. Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την αναερόβια χώνευση των ζωικών αποβλήτων είναι οι: διαλείποντος έργου, συνεχούς ροής απλού και διπλού σταδίου, αυλωτοί αντιδραστήρες, διαλείποντος έργου σε σειρά (ASBR), αντιδραστήρες με φίλτρα (AF) και αντιδραστήρες εμβολικής ροής (PFR). Οι αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (BR) είναι πλέον απλοί στο σχεδιασμό και στην λειτουργία τους. Αυτοί γεμίζουν με την πρώτη ύλη και όσο πραγματοποιείται η αντίδραση, τίποτα δεν εισάγεται ή αποσύρετε, μέχρι την ολοκλήρωση της. Κάποια από τα προϊόντα της ζύμωσης μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε επόμενες χωνεύσεις. Οι αντιδραστήρες συνεχούς ροής απλού σταδίου χρησιμοποιούν μηχανική ανάμιξη ή επανακυκλοφορία του βιοαερίου για την συνεχή ανάμιξη των υλικών που περιλαμβάνονται στον αντιδραστήρα. Επίσης, ο αντιδραστήρας συνεχούς ροής διπλού σταδίου, χρησιμοποιεί ανεξάρτητους αντιδραστήρες στους οποίους λαμβάνουν χώρα ξεχωριστά η υδρόλυση/οξεογένεση και η οξικογένεση/μεθανογένεση. Ομοίως, ο PFR αντιδραστήρας είναι ένα αμιγές σύστημα όπου τα απόβλητα ρέουν ημι-συνεχώς σαν ένα έμβολο διάμεσου ενός οριζόντιου αντιδραστήρα.

Τα τελευταία χρόνια, μια σειρά νέων αντιδραστήρων έχουν προσαρμοστεί και αναπτυχθεί, επιτρέποντας σημαντικά υψηλότερα ποσοστά μετατροπής, ανά μονάδα όγκου του αντιδραστήρα. Μεταξύ αυτών είναι οι: AF, UASB, AFB, OFR. Οι AF, UASB, AFB μπορούν να συσσωρεύσουν υψηλή συγκέντρωση βιομάζας επιτρέποντας μεγάλο χρόνο κατακράτησης στερεών (SRT) ακόμη και με χαμηλό HRT. Οι παραπάνω αντιδραστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για διαφορετικά είδη αποβλήτων. Ο αντιδραστήρας OFR παρουσιάζει ενίσχυση στις μηχανικές ιδιότητες όπως η ανάμιξη. Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για την απόδοση της χώνευσης.

### **3.2 Λειτουργία και απόδοση διάφορων βιοαντιδραστήρων για την ΑΧ ζωικών απορριμμάτων και αποβλήτων.**

Οι παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης χρησιμοποιούνται συνήθως για να καθορίσουν το μέγεθος του βιοαντιδραστήρα, τους βοηθητικούς εξοπλισμούς που απαιτούνται, καθώς και το μέγεθος και τις προδιαγραφές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας του βιοαερίου. Κατά τη διάρκεια της ΑΧ, ειδικά τα αναερόβια μεθανογόνα βακτήρια είναι πιο ευαίσθητα στις αλλαγές της θερμοκρασίας και της όξινης συγκέντρωσης στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα και η ανάπτυξή τους μπορεί να παρεμποδιστεί κάτω από όξινες συνθήκες. Ως εκ τούτου, στις περιπτώσεις που μειώνεται το pH, αυτό μπορεί να διατηρηθεί στην βέλτιστη περιοχή (6.5-7.5) με την προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου, ανθρακικού ασβεστίου ή υδροξειδίου του ασβεστίου [35]. Επίσης, η απόδοση προς μεθανίου σε σχέση με τα VS επηρεάζεται άμεσα από το ποσοστό μετατροπής, που απαιτεί ένα κατάλληλο και αποτελεσματικό ανεφοδιασμό θρεπτικών ουσιών για τους μικροοργανισμούς στο εσωτερικό του αντιδραστήρα για βέλτιστη λειτουργία [44]. Η εργασία εστιάζεται στα ζωικά απόβλητα που παράγονται σε βοοειδή γαλακτοπαραγωγής, χοίρους και πουλερικά.

#### **3.2.1 Χρήση αναερόβιων βιοαντιδραστήρων για την χώνευση κοπριάς βοοειδών (CM).**

Η κοπριά βοοειδών (CM), όταν περιέχει υγρασία περίπου 75-80%, αναφέρεται ως υδαρής κοπριά βοοειδών. Όταν η περιεκτικότητα στερεών είναι μεταξύ 25% και 40%, η διαδικασία περιγράφεται ως ξηρή χώνευση, όταν το στερεό περιεχόμενο είναι κάτω του 15%, αναφέρεται ως υγρή χώνευση. Επίσης, η CM έχει χαμηλή βιο-αποδόμηση, λόγω του υψηλού ποσοστού των ανόργανων ενώσεων και ινών που δεν διασπώνται στο σύστημα πέψης της αγελάδας, έτσι η απόδοση παράγωγης μεθανίου από CM είναι σχετικά χαμηλή.

Ο Ahring[45] πραγματοποίησε μια μελέτη με τους συνεργάτες του, για την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας από 55°C σε 65°C, στην απόδοση των δύο αντιδραστήρων CSTRs κατά την επεξεργασία CM με 15 ημέρες υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT). Παραγόταν βιοαέριο σταθερά σε ποσότητα  $0.2\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VSday}^{-1}$  σε 10 ημέρες μετά το ξεκίνημα σε 55°C με μια περιεκτικότητα σε μεθάνιο της τάξης του 65-71%. Ωστόσο με την αύξηση της θερμοκρασίας στους 65°C, παρατηρήθηκε μια γρήγορη πτώση στην παραγωγή βιοαερίου και στην περιεκτικότητα σε μεθάνιο (< από 45%),. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα, ότι μια αλλαγή της θερμοκρασίας από 55°C σε 65°C, οδήγησε σε μειωμένη παραγωγή μεθανίου και αυξημένο ποσό πτητικών λιπαρών οξέων (VFA) στα λύματα. Σε μια παρόμοια μελέτη, η επίδραση της θερμοκρασίας (50°C και 60°C) στην απόδοση των CSTRs με αγελαδινή κοπριά, ερευνήθηκε από τον El-Mashad [46], με HRT 10 και 20 ημέρες. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι το στάδιο της υδρόλυσης είναι το στάδιο της διεργασίας που πλήττεται στην AX της CM στο θερμοκρασιακό εύρος των 50-60°C, καθώς και το ποσοστό παραγωγής μεθανίου στους 60°C βρέθηκε να είναι χαμηλότερο από εκείνο στους 50°C, σε όλα τα επίπεδα. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η συγκέντρωση της αμμωνίας και η αύξηση της οξύτητας επηρέασαν την απόδοση στο στάδιο της υδρόλυσης σημαντικά και η μεθανογένεση σταδιακά επηρεάστηκε αρνητικά.

Ο Maranon [47] με τους συνεργάτες του εκπόνησαν μελέτη για την επίδραση του HRT για την χώνευση CM σε UASB αντιδραστήρα. Διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο COD αφαίρεσε 75.5% του συνόλου του βιοαερίου για HRT 22.5 ημέρες, σε OLR  $2.35\text{ kgCODday}^{-1}\text{m}^{-3}$ . Στη μελέτη, οι τιμές παραγωγής βιοαερίου κυμάνθηκαν μεταξύ 0.20 και  $0.39\text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{COD}$ .

Από τους Kalia [48] και τους συνεργάτες του, δοκιμάστηκε η AX του CM (TS19.9%) υπό συνθήκες περιβάλλοντος (20-23°C). Τα αποτελέσματα έδειξαν μια χαμηλότερη απόδοση της τάξεως  $0.103\text{m}^3\text{μεθανίου/kgVSμε μετατροπή VS}$  ίση με 23.9%. Ωστόσο με ανάμειξη 10% πολτού χώνευσης με φρέσκο CM σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, επετεύχθη όχι μόνο μια υψηλότερη

παραγωγή βιοαερίου, αλλά και για μικρότερους HRT 14 ημερών με μετατροπής VS ίση με 36.1%.

Ο Harikishan[49] και οι συνεργάτες, αξιολόγησαν τις επιδόσεις του αντιδραστήρα δύο σταδίων συνεχούς ανάδευσης, για επεξεργασία CM από βοοειδή γαλακτοπαραγωγής. Ο πρώτος αντιδραστήρας λειτουργούσε υπό θερμοφιλικές συνθήκες με HRT 4 ημερών και ο δεύτερος αντιδραστήρας λειτουργούσε σε μεσοφιλική κατάσταση με HRT 10 ημερών. Αναφέρεται ότι μια συνολική παραγωγή μεθανίου  $0.21 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  συμπεριλαμβανομένου ενός υψηλού OLR  $5.82 \text{ kgVSm}^{-3}\text{day}^{-1}$  για το επιτυγχάνει μείωση VS 41% στον δεύτερο αντιδραστήρα.

Ο Nielsen[50] με τους συνεργάτες του, μελέτησαν έναν αντιδραστήρα σε εργαστηριακή κλίμακα, για την σύγκριση της απόδοσης ενός συστήματος δύο σταδίων με συμβατικό σύστημα ενός σταδίου, για τη επεξεργασία της CM. Στη μελέτη για όλα τα συστήματα χρησιμοποιήθηκε OLR  $3 \text{ kgVSm}^{-3}\text{day}^{-1}$ . Στο σύστημα δύο σταδίων, ο πρώτος αντιδραστήρας λειτουργεί σε  $68^\circ\text{C}$  με HRT 3 ημερών και ο δεύτερος αντιδραστήρας σε  $55^\circ\text{C}$  με HRT 12 ημερών. Ο συμβατικός αντιδραστήρας ενός σταδίου έχει συνθήκες λειτουργίας  $55^\circ\text{C}$  με HTR 15 ημερών. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι το σύστημα δύο σταδίων έχει 6-8% υψηλότερη απόδοση σε μεθάνιο και 9% περισσότερη μετατροπή VS από ότι το συμβατικό σύστημα ενός σταδίου.

Οι Demirel και Chen [51], σύγκριναν τις συμβατικές ρυθμίσεις, αντιδραστήρα μίας φάσης έναντι αντιδραστήρα δύο φάσεων συνεχούς ανάδευσης που επεξεργάζεται σε μεσόφιλες συνθήκες CM από μονάδες γαλακτοπαραγωγής. Κατά την επεξεργασία με δύο φάσεις, εφαρμόστηκε στον αντιδραστήρα οξεογέννησης, που αποτελεί την πρώτη φάση, HTR 2 ημερών και στον αντιδραστήρα μεθανογέννησης, που αποτελεί την δεύτερη φάση, HTR 8 ημερών. Στο συμβατικό αντιδραστήρα μίας φάσης εφαρμόστηκε HTR 20 ημερών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο συμβατικό αντιδραστήρα μίας φάσης η OLRs κυμαίνεται μεταξύ 1 και  $6.3 \text{ kgVSm}^{-3}\text{day}^{-1}$ . Από την άλλη πλευρά, στον αντιδραστήρα δύο φάσεων παρουσιάστηκε OLR  $12.6 \text{ kgVSm}^{-3}\text{day}^{-1}$ . Επίσης



εμφανίζεται 50% με 67% υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου σε OLR 5 με 6  $\text{kgVSday}^{-1}\text{m}^{-3}$ . Συμπεραίνεται ότι η χρήση των δύο φάσεων οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση λόγω μειωμένου όγκου και υψηλής απόδοσης.

Στην μελέτη που εκπόνησαν ο Rico με τους συνεργάτες του [52], αξιολογήθηκε η επιρροή σε μεσόφιλες συνθήκες λειτουργίας ( $37^{\circ}\text{C}$ ), του βιοαντιδραστήρα με ανακυκλοφορία για την παραγωγή βιοαερίου με πρώτη ύλη, απόβλητα αγελάδων γαλακτοπαραγωγής, σ' ένα αντιδραστήρα CSTR. Μελέτησαν την επίδραση της συνεχούς και διαλείπουσας λειτουργίας της αντλίας ανακυκλοφορίας με HRT 10 και 20 ημερών. Λαμβάνεται σταθερή παραγωγή βιοαερίου για 1.26-1.34  $\text{m}^3$  με HRT 10 ημερών, ενώ για HRT 20 ημερών φτάνει σε σταθερή τιμή για 0.7 $\text{m}^3$  με καμία σημαντική διαφορά μεταξύ των όρων της ανάμιξης. Συμπεραίνεται ότι για AX αποβλήτων ζώων γαλακτοπαραγωγής με HRT 10 ημερών και με TS 6%, η συγκέντρωση επηρεάζεται ελάχιστα από την ανακυκλοφορία. Από την άλλη πλευρά, με HRT 20 ημερών, το ποσοστό ανακυκλοφορίας δεν επηρεάζει την απόδοση του αντιδραστήρα. Ως εκ τούτου, μπορεί να ειπωθεί ότι η συνεχής ανακυκλοφορία δεν βελτιώνει την παραγωγή βιοαερίου.

Ο Castrillon με τους συνεργάτες του [54] διεξήγαγαν μελέτη σχετικά με τη αναερόβια θερμοφιλή επεξεργασία CM σε UASB αντιδραστήρα με HRT 7.3-22.5 ημερών. Η υψηλότερη αποδόμηση COD (79.7%), παρατηρήθηκε για HRT 22.5 ημερών. Διαπιστώθηκε ότι η απομάκρυνση του COD ήταν κάπως μεγαλύτερη σε σχέση με την μεσόφιλη διεργασία που μελετήθηκε από τον Maranon και τους συνεργάτες του όπως αυτή αναλύθηκε παραπάνω [55].

Ο Aoki με τους συνεργάτες του [56] μελέτησαν την θερμοφιλή ( $55^{\circ}\text{C}$ ) AX σε πιλοτική κλίμακα 60  $\text{m}^3$ , για την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα βοοειδών γαλακτοπαραγωγής, σε ψυχρή περιοχή, με μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος -  $23^{\circ}\text{C}$ . Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η μέση παραγωγή βιοαερίου είναι 150  $\text{m}^3\text{day}^{-1}$  με 56% περιεκτικότητα σε μεθάνιο, σε ένα μέσο OLR 6.75  $\text{kgVSday}^{-1}\text{m}^{-3}$  και με HRT 13 ημερών.

Ο Amon με τους συνεργάτες του [57] διερεύνησαν την επίδραση της διατροφής των αγελάδων στην απόδοση παραγωγής μεθανίου σε χωνευτήρα διαλείποντος έργου για 60 ημέρες στους 38°C. Αναφέρεται υψηλότερη απόδοση σε μεθάνιο και βιοαερίου 0.166 και 0.245 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS αντίστοιχα, από την κοπριά αγελάδων γαλακτοπαραγωγής με μέση γαλακτοπαραγωγική απόδοση οι οποίες τρέφονταν με μια καλά ισορροπημένη διατροφή. Συμπεραίνεται ότι η διατροφή των ζώων και κατ' επέκταση η αναερόβια διεργασία που λαμβάνει χώρα κατά την πέψη των αγελάδων γαλακτοπαραγωγής επηρεάζουν εμφανώς την απόδοση των μετέπειτα διεργασιών.

Ο Omar με τους συνεργάτες του [44], μελέτησαν την αναερόβια επεξεργασία ενεργούς λάσπης CM μαζί με φοινικέλαιο λυμάτων ελαιοτριβείου, σε χωνευτήρα 10L διαλείποντος έργου, υπό θερμοφιλες συνθήκες, για HRT 17 ημερών. Παρατηρήθηκε μείωση 98% VS με απόδοση μεθανίου 0.184 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>VS.

Ο Dubronskis και οι συνεργάτες του [58], διερεύνησαν τη χώνευση σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου σε 37°C, με CM από βιζόν. Παρατηρήθηκε παραγωγή υψηλής απόδοσης βιοαέριο 0.303 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS και μεθανίου 0.168 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS με περιεκτικότητα σε μεθάνιο 56% από το αρχικά χωνευμένο υλικό και με προσθήκη 25% φρέσκιας κοπριάς από βιζόν. Συμπεραίνεται ότι η φρέσκια κοπριά από βιζόν έχει υψηλό δυναμικό για την παραγωγή βιοαερίου, αλλά θα πρέπει να αναμιγνύεται με γεωργικά απόβλητα πλούσια σε άνθρακα για την αύξηση την αναλογίας αζώτου-άνθρακα για την βέλτιστη AX.

Οι Sadaka και Engler[59] διερεύνησαν την επίδραση στην AX, της ανάμιξης και μη στο CM κοπριάς βοοειδών, σε αντιδραστήρες όγκου 4L. Αναφέρεται ότι η παραγωγή βιοαερίου αυξάνεται κατά 33.3% στην περίπτωση της ανάμιξης.

Ο Karim με την ομάδα του [60] μελέτησαν την μη στατική AX αγελαδινής κοπριάς σε μεσοφιλικές συνθήκες λειτουργίας, χρησιμοποιώντας μικρής κλίμακας χωνευτήρια με ανάδευση αερίου τύπου (OLR 1.2-5.5 gVS l<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>). Αναφέρθηκε παραγωγή μεθανίου 0.6-1.5 l<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, και παρατηρήθηκε αύξηση της περιεκτικότητας του μεθανίου στο βιοαέριο ανάλογη της αύξησης του HRT.

Συμπεραίνεται ότι η αποτελεσματικότητα του συστήματος χώνευσης της κοπριάς πρέπει να αναλύεται και να σχεδιάζετε χωριστά από τις κινητικές παραμέτρους της διεργασίας.

Η αναστολή-παρεμπόδιση της διαδικασίας CM AX, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ελεύθερου αμμωνίου και της αλληλεπίδρασης του με την ελεύθερη αμμωνία, η VFA και το pH έχει ήδη αναφερθεί [54]. Επίσης, η αναλογία άνθρακα-αζώτου στην περίπτωση CM βρίσκεται συνήθως γύρω στο 5 έως 8:1 το οποίο είναι πολύ χαμηλό για AX, με δεδομένο πως το αποδεκτό εύρος το 13 έως 28:1 [61]. Επομένως, με την προσθήκη ευκόλως βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης στην διαδικασία χώνευσης CM αυξάνεται η παραγωγή βιοαερίου, λόγω μεταβολής των πρώτων υλών. Εκτεταμένες αναφορές έχουν γίνει για τα πλεονέκτημα της συνδυαστικής χώνευσης CM μαζί με άλλα είδη αποβλήτων από αρκετούς ερευνητές.

Οι Angelidaki και Ellegard[62] αναφέρονται σε αύξηση της παραγωγής βιοαερίου, λόγω της συν-χώνευσης CM με οργανικά απόβλητα, εκπονώντας συγκριτική μελέτη μεταξύ μεμονωμένης χώνευσης οικιακών οργανικών απόβλητων (KW), μεμονωμένης χώνευσης CM και συνδυασμένης χώνευσης CM με KW [61]. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μεσόφιλες συνθήκες (35°C) και χρησιμοποιήθηκαν δύο ρυθμοί πλήρωσης 10 και 20 kgVS m<sup>-3</sup> day<sup>-1</sup>. Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η διαδικασία συνδυασμένης χώνευσης αυξάνει την παραγωγή μεθανίου κατά 44% σε σύγκριση με την μεμονωμένη χώνευση. Αναφέρεται απόδοση μεθανίου 0.2986 και 0.3108 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS για OLRs των 10 και 20 kg day<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> VS, αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι μέσω της συνδυασμένης χώνευσης CM με KW επιτυγχάνεται αυξημένη και σταθερή απόδοση μεθανίου και παραγωγή βιοαερίου.

Ο Callaghan με τους συνεργάτες του [63], σύγκριναν δύο διαφορετικές συστάσεις χώνευσης στις ίδιες συνθήκες, χρησιμοποιώντας αντιδραστήρες AX διαλείποντος έργου του 1L ο καθένας, με HRT 14 ημερών σε συνθήκες μεσόφιλης χώνευσης τοποθετήθηκαν στον ένα χωνεύτρα μόνο CM και στον δεύτερο συνδυασμός CM με εντόσθια ψαριών. Αναφέρεται υψηλότερη απόδοση

μεθανίου  $0.37\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  με μεταροπή VS 47.3% στην συνδυασμένη χώνευση σε σχέση με  $0.15\text{m}^3\text{μεθανίουkg}^{-1}\text{VS}$  με μείωση VS 31.1% της μεμονωμένης χώνευσης. Συμπεραίνεται από τη μελέτη ότι η συνδυασμένη χώνευση των εντοσθίων ψαριών, με στερεά απόβλητα ζυθοποιείων και υδαρής κοπριάς βοοειδών ευνοεί την αυξημένη παραγωγή μεθανίου, σε σύγκριση με την χώνευση μόνο υδαρής κοπριάς βοοειδών.

Μελέτη της αναερόβιας συνδυασμένης χώνευσης CM και λιπιδίων εκπόνησαν οι Mladenovska με συνεργάτες [64] σε CSTR, υπό μεσόφιλες συνθήκες λειτουργίας με HRT 15 ημερών. Παρατηρήθηκε υψηλότερη απόδοση μεθανίου  $0.224\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ , σε σχέση με αντιδραστήρα επεξεργασίας μόνο κοπριάς. Με τη συνδυασμένη χώνευση CM και λιπιδίων αυξάνει η απόδοση μεθανίου και επιτυγχάνετε σταθερότητα της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

Ο Comino με τους συνεργάτες του [65] διεξήγαγαν μελέτες για τη διερεύνηση της αναερόβιας συνδυασμένης χώνευσης CM και τυρόγαλου, σε βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας. Στα πλαίσια της μελέτης, η θερμοκρασία διατηρείτε σε  $35^\circ\text{C}$ . Αναφέρεται παραγωγή βιοαερίου  $0.423\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  με ισοδύναμη αύξηση της απόδοσης  $0.211\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  για διάστημα 56 ημερών με μια περιεκτικότητα σε μεθάνιο 51.4%. Συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός CM και τυρόγαλου δίνουν καλό δυναμικό για την παραγωγή βιοαερίου.

Διερεύνηση των επιδράσεων της συνδυασμένης χώνευσης μειγμάτων CM και KW σε χωνευτήρα διαλείποντος έργου ημι-συνεχούς λειτουργίας υπό μεσόφιλες συνθήκες, έγινε από τους Li και συνεργάτες. Αναφέρετε σημαντική απόδοση μεθανίου  $0.233\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  με 71.9% μετατροπή των VS. Συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη αναλογία συνδυασμένης χώνευσης CM και KW είναι 3:1. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η συνδυασμένη χώνευση όταν χρησιμοποιεί CM, αυξάνει την απόδοση του μεθανίου και τη σταθερότητα του βιοαντιδραστήρα.

Οι Alkayak και συνεργάτες [67], διερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας και της HRT στην αναερόβια συνδυασμένη χώνευση CM και γεωργικών υπολειμμάτων σε αντιδραστήρα ημι-συνεχούς τροφοδοσίας σε συνθήκες

λειτουργίας 20°C και 35°C. Χρησιμοποιήθηκαν αντιδραστήρες με HRT 20 και 30 ημερών και με OLR 3 kgVSm<sup>-3</sup>day<sup>-1</sup>. Παρατηρήθηκε σαφής επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση του αντιδραστήρα τόσο για HRT 20 όσο και για HRT30 ημερών. Αναφέρεται απόδοση βιοαερίου 0.299-0.324 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS και 0.087-0.138 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VSγια 35°C και 20°C, αντίστοιχα. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η HRT ως λειτουργική παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά την ΑΧ, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα με απόδοση μεθανίου 0.042-0.182 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS για 20 ημέρες HRT και 0.039-0.182 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS για 30 ημέρες HRT.

Στον Πίνακα 17 συνοψίζονται οι αποδόσεις των διάφορων αντιδραστήρων των μελετών που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως διαλείποντος έργου, ημι-συνεχούς λειτουργίας, ενός ή δύο σταδίων, UASB, AF, CSTR, TPAD, καθώς και οι συνθήκες αναερόβιας επεξεργασίας του CM. Οι περισσότερες των μελετών διεξήχθησαν σε βιοαντιδραστήρες εργαστηριακής κλίμακας 0.6-30L υπό συνθήκες ψυχρόφιλες (20-23°C), μεσόφιλες (35-37°C) ή θερμοφιλές (53-68°C), με OLR από 0.117 μέχρι 6 kgVSm<sup>-3</sup>day<sup>-1</sup> και HRT 2 έως 35 ημέρες. Σε συνδυασμένη χώνευση εμφανίζεται υψηλότερη απόδοση βιοαερίου σε σχέση με την χώνευση μόνο του CM. Η υψηλότερη μετατροπή των VS κυμαίνεται σε ποσοστά από 68% έως και 78%.

Αντιδραστήρας	Υπόστρωμα	Θερμ. (°C)	OLR (kgVSm <sup>-3</sup> day <sup>-1</sup> )	HRT (day)	Αφαίρεση VS ή COD (%)	CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VS	Βιοαέριο (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VS)	% CH <sub>4</sub>
Batch (10 L)	CM	53		17	78% VS	.159	.184	65
CSTR (3 L)	CM	55+ 65	3	15		.202+.165		
CSTR (8 L)	CM	50+ 60		20+ 10				
UASB (8 L)	CM	37	2.35	22.5	75.5% COD		.200- .390	64
Batch	CM υδαρής	21- 23		14	36.1% VS		.103	55
TPAD (20+30 L)	CM γαλακτ.	55/35	5.8	14	41% VS	.210		60
2-φάσεις (0.6+2.4 L)	CM	55+ 68	3	3+12	47.1% VS	.260		
1-φάση (2 L)	CM γαλακτ.	36	5	20	52% VS		.235	
2-φάσεις (0.4+1.6 L)	CM γαλακτ.	36	5-6	10	68% VS		.176	50
Πιλοτ. CSTR(1.5 m <sup>3</sup> )	CM γαλακτ.	37	4.5+ 2.3	10+ 20	38%VS+46%VS			67+70
UASB (9 L)	CM	55		7.3- 22.5	79.7% COD			67.7
UASB (9 L)	CM	37	1.5- 3.7 (COD)	14	85% COD			
60 m <sup>3</sup> digester	CM γαλακτ.	55	6.75	13				56
Batch (1 L)	CM γαλακτ.	37				.166	.245	
Batch	CM+ κοπριά μικρών	37				.168	.303	56
Mixed +unmixed	CM+ Βόιο κρέας				9.6%+ 7.3% VS		.2	
Batch (1 L)	CM+ KW	35	10+ 20		52.5%VS+65.8%VS	.298+ .310		
Batch (1 L)	CM+ ψάρια	35		14	47.3% VS	.370		
CSTR (3 L)	CM+ λιπίδια	37	3	15	37% VS	.224		
Πιλοτ. Batch (128L)	CM+ τυρόγαλο	35		56	74% COD	.211	.423	51.4
Batch (1 L)	CM+ KW	35		12	61% VS	.297		50.9
Ημι-συνεχής (1.05 L)	CM+ υπόλειμμα	20+ 35	3	20-30	35-51% VS		.299-.324+ .087-.138	46.9-56.7

Πίνακας 17. Αποδόσεις διάφορων αντιδραστήρων και διάφορων συνθηκών CM

### 3.2.2 Χρήση αναερόβιων βιοαντιδραστήρων για την χώνευση κοπριάς χοίρων (SM)

Η κοπριά των χοίρων (SM) χαρακτηρίζονται από υψηλό ποσοστό υγρασίας συνήθως πάνω από 96% και υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο με συνέπεια τη συσσώρευση αμμωνίας, κατά τη διάρκεια της χώνευσης. Η απόδοση σε μεθάνιο από την κοπριά χοίρων (SM) είναι συνήθως υψηλότερη από αυτήν της κοπριάς βοοειδών (CM).

Οι Hansen και συνεργάτες [68], σύγκριναν τις αποδόσεις ενός αντιδραστήρα διαλείποντος έργου και ενός CSTR οι οποίοι λειτουργούν υπό θερμοφιλικές συνθήκες και σαν πρώτη υλη χρησιμοποιούν SM. Λόγο της υψηλής συγκέντρωσης VFA, η απόδοση προς μεθάνιο στον CSTR ήταν χαμηλή  $0.067 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  για HRT 15 ημερών. Ωστόσο, με προσθήκη 10% (w/w) γλαυκίνης εξισορροπείται η διεργασία με σημαντική απόδοση μεθανίου  $0.195 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  για HRT 20 ημερών.

Η Andara με τους συνεργάτες της [69], μελέτησαν την απόδοση της AX για την επεξεργασία PM αποβλήτων υπό μεσόφιλες συνθήκες για HRT 60 ημερών, μέσω διεργασιών διαλείποντος έργου με και χωρίς ανάμιξη αντίστοιχα. Τα αποτελέσματά δείχνουν στον αντιδραστήρα με την ανάδευση υψηλότερη απόδοση OLR  $1.45 \text{ kg. VS m}^{-3}\text{day}^{-1}$  σε σχέση με τον αντιδραστήρα χωρίς ανάδευση OLR  $0.8 \text{ kgVS day}^{-1}\text{m}^{-3}$  και μετατροπή VS κατά 65% και 61% αντίστοιχα για κάθε αντιδραστήρα.

Στο εργαστηριακής κλίμακας πείραμα που εκπονήθηκε από τον Kalyuzhnyi και τους συνεργάτες του [70], διαπιστώθηκε ότι το σύστημα UASB είναι κατάλληλο για την προ-επεξεργασία του υγρού κλάσματος διαφορετικών τύπων κοπριάς. Κατά τη μελέτη, η θερμοκρασία διατηρήθηκε στους  $35^\circ\text{C}$  με μέγιστη OLR  $12.39 \text{ kgCOD day}^{-1}\text{m}^{-3}$  για HRT 1 ημέρα και παρατηρήθηκε συνολική μείωση COD κατά 75% για το PM.

Οι Hill και Bolte [71] για να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά παραγωγής μεθανίου από SM με υψηλό ποσοστό υγρασίας, εκπόνησαν μελέτες για

διαδοχικά HRT των 5, 3, 2, 1 ημέρας αντίστοιχα στους 35°C. Παρατηρήθηκε παραγωγή μεθανίου μεταξύ 0.36 και 0.22 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS, όπου η μετατροπή προς μεθάνιο αυξανόταν με αύξηση του HRT.

Ο Pagillame τους συνεργάτες του [72], σύγκριναν τις αποδόσεις της μεσόφιλης AX του SM σε CSTR όταν πραγματοποιείται σε ένα και σε δύο στάδια αντίστοιχα. Η μελέτη έδειξε υψηλότερη απόδοση μεθανίου 0.64 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS και 61% μετατροπή VS για το CSTR δύο σταδίων, ενώ στην περίπτωση του ενός σταδίου η απόδοση του μεθανίου ήταν 0.51m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> VS και η μετατροπή των VS 50% για ίδιο HRT ίσο με 15 ημέρες.

Από τον Moller και τους συνεργάτες του [73] διερευνήθηκε η απόδοση της χώνευσης PM με CSTR σε πιλοτική κλίμακα για υψηλή και χαμηλή συγκέντρωση στερεών, υπό θερμοφίλες συνθήκες. Στην χαμηλή συγκέντρωση στερεών παρατηρείται απόδοση μεθανίου 0.32 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS και μετατροπή 52% VS για HRT 22.8 ημερών. Για υψηλή συγκέντρωση στερεών παρατηρείται χαμηλότερη απόδοση μεθανίου 0.203 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS με μετατροπή των VS ίση με 44% για HRT 20.5 ημερών. Συμπεραίνεται ότι η χώνευση με χαμηλή συγκέντρωση στερεών εμφανίζει καλύτερη απόδοση, λόγω του ότι σε υψηλή αναλογία στερεών, προκαλείτε υψηλό επίπεδο VFA που αναστέλλει την πρόοδο της διεργασίας.

Η μελέτη που διεξήχθη από τον Masse [74], διερεύνησε τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας μεταξύ 10°C και 20°C στη σταθερότητα και τις αποδόσεις της ψυχρόφιλης επεξεργασίας SM σε ASBR. Παρατηρήθηκε μείωση στην απόδοση του μεθανίου από 0.266 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>COD στους 20°C στα 0.218 και 0.08m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>COD στους 15°C και 10°C αντίστοιχα. Επίσης, η συνολική COD παρατηρήθηκε να μειώνεται, καθώς μειωνόταν η θερμοκρασία, ωστόσο η διαφορά δεν ήταν έντονη. Συμπεραίνεται ότι η διακύμανση στη λειτουργία του ψυχρόφιλου ASBR, έχει μόνο προσωρινή επίδραση στην απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος.

Από τον Masse και τους συνεργάτες του [75], διεξήχθη μια ακόμα μελέτη, ώστε να συγκεντρωθούν πληροφορίες για να αξιολογηθούν καλύτερα τα γεωπονικά,



περιβαλλοντικά, και οικονομικά οφέλη της τεχνολογίας της αναερόβιας χώνευσης. Το πείραμα διεξήχθη σε εργαστηριακής κλίμακας αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, ψυχρόφιλης αναερόβια αλληλουχίας (PASBRs) επεξεργασίας SM με HRT 28 ημερών. Η αναερόβια διεργασία μείωσε το VS της κοπριάς κατά μέσο όρο 77% κατά τη διάρκεια του κύκλου της χώνευσης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να επιτεύχθηκε μέση αθροιστική παραγωγή βιοαερίου 0.121 m<sup>3</sup> με 64% περιεκτικότητα σε μεθάνιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σημαντική ποσότητα των θρεπτικών συστατικών της κοπριάς διατηρήθηκαν στον βιοαντιδραστήρα και η διανομή των θρεπτικών συστατικών της, στη λάσπη και στα υπερκείμενα λύματα του βιοαντιδραστήρα, οδήγησαν σε περαιτέρω διαχωρισμό του φωσφόρου και άλλων στοιχείων. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι η τεχνολογία PASBR στη διαχείριση SM μειώνει σημαντικά το κόστος των επιχειρήσεων, τον όγκο της κοπριάς που πρέπει να μεταφερθεί εκτός της φάρμας, καθώς και τον κίνδυνο μόλυνσης της επιφάνειας του εδάφους και του νερού.

Οι Chae και συνεργάτες [76], λαμβάνουν σαν κριτήριο σχεδιασμού, μεσόφιλης AX διαλείποντος έργου για επεξεργασία SM, την αξιολόγηση των επιπτώσεων των ζωοτροφών και των διαφορετικών θερμοκρασιών χώνευσης στην απόδοση του βιοαερίου. Για 25°C με 20 μέρες HRT και μετατροπή των VS 44%, η απόδοση μεθανίου είναι 0.317 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS. Για 35°C με 20 ημέρες HRT, και 61% μετατροπή VS παρατηρήθηκε υψηλότερη απόδοση μεθανίου 0.437 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS. Τα αποτελέσματα αυτά δηλώνουν ότι η θερμοκρασία της χώνευσης επηρεάζει την απόδοση και την συνολική απόδοση του βιοαντιδραστήρα.

Ο Ferrer με τους συνεργάτες του [77] μελέτησαν την απόδοση αντιδραστήρα διαλείποντος έργου πιλοτικής κλίμακας για επεξεργασία PM (6% TS) αραιωμένο σε ούρα χοίρου. Παρατηρήθηκε υψηλής απόδοσης παραγωγή βιοαερίου 0.262m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS, με σχεδόν 50% περιεκτικότητα σε μεθάνιο για HRT 80 ημερών. Ωστόσο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν όταν το PM ήταν αραιωμένο σε νερό, σε ψυχρόφιλη κατάσταση, για HRT 80 ημερών, εμφανίστηκε μια χαμηλότερη απόδοση βιοαερίου 0.207 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS με 22% περιεκτικότητα σε

μεθάνιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν τη σκοπιμότητα της χρήσης ούρων αντί νερού στην αραίωση του PM.

Τα τελευταία έτη υπάρχουν πολλά παραδείγματα πειραμάτων συνχώνευσης των SM με διαφορά προϊόντα αποβλήτων που έχουν δείξει θετικά αποτελέσματα. Από τις μελέτες που πραγματοποιούνται την κοινή χώνευση των αποβλήτων των χοίρων παρουσιάζεται βελτίωση της ισορροπίας των θρεπτικών συστατικών και της ρυθμιστικής ικανότητας των συστημάτων, με αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση βιοαερίου.

Η μελέτη των Kararaju και Rintala [78], αξιολογεί τη δυνατότητα της κοινής χώνευσης PM με κονδύλους πατάτας και υποπροϊόντων (φλούδες πατάτας κτλ) σε τρεις CSTRs στους 35°C. Τα αποτελέσματά παρουσιάζουν OLR 2 kgVS m<sup>-3</sup> day<sup>-1</sup> με μια αύξηση παραγωγής μεθανίου από 0.21 σε 0.24 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> VS σε αναλογία VS 85:15 (PM και κονδύλων πατάτας). Η περαιτέρω αύξηση της αναλογίας VS 80:20 οδήγησε σε 30% αύξηση στην παραγωγή μεθανίου με απόδοση μεθανίου 0.30 και 0.33 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> VS.

Οι Zhang και συνεργάτες [79], μελέτησαν σε εργαστηριακή κλίμακα τη επεξεργασία κοσκινισμένων αποβλήτων χοίρων και γαλακτοκομικών αποβλήτων σε ASBR δύο σταδίων με HRT 6 ημερών. Η λειτουργία απόδοσης υπολογίζεται αρχικά σε μεσόφιλες (35°C) και έπειτα σε θερμοφιλες (55°C)/μεσόφιλες (35°C) συνθήκες. Συμπεραίνεται ότι το σύστημα της 55°C/35°C είχε καλύτερη απόδοση στην επεξεργασία των γαλακτοκομικών προϊόντων και SM έχοντας 6-15% περισσότερο απομάκρυνση VS από το σύστημα στους 35°C.

Από τους Boe και συνεργάτες [80], διερευνήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα η επίδραση της θερμοκρασίας στη απόδοση της AX σε θερμοκρασίες 55°C, 37°C, και 15°C, αντίστοιχα, σε σύστημα CSTR επεξεργασίας κοπριάς χοίρων και αγελάδων. Παρατηρήθηκε σχεδόν παρόμοιο περιεχόμενο μεθανίου στο βιοαέριο, περίπου 70% σε όλες τις θερμοκρασίες χώνευσης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται αύξηση του βιοαερίου κατά 8-12% από τους αντιδραστήρες που

λειτουργούν σε 55°C και 37°C, γεγονός που υποδεικνύει τη σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στη απόδοση της χώνευσης.

Από τους Lansing και συνεργάτες [81] διερευνήθηκε η απόδοση σε PFR αναερόβιας συνχώνευσης SM και μαγειρικού λίπους (CG). Επιτεύχθηκε υψηλή απόδοση μεθανίου  $0.31 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  με αναλογία μίξης 2.5% όγκου λίπους με OLR  $0.78 \text{ kgVS m}^{-3}\text{day}^{-1}$ , σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για HRT 40 ημερών. Διαπιστώθηκε επίσης μια αναλογία μίξης με 5% και 10% μόλυβδο έχει μεγαλύτερη παραγωγή οργανικής ύλης αλλά χαμηλότερη απόδοση. Ωστόσο, η υψηλότερη απόδοση που παρατηρήθηκε στο εσωτερικό του αντιδραστήρα ήταν για συντελεστή μίξης 2.5% και είναι παρόμοια με τα χωνευτήρια σε εργαστηριακή κλίμακα όπως αναφέρει ο Moller και οι συνεργάτες του. Ως εκ τούτου, τα παράγωγα αποβλήτων λίπους μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία για τα χωνευτήρια χαμηλού κόστους.

Από τους Francese και συνεργάτες [82], διερευνήθηκε η AX μίγματος PM με απόβλητα ψαριών και απορριμμάτων μπεντονίτη, σε εργαστηριακής κλίμακας χωνευτήρα, συνεχούς ανάδευσης σε θερμοκρασία 30°C και HRT 15 ημερών. Παρήχθει βιοαέριο με μεγίστη περιεκτικότητα σε μεθάνιο περίπου 74% και μέση περιεκτικότητα 65%.

Στον πίνακα 18 παρακάτω, παρουσιάζονται οι αποδόσεις των διεργασιών AX κτηνοτροφικών απορριμμάτων χοίρων. Όπως φαίνεται, οι περισσότερες των μελετών αφορούν την συνχώνευση κοπριάς χοίρων (SM), με άλλες πρώτες ύλες. Μέσω αυτών των τεχνικών, παρατηρείτε βελτίωση στην ισορροπία θρεπτικών συστατικών και ρυθμιστικής ικανότητα κατά τις διεργασίες της χώνευσης. Οι περισσότερες μελέτες διεξήχθησαν σε μεσόφιλες θερμοκρασίες μεταξύ 22 °C και 37°C και σε μια μελέτη διερευνάται η επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στην παραγωγή βιοαερίου. Το HRT κυμαίνεται από 0.9 έως 80 ημέρες, ενώ το OLR από  $0.34$  έως  $12 \text{ kgVS m}^{-3}\text{day}^{-1}$  και η υψηλότερη μετατροπή VS, 77% και 95% επιτεύχθηκαν σε αντιδραστήρες ASBR, PFR αντίστοιχα. Αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, CSTR, UASB, ASBR, PFR, συστήματα ενός και δύο σταδίων χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία για τη AX του SM.

Αντιδραστήρας	Υπόστρωμα	Θερμ. (°C)	OLR (kgVSm <sup>-3</sup> day <sup>-1</sup> )	HRT (day)	Αφαίρεση VS COD (%)	CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VS	Βιοαέριο (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VS)	% CH <sub>4</sub>
Batch 0.058 L	SM	55		20		0.067		
Batch+ανάδ 565 L	Υδαρής PM	35	0.8	60	61	0.176		50
Batch 245 L	Υδαρής PM	35	1.45	60	65	0.165		45
UASB 26 L	PM	35	12.39	0.9- 3.6	75% COD			77
Διάσπαρτη AX 380 L	Υγρή SM	35	15- 15.42	5,3,2,1	51.6%VS1day 34.5%VS2day	0.36-0.222 (5-2 day)		63.4-59.5 (5-2 day)
1-2 φάσεις	SM	37		15		0.510-0.640		
1-φ χαμηλών στερεών 130 L	SM	53	4	22.8	52% VS	0.320		71
2-φ υψηλών στερεών 130 L	SM	55/34	4	20.5	44% VS	0.203		65
ASBR 42 L	SM	10-20	1.2- 1.1	15	45.4%VS-54.2% VS	0.08-0.266		81-75
ASBR 41 L	SM	17	4	28	77% VS			69
Batch 12 L	SM	25-35		20	44- 61	0.317-0.437		44- 60
Batch 225 L	SM+νερό - SM+ ούρα	22.6- 32.5		80			0.207- 0.262	22-49
3- CSTR 5 L	PM+πατάτα+υποπρ.	35	2-3	26-27		0.3-0.33(80:20VS)		60
2 φάσεις ASBR	SM+γαλακτοκομικά	55/35-35/35	1,2,3,4	6	6-15%επιπλέων VS(55/35)			
CSTR 9 L	SM+ CM	55		15		0.307		70
PFR 250 L	SM- SM+CG	26	0.34- 0.78	40	90.5- 95.4 %VS	0.290-0.310		70-54
CSTR 5 L	PM+ιχθυέλαιο+μπετον.	30	60kgVSday <sup>-1</sup>	15	56% VS		0.249	66

Πίνακας

18.

Αποδόσεις

αντιδραστήρων

SM

### 3.2.3 Χρήση αναερόβιων βιοαντιδραστήρων για την χώνευση αποβλήτων πουλερικών.

Τα απόβλητα πουλερικών χαρακτηρίζονται από στερεό περιεχόμενο σε ποσοστό 20-25% και από υψηλό ποσοστό βιοαποδομήσιμης ύλης, πλούσια σε οργανικό άζωτο και σχετικά χαμηλή πηγή άνθρακα. Αυτό οδηγεί σε αργή και όχι ικανοποιητική απόδοση της ΑΧ που συνοδεύεται από όξινηση, η οποία επηρεάζει το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου [83]. Ως εκ τούτου, η συνδυασμένη χώνευση των απόβλητων από πουλερικά, με διάφορα απόβλητα είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την μεγιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου.

Από τους Bujoczek και συνεργάτες [84], μελετήθηκε η χώνευση αποβλήτων από κοτόπουλα (CHM), με μέγιστη περιεκτικότητα σε στερεά 10%. Κατά τη διεργασία εμφανίστηκε συσσώρευση αμμωνίας λόγω μετατροπής του περιεχόμενου οργανικού αζώτου πράγμα που ανέστειλε την πρόοδο της διεργασίας. Η υψηλότερη απόδοση μεθανίου  $0.548 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  μετρήθηκε σε εργαστηριακό αντιδραστήρα ΑΧ υπό μεσόφιλες συνθήκες με HRT 15 ημερών, 100% νωπού CHM αραιωμένο με 5% TS. Συμπεραίνεται ότι ο συντελεστής αραίωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του αντιδραστήρα της αναερόβιας επεξεργασίας CHM.

Οι Gungor-Demirci και Demiret [85], εξέτασαν τη σκοπιμότητα της αναερόβιας επεξεργασίας και το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου από κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής και CM. Αναφέρεται απόδοση βιοαερίου 0.18-0.27  $\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{COD}$  και 0.223-0.368  $\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{COD}$  για αρχική συγκέντρωση COD 12 και 53 g/L, αντίστοιχα και μετατροπές COD κατά 32-43.3% και 37.9-50% στις προαναφερθείσες αρχικές συγκεντρώσεις.

Από τους Magbanua Jr. και συνεργάτες [86], μελετήθηκε η συνδυασμένη χώνευση αποβλήτων από γουρούνα και πουλερικά σε χωνευτήρα διαλείποντος έργου υπό μεσόφιλες συνθήκες με HRT μέχρι 95 ημέρες. Λόγω της υπερβολικής

συγκέντρωσης VFA που παρεμποδίζει τη δραστηριότητα της μεθανογένεσης παρουσιάστηκε μειωμένη παραγωγή μεθανίου  $0.2\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ .

Από τους Bujoczek και συνεργάτες [84], μελετήθηκε η συνδυασμένη χώνευση υπό θερμοφίλες συνθήκες σε εργαστηριακό αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, CHM και χωνευμένης λάσπης (10.3% TS) με HRT 33 ημερών, όπου παρατηρήθηκε υψηλή απόδοση μεθανίου  $0.473\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ . Συμπεραίνεται ότι απόβλητα μεγάλης περιεκτικότητας σε οργανικό άζωτο και στερεά, απαιτούν μεγάλο χρόνο εγκλεισμού.

Οι Abouelenie και συνεργάτες [87], ασχολήθηκαν με την απόρριψη της αμμωνίας στην AX της CHM. Υπό θερμοφίλες συνθήκες και με HRT 55 ημέρες, επετεύχθη μια σημαντική απόδοση μεθανίου  $0.103\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ . Αυτή η απόδοση είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη για την AX νωπού CHM (21.7% TS) και πολύ υψηλότερη από αυτή της συνδυασμένης χώνευσης αποβλήτων γουρουνιών και πουλερικών (17.4% TS) με παραγωγή μεθανίου  $0,009\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ . Επιπλέον από αυτή την ομάδα μελετήθηκε η AX σε χωνευτήρα διαλείποντος έργου, με πρώτη ύλη CHM από όπου είχε απομακρυνθεί η αμμωνία. Το σύστημα μελετήθηκε σε θερμοφιλικές συνθήκες με HRT 10 ημερών παράγοντας μεθάνιο  $0.195\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ . Η απομάκρυνση της αμμωνίας είναι μια νέα τεχνολογία που μειώνει το συνολικό κόστος της χώνευσης σε αντιδραστήρες ενός σταδίου, για την επεξεργασία αποβλήτων πουλερικών με χαμηλό HRT.

Από τους Lazog και συνεργάτες [89], πραγματοποιήθηκαν αναερόβιες διακοπτόμενες δοκιμές συνδυασμένης χώνευσης, αποβλήτων πουλερικών και οικιακών ελαίων στους  $37^\circ\text{C}$  με HRT 305 ημερών με OLR από 0.3 έως  $1.2\text{kg VS m}^{-3}\text{day}^{-1}$ . Παρατηρήθηκε αναστολή της διεργασίας, λόγω της ελεύθερης αμμωνίας κατά την 175η ημέρα η οποία οδήγησε στη μείωση της παραγωγής βιοαερίου στο  $200\text{-}300\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  ανά ημέρα, όπου πριν από την αναστολή διατηρούνταν μεταξύ 400 και  $600\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  ανά ημέρα. Συμπεραίνεται ότι η υψηλή συγκέντρωση ελεύθερης αμμωνίας έχει σημαντική ανασταλτική επίπτωση στην αναερόβια διεργασία για την συνδυασμένη χώνευση της κοπριάς

πουλερικών και των ορυκτελαίων της κουζίνας επειδή πάνω από 1130 mgNH<sub>3</sub>/L ελεύθερης αμμωνία εντοπίστηκε κατά τη διάρκεια της χώνεψης.

Από τους Ahozie και συνεργάτες [90], διεξήχθη έρευνα σε τέσσερις τύπους γεωργικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των περιττωμάτων πουλερικών, κοπριάς, καλαμποκιού, και συνδυασμών τους. Χρησιμοποιήθηκε βιοαντιδραστήρας διαλείποντος έργου πιλοτικής κλίμακας, με θερμοκρασία λειτουργίας μεταξύ 20°C και 29°C με HRT 40 ημερών. Στη μελέτη αναφέρεται ότι η παραγωγή βιοαερίου ογκομετρικά (0.00356 m<sup>3</sup>kg<sup>-1</sup>VS) από περιττώματα πουλερικών ήταν υψηλότερης αξίας.

Από τους Atuanya και Aigbirior [91], μελετήθηκε η χρήση UASB αντιδραστήρα για την επεξεργασία λυμάτων πουλερικών. Χρησιμοποιήθηκε UASB αντιδραστήρας πιλοτικής κλίμακας σε θερμοκρασίες μεταξύ 26°C και 34°C με HRT 90 ημερών. Επετεύχθη παραγωγή βιοαερίου με 0.26m<sup>3</sup> μεθανίου kg<sup>-1</sup>COD και OLR ανά ημέρα 2.9 kgCODm<sup>-3</sup> σε συνεχή λειτουργία 95 ημερών στους 30°C.

Στον Πίνακα 19 αποτυπώνονται συνοπτικά τα δεδομένα της απόδοσης από την επεξεργασία διαφόρων ειδών αποβλήτων πουλερικών των παραπάνω μελετών. Οι περισσότερες των μελετών διεξήχθησαν σε μεσόφιλες (35-37°C) και θερμόφιλες συνθήκες (55°C). Παρατηρήθηκε όταν τα απόβλητα είναι χωνευμένα αρχικά με στερεά, προκαλούν μια μείωση στην απόδοση του αντιδραστήρα ως αποτέλεσμα της συσσώρευσης της αμμωνίας, αλλά η αναστολή αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με αραίωση τους σε χαμηλό % TS ή με την συνδυασμένη χώνευση τους με άλλου τύπου απόβλητα.

Αντιδραστήρας	Υπόστρωμα	Θερμ. (°C)	OLR kgVS m <sup>-3</sup> day <sup>-1</sup>	HRT (day)	Αφαίρεση VS ή COD (%)	CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VS	Βιοαέριο m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VS	% CH <sub>4</sub>
Batch 0.16 L	CHM- CHM+ ιλύος	35		15-33		0.548-0.473		70-41
Batch 0.125 L	CHM+SM	35		113		0.130	0.2	
Batch 0.125 L	CHM+ σπόρος ιλύος	55-37		55		0.103-0.031		55-30
Batch 0.5 L	CHM	55		10		0.195		67
Ημι-συνεχείς	Πουλερικών+ απόβλητα λαδιών κουζίνας	37		305			400-600 m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> VSday <sup>-1</sup>	52
Batch πιλοτικής κλίμακας 0.28m <sup>3</sup>	Περιπτώματα πουλερικών+ αγροτικά απόβλητα	25-29		40			0.00356	
UASB 3.5 L	Λήμματα πουλερικών	26-34	2.9 kgCOD m <sup>-3</sup> day <sup>-1</sup>	13.2h	78% COD	0.26 m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> COD		

Πίνακας 19. Αποδόσεις διάφορων αντιδραστήρων και διάφορων συνθηκών CHM [31]

### 3.2.4 Συμπερασματικά σχόλια

Σύμφωνα με τους IsmailM. Nasir, Tinal. MohdGhazi και RozitaOmar [31] η AX τον κτηνοτροφικών απόβλητων έχει αποδειχθεί ότι είναι αποδοτική επιλογή για την παραγωγή βιοαερίου. Οι περισσότερες των μελετών AX κτηνοτροφικών αποβλήτων διεξήχθησαν σε διαφορετικούς τύπους αντιδραστήρων με ποικιλία λειτουργικών παραμέτρων, όπως θερμοκρασία, OLR και HRT. Τα αποτελέσματα αυτών των παραμέτρων για την απόδοση της διεργασίας είναι πολύ σημαντικά. Σε πολλές περιπτώσεις, αστάθεια του pH ή της θερμοκρασίας και παρουσία τοξικών ουσιών μπορούν να παρεμποδίσουν τη διαδικασία της χώνευσης. Ως εκ τούτου, οι στρατηγικές συστηματικού ελέγχου της διεργασίας μπορούν να



βοηθήσουν στην επίλυση των λειτουργικών προβλημάτων. Από τα στοιχεία των μελετών που αναλύθηκαν παραπάνω εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

I. Ως επί το πλείστον οι αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες είναι απλοί στο σχεδιασμό και τη λειτουργία τους και διατηρούν μια σταθερή απόδοση.

II. Η συνδυασμένη χώνευση επιτρέπει την ισορροπημένη λειτουργία των διεργασιών, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση βιοαερίου με μια αποτελεσματική απόδοση του βιοαντιδραστήρα.

III. Επιτυγχάνεται διαχωρισμός του σταδίου της υδρόλυση και του σταδίου της μεθανογένεσης, πράγμα σημαντικό για την βέλτιστη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα.

IV. Η απόδοση του μεθανίου του CM κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και  $0.37\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  και η μετατροπή των VS μπορεί να φτάσει το 78%. Επίσης παρατηρείται αύξηση της απόδοσης έως και 15-20%, με την συνδυασμένη χώνευση γαλακτοκομικών αποβλήτων.

V. Η τυπική απόδοση μεθανίου από SM κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και  $0.44\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$  και η μετατροπή των VS μπορεί να φτάσει το 95%.

VI. Η AX απόβλητων πουλερικών εμφανίζει μέτριο δυναμικό στην παραγωγή βιοαερίου, παρουσιάζοντας μεγίστη απόδοση ως επί το πλείστον σε βιοαντιδραστήρες διαλείποντος έργου (συνήθως σε ολικά στερεά <5%). Επίσης η συσσώρευση αμμωνίας αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα της διεργασίας λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άζωτο των αποβλήτων CHM, γεγονός που εν μέρει αντιμετωπίζεται. Η απόδοση μεθανίου κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και  $0.5\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{VS}$ .

### **3.3 Ενεργειακό και θρεπτικό δυναμικό των ζωικών αποβλήτων στην Ελλάδα**

#### **3.3.1 Εισαγωγή**

Σύμφωνα με τα πρακτικά του 3ου πανελληνίου συνεδρίου γεωργικής μηχανικής ο κ. Μιχάλης Μαρδίκης παρουσίασε το Ενεργειακό και θρεπτικό δυναμικό των ζωικών αποβλήτων στην Ελλάδα.

Η σύγχρονη μορφή της βιομηχανίας παραγωγής ζωικών προϊόντων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που προκαλούν περιβαλλοντικά προβλήματα. Κύρια αιτία θεωρείται η εντατικοποίηση της παραγωγής η οποία οδήγησε στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων που διατίθενται ανεπεξέργαστα και σχεδόν ανεξέλεγκτα στους εδαφικούς και υδατικούς αποδέκτες.

Όμως τα κτηνοτροφικά απόβλητα αποτελούν μία αξιόλογη πηγή θρεπτικών στοιχείων, απαραίτητων για την ανάπτυξη των φυτών. Παρόλα αυτά το μεγαλύτερο μέρος της θρεπτικής αξίας τους δεν χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των φυτών επειδή χάνονται είτε πριν να ανακυκληθούν ή πριν να μετατραπούν σε μορφή προσλήψιμη από τα φυτά.

Πριν τη διάθεση των αποβλήτων πρέπει απαραίτητα να έχει πραγματοποιηθεί επεξεργασία τους ώστε να μειωθεί το ρυπαντικό τους φορτίο. Μεταξύ των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα, η ΑΧ φαίνεται να ενδείκνυται στη περίπτωση των ζωικών αποβλήτων γιατί μειώνει σημαντικά το ρυπαντικό φορτίο των αποβλήτων και οι παραγωγοί μπορούν να εξασφαλίσουν πρόσοδο από την εκμετάλλευση των προϊόντων της ΑΧ. Το οικονομικό όφελος που θα προκύψει έγκειται στην ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου και στην πώληση της χωνεμένης λάσπης ή των

παραγώγων της για την κάλυψη των θρεπτικών αναγκών των καλλιεργειών. Η ΑΧ παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα.

Επιπροσθέτως, η αξιοποίηση των ζωικών αποβλήτων αναμένεται να έχει σημαντική συνεισφορά στην επίτευξη των στρατηγικών στόχων της εθνικής ενεργειακής στρατηγικής. Συγκεκριμένα στα πλαίσια της πολιτικής που έχει αναπτυχθεί γίνεται λόγος για την ασφάλεια και αξιοπιστία του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας. Έως τώρα, η Ελλάδα είναι ενεργειακά εξαρτώμενη χώρα με συνέπειες την εκροή σημαντικού μέρους των εθνικών πόρων για την εξασφάλιση ορυκτών καυσίμων και την ευαισθησία στις μεταβολές του παγκόσμιου ενεργειακού σκηνικού. Η παραγωγή και ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου θα εξασφαλίσει, εν-μέρει, την επιθυμητή ποικιλότητα στις χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας και στις πηγές εφοδιασμού.

Επίσης, η αντικατάσταση μέρους των χημικών λιπασμάτων από ΧΛ εικάζεται ότι μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Επομένως το συνολικό όφελος από την αξιοποίηση των ζωικών αποβλήτων αναμένεται να είναι η συμβολή τους, ως μέρος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στη μείωση των κινδύνων που συνδέονται με την ενεργειακή εξάρτηση. Ο σκοπός είναι να εκτιμήσουμε το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου και θρεπτικών στοιχείων που μπορεί να εξοικονομηθεί από τα ζωικά απόβλητα, από μεσαίου και μεγάλου μεγέθους πτηνοτροφικές και κτηνοτροφικές μονάδες, επεξεργαστούν σε μονάδες ΑΧ.

### **3.3.2 Αποτελέσματα**

Το σύστημα πτηνό-κτηνοτροφικής παραγωγής στην Ελλάδα αποτελείται κύρια από την εκτροφή προβάτων, αιγών, αγελάδων, χοίρων και πουλερικών. Ωστόσο η προβατοτροφία και αιγοτροφία είναι εκτατικές μορφές κτηνοτροφίας και έτσι η παραγόμενη κοπριά διασπείρεται σε όλη την έκταση του βοσκότοπου. Η εντατική εκτροφή αποτελείται κυρίως από την αγελαδοτροφία, χοιροτροφία και την πτηνοτροφία.

Βάσει των στοιχείων από την απογραφή του ζωικού κεφαλαίου της Αγροτικής Τράπεζας ο συνολικός αριθμός των μεσαίου και μεγάλου μεγέθους βουστασίων, χοιροτροφείων και ορνιθοτροφείων καθώς επίσης και των εκτρεφόμενων κεφαλών παρουσιάζονται παρακάτω.

Από τις 803 συνολικά μονάδες, το μεγαλύτερο μέρος αναφέρεται στην εκτροφή αγελάδων (355) ενώ οι μονάδες εκτροφής χοίρων και κοτόπουλων είναι 277 και 171, αντίστοιχα. Όσον αφορά τον αριθμό των σιτιζόμενων ζώων αυτός ανέρχεται σε 68066, 100780 και 21524400 κεφαλές για αγελάδες, χοίρους και κοτόπουλα, αντίστοιχα.

Η εντατική κτηνοτροφία παράγει ημερησίως 3227.9 491.8 και 1987.1m<sup>3</sup> από αγελάδες, χοίρους και όρνιθες, αντίστοιχα. Στο σχήμα απεικονίζεται η κατανομή της ημερήσιας παραγωγής ζωικών αποβλήτων. Οι νομοί όπου η ημερήσια παραγωγή υπερβαίνει το 5% της συνολικής ημερήσιας εγχώριας παραγωγής ζωικών αποβλήτων είναι, κατά αύξουσα σειρά, Λάρισας, Ιωαννίνων, Ημαθίας, Εύβοιας, Θεσσαλονίκης και Αττικής με ποσοστά 5.7, 7.2, 7.5, 8.7, 14.5 και 15.3%, αντίστοιχα.

Πίνακας 20. Συνολικός αριθμός μεσαίου-μεγάλου μεγέθους μονάδων, εκτρεφόμενα ζώα και ημερήσια παραγωγή αποβλήτων και θρεπτικών στοιχείων [17].

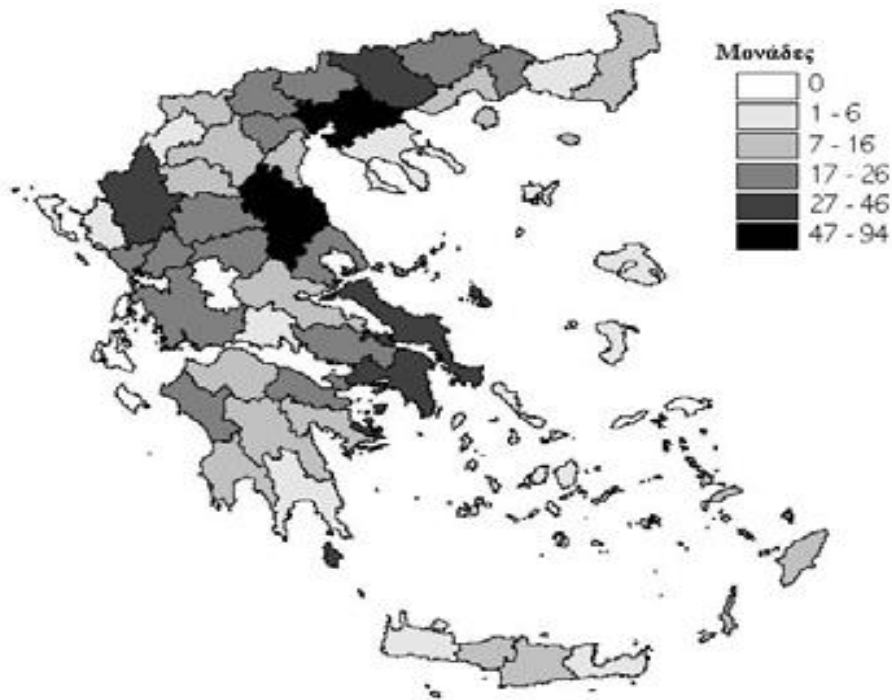
	Μονάδες	Κεφαλές	Όγκος αποβλήτων (m <sup>3</sup> /ημέρα)	Παραγωγή βιοαερίου (m <sup>3</sup> /ημέρα)	N (t/ημ.)	P (t/ημ.)	K (t/ημ.)
Αγελάδες κρεατο/γής	78	12582	724.72	10484.58	3.62	0.74	2.34
Αγελάδες γαλα/γής	240	36241	2087.48	30199.63	10.44	2.13	6.73
Μόσχοι	37	19243	415.65	16035.19	2.36	0.64	1.45
Χοίροι	277	100780	491.81	9523.71	3.20	1.13	1.78
Πουλερικά Πάχυνσης	79	16110000	1304.91	96660.00	15.95	4.35	5.80
Όρνιθες	72	4180900	526.79	58950.69	6.32	2.26	2.26

ωο/γής							
Όρνιθες ανα/γής	20	1233500	155.42	17392.35	1.87	0.67	0.67
Σύνολο	803	21.693.246	5.706,78	239.246,15	43,75	11,92	21,02

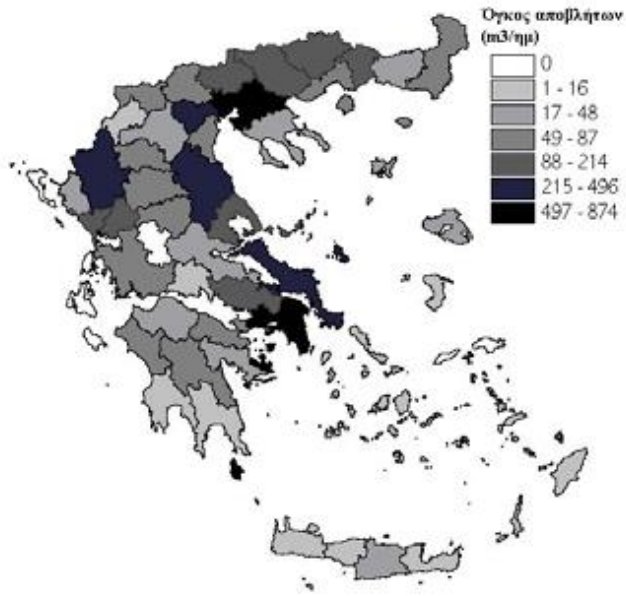
Οι ημερήσιες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων που βρίσκονται στα ζωικά απόβλητα εκτιμήθηκαν με βάση δημοσιευμένους πίνακες. Σύμφωνα με αυτές τις τιμές η αγελαδοτροφία μπορεί να συνεισφέρει στη παραγωγή 16.4 t N/ημέρα, 3.5 t P/ημέρα και 10.5 t K/ημέρα. Η εκτροφή χοίρων μπορεί να παράγει 3.2, 1.1 και 1.8 t/ημέρα των στοιχείων άζωτο, φωσφόρο και κάλιο, αντίστοιχα. Στα σχήματα παρουσιάζονται οι κατανομές των θεωρητικών ποσοτήτων N, P και K, αντίστοιχα που μπορούν να παραχθούν ημερησίως από μεσαίου και μεγάλου μεγέθους μονάδες σε κάθε νομό της χώρας. Η μεγαλύτερη παραγωγή αζώτου (από όλες τις μονάδες) υπολογίσθηκε ότι πραγματοποιείται στους νομούς της Αττικής, Εύβοιας, Θεσσαλονίκης, Ιωαννίνων και Ημαθίας αφού σε αυτές τις περιοχές η ημερήσια παραγωγή ανά νομό ανέρχεται στους 8.0, 5.4, 4.9, 4.4 και 2.3 tN, αντίστοιχα. Όσον αφορά τις περιοχές με τη μεγαλύτερη παραγωγή φωσφόρου, αυτές είναι η Αττική, Εύβοια, Ιωάννινα και Θεσσαλονίκη στις οποίες παράγονται 2.4, 1.7, 1.3 και 1.2 tP/ημέρα, αντίστοιχα.

Τέλος, όσον αφορά το κάλιο, οι νομοί της Αττικής, Θεσσαλονίκης, Εύβοιας, Ιωαννίνων, Ημαθίας, και Λάρισας φαίνεται να έχουν το υψηλότερο δυναμικό, ανερχόμενο σε 3.4, 2.8, 2.1, 1.7, 1.5 και 1.1 tK/ημέρα, αντίστοιχα. Η ΑΧ αλλάζει σε ελάχιστο βαθμό το περιεχόμενο σε θρεπτικά στοιχεία της ΧΛ σε σχέση με τα ακατέργαστα ζωικά απόβλητα. Επίσης η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων που περιέχονται στη ΧΛ για χρήση τους από τα φυτά κυμαίνεται μεταξύ 30 και 60% για το άζωτο, 50% για το φωσφόρο και 75-100% για το κάλιο. Στηριζόμενοι στις παραπάνω παραδοχές θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι κάθε χρόνο 4790-9581 t αζώτου, 2175 t φωσφόρου και 5755-7673 t καλίου θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από τα φυτά για την ανάπτυξη τους. Συνεπώς οι αντίστοιχες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα χημικά

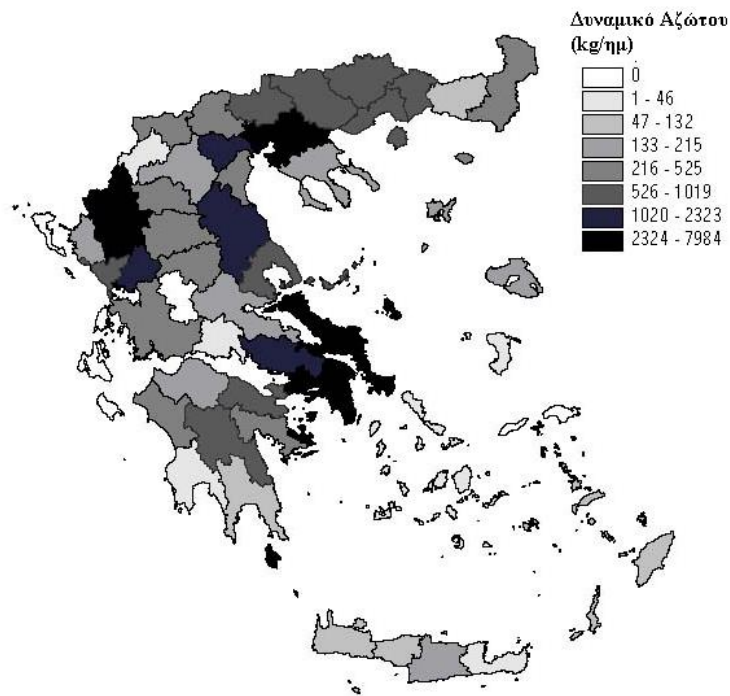
λιπάσματα. Όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου αυτή εκτιμήθηκε ότι μπορεί να ανέλθει ημερησίως στα  $239246\text{m}^3$  με ισοδύναμο ενεργειακό περιεχόμενο μεγαλύτερο από 200 ΤΙΠ. Ετησίως δύναται να παραχθούν 5.6PJ που θα κάλυπταν το 0.7% των συνολικών ενεργειακών αναγκών. Τέλος αναφορικά με την κατανομή ανά νομό της παραγωγής βιοαερίου και της δυνητικής εξοικονόμησης ενέργειας αυτή παρουσιάζεται στα σχήματα 6 και 7 αντίστοιχα. Όπως αναμένονταν η κατανομή είναι ανάλογη σε σημαντικό βαθμό της αντίστοιχης των ζωικών αποβλήτων. Συγκεκριμένα στους νομούς Αττικής, Εύβοιας, Ιωαννίνων και Θεσσαλονίκης δύναται να παραχθούν οι μεγαλύτερες ποσότητες βιοαερίου ανερχόμενες σε 54921, 33274, 27852 και 21433  $\text{m}^3/\text{ημέρα}$ , αντίστοιχα. Το αντίστοιχο ενεργειακό περιεχόμενο ανά νομό είναι 1324026, 753953, 638219 και 513341 MJ/ημέρα.



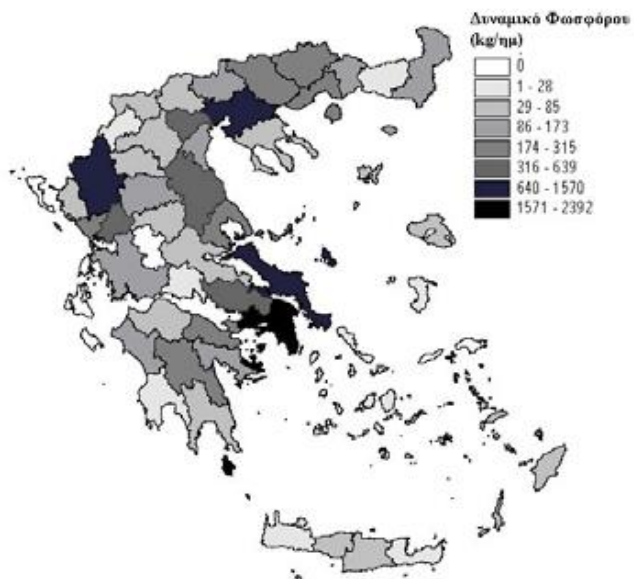
Σχήμα 10. Κατανομή μεσαίου-μεγάλου μεγέθους κτηνοτροφικών και πτηνοτροφικών μονάδων [17]



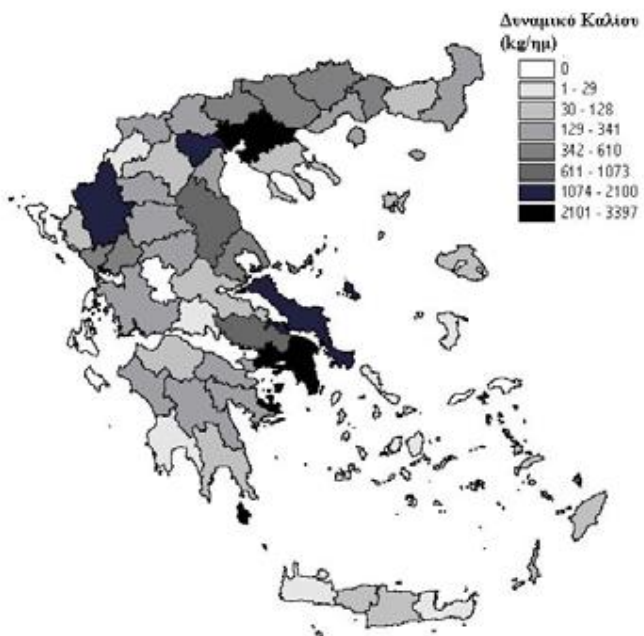
Σχήμα 11. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής ζωικών αποβλήτων (m<sup>3</sup>/ημέρα) ανά νομό [17]



Σχήμα 12. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής αζώτου (kgN/ημέρα) [17].

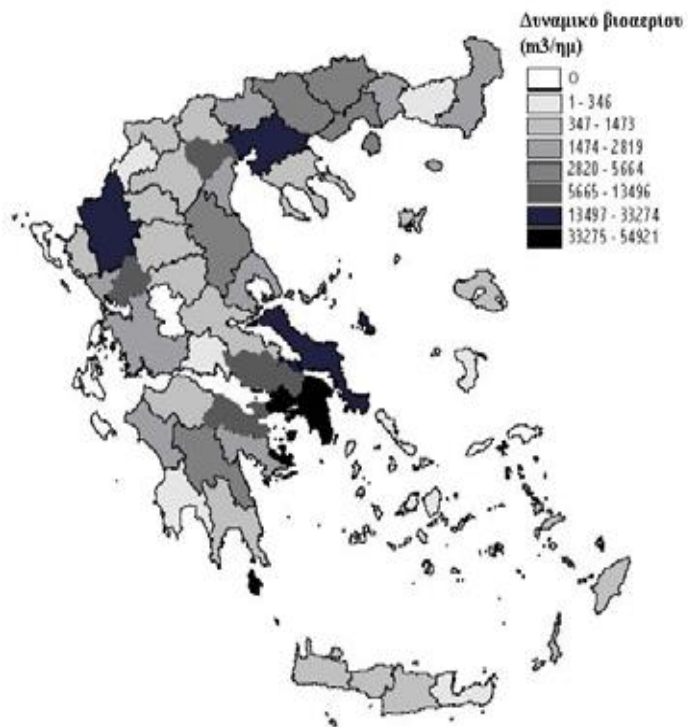


Σχήμα 13. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής φωσφόρου (kg P/ημέρα) [17].

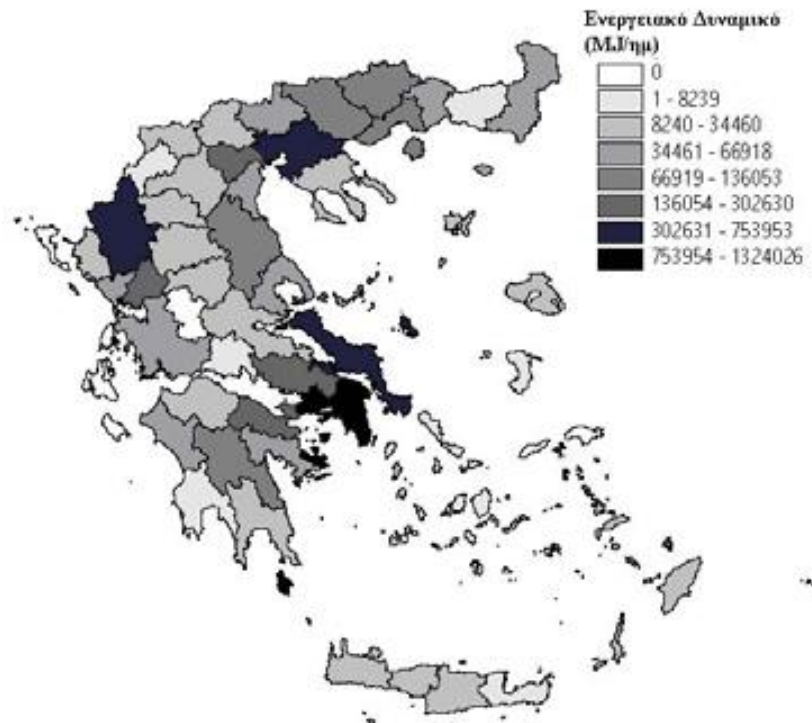


Σχήμα 14. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής καλίου (kg K/ημέρα) [17].





Σχήμα 15. Δυναμικό ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου (m<sup>3</sup>/ημέρα) [17].



Σχήμα 16. Ημερήσιο ενεργειακό δυναμικό (MJ/ημέρα) [17].

### 3.3.3 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα ζωικά απόβλητα αποτελούν μια πολύτιμη πηγή ενέργειας και θρεπτικών στοιχείων που θα πρέπει να εκμεταλλευτεί άμεσα. Αν μάλιστα αναφερθεί ότι σε αρκετές τεχνολογικά προηγμένες χώρες, η από κοινού ΑΧ ζωικών αποβλήτων με φυτικά υπολείμματα ή και αγροτοβιομηχανικά απόβλητα κερδίζει συνεχώς έδαφος τότε γίνεται σαφές ότι το δυναμικό βιοαερίου και θρεπτικών στοιχείων είναι πολλαπλάσιο του υπολογιζόμενου στα πλαίσια αυτής της αναφοράς. Η ενεργειακή αξιοποίηση των ζωικών αποβλήτων θα συνέβαλε στη μείωση της εξάρτησης των κτηνοτρόφων και πτηνοτρόφων από τα ορυκτά καύσιμα ή την ηλεκτρική ενέργεια και την αντίστοιχη εξοικονόμηση πόρων. Επιπλέον το καθαρό εισόδημα θα μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω από την πώληση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο υπάρχον δίκτυο της ΔΕΗ.

Σε εθνικό επίπεδο, η παραγωγή βιοαερίου και επακολούθως ενέργειας θα έχει σημαντική συνεισφορά στην επίτευξη των στόχων της Κοινοτικής Οδηγίας 96/92 που στοχεύει στην ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς ενέργειας. Ειδικότερα η ενεργειακή αξιοποίηση των ζωικών αποβλήτων θα βοηθήσει στην ενίσχυση του διαχωρισμού μεταξύ παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και φορέων διαχείρισης των δικτύων μεταφοράς. Επίσης θα εξασφαλίσει την πρόσβαση νέων παραγωγών και διανομέων στα δίκτυα μεταφοράς. Η Ελληνική Πολιτεία εναρμονιζόμενη με την κοινοτική πολιτική έχει τροποποιήσει την ενεργειακή της πολιτική με στρατηγικούς στόχους την ασφάλεια και αξιοπιστία του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας και την προστασία του περιβάλλοντος. Η ασφάλεια και αξιοπιστία του ενεργειακού εφοδιασμού μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της ποικιλίας ενεργειακών πηγών και εξασφάλιση ισορροπίας μεταξύ τους, ανά προϊόν και γεωγραφική περιοχή.

Το βιοαέριο, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ), αναμένεται να συμβάλλει στην επίτευξη των στόχων της εθνικής πολιτικής ενέργειας. Το Ελληνικό Κράτος κατανοώντας την επιτακτική ανάγκη διείσδυσης των ΑΠΕ (μεταξύ αυτών και το βιοαέριο) στο ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο έχει εισαγάγει σειρά νομοθετικών αλλαγών και χρηματοδοτικών κινήτρων (π.χ. Ν. 2244/94 και Ν. 2773/99). Με αυτά τα μέτρα ενισχύονται οι επενδύσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ δίνοντας τη δυνατότητα μείωσης του κόστους εγκατάστασης μονάδας ΑΧ που αποτελεί τη σημαντικότερη τροχοπέδη για την αξιοποίηση των ζωικών αποβλήτων.

Εκτός των προαναφερθέντων οφελών από την παραγωγή βιοαερίου, πηγή εισοδήματος θα μπορούσε να αποτελέσει η πώληση της ΧΛ ή των παραγώγων της. Όπως εκτιμήθηκε στα αποτελέσματα η παραγόμενη ΧΛ μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος των θρεπτικών αναγκών των καλλιεργειών. Ο ιδιοκτήτης της μονάδας ΑΧ μπορεί να εξασφαλίσει πηγή εσόδων από την πώληση της ΧΛ στους αγρότες ενώ οι αγρότες θα εξασφαλίσουν ένα αρκετά καλύτερο λίπασμα σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα χημικά λιπάσματα.

Επιπροσθέτως θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αντικατάσταση μέρους των χημικών λιπασμάτων θα συνεισέφερε στη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας αφού, ως γνωστό, η παραγωγή συμβατικών λιπασμάτων είναι αρκετά ενεργειακό και περιβαλλοντικά βλαβερή διαδικασία. Αν αυτά τα οφέλη εκτιμηθούν και προσμετρηθούν με τα υπόλοιπα οφέλη της ΑΧ τότε αναμένεται η ΑΧ να κερδίσει το ενδιαφέρον του αγροτικού, οικονομικού, ενεργειακού και περιβαλλοντικού τομέα. Τέλος, θα πρέπει να αναλογιστούν τα ποικίλα και σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που θα προκύψουν από την ΑΧ των ζωικών αποβλήτων.

## **4 ΣΗΘ(ΣΥΝΔΙΑΣΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)**

### **4.1 Γενικά**

Τα συστήματα Συνδυασμένης παραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ γνωστή και ως Συμπαράγωγή) παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική (ή και μηχανική) και θερμική ενέργεια σε ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο σύστημα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την κοινή πρακτική, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε ένα κεντρικό σταθμό, ενώ χρησιμοποιείται επιτόπιος εξοπλισμός θέρμανσης και ψύξης για την κάλυψη των αναγκών σε μη ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια που ανακτάται σε ένα σύστημα ΣΗΘ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση ή ψύξη στη βιομηχανία ή τα κτίρια. Επειδή η ΣΗΘ εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που σε άλλη περίπτωση θα χανόταν κατά τη συμβατική διακριτή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, η συνολική απόδοση αυτών των ολοκληρωμένων συστημάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των μεμονωμένων συστημάτων [10].

Σύμφωνα με τον οδηγό του ΚΑΠΑ η ΣΗΘ δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη τεχνολογία αλλά περισσότερο μια εφαρμογή τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ή και ψύξης, καθώς και για μηχανική ή και ηλεκτρική ενέργεια των τελικών καταναλωτών. Λόγω των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων, έχουν αναπτυχθεί νέες διατάξεις των συστημάτων ΣΗΘ που τα καθιστούν οικονομικά συμφέροντα σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Οι νέες γενιές των στροβίλων, κυψελών καυσίμου και παλινδρομικών μηχανών συνιστούν το αποτέλεσμα εντατικής και συνδυασμένης έρευνας, ανάπτυξης και επίδειξης, τόσο από ινστιτούτα όσο και από τη βιομηχανία. Τα προηγμένα υλικά και οι τεχνικές σχεδίασης μέσω Η/Υ έχουν αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του εξοπλισμού, μειώνοντας ταυτόχρονα τα κόστη και τις εκπομπές ρύπων.

Η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τη φύση της μη αποδοτική, αφού μετατρέπεται μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας των καυσίμων σε ωφέλιμη ενέργεια. Η σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας με τη ΣΗΘ οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμων και σε μειωμένες εκπομπές ρύπων σε σχέση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η ΣΗΘ αποτελεί μια οικονομικά παραγωγική προσέγγιση για τη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων μέσω της πρόληψης της ρύπανσης, ενώ ο παραδοσιακός έλεγχος της ρύπανσης που επιτυγχάνεται απλά μέσω της επεξεργασίας των καυσαερίων δεν παρέχει κανένα οικονομικό όφελος και, στην πραγματικότητα, μειώνει την απόδοση και την ωφέλιμη παραγωγή ενέργειας.

Η συνολική απόδοση του συστήματος προκύπτει από μια αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας. Δεδομένου ότι από ένα σύστημα ΣΗΘ προκύπτουν δύο ή περισσότερα χρησιμοποιήσιμα ενεργειακά προϊόντα, ο καθορισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης των συστημάτων αυτών είναι πιο σύνθετος από ότι στα απλά συστήματα. Το όλο σύστημα μπορεί να αντιμετωπισθεί ως δύο υποσυστήματα, το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (συνήθως

μια μηχανή ή ένας στρόβιλος) και το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (συνήθως κάποιος τύπος λέβητα). Η απόδοση του συνολικού συστήματος προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας.



Σχήμα 17. Συμβατικό ενεργειακό σύστημα σε σύγκριση με σύστημα συμπαραγωγής [10]

Τα αποδοτικότερα συστήματα ΣΗΘ (με πάνω από 80% συνολικό βαθμό απόδοσης) είναι εκείνα που ικανοποιούν μεγάλη θερμική ζήτηση με την ταυτόχρονη παραγωγή σχετικά μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος. Όσο αυξάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία της ανακτώμενης ενέργειας, τόσο μειώνεται ο λόγος της παραγόμενης ισχύος προς τη θερμότητα. Η μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική για τα οικονομικά της ΣΗΘ, καθώς η διάθεση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά είναι τεχνικά ευκολότερη απ' ό,τι είναι στην περίπτωση της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας.

Η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) είναι η τυπική εφαρμογή του βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες και θεωρείται ως μια πολύ αποδοτική χρήση του βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας. Πριν από τη μετατροπή της ΣΗΘ, το βιοαέριο στραγγίζεται και ξηραίνεται. Οι περισσότερες μηχανές αερίου έχουν μέγιστα όρια για το

σουλφίδιο υδρογόνου, τους αλογονημένους υδρογονάνθρακες και τις σιλοξάνες στο βιοαέριο. Μια μονάδα ΣΗΘ που χρησιμοποιεί μηχανή εσωτερικής καύσης έχει αποδοτικότητα μέχρι 90% και παράγει 35% ηλεκτρική ενέργεια και 65% θερμότητα.

Η πιο συνήθης εφαρμογή των μονάδων ΣΗΘ είναι οι θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής τύπου κορμού (BTTP) με κινητήρες καύσης που συνδέονται με μια γεννήτρια. Οι γεννήτριες έχουν συνήθως μια σταθερή ταχύτητα περιστροφής (1500 περιστροφές ανά λεπτό) προκειμένου να είναι συμβατές με τη συχνότητα του δικτύου. Οι κινητήρες μπορούν να είναι μηχανές έγχυσης τύπου Otto, Ντίζελ ή πιλοτικές. Τόσο οι μηχανές αερίου Ντίζελ όσο και οι Otto λειτουργούν χωρίς πετρέλαιο ανάφλεξης, σύμφωνα με την αρχή του Otto. Η διαφορά αυτών των μηχανών είναι μόνο στη συμπίεση. Οι εναλλακτικές λύσεις στις προαναφερθείσες εφαρμογές είναι οι μικροί αεριοστρόβιλοι, οι μηχανές Stirling και οι κυψέλες καυσίμου, τεχνολογίες που είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης.

Ένα σημαντικό ζήτημα για την ενεργειακή και την οικονομική αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων του βιοαερίου είναι η χρήση της παραχθείσας θερμότητας. Συνήθως, ένα μέρος της θερμότητας χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των χωνευτηρίων (θερμότητα διεργασίας) και περίπου τα δύο τρίτα όλης της παραχθείσας ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξωτερικές ανάγκες. Πολλές εγκαταστάσεις βιοαερίου, σε χώρες όπως η Γερμανία, σχεδιάστηκαν αποκλειστικά για λόγους ηλεκτροπαραγωγής, χωρίς πρόβλεψη για χρήση της θερμότητας.

Σήμερα, για την επίτευξη καλής οικονομίας της εγκατάστασης είναι υποχρεωτική η χρήση της θερμότητας. Οι τιμές των προϊόντων (π.χ. για το καλαμπόκι) έχουν αυξηθεί και, για πολλές εγκαταστάσεις, δεν είναι αρκετή μόνο η πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας για την επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας. Οι

νέες εγκαθιστάμενες μονάδες βιοαερίου πρέπει επομένως να περιλαμβάνουν πάντα στο γενικό σχεδιασμό τη χρήση της θερμότητας.

Η θερμότητα από βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις βιομηχανικές διεργασίες, στις γεωργικές δραστηριότητες ή για τη θέρμανση κτιρίων. Ο καταλληλότερος χρήστης της θερμότητας είναι η βιομηχανία, δεδομένου ότι η ζήτηση είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η ποιότητα της θερμότητας (θερμοκρασία) είναι ένα σημαντικό ζήτημα για τις βιομηχανικές εφαρμογές. Η χρήση της θερμότητας από βιοαέριο για την θέρμανση κτιρίων και νοικοκυριών (θέρμανση μίνι-δικτύου ή περιοχής) είναι μια άλλη επιλογή, αν και αυτή η εφαρμογή έχει χαμηλή ζήτηση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και υψηλή, κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η θερμότητα από βιοαέριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση προϊόντων, τεμαχίων ξύλου ή για το χωρισμό του κομπόστ. Τέλος, η θερμότητα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμένα συστήματα «ηλεκτρισμού, θερμότητας, δροσισμού». Αυτή η διεργασία είναι γνωστή από τα ψυγεία και χρησιμοποιείται π.χ. για την εν ψυχρώ αποθήκευση τροφίμων ή τον κλιματισμό. Η ενέργεια εισαγωγής είναι θερμότητα, η οποία μετατρέπεται σε ψύξη μέσω μιας διεργασίας απορρόφησης, όπου γίνεται μια διαφοροποίηση μεταξύ της προσρόφησης και της διεργασίας δροσισμού με απορρόφηση. Το πλεονέκτημα της ψύξης μέσω της απορρόφησης είναι οι μικρές φθορές, λόγω των λίγων μηχανικών μερών, και η μικρή κατανάλωση ενέργειας, σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις δροσισμού με συμπίεση. Η χρήση του συνδυασμού ηλεκτρισμός- θερμότητα-δροσισμός στις εγκαταστάσεις βιοαερίου εξετάζεται αυτήν την περίοδο μέσω διάφορων πιλοτικών προγραμμάτων.

## **4.2 Τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής**

Όπως αναφέρετε στον οδηγό του ΚΑΠΕ για τη ΣΗΘ ο τρόπος λειτουργίας χαρακτηρίζεται από το κριτήριο στο οποίο βασίζεται η ρύθμιση της παραγωγής του ηλεκτρισμού και της ωφέλιμης θερμότητας ενός συστήματος συμπαραγωγής.



Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί τρόποι λειτουργίας, οι πιο ευδιάκριτοι από τους οποίους παρατίθενται στη συνέχεια:

- *Κάλυψη του θερμικού φορτίου:* Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας του συστήματος συμπαραγωγής είναι ίση με το θερμικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος). Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το φορτίο η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται στο δίκτυο, ενώ εάν είναι μικρότερη η συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια αγοράζεται από το δίκτυο.

- *Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης:* Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα ΣΗΘ διαστασιολογείται ώστε να παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την εγκατάσταση. Εφεδρικοί λέβητες ή καυστήρες χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των περιόδων που η ζήτηση θερμότητας είναι υψηλότερη. Ο κύριος κινητήρας της μονάδας λειτουργεί πάντα υπό πλήρες φορτίο. Εάν η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια της εγκατάστασης υπερβαίνει αυτήν που μπορεί να παρέχει ο κύριος κινητήρας, τότε η υπόλοιπη ποσότητα μπορεί να αγοραστεί από το δίκτυο. Αντίστοιχα, εάν το επιτρέπουν οι ισχύοντες νόμοι, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να πωληθεί στην ηλεκτρική εταιρεία.

- *Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου:* Κάθε χρονική στιγμή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με το ηλεκτρικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος ΣΗΘ). Εάν η συμπαραγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη από το θερμικό φορτίο ένας βοηθητικός λέβητας υποβοηθά στην κάλυψη των αναγκών, ενώ εάν είναι μεγαλύτερη η πλεονάζουσα θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω συσκευών ψύξης ή μέσω των καυσαερίων.

- *Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου βάσης:* Σε αυτήν τη διάταξη, η μονάδα ΣΗΘ διαστασιολογείται ώστε να ικανοποιεί την ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης, βάσει της καμπύλης των ιστορικών αναγκών. Οι υπόλοιπες ανάγκες σε ηλεκτρισμό καλύπτονται από το δίκτυο. Οι θερμικές ανάγκες της εγκατάστασης θα μπορούσαν να καλυφθούν από το σύστημα συμπαραγωγής μόνο ή με πρόσθετους λέβητες. Εάν η θερμική ενέργεια που παράγεται σύμφωνα

με το ηλεκτρικό φορτίο βάσης υπερβαίνει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης, και εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες, η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια μπορεί να πωληθεί σε γειτονικούς πελάτες.

- *Μικτή κάλυψη*: Σε ορισμένες χρονικές περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του θερμικού φορτίου, ενώ σε άλλες περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του ηλεκτρικού φορτίου. Η απόφαση βασίζεται στην εκτίμηση παραμέτρων όπως είναι τα επίπεδα των φορτίων, η τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την συγκεκριμένη ημέρα και ώρα.

- *Αυτόνομη λειτουργία*: Υφίσταται πλήρης κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή χωρίς σύνδεση με το δίκτυο. Αυτός ο τρόπος απαιτεί να διαθέτει το σύστημα ηλεκτρική και θερμική δυναμικότητα εφεδρείας, έτσι ώστε στην περίπτωση που μια μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας για οποιοδήποτε λόγο, οι υπόλοιπες μονάδες να είναι σε θέση να καλύψουν το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο. Αυτή είναι και η πιο δαπανηρή στρατηγική, τουλάχιστον από την άποψη του αρχικού κόστους του συστήματος.

Γενικά, η λειτουργία κάλυψης του θερμικού φορτίου οδηγεί στον υψηλότερο βαθμό αξιοποίησης του καυσίμου (λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμων - *FESR*) και ίσως στην καλύτερη οικονομική απόδοση της συμπαραγωγής, τόσο στο βιομηχανικό όσο και στον κτιριακό τομέα. Στον τομέα των εταιριών ηλεκτροπαραγωγής, ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του δικτύου, τη διαθεσιμότητα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και τις υποχρεώσεις της εταιρίας προς τους πελάτες της, όσον αφορά την τροφοδοσία τους με ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Εντούτοις, η εφαρμογή γενικών κανόνων δεν είναι η συνετότερη προσέγγιση για την περίπτωση της συμπαραγωγής. Κάθε εφαρμογή έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, υπάρχει μια πληθώρα συστημάτων ΣΗΘ (ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας, το μέγεθος, τη διαμόρφωση), ενώ η σχεδίαση ενός συστήματος συμπαραγωγής μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του χρήστη και έχει επιπτώσεις στους δυνατούς τρόπους λειτουργίας του, και το αντίστροφο.

Εξάλλου, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος μπορεί να μεταβάλλονται οι διάφορες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι με την ημέρα και τη χρονική στιγμή.

Όλες αυτές οι πτυχές καθιστούν αναγκαία τη λήψη αποφάσεων όχι βάσει γενικών κανόνων μόνο, αλλά με τη χρήση συστηματικών διαδικασιών βελτιστοποίησης που βασίζονται στο μαθηματικό προγραμματισμό, τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τη λειτουργία του συστήματος. Για τη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής, ειδικότερα, διατίθενται συστήματα ελέγχου βασισμένα σε μικροεπεξεργαστές. Αυτά παρέχουν τη δυνατότητα τα διάφορα συστήματα ΣΗΘ να λειτουργούν για την κάλυψη κάποιου φορτίου βάσης, να παρακολουθούν τα ηλεκτρικά ή τα θερμικά φορτία, είτε να λειτουργούν κατά ένα οικονομικοτεχνικά βέλτιστο τρόπο (τρόπος μικτής κάλυψης).

Στην τελευταία περίπτωση, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίβλεψη της απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής, περιλαμβανομένων:

- του βαθμού απόδοσης του συστήματος και του ποσού της διαθέσιμης ωφέλιμης θερμότητας,
- των ηλεκτρικών και των θερμικών αναγκών του χρήστη, της ποσότητας της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αποδοθεί στο δίκτυο, και του ποσού της θερμότητας που πρέπει να απορριφθεί στο περιβάλλον,
- του κόστους της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της αξίας των πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι αυτά μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την ημέρα της εβδομάδας, ή την εποχή.

Με βάση τα δεδομένα αυτά, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να καθορίσει ποιος τρόπος λειτουργίας είναι ο πιο οικονομικός, ακόμη και το κατά πόσο η μονάδα πρέπει να διακόψει τη λειτουργία της. Επιπλέον, με την παρακολούθηση των παραμέτρων λειτουργίας, όπως είναι η αποδοτικότητα, οι ώρες λειτουργίας, η θερμοκρασία των καυσαερίων, οι θερμοκρασίες του νερού ψύξης, κλπ., ο

μικροεπεξεργαστής μπορεί να βοηθήσει στον προγραμματισμό της συντήρησης του συστήματος. Εάν το σύστημα λειτουργεί χωρίς άμεση επίβλεψη, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να συνδεθεί μέσω τηλεφωνικής γραμμής με ένα κέντρο τηλεπαρακολούθησης, όπου η ανάλυση των δεδομένων μέσω Η/Υ μπορεί να προειδοποιήσει το εξειδικευμένο προσωπικό για μία επικείμενη ανάγκη προγραμματισμένης ή μη συντήρησης. Επιπλέον, ως τμήμα ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να συντάσσει εκθέσεις για την τεχνική και την οικονομική απόδοση του συστήματος.

### **4.3 Τύποι σχημάτων συμπαραγωγής**

Σύμφωνα με τον οδηγό του ΚΑΠΕ για τη ΣΗΘ ήδη από το 1900 υπήρχε η πρώτη εφαρμογή αυτού που είναι σήμερα γνωστό ως "συμπαραγωγή" σε μερικές μεγάλες πόλεις και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Ο κύριος κινητήρας των γεννητριών ήταν παλινδρομικές ατμομηχανές που συνήθως απέβαλαν ατμό χαμηλής πίεσης σε κεντρικούς αγωγούς διανομής, οι οποίοι τροφοδοτούσαν με αυτόν συστήματα θέρμανσης και παραγωγικών διεργασιών. Με τον τρόπο αυτό γεννήθηκαν οι πρώτες εγκαταστάσεις «συμπαραγωγής αιχμής», οι οποίες πήραν την ονομασία αυτή από την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για χρήση τους σε παραγωγικές διεργασίες.

Η εν λόγω ορολογία δεν χρησιμοποιήθηκε γι' αυτόν τον τύπο παραγωγής μέχρι τη δεκαετία του '70, και ο όρος «αιχμή» αναφέρεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς παράγεται από τον κύριο κινητήρα ως πρωταρχική λειτουργία και η θερμική ενέργεια που απορρίπτεται από αυτόν χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τις διεργασίες της μονάδας. Η άλλη διάταξη, κατά την οποία η ηλεκτρική ισχύς παράγεται από απορριπτόμενο ατμό, είναι γνωστή ως κύκλος «βάσης». Κατά συνέπεια, διακρίνονται δύο κύριοι τύποι συμπαραγωγής: τα συστήματα «αιχμής» και «βάσης».

Υπάρχουν τέσσερις τύποι συστημάτων συμπαραγωγής κύκλου αιχμής. Στον πρώτο τύπο τα καύσιμα καταναλώνονται σε έναν αεριοστρόβιλο ή μια μηχανή diesel για την παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος. Τα καυσαέρια παρέχουν θερμότητα για διεργασίες, ή οδηγούνται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου παράγεται ατμός για τη λειτουργία ενός δευτερεύοντος αμοστροβίλου. Αυτό είναι ένα σύστημα αιχμής συνδυασμένου κύκλου. Ο δεύτερος τύπος συστήματος καταναλώνει καύσιμα (οποιοδήποτε είδους) για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης που στη συνέχεια οδηγείται σε αμοστροβίλο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η εξαγωγή παρέχει ατμό διεργασιών χαμηλής πίεσης. Αυτό είναι ένα αμοστροβιλικό σύστημα αιχμής. Ο τρίτος τύπος καταναλώνει καύσιμα όπως είναι το φυσικό αέριο, το diesel, τα ξύλα, ο αεριοποιημένος άνθρακας, ή το αέριο ΧΥΤΑ. Το ζεστό νερό από το σύστημα ψύξης των χιτωνίων της μηχανής οδηγείται σε έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου μετατρέπεται σε ατμό διεργασιών και ζεστό νερό για θέρμανση χώρων. Ο τέταρτος τύπος είναι ένα αεριοστροβιλικό σύστημα αιχμής. Ένας στρόβιλος φυσικού αερίου οδηγεί μια γεννήτρια και τα καυσαέρια οδηγούνται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου παράγεται ατμός και θερμότητα διεργασιών. Σε μία μονάδα κύκλου αιχμής χρησιμοποιούνται πάντοτε κάποια πρόσθετα καύσιμα, πέραν αυτών που απαιτούνται για την παραγωγική διεργασία, και έτσι υφίσταται ένα λειτουργικό κόστος που σχετίζεται με την ηλεκτροπαραγωγή.

Τα συστήματα κύκλου «βάσης» είναι πολύ λιγότερο συνηθισμένα από τα αντίστοιχα κύκλου «αιχμής». Τέτοια συστήματα συναντώνται σε βαριές βιομηχανίες, όπως αυτές του γυαλιού ή οι μεταλλουργικές, όπου χρησιμοποιούνται φούρνοι πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Ένας λέβητας ανάκτησης της απόβλητης θερμότητας συλλέγει τη θερμότητα που αποβάλλεται από κάποια θερμική παραγωγική διεργασία. Αυτή η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παραχθεί ατμός ο οποίος κινεί έναν αμοστροβίλο που παράγει ηλεκτρισμό. Δεδομένου ότι το καύσιμο καίγεται

πρώτα κατά την παραγωγική διεργασία, δεν απαιτείται καμία πρόσθετη ποσότητα καυσίμου για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 4.4 Βασικές αρχές της συμπαραγωγής

Μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες βασικές επιλογές για τη συμπαραγωγή [10]:

- *Συμπαραγωγή με ατμοστρόβιλο:* Χρησιμοποιείται άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, ξύλα, απόβλητα, τύρφη και πυρηνικά καύσιμα. Ο ατμός είναι το μέσο με το οποίο η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.
- *Συμπαραγωγή με αεριοστρόβιλο:* Το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το βιοαέριο είναι τα μόνα κατάλληλα καύσιμα. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι τα καυσαέρια του θαλάμου καύσης.
- *Συμπαραγωγή με συνδυασμένο κύκλο:* Η υψηλή θερμότητα και περιεκτικότητα σε οξυγόνο των καυσαερίων του αεροστροβίλου χρησιμοποιούνται σε μια δεύτερη διεργασία με έναν ατμοστρόβιλο.
- *Συμπαραγωγή με παλινδρομική μηχανή:* Η χημικά δεσμευμένη ενέργεια του φυσικού αερίου, του πετρελαίου diesel ή του βιοαερίου, για παράδειγμα, μετασχηματίζεται άμεσα με την καύση σε μηχανική ενέργεια.

Όλες οι ανωτέρω τεχνολογίες είναι σε θέση να παραγάγουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια, και χαρακτηρίζονται ως "θερμικές μηχανές". Πιο συγκεκριμένα, η θερμική μηχανή ορίζεται ως: *"μία συσκευή που μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια"* ή, πιο σωστά, ως *"ένα σύστημα που λειτουργεί συνεχώς και μόνο θερμότητα και έργο μπορούν να περάσουν τα όριά του"*. Επιπλέον, η λειτουργία μιας θερμικής μηχανής μπορεί να παρασταθεί καλύτερα από ένα θερμοδυναμικό κύκλο. Μερικά παραδείγματα είναι οι κύκλοι Otto, Diesel, Brayton, Stirling και Rankine.

#### 4.4.1 Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μεταξύ των πιο ευρέως διαδεδομένων και περισσότερων αποδοτικών κύριων πηγών ενέργειας για ΣΗΘ είναι οι παλινδρομικές μηχανές ή μηχανές εσωτερικής καύσης - ΜΕΚ. Διάφοροι τύποι αυτών των μηχανών είναι εμπορικά διαθέσιμοι, αλλά δύο από αυτούς έχουν περισσότερη σημασία σε στατικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, πιο συγκεκριμένα οι τετράχρονοι μηχανές με σπινθηριστή (κύκλος Otto) και οι μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση (κύκλος Diesel). Τα κύρια μηχανικά μέρη των μηχανών κύκλου Otto και Diesel είναι τα ίδια. Και οι δύο χρησιμοποιούν ένα κυλινδρικό θάλαμο καύσης κατά μήκος του οποίου κινείται ένα κατάλληλα εφαρμοσμένο έμβολο.

Το έμβολο συνδέεται σε έναν στροφαλοφόρο άξονα που μετασχηματίζει τη γραμμική κίνηση του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο σε περιστροφική κίνηση στο στροφαλοφόρο άξονα. Οι περισσότερες μηχανές διαθέτουν πολλαπλούς κυλίνδρους που κινούν ένα κοινό στροφαλοφόρο άξονα. Τόσο οι μηχανές κύκλου Otto όσο και οι τετράχρονοι μηχανές Diesel ολοκληρώνουν έναν κύκλο λειτουργίας σε τέσσερις κινήσεις του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο. Οι κινήσεις αυτές περιλαμβάνουν [10]:

1. εισαγωγή του αέρα (ή του μίγματος αέρα- καυσίμου) στον κύλινδρο,
2. συμπίεση με καύση του καυσίμου,
3. επιτάχυνση του εμβόλου από τη δύναμη της καύσης (κίνηση ισχύος), και
4. αποβολή των προϊόντων της καύσης από τον κύλινδρο.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των κύκλων Otto και Diesel είναι η μέθοδος της καύσης του καυσίμου. Στον κύκλο Otto χρησιμοποιείται ένας σπινθηριστής για την ανάφλεξη ενός έτοιμου μίγματος αέρα καυσίμου που εισάγεται στον κύλινδρο. Από την άλλη, μια μηχανή Diesel συμπιέζει τον αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο σε υψηλή πίεση, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του στα επίπεδα της θερμοκρασίας ανάφλεξης του καυσίμου που εγχέεται υπό υψηλή πίεση.

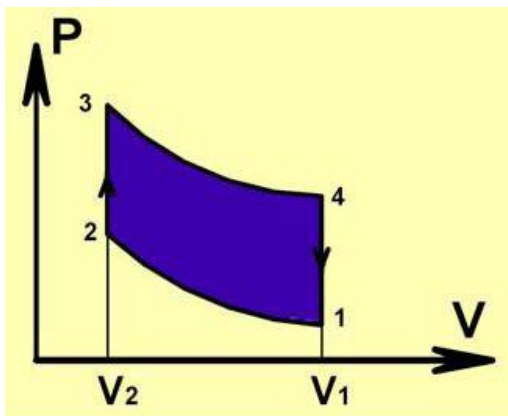


Εικόνα 3. ΜΕΚ [11]

### Κύκλος Otto [10]

Διάφορες μηχανές μπορούν να προσομοιωθούν από τον κύκλο Otto, όπως είναι οι μηχανές βενζίνης και οι μηχανές αερίου. Ο κύκλος Otto είναι ένας ιδανικός τυποποιημένος κύκλος του αέρα που αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2 έως 3: Αντιστρέψιμη θέρμανση υπό σταθερό όγκο.
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση.
- 4 έως 1: Αντιστρέψιμη ψύξη υπό σταθερό όγκο



Σχήμα 18.Ο θερμοδυναμικός κύκλος Otto [10]

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός κύκλου Otto με ένα τέλειο αέριο ως ενεργειακό ρευστό είναι:  $\eta=1-(T_4-T_1)/(T_3-T_2)$



ενώ αποδεικνύεται ότι η ανωτέρω σχέση μπορεί να αναχθεί στην ακόλουθη:  
 $\eta = 1 - r^n$

όπου  $r (=V_1/V_2)$  είναι ο λόγος συμπίεσης, και  $n (=1-\gamma)$  μια σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα.

Οι κινητήρες Otto αναπτύσσονται για τη χρήση του βιοαερίου σύμφωνα με την αρχή του Otto. Λειτουργούν με πλεόνασμα αέρα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές CO. Αυτό οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση αερίου και μειωμένη απόδοση του κινητήρα, τα οποία αντισταθμίζονται με τη χρήση ενός στροβιλοφουσητήρα καυσαερίων. Απαιτούν βιοαέριο με τουλάχιστον 45% μεθάνιο. Επίσης μπορούν να λειτουργούν με βιοαέριο και με φυσικό αέριο. Αυτό είναι χρήσιμο κατά την φάση της εκκίνησης των εγκαταστάσεων βιοαερίου, όταν η θερμότητα χρησιμοποιείται για την θέρμανση των χωνευτήρων [27].

#### Κύκλος Diesel [10]

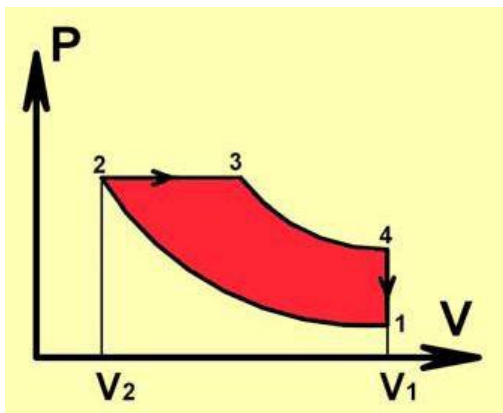
Ο κύκλος Diesel είναι ένας ιδανικός τυποποιημένος κύκλος του αέρα που αποτελείται επίσης από τέσσερα στάδια:

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2 έως 3: Αντιστρέψιμη θέρμανση υπό σταθερή πίεση.
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση.
- 4 έως 1: Αντιστρέψιμη ψύξη υπό σταθερό όγκο.

Ορίζοντας τον λόγο συμπίεσης  $r$  ως:  $r = V_1/V_2$  και το λόγο αποκοπής  $\beta$  ως:  $\beta = V_3/V_2$ , ο θερμοκός βαθμός απόδοσης του κύκλου Diesel με τέλειο αέριο ως ρευστό λειτουργίας είναι:

$$\eta = 1 - [r(\beta n - 1)] / [(\beta - 1)\gamma r n]$$

όπου  $n (= \gamma)$  είναι μία σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα



Σχήμα19. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Diesel [10]

Το βιοαέριο αναμιγνύεται με τον αέρα καύσης σε έναν αναμίκτη. Το μίγμα περνά μέσω ενός συστήματος έγχυσης στον θάλαμο καύσης όπου αναφλέγεται από το εγχεόμενο πετρέλαιο ανάφλεξης. Οι μηχανές πιλοτικής έγχυσης λειτουργούν με περίσσεια αέρα. Σε περίπτωση διακοπής παροχής βιοαερίου, οι μηχανές πιλοτικής έγχυσης μπορούν να λειτουργήσουν με καθαρό έλαιο ανάφλεξης ή ντίζελ χωρίς πρόβλημα. Αν το έλαιο ανάφλεξης προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (βιοντίζελ) δεν περιέχει  $\text{SO}_2$  και εκπέμπει λιγότερο  $\text{CO}$ . Επιπλέον είναι βιοδιασπάσιμα, που είναι σημαντικό στην περίπτωση διαρροής υγρών. Εάν χρησιμοποιηθούν βιοκαύσιμα θα έχουμε μεγαλύτερη φθορά των φίλτρων, θα έχουμε χαμηλότερο ιξώδες, απελευθέρωση νιτρώδους οξειδίου και θα χρειαστεί απόφραξη των εκτοξευτήρων [27].

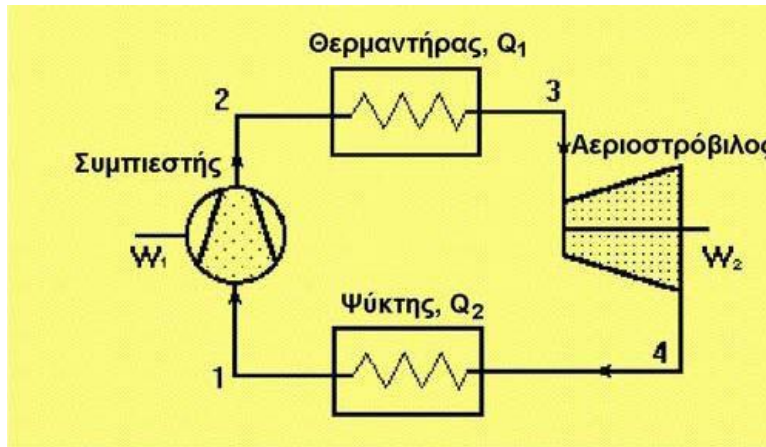
#### 4.4.2 Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούν τα θερμά αέρια που παράγονται άμεσα από την καύση ορυκτών καυσίμων. Το θερμό αέριο εκτονώνεται μέσα από τα πτερύγια του δρομέα του στροβίλου αναγκάζοντας τα να κινηθούν. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διεργασία του αεριοστροβίλου. Η διεργασία 3-4, που παρουσιάζεται στο διάγραμμα T-s παρακάτω του αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου του σχήματος, αντιστοιχεί σε μια μη αναστρέψιμη αλλά σχεδόν αδιαβατική εκτόνωση των αερίων της καύσης.

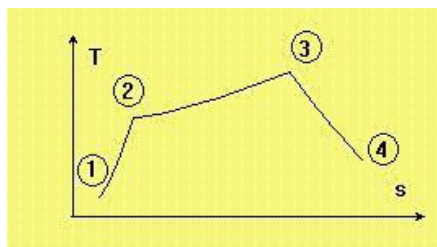
Το παραγόμενο έργο από το στρόβιλο είναι:  $W_{out} = m(h_3 - h_4)$

Όπου μείναι η παροχή μάζας των καυσαερίων,  $h_3$  είναι η ενθαλπία των καυσαερίων στην είσοδο και  $h_4$  η ενθαλπία τους στην έξοδο. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου

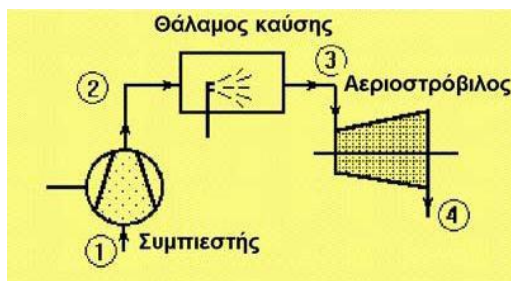
είναι:  $\eta = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4s})$



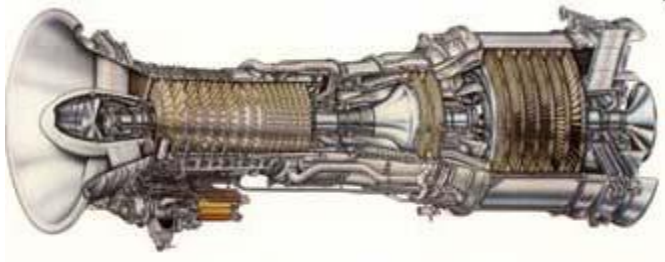
Σχήμα 20. Σύστημα αεριοστρόβιλου [10]



Σχήμα 21. Διάγραμμα θερμοκρασία- εντροπίας αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου [10]



Σχήμα 22. Σύστημα αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου [10]



Εικόνα 4. Αεριοστρόβιλος [11]

### Ο κύκλος Brayton (ή Joule) [10]

Ο θερμοδυναμικός κύκλος που σχετίζεται με την πλειοψηφία των αεριοστροβιλικών συστημάτων είναι ο κύκλος Brayton, στον οποίο ο ατμοσφαιρικός αέρας, που είναι το εργαζόμενο μέσο, διέρχεται από τον στρόβιλο μόνο μία φορά. Οι θερμοδυναμικές διεργασίες του κύκλου Brayton περιλαμβάνουν τη συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, την εισαγωγή και ανάφλεξη του καυσίμου, και την εκτόνωση των θερμών καυσαερίων μέσω του στρόβιλου. Η αναπτυσσόμενη ισχύς χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή και της ηλεκτρογεννήτριας. Οι κύριες συνιστώσες ενός αεριοστροβίλου παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

Τόσο η εισαγωγή όσο και η απόρριψη της θερμότητας στον κύκλο Brayton γίνεται υπό σταθερή πίεση, και για το λόγο αυτό ο κύκλος είναι επίσης γνωστός ως κύκλος σταθερής πίεσης. Ο κύκλος, του οποίου τα διαγράμματα T-s και P-V παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα, αποτελείται από τέσσερις διεργασίες:

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2 έως 3: Θέρμανση υπό σταθερή πίεση.
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση.
- 4 έως 1: Αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση.

Το εισαγόμενο έργο στον κύκλο (συμπιεστής)  $W_1$  και το παραγόμενο έργο από τον κύκλο (στρόβιλος)  $W_2$  είναι:

$$W_1 = m(h_2 - h_1)$$

$$W_2 = m(h_3 - h_4)$$

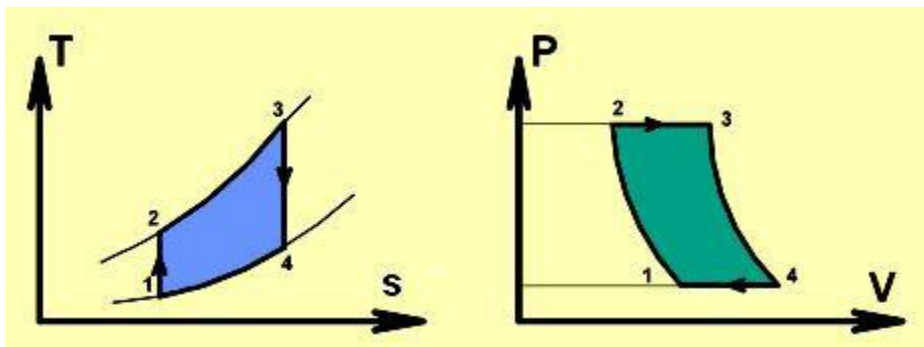
Όπου  $m$  είναι η παροχή μάζας στον κύκλο. Η παρεχόμενη θερμότητα στον κύκλο  $Q_1$  (θερμαντήρας) και η απορριπτόμενη θερμότητα  $Q_2$  από τον κύκλο (ψυκτική μονάδα) είναι, αντίστοιχα:

$$Q_1 = m(h_3 - h_2)$$

$$Q_2 = m(h_4 - h_1)$$

Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης του κύκλου με ενεργειακό μέσο ένα τέλειο αέριο είναι:  $\eta = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$

Αποδεικνύεται ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να αναχθεί στην εξής:  $\eta = 1 - r^n$  όπου  $r (= P_2 / P_1)$  είναι ο λόγος πίεσης και  $n (= 1 + 1/\gamma)$  μία σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα.

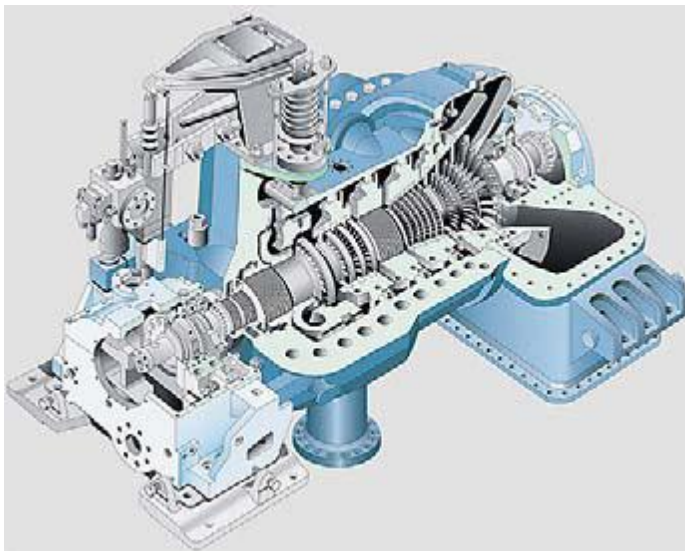


Σχήμα 23. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Brayton (ή Joule) [10]

#### 4.4.3 Ατμοστρόβιλοι

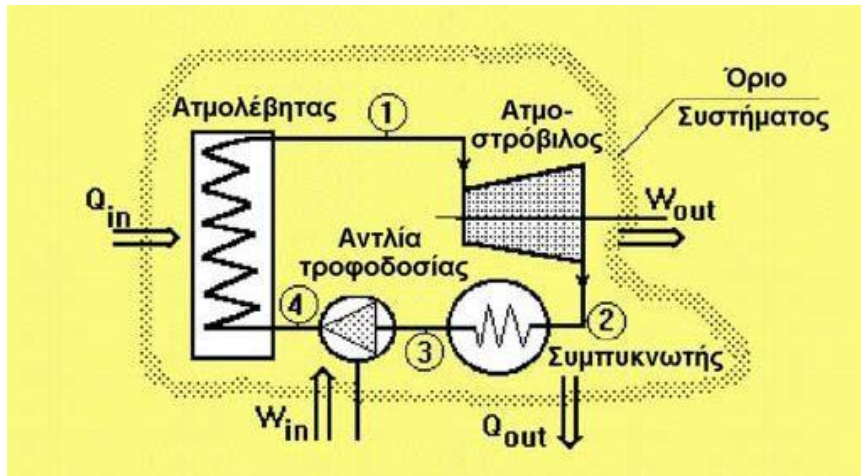
Ο ατμοστρόβιλος εξαρτάται από κάποια χωριστή πηγή ενέργειας και δεν μετατρέπει άμεσα το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ατμοστρόβιλοι απαιτούν μία πηγή ατμού υψηλής πίεσης που παράγεται σε κάποιο λέβητα ή ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας. Στα καύσιμα των λεβήτων συμπεριλαμβάνονται ορυκτά καύσιμα, όπως ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ή ανανεώσιμα καύσιμα, όπως το ξύλο ή τα αστικά απορρίμματα. Ο ατμοστρόβιλος μπορεί να αποτελείται από πολλές βαθμίδες, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να οριστεί με την ανάλυση της εκτόνωσης του ατμού από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη πίεση [10].

Ο θερμοδυναμικός κύκλος του ατμοστροβίλου είναι ο κύκλος Rankine, παρόλο που εφαρμόζονται και κάποιοι άλλοι, όπως οι κύκλοι αναθέρμανσης και αναγέννησης, και ο συνδυασμένος κύκλος. Ο κύκλος Rankine είναι ο βασικός κύκλος των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και συνίσταται κατ' αρχήν από μια πηγή θερμότητας (λέβητας) που μετατρέπει το νερό σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός ρέει μέσα από το στρόβιλο και παράγει μηχανική ισχύ, και μπορεί να είναι υγρός, ξηρός κορεσμένος ή υπέρθερμος. Όταν εξέρχεται από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστέφει στο λέβητα για να επαναληφθεί η διαδικασία, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 5. Ατμοστρόβιλος [11]

Η αποδοτικότητα των ατμοστροβίλων συχνά περιγράφεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης της διαδικασίας εκτόνωσης. Η παρουσία σταγονιδίων στον ατμό μειώνει την απόδοση του στροβίλου και προκαλεί τη φυσική διάβρωση των πτερυγίων. Για το λόγο αυτό, ο λόγος ξηρότητας του ατμού στην έξοδο του στροβίλου δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 0.9 [10].



Σχήμα 24. Σύστημα ατμοστροβίλου [10]

### Ο κύκλος Rankine [10]

Ο κύκλος Rankine αντιστοιχεί σε μια θερμική μηχανή με κύκλο ισχύος ατμού. Το πιο κοινό εργαζόμενο μέσο είναι το νερό. Ο κύκλος συνίσταται από τέσσερις διεργασίες:

- 1 έως 2: Ισεντροπική εκτόνωση (ατμοστρόβιλος).
- 2 έως 3: Αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση (συμπυκνωτής).
- 3 έως 4: Ισεντροπική συμπίεση (αντλία).
- 4 έως 1: Θέρμανση υπό σταθερή πίεση (λέβητας).

Το παραγόμενο έργο του κύκλου (ατμοστρόβιλος) και το εισαγόμενο έργο στον κύκλο (αντλία) είναι αντίστοιχα:

$$W_1 = m(h_1 - h_2)$$

$$W_2 = m(h_4 - h_3)$$

Με  $m$  την παροχή μάζας του κύκλου. Η παρεχόμενη θερμότητα στον κύκλο  $Q_1$  (από το λέβητα) και η απορριπτόμενη θερμότητα  $Q_2$  από τον κύκλο (στο συμπυκνωτή) είναι αντίστοιχα:

$$Q_1 = m(h_1 - h_4)$$

$$Q_2 = m(h_2 - h_3)$$

Το ωφέλιμο έργο του κύκλου είναι:  $W = Q_1 - Q_2$  και ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός κύκλου Rankine ορίζεται τότε ως:  $\eta = W / Q_1$

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine δεν είναι τόσο υψηλός όπως αυτός του κύκλου Carnot, αλλά ο κύκλος αυτός παρουσιάζει λιγότερες πρακτικές δυσκολίες και είναι πιο οικονομικός.

#### 4.4.4 Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης

Ατμός υψηλής πίεσης (20-100 bar) και θερμοκρασίας (480-540 °C) παράγεται σε λέβητα με κατανάλωση καυσίμου και χρησιμοποιείται για την κίνηση ατμοστροβίλου, στον άξονα του οποίου είναι συνδεδεμένη ηλεκτρογεννήτρια. Ο ατμός βγαίνει από τον στρόβιλο σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις θερμικές διεργασίες. Ο όρος «αντίθλιψη» οφείλεται στο ότι η πίεση αυτή είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (3-20 bar).

Το σύστημα αντίθλιψης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

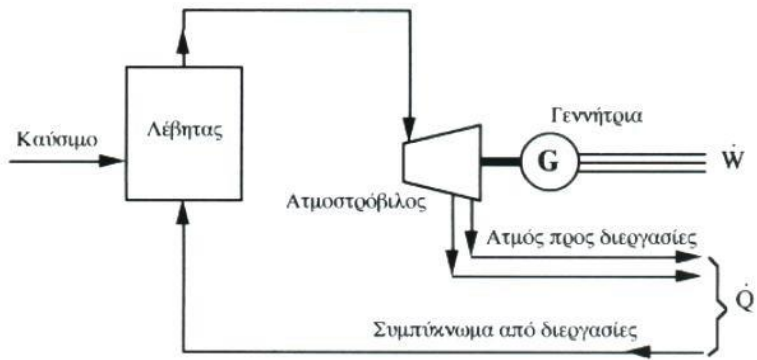
- απλή μορφή,
- μικρότερο κόστος,
- μειωμένη ή και καθόλου ανάγκη ψυκτικού νερού,
- υψηλότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 85%), κυρίως διότι δεν αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον μέσω ψυγείου.

Σημαντικό μειονέκτημα του, όμως, είναι ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένη με την απαιτούμενη θερμότητα. Έτσι,

α) είναι αδύνατη η ανεξάρτητη λειτουργία του ατμοηλεκτρικού σταθμού από το δίκτυο θέρμανσης, και

β) είναι αναγκαία η αμφίδρομη σύνδεση με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού για την κάλυψη πρόσθετων αναγκών ή για τη διοχέτευση της πιθανής περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας.

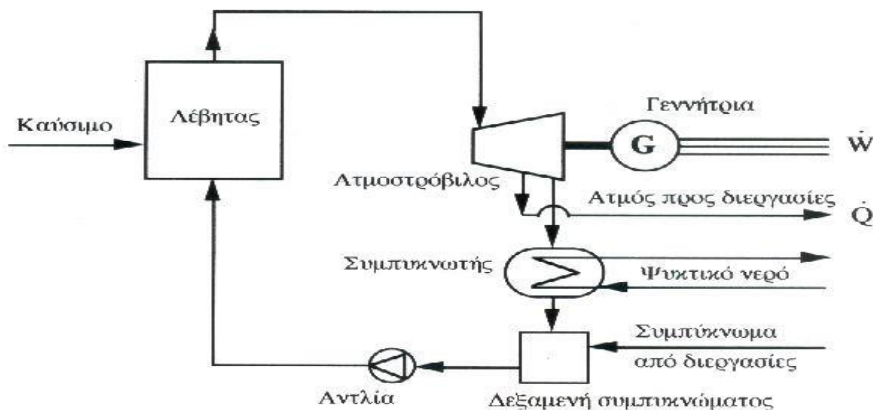




Σχήμα 25. Σύστημα με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης [22]

#### 4.4.5 Ατμοστρόβιλος απομάστευσης

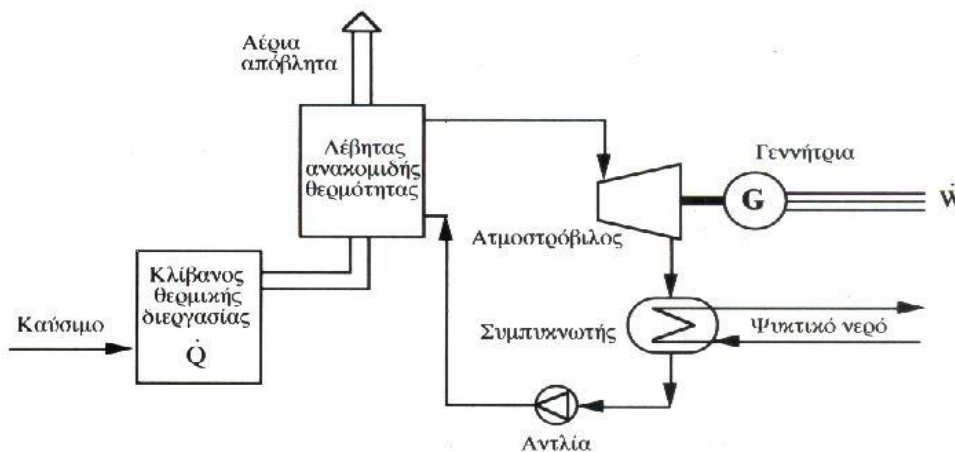
Αυτό το σύστημα ΣΗΘ αποτελείται από ατμολέβητα, ατμοστρόβιλο, ψυγείο, κ.λ.π. (κύκλος Rankine). Μέρος του ατμού απομαστεύεται από μία ή περισσότερες ενδιάμεσες βαθμίδες του στροβίλου στις επιθυμητές πιέσεις, ενώ ο υπόλοιπος εκτονώνεται μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή (λέγεται και ψυγείο ατμού) που είναι 0,05-0,10 bar. Τα συστήματα απομάστευσης είναι ακριβότερα και έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 80%) από τα συστήματα αντίθλιψης. Όμως, έχουν τη δυνατότητα ανεξάρτητης (μέσα σε ορισμένα όρια) ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση της ολικής παροχής ατμού και επομένως της παροχής ατμού προς τον συμπυκνωτή.



Σχήμα 26. Σύστημα με ατμοστρόβιλο απομάστευσης [22].

#### 4.4.6 Ατμοστρόβιλος σε κύκλο βάσης

Αρκετές βιομηχανίες (π.χ. χαλυβουργεία, υαλουργεία, κεραμουργεία, εργοστάσια τσιμέντου, εργοστάσια αλουμινίου, διυλιστήρια πετρελαίου, κ.λ.π.) έχουν αέρια απόβλητα υψηλής θερμοκρασίας. Μετά τη θερμική διεργασία, τα αέρια αυτά μπορούν να περάσουν μέσα από λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου παράγεται ατμός που κινεί μια ατμοστροβιλογεννήτρια. Έτσι, η μονάδα παραγωγής θερμότητας μετατρέπεται σε σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού.

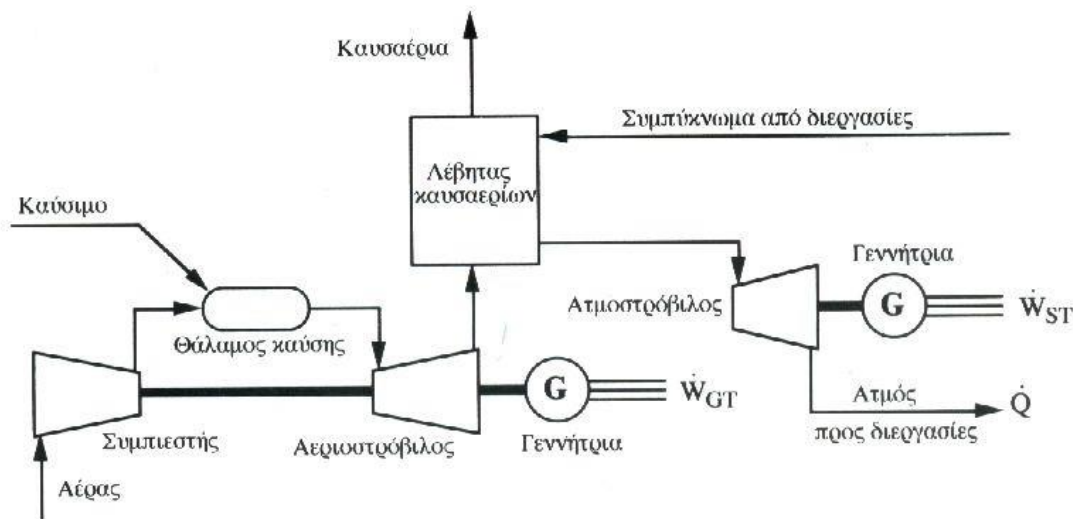


Σχήμα 27. Σύστημα με κύκλο βάσης ατμού [22]

#### 4.4.7 Συνδυασμένος κύκλος

Ο όρος «συνδυασμένος κύκλος» αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι εκείνα με συνδυασμό αεριοστρόβιλου - ατμοστρόβιλου (κύκλοι Joule-Rankine). Το Σχήμα 28 δείχνει τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος.

Η υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου στα καυσαέρια του αεριοστροβίλου (περίπου 17%) επιτρέπει την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων, εάν κριθεί αναγκαία για την αύξηση ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά κάνει την εγκατάσταση και ιδιαίτερα τις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου πιο περίπλοκες.



Σχήμα 28. Σύστημα συνδυασμένου κύκλου [22]

Η ισχύς των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή 20-400MW, ενώ κατασκευάζονται επίσης και μικρότερες μονάδες με ισχύ 4-11 MW. Ο χρόνος εγκατάστασης είναι 2-3 έτη. Είναι δυνατή η ολοκλήρωση της εγκατάστασης σε δύο πεδία: Εγκαθίσταται πρώτα η μονάδα αεριοστροβίλου, που μπορεί να είναι έτοιμη για λειτουργία σε 12-18 μήνες. Ενώ αυτή λειτουργεί, συμπληρώνεται το σύστημα με τη μονάδα του ατμοστροβίλου. Η αξιοπιστία των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου είναι 80-85 %, η μέση ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και ο οικονομικός χρόνος ζωής 15-25 έτη.

#### 4.4.8 Τυποποιημένες μονάδες παραγωγής (πακέτα)

Μεγάλη ώθηση στη διάδοση της συμπαραγωγής αναμένεται ότι θα δώσει η μαζική παραγωγή τυποποιημένων μονάδων σε μορφή πακέτου με ηλεκτρική ισχύ 10-1000kW, που έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος,
- Μικρό όγκο,
- Εύκολη εγκατάσταση (το μόνο που χρειάζεται είναι η σύνδεσή τους με τα υδραυλικά και ηλεκτρικά δίκτυα),
- Αυτοματοποιημένη λειτουργία χωρίς τη συνεχή παρακολούθηση από εξειδικευμένο προσωπικό.

Οι μονάδες αυτές συνήθως έχουν κινητήρα Diesel. Σε ισχύς μικρότερες των 100 kW είναι δυνατή η χρήση αεριοστρόβιλου. Μπορούν να λειτουργούν με υγρό ή αέριο καύσιμο. Το φυσικό αέριο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο καύσιμο για τις μονάδες αυτές χάρη στην καθαρότητα, την έλλειψη ανάγκης αποθήκευσης και τη χαμηλή τιμή του. Στις μονάδες – πακέτα το 27-35% της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και το 50-55% σε θερμότητα. Επομένως ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι 0.5–0.7, ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης φτάνει το 80%. Μικροεπεξεργαστές, εγκατεστημένοι στον χώρο όπου βρίσκεται η μονάδα, παρακολουθούν τις τιμές κρίσιμων παραμέτρων και μεταβιβάζουν τα σχετικές πληροφορίες, μέσω αποκλειστικής τηλεφωνικής γραμμής, σε κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όταν η εξέλιξη των τιμών ορισμένων παραμέτρων δείχνει επερχόμενη βλάβη, ειδοποιείται η ομάδα συντήρησης, που επεμβαίνει πριν ακόμη η βλάβη εκδηλωθεί.

#### 4.4.9 Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή, που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης.

Στη βασική της μορφή λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα και συνήθως μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), που αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Ορισμένοι τύποι κυψελών μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και διοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες.

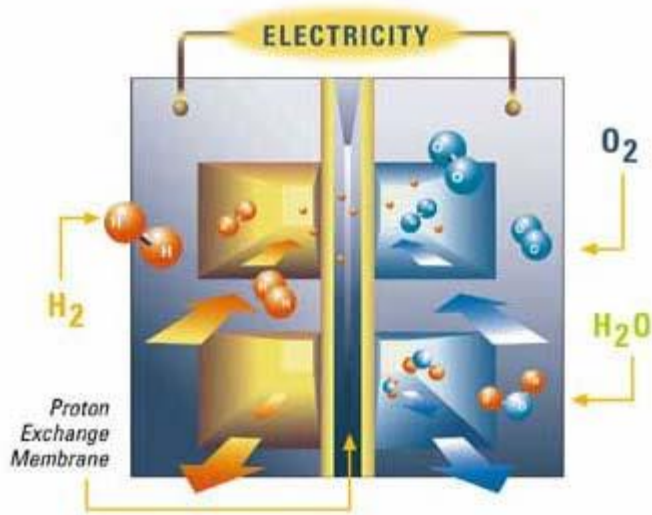
Οι κυψέλες καυσίμου είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή στον βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα (ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το φυσικό αέριο). Κύρια πλεονεκτήματά τους είναι τα ακόλουθα:

- αρθρωτή (modular) δομή, που διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ,
- διατήρηση υψηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ακόμη και σε μερικό φορτίο (δηλ. φορτίο μικρότερο του ονομαστικού),
- ευκολία αυτοματισμού,
- χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- χαμηλή στάθμη θορύβου.

Χάρη στον υψηλό βαθμό απόδοσης και τα καθαρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται, οι εκπομπές  $\text{CO}_2$  και  $\text{SO}_2$  είναι κατά 10-100 φορές χαμηλότερες από εκείνες άλλων συστημάτων. Ειδικότερα, επειδή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες της καύσης, οι εκπομπές  $\text{NO}_x$  είναι μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους από τις εκπομπές των συστημάτων που στηρίζονται στην καύση. Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου κάνουν τις κυψέλες καυσίμου πιο κατάλληλες από άλλα συστήματα για εγκατάσταση και λειτουργία σε κατοικημένες περιοχές και σε κτίρια όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κ.λπ. Μειονεκτήματα, που εμποδίζουν προς το παρόν την πλατιά διάδοσή τους, είναι:

- το υψηλό κόστος κατασκευής και

- η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής.



Εικόνα 6. Κυψέλη καυσίμου [11]

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο βιοαερίου [27] υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου που ονομάζονται σύμφωνα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Μπορούν να είναι χαμηλής (AFC, PEM), μέσης (PAFC) ή υψηλής θερμοκρασίας (MCFC, SOFC) κυψέλες καυσίμου. Η επιλογή τους εξαρτάται από το αέριο εισαγωγής και τη χρήση της θερμότητας.

Η PEM (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το βιοαέριο, λόγω της θερμοκρασίας λειτουργίας της που είναι  $80^{\circ}C$ . Ο τύπος ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιεί επηρεάζει τη λειτουργική ζωή των PEM, που είναι πολύ ευαίσθητες στις ακαθαρσίες του αερίου καυσίμου, συμπεριλαμβανομένου και του  $CO_2$ . Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικός ο καθαρισμός του αερίου.

Η πιο αναπτυγμένη είναι η PAFC (κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέως), που συχνά χρησιμοποιείται με φυσικό αέριο. Σε σχέση με άλλες κυψέλες η ηλεκτρική απόδοση είναι χαμηλή αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητη στην παρουσία  $CO_2, CO$  στο αέριο.

Η MCFC (κυψέλη καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων) χρησιμοποιείται με μία ροή ρευστού άνθρακα ως ηλεκτρολύτη. Δεν επηρεάζεται από το CO, ενώ ανέχεται συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> μέχρι 40% του όγκου. Λόγο της θερμοκρασίας λειτουργίας της που είναι 600-700°C η μετατροπή του μεθανίου σε H<sub>2</sub>, γνωστή και ως ανασχηματισμός, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στη κυψέλη. Η διάσπαρτη θερμότητα της μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν στρόβιλο.

Η SOFC (κυψέλη καυσίμου σταθεροποιημένων οξειδίων) λειτουργεί σε θερμοκρασίες 750 με 1000°C. Έχει υψηλή ηλεκτρική απόδοση και ο ανασχηματισμός του μεθανίου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στην κυψέλη. Είναι ιδανική για βιοαέριο λόγω της χαμηλής ευαισθησίας της στο θείο.

#### **4.4.10 Μηχανές Stirling**

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι επίσης δυνατή με μηχανές Stirling. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξή της έχει αυξηθεί τελευταία, χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με συστήματα κινητήρων Diesel, αεροστροβίλων ή ατμοστροβίλων: δυνατότητα υψηλότερου βαθμού απόδοσης, μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου, καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο, χαμηλές εκπομπές ρύπων, χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.

Αρχικά, η έρευνα και ανάπτυξη είχε ως αντικείμενο κινητήρες ισχύος 3-100 kW, κατάλληλους για αυτοκίνητα. Η προσπάθεια στράφηκε κατόπιν και προς κινητήρες ισχύος μέχρι 1-1.5 MW με αναμενόμενη διάρκεια ζωής της τάξεως των 20 ετών. Χάρη στην εξωτερική καύση και στον κλειστό κύκλο λειτουργίας, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσης με αποτέλεσμα οι φθορές να είναι περιορισμένες. Τα έμβολα της μηχανής κινούνται από την διαστολή ενός εσώκλειστου αερίου, ως αποτέλεσμα της έγχυσης θερμότητας από μια εξωτερική πηγή ενέργειας. Όμως, απαιτούνται στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού λαδιού προς το εσωτερικό του

κυλίνδρου. Η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν.



Εικόνα 7. Μηχανή Stirling

Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει η χρήση διαφόρων καυσίμων: υγρά ή αέρια καύσιμα, αέρια ή υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα, ακόμη και απορρίμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, είναι δυνατή η αλλαγή καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας ή μετατροπή των ρυθμίσεων του κινητήρα. Χάρη στην ευελιξία τους, οι μηχανές Stirling μπορούν επίσης να αποτελέσουν στοιχεία ηλιακών ή πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ή συμπαραγωγής.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι μηχανές Stirling για το βιοαέριο είναι απαραίτητη κάποια τεχνική προσαρμογή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί βιοαέριο με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μεθάνιο. Η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται 24%-28% που είναι μικρότερη από αυτήν του Otto. Η θερμοκρασία των καυσαερίων κυμαίνεται 250°C με 300°C. Η δυναμικότητα τους είναι συνήθως μικρότερη από 50 kW [27].



#### 4.4.11 Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά

Στον κύκλο βάσης, εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, που εξατμίζεται με ανάκτηση θερμότητας από αέρια υψηλής θερμοκρασίας (600 °C ή και υψηλότερης).

Η παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (80-300 °C) είναι δυνατή εάν χρησιμοποιηθούν οργανικά ρευστά, π.χ. το λουένη, που έχουν θερμοκρασία βρασμού αρκετά χαμηλότερης εκείνης του νερού. Έτσι, πηγές θερμότητας μπορούν να είναι η ηλιακή ενέργεια, βιομηχανικά απόβλητα, γεωθερμική ενέργεια, καυσαέρια ή θερμότητα ψύξης μηχανών, κ.λπ.

Η ισχύς των συστημάτων αυτών κυμαίνεται στην περιοχή 2 kW – 10 MW. Ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός, 10-30%, αλλά σημασία έχει το γεγονός ότι ένα τέτοιο σύστημα παράγει πρόσθετη ισχύ χωρίς να ξοδεύει καύσιμο. Από κατασκευαστικής πλευράς, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών, ώστε να μην παθαίνουν διάβρωση από το οργανικό ρευστό (π.χ. χρήση ανοξείδωτου χάλυβα), και στη στεγανότητα των στοιχείων του συστήματος, ώστε να μην διαφεύγει το οργανικό ρευστό στην ατμόσφαιρα.

Ο χρόνος εγκατάστασης μικρών συστημάτων (μέχρι 50 kW), και ιδιαίτερα εκείνων που είναι κατάλληλα για χρήση στον εμπορικό – κτιριακό τομέα, είναι 4-8 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες μονάδες είναι 1-2 έτη. Καθώς η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την αξιοπιστία των συστημάτων. Εκτιμάται ότι η μέση ετήσια διαθεσιμότητά τους είναι 80-90%. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 20 έτη.

## Βιβλιογραφία

1. ΜΥΡΣΙΝΗ ΧΡΗΣΤΟΥ γεωπόνος υπ. τμήματος βιομάζας κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας -ΚΑΠΕ "*δυναμικό βιομάζας στην Ελλάδα*"(Αθήνα 25/11/2010)
2. [www.cres.gr/energy-saving/.../pdf/biomass\\_guide.pdf](http://www.cres.gr/energy-saving/.../pdf/biomass_guide.pdf) βιομάζα-ΚΑΠΕ
3. Τμ. Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων "*Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιομάζας*" Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2007, ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑ
4. Αντώνης Γερασίμου Πρόεδρος Ελληνικής Εταιρίας Ανάπτυξης Βιομάζας "*Η αγροτική Βιομάζα και οι δυνατότητες αξιοποίησής της στην Ελλάδα*" Αθήνα, Οκτώβριος 2013
5. ΓΙΑΝΝΗ ΒΟΥΡΔΟΥΜΠΑΧΗΜΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ, Μ.ΣC "*ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*". Χ Α Ν Ι Α 1 9 9 8
6. Της εταιρίας Μ. Αντωνιάδη φάρμα "*Μελέτη εκτίμησης επιπτώσεων στο περιβάλλον από την ανέγερση σταθμού αναερόβιας επεξεργασίας αποβλήτων*"
7. renInvestgroup "*βιοαέριο- μια σημαντική εναλλακτική μορφή ενέργειας*" Πτολεμαΐδα- Ιούλιος 2012
8. Κοφαχείλης Αλέξανδρος μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης "*ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ (PABR) ΚΑΙ ΚΛΑΣΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΡΟΩΝ*" Πάτρα, Ιούνιος 2009
9. Σφetsiouris Κωνσταντίνος Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ "*Κτηνοτροφικά απόβλητα Βιοχημική μετατροπή Παραγωγή θέρμανσης/ψύξης*"
10. "Οδηγός συστημάτων ΣΥΘ" ΚΑΠΕ

11. ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΥ ΑΝΤΙΠΡΟΕΔΡΟΣ ΕΣΣΗΘΠΡΟΕΔΡΟΣ & Δ.Σ. ΙΤΑ α.ε. "ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ" Φεβρουαρίου 2009
12. Αλέξανδρος Τσιμπερδώνης Διπλωματική εργασία "Αναερόβια Χώνευση για τη παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα σε Περιοδικό Αναερόβιο Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες" Αθήνα 24/1/2014
13. Διδακτορική διατριβή ΚΑΛΦΑ Δ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ "Παραγωγή βιοαερίου από αναερόβια χώνευση προεπεξεργασμένου και μη ελαιοπολτού" Πάτρα Μάρτιος 2007
14. Κωνσταντίνος Κίττας"Βιοκαύσιμα και ενεργειακές καλλιέργειες"Καρδίτσα Απρίλιος 2007
15. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΑΥΡΙΑΝΗ Ν. ΡΟΓΚΑΚΟΥ "ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ"ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012
16. Α. Νικολάου, Ι. Παπαμιχαήλ, Β. Λυχνάρης και Κ. Πανούτσου "ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ"
17. Μιχάλης Μαρδίκης Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας"ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΑΙ ΘΡΕΠΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΩΝ ΖΩΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ"
- 18.<http://www.biomassenergy.gr/>
- 19.Ελευθεριάδης Ιωάννης ΚΑΠΕ "Δυνατότητες καλλιέργειας των ενεργειακών φυτών στον Ελληνικό χώρο"
20. [www.agroenergy.gr](http://www.agroenergy.gr)
21. [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- 22.Λουκάς Δασούτης etal"ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΗΣΜΟΥ, ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ" Αθήνα Δεκέμβριος 2010

23. [www.envima.gr](http://www.envima.gr)

24. [www.biofuels.gr](http://www.biofuels.gr)

25. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΣΤΑΜΑΤΕΛΑΤΟΥ διδακτορική διατριβή "βελτιστοποίηση συστημάτων αναερόβιας χώνευσης" Πάτρα Σεπτέμβριος 1999

26. Giovanni Riva, Ester Forrapedretti, Carla de Carolis, "Εγχειρίδιο ΑΠΕ Βιομάζα"

27. Σιούλας Κωνσταντίνος etal "Εγχειρίδιο βιοαερίου"

28. Σιούλας Κωνσταντίνος "Βιοαέριο στην Ελλάδα"

29. ΣΠΥΠΟΥΔΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ μεταπτυχιακή διατριβή "Παραγωγή βιοαερίου από εκχύλισμα ημι-κομποστοποιημένων στερεών πτηνοτροφικών αποβλήτων με τυρόγαλα στη μεσόφιλη περιοχή. Τεχνικο-οικονομική διερεύνηση εφαρμογής των αποτελεσμάτων σε τυροκομείο στην Αργολίδα "

30. ΑΝΤΩΝΙΟΣ Π. ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ Β. ΣΩΤΗΡΙΟΥ διπλωματική εργασία "Αξιοποίηση της Βιομάζας στον Ελλαδικό Χώρο για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Συστημάτων Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας"

31. Ismail M. Nasir, Tinia I. Mohd, Ghazi Rozita Omar "Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production"

32. Martin Van Haren and Ron Fleming "Electricity and Heat Production Using Biogas from the Anaerobic Digestion of Livestock Manure - Literature Review"

33. [bisyplan.bioenarea.eu](http://bisyplan.bioenarea.eu)

34. Demirer, G. N., Chen, S., *Anaerobic digestion of dairy manure in a hybrid reactor with biogas recirculation*. World J. Microbiol. Biotechnol. 2005, 21, 1509–1514.

35. Sakar, S., Yetilmezsoy, K., Kocak, E., *Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment—a literature review*. Waste Manage. Res. 2009, 27, 3–18.

36. Chynoweth, D. P., Wilkie, A. C., Owens, J. M., *Anaerobic processing of piggery wastes: a review*. Proceedings of the ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida, USA 1998.
37. Abdullah, N. A., Ayub, M. A., Abdul-Talib, S., Mohd Tajuddin, R. et al., *Development of methodology to establish the sludge volume to power generated in utilising sewage sludge as a biofuel*. First Engineering Conference on Energy and Environment, Kuching, Sarawak, Malaysia 2007.
38. Parawira, W., Murto, M., Zvauya, R., Mattiasson, B., *Comparative performance of a UASB reactor and an anaerobic packed - bed reactor when treating potato waste leachate*. *Renew. Ener.* 2006, 31, 893–903.
39. Gunaseelan, V. N., *Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review*. *Biomass Bioenerg.* 1997, 13, 83–114.
40. Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B., Hamdi, M., *Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes*. *Proc. Biochem.* 2005, 40, 989–995.
41. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L., *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. *Bioresour. Technol.* 2008, 99, 7928–7940.
42. Wilkie, A. C., *Anaerobic digestion of dairy manure: design and process considerations*. Proceedings of the Dairy Manure Management Conference, Natural Resource, Agriculture and Engineering Service, Cornell University, Ithaca, New York, USA, 2005 pp. 301–312.
43. Mohd Ghazi, T. I., Resul, G. M. F. M., Yunus, R. et al., *Preliminary design of oscillatory flow biodiesel reactor for continuous biodiesel production from jatropha triglycerides*. *J. Eng. Sci. Technol.* 2008, 3, 138–145.
44. Omar, R., Harun, R. M., Mohd Ghazi, T. I., Wan Azlina, W. A. K. G. et al., *Anaerobic treatment of cattle manure for biogas production*. Proceedings Philadelphia, Annual meeting of American Institute of Chemical Engineers, Philadelphia, USA 2008.

45. Ahring, B. K., Ibrahim, A. A., Mladenovska, Z., *Effect of temperature increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure*. *Water Res.* 2001, 35, 2446–2452.
46. El-Mashad, H. M., Zeeman, G., van Loon, W. K., Bot, G. P., Lettinga, G., et al., *Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure*. *Bioresour. Technol.* 2004, 95, 191–201.
47. Marañón, E., Castrillon, L., Vázquez, I., Sastre, H., *The influence of hydraulic residence time on the treatment of cattle manure in UASB reactors*. *Waste Manage. Res.* 2001, 19, 436–441.
48. Kalia, A. K., Singh, S. P., *Effect of mixing digested slurry on the rate of biogas production from dairy manure in batch fermenter*. *Ener. Sour.* 2001, 23, 711–715.
49. Harikishan, S., Sung, S., *Cattle waste treatment and Class A biosolid production using temperature-phased anaerobic digester*. *Adv. Environ. Res.* 2003, 7, 701–706.
50. Nielsen, H., Mladenovska, Z., Westermann, P., Ahring, B., *Comparison of two stage thermophilic (68°C/55°C) anaerobic digestion with one stage thermophilic (55°C) digestion of cattle manure*. *Biotechnol. Bioeng.* 2004, 86, 291–300.
51. Demirer, G., Chen, S., *Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure*. *Proc. Biochem.* 2005, 40, 3542–3549.
52. Rico, C., Rico, J. L., Munoz, N., Gomez, B. et al. *Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in pilot plant*. *Eng. Life Sci.* 2011, 11, 476–481.
53. Rojas, C., Fang, S., Uhlenhut, F., Borchert, A. et al., *Stirring and biomass starter influences the anaerobic digestion of different substrates for biogas production*. *Eng. Life Sci.* 2010, 10, 339–347.
54. Castrillon, L., Vazquez, I., Maranon, E., Sastre, H., *Anaerobic thermophilic treatment of cattle manure in UASB reactors*. *Waste Manage. Res.* 2002, 20, 350–356.
55. Maranon, E., Castrillon, L., Fernandez, J. J., Fernandez, Y. et al., *Anaerobic mesophilic treatment of cattle manure in an up flow anaerobic sludge blanket reactor with prior pasteurization*. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2006, 56, 137–143.

56. Aoki, K., Umetsu, K., Nishizaki, K., Takahashi, J. et al., *Thermophilic biogas plant for dairy manure treatment as combined power and heat system in cold regions*. Int. Congr. Series 2006,1293, 238–241.
57. Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W. et al., *Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield*. Agric. Ecosys. Environ. 2007, 118, 173–182.
58. Dubrovskis, V., Plume, I., Straume, I., *Investigation of biogas production from mink and cow manure*. Proceedings of the 8th International Scientific Conference, Engineering for rural development, Jelgava, Latvia 2009.
59. Sadaka, S., Engler, C., *Effects of mixing on anaerobic composting of beef manure*. Proceeding of ASAE Annual International Meeting, Technical papers: Engineering Solutions for a New Century, Milwaukee, WI, USA 9–12 July 2000.
60. Karim, K., Klasson, K. T., Drescher, S. R., Ridenour, W. et al., *Mesophilic digestion kinetics of manure slurry*. Appl. Biochem. Biotechnol. 2007, 142, 231–242.
61. Li, R., Chen, S., Li, X., Lar, J. S. et al., *Anaerobic codigestion of kitchen waste with cattle manure for biogas production*. Energy & Fuels 2009, 23, 2225–2228.
62. Angelidaki, I., Ellegaard, L., *Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plant: status and future trend*. Appl. Biochem. Biotechnol. 2003, 109, 95–105.
63. Callaghan, F., Wase, D., Thayanithy, K., Forster, C., *Codigestion of waste organic solids: batch studies*. Bioresour. Technol. 1999, 67, 117–122.
64. Mladenovska, Z., Dabrowski, S., Ahring, B. K., *Anaerobic digestion of manure and mixture of manure with lipids: biogas reactor performance and microbial community analysis*. Water Sci. Technol. 2003, 48, 271–278.
65. Comino, E., Rosso, M., Riggio, V., *Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix*. Bioresour. Technol. 2009, 100, 5072–5078.
66. Li, R., Chen, S., Li, X., *Anaerobic co-digestion of kitchen waste and cattle manure for methane production*. Ener. Sour. A 2009, 31, 1848–1856.

67. Alkaya, E., Erguder, T.H., Demirer, G.N., *Effect of operational parameters on anaerobic co-digestion of dairy cattle manure and agricultural residues: a case study for the Kahramanmaraş region in Turkey*. Eng. Life Sci. 2010, 10, 552–559.
68. Hansen, K. H., Angelidaki, I., Ahring, B. K., *Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia*. Water Res. 1999, 32, 5–12.
69. Rodriguez Andara, A., Lomas Esteban, J., *Kinetic study of the anaerobic digestion of the solid fraction of piggery slurries*. Bio. Bioener. 1999, 17, 435–443.
70. Kalyuzhnyi, S., Sklyar, V., Fedorovich, V., Kovalev, A. et al., *The development of biological methods for utilisation and treatment of diluted manure streams*. Water Sci. Technol. 1999, 40, 223–229.
71. Hill, D., Bolte, J., *Methane production from low solid concentration liquid swine waste using conventional anaerobic fermentation\**. Bioresour. Technol. 2000, 74, 241–247.
72. Pagilla, K. R., Kim, H., Cheunbarn, T., *Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste*. Water Res. 2000, 34, 2747–2753.
73. Møller, H. B., Nielsen, A. M., Nakakubo, R., Olsen, H. J., *Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure*. Livestock Sci. 2007, 112, 217–223.
74. Massé, D. I., Masse, L., Croteau, F., *Effect of temperature fluctuations in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure*. Bioresour. Technol. 2003, 89, 57–62.
75. Massé, D., Lu, D., Masse, L., Droste, R., *Effect of antibiotics on psychrophilic anaerobic digestion of swine manure slurry in sequencing batch reactors*. Bioresour. Technol. 2000, 75, 205–211.
76. Chae, K., Jang, A., Yim, S., Kim, I. S., *The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure*. Bioresour. Technol. 2008, 99, 1–6.
77. Ferrer, I., Gamiz, M., Almeida, M., Ruiz, A., *Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru)*. Waste Manage. 2009, 29, 168–173.



78. Kaparaju, P., Rintala, J., *Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure*. Resour. Conserv. Recy. 2005, 43, 175–188.
79. Zhang, R., Tao, J., Dugba, P., *Evaluation of two-stage anaerobic sequencing batch reactor systems for animal wastewater treatment*. Trans. ASAE 2000, 43, 1795–802.
80. Boe, K., Karakashev, D., Trably, E., Angelidaki, I., *Effect of post-digestion temperature on serial CSTR biogas reactor performance*. Water Res. 2009, 43, 669–676.
81. Lansing, S., Martin, J. F., Botero, R. B., Da Silva, T. N. et al., *Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease*. Bioresour. Technol. 2010, 101, 4362–4370.
82. Francese, A. P., Aboagye-Mathiesen, G., Olesen, T., Cordoba, P.R. et al., *Feeding approaches for biogas production from animal wastes and industrial effluents*. World J. Microbiol. Biotechnol. 2000, 16, 147–150.
83. Zhi, Y., Zhou, C., *An effective way of anaerobic digestion of chicken manure with plant biomass*. Tech Connect World Conference and Expo 2011, Boston MA, USA 2011.
84. Bujoczek, G., Oleszkiewicz, J., Sparling, R., Cenkowski, S., *High solid anaerobic digestion of chicken manure*. J. Agric. Eng. Res. 2000, 76, 51–60.
85. Güngör-Demirci, G., Demirer, G. N., *Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure*. Bioresour. Technol. 2004, 93, 109–117.
86. Magbanua Jr., B. S., Adams, T. T., Johnston, P., *Anaerobic codigestion of hog and poultry waste*. Bioresour. Technol. 2001, 76, 165–168.
87. Abouelenien, F., Nakashimada, Y., Nishio, N., *Dry mesophilic fermentation of chicken manure for production of methane by repeated batch culture*. J. Biosci. Bioeng. 2009, 107, 293–295.
88. Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M. et al., *Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle*. Bioresour. Technol. 2010, 101, 6368–6373.

89. Lazor, M., Hutnan, M., Sedl'acek, S., Koles'arov'a, N. et al., *Anaerobic co-digestion of poultry manure and waste kitchen oil*. Proceedings of the 37th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering, Tatransk' e Matliare, Slovakia 2010.
90. Anozie, A. N., Layokun, S. K., *An evaluation of a batch pilotscaledigester for gas production from agricultural wastes*. *Ener.Sour.* 2005, 27, 1301–1311.
91. Atuanya, E. I., Aigbirior, M., *Mesophilic biomethanation and treatment of poultry wastewater using pilot-scale UASB reactor*. *Environ. Monit. Assess.* 2002, 77, 139–147.
92. Ahring, K.B., Sandberg, M., Angelidaki, I., *Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors*, *Appl Microbiology Biotechnology* 43, 559-565, 1995.
93. Gerardi, H. Michael, *Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, 2003.
94. Hall E.R., *Anaerobic treatment of wastewaters in suspended growth and fixed film processes*, In: *Water Quality Management Library*, Ed. Malina, J.F. and Pohland, F.G., Technomic Publishing Company, 1992.
95. Καραγκούνη-Κύρτσου, Α., *Γενική Μικροβιολογία*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης Αθήνα, 1999.