

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΤΕΧΝΟ- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΑΞΙΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΖΩΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ**

υπό

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΟΝΤΟΚΩΣΤΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ., 2009

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2013

© 2013 Γεώργιος Κοντοκόστας

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βιομηχανίας,

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βιομηχανίας,

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αναστάσιο Σταμάτη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Νικόλαο Ανδρίτσο, Αναστάσιο Σταματέλλο, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Γεώργιος Κοντοκόστας

ΤΕΧΝΟ- ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΑΞΙΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΖΩΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΓΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΝΤΟΚΩΣΤΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2013

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης, Αναπληρωτής Καθηγητής Εφαρμοσμένης
Θερμοδυναμικής – Θερμικών σταθμών

Περίληψη

Ο Ευρωπαϊκός στόχος «20/20/20», που ψηφίστηκε το 2008, περιλαμβάνει 20% μείωση των αερίων θερμοκηπίου, 20% αύξηση ενεργειακής αποδοτικότητας και επιπλέον αύξηση του ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% μέχρι το έτος 2020. Η χρήση βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας συμβάλει στην επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή βιοαερίου, το οποίο καίγεται για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία αναπτύσσονται αριθμητικές μέθοδοι για την εκτίμηση της απόδοσης σε βιοαέριο συστημάτων αναερόβιας χώνευσης και στη συνέχεια της ενέργειας που παράγεται από την καύση του.

Αρχικά, αναπτύσσεται η μέθοδος για τη διαστασιολόγηση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης και ο υπολογισμός του παραγόμενου βιοαερίου με βάση συγκεκριμένες ποσότητες υποστρωμάτων που είναι διαθέσιμα.

Στη συνέχεια αναπτύσσεται το θερμοδυναμικό μοντέλο της συμπαραγωγής για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που παράγονται από την καύση του βιοαερίου σε σύστημα αεροστροβίλου.

Επίσης αναπτύσσεται το οικονομικό μοντέλο βιωσιμότητας του σταθμού, μετά την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στον εθνικό φορέα και των άλλων προϊόντων σε πελάτες-καταναλωτές.

Τέλος, εφαρμόζονται πραγματικά δεδομένα στο μοντέλο και εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα. Ακολουθεί και βελτιστοποίηση για τον υπολογισμό των βέλτιστων επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Κίνητρο και Υπόβαθρο	1
1.2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	1
1.3	Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας	1
Κεφάλαιο 2	Ενέργεια από Βιομάζα	3
2.1	Εισαγωγή	3
2.1.1	Η φωτοσύνθεση	3
2.1.2	Ο φυσικός κύκλος του άνθρακα	4
2.1.3	Ο κύκλος του άνθρακα με τα ορυκτά καύσιμα	5
2.2	Βιομάζα	6
2.2.1	Προέλευση βιομάζας	7
2.3	Διεργασίες παραγωγής βιοκαυσίμων και βιοενέργειας	8
2.3.1	Θερμοχημικές διεργασίες[8]	9
2.3.2	Βιοχημικές διεργασίες	14
2.4	Παραγωγή ενέργειας	16
2.4.1	Παραγωγή θερμικής ενέργειας	16
2.4.2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας – Συμπααραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	19
2.4.3	Συμπααραγωγή με καύση στερεών καυσίμων	19
2.4.4	Συμπααραγωγή με καύση αέριων και υγρών καυσίμων	21
Κεφάλαιο 3	Αναερόβια χώνευση	24
3.1	Αναερόβια χώνευση	24
3.1.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση	26
3.1.2	Ιδιότητες βιοαερίου	29
3.1.3	Υποστρώματα	29
3.2	Συστήματα παραγωγής βιοαερίου	33
3.2.1	Μέρη σταθμού βιοαερίου	35
Κεφάλαιο 4	Διαστασιολόγηση σταθμού παραγωγής βιοαερίου	48
4.1	Διαστασιολόγηση	48
4.1.1	Δεξαμενή αποθήκευσης υγρών υποστρωμάτων	48
4.1.2	Αντλία τροφοδοσίας υγρών υποστρωμάτων	48
4.1.3	Σιλό αποθήκευσης στερεών υποστρωμάτων	49
4.1.4	Χωνευτήρας	49
4.1.5	Σύστημα ανάδευσης	49
4.1.6	Σύστημα θέρμανσης χωνευτήρα	50
4.1.7	Αποθήκευση βιοαερίου	52
4.2	Ενεργειακές ανάγκες του σταθμού	52
4.2.1	Ηλεκτρικές ανάγκες	52
4.2.2	Θερμικές ανάγκες	52
Κεφάλαιο 5	Θερμοδυναμική ανάλυση συστήματος ΣΗΘ	53
5.1	Εισαγωγή	53
5.2	Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί	55
Κεφάλαιο 6	Εξεργειακή ανάλυση συστήματος ΣΗΘ	60

6.1	Εισαγωγή	60
6.2	Εξεργειακοί υπολογισμοί.....	63
6.2.1	Ρυθμοί μεταβολής εξέργειας.....	63
6.2.2	Καταστροφή εξέργειας στις συσκευές και εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης	66
6.2.3	Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος συμπαραγωγής.....	68
Κεφάλαιο 7 Οικονομική ανάλυση		69
7.1	Οικονομική ανάλυση.....	69
7.1.1	Εκτίμηση Συνολικού Κεφαλαίου Επένδυσης.....	69
7.1.2	Εκτίμηση δαπανών λειτουργίας και συντήρησης.....	71
7.1.3	Εκτίμηση εσόδων από την πώληση των προϊόντων.....	72
7.1.4	Εκτίμηση απόδοσης	72
7.2	Οικονομικοί υπολογισμοί	73
Κεφάλαιο 8 Βελτιστοποίηση		77
8.1	Βελτιστοποίηση	77
8.2	Βελτιστοποίηση συστήματος ΣΗΘ.....	78
Κεφάλαιο 9 Αριθμητικά αποτελέσματα		79
9.1	Διαστασιολόγηση σταθμού αναερόβιας χώνευσης	79
9.2	Αποτελέσματα θερμοδυναμικών υπολογισμών.....	84
9.3	Αποτελέσματα εξεργειακών υπολογισμών	88
9.4	Αποτελέσματα οικονομικών υπολογισμών.....	91
9.5	Βελτιστοποίηση	98
9.6	Εναλλακτικό σενάριο αξιοποίησης βιοαερίου [25] [26]	99
Κεφάλαιο 10 Συμπεράσματα		103
Βιβλιογραφία		105

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Συνήθειες διεργασίες για στερεή βιομάζα	11
Πίνακας 3-1: Τύποι διεργασιών της αναερόβιας χώνευσης.....	26
Πίνακας 3-2: Αναλογία C/N υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα για παραγωγή βιοαερίου.....	28
Πίνακας 3-3: Σύσταση του βιοαερίου.	29
Πίνακας 3-4: Απόβλητα κατάλληλα για βιολογική επεξεργασία σύμφωνα με ΕΚΑ.[13].....	31
Πίνακας 3-5: Ενδεικτικές τιμές για μερικά είδη υποστρωμάτων.[1], [2], [3].....	32
Πίνακας 5-1: Πίνακας συντελεστών για διάφορες ουσίες.	54
Πίνακας 6-1: Πίνακας χημικών εξεργειών για διάφορες ουσίες.....	61
Πίνακας 6-2: Πίνακας ειδικών μοριακών ενθαλπιών και εντροπιών σε συνθήκες αναφοράς για διάφορες ουσίες.	64
Πίνακας 7-1: Ανάλυση του Συνολικού Κεφαλαίου Επένδυσης.....	70
Πίνακας 7-2: Κατανάλωση πετρελαίου για μεταφορά υποστρωμάτων[21]	74
Πίνακας 7-3: Απόδοση καλλιέργειών σε ενσίρωμα	75
Πίνακας 9-1: Ποσότητες υποστρωμάτων ανά έτος.....	79
Πίνακας 9-2: Παραγωγή βιοαερίου ανά τύπο υποστρώματος	79
Πίνακας 9-3: Διαστασιολόγηση χωνευτήρα.....	80
Πίνακας 9-4: Διαστασιολόγηση αγωγού εκκένωσης	80
Πίνακας 9-5: Σύστημα θέρμανσης χωνευτήρα.....	81

Πίνακας 9-6: Διαστασιολόγηση συστήματος ανάδευσης	82
Πίνακας 9-7: Διαστασιολόγηση δεξαμενής υγρών υποστρωμάτων.....	82
Πίνακας 9-8: Διαστασιολόγηση αντλιών τροφοδοσίας.....	82
Πίνακας 9-9: Διαστασιολόγηση σιλό	82
Πίνακας 9-10: Διαστασιολόγηση συστήματος τροφοδοσίας στερεών.....	83
Πίνακας 9-11: Διαστασιολόγηση δεξαμενής αποθήκευσης βιοαερίου.....	83
Πίνακας 9-12: Διαστασιολόγηση αποθείωσης.....	83
Πίνακας 9-13: Συνολικές ιδιοκαταναλώσεις σταθμού αναερόβιας χώνευσης.....	83
Πίνακας 9-14: Μεταβλητές απόφασης.....	84
Πίνακας 9-15: Ειδικές μοριακές ενθαλπίες (απόλυτες) για τον υπολογισμό του λόγου καυσίμου-αέρα	84
Πίνακας 9-16: Περιεκτικότητες καυσαερίων	85
Πίνακας 9-17: Παροχές αέρα, καυσίμου, καυσαερίων	85
Πίνακας 9-18: Θερμοδυναμικά στοιχεία ανά θέση	85
Πίνακας 9-19: Παραγόμενη ισχύς	85
Πίνακας 9-20: Βαθμοί απόδοσης κύκλου συμπαραγωγής	86
Πίνακας 9-21: Διακύμανση μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας, θερμικών αναγκών και διαθέσιμης θερμικής ισχύος	87
Πίνακας 9-22: Εξέργειες ανά θέση.....	88
Πίνακας 9-23: Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης.....	90

Πίνακας 9-24: Σταθερό κεφάλαιο επένδυσης	92
Πίνακας 9-25: Κεφάλαιο κίνησης και συνολικό κεφάλαιο επένδυσης.....	92
Πίνακας 9-26: Έσοδα από τη λειτουργία του σταθμού ανά έτος.....	92
Πίνακας 9-27: Κόστος λειτουργίας του σταθμού.....	93
Πίνακας 9-28: Αποσβέσεις.....	93
Πίνακας 9-29: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης.....	93
Πίνακας 9-30: Βασικές χρηματοροές επένδυσης.....	96
Πίνακας 9-31: Βελτιστοποίηση προς ηλεκτρική ισχύ και θερμική ισχύ.....	98
Πίνακας 9-32: Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης αναβάθμισης βιοαερίου.....	100
Πίνακας 9-33: Έσοδα από τη λειτουργία του σταθμού βιομεθανίου ανά έτος.....	100
Πίνακας 9-34: Κόστος λειτουργίας του σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου.....	100
Πίνακας 9-35: Αποσβέσεις σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου	101
Πίνακας 9-36: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου.....	101
Πίνακας 9-37: Χρηματοροή για είκοσι έτη λειτουργίας σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου	101

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Ο φυσικός κύκλος του άνθρακα.	4
Σχήμα 2-2: Απλουστευμένη σχηματική παράσταση συμπαραγωγικού σταθμού με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.[10]	20
Σχήμα 2-3: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου.[10].....	22
Σχήμα 3-1: Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.[2]	24
Σχήμα 3-2: Κύρια συστατικά των τροφίμων και οι διεργασίες μετατροπής τους κατά την αναερόβια χώνευση.[2]	25
Σχήμα 3-3: Απόδοση βιοαερίου ανάλογα με τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής.[12].	27
Σχήμα 3-4: Εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή βιοαερίου από κοπριά και αγροτικά υπολείμματα.....	34
Σχήμα 3-5: Εύρη λειτουργίας και αποδόσεις διάφορων τύπων μηχανών.[12]	42
Σχήμα 5-1: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο.	55
Σχήμα 9-1: Παραγωγή βιοαερίου ανά τύπο υποστρώματος.....	80
Σχήμα 9-2: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο	84
Σχήμα 9-3: Συγκεντρωτικά ισχύς	86
Σχήμα 9-4: Διακύμανση θερμικών αναγκών και διαθέσιμης θερμικής ισχύος.....	87
Σχήμα 9-5: Ισοζύγιο μάζας, ενέργειας και τελικό λίπασμα που προκύπτει	88
Σχήμα 9-6: Μεταβολή της φυσικής εξέργειας ανά θέση.....	89
Σχήμα 9-7: Μεταβολή της χημικής εξέργειας ανά θέση	89

Σχήμα 9-8: Μεταβολή της ολικής εξέργειας ανά θέση	90
Σχήμα 9-9: Λόγοι καταστροφής εξέργειας συστατικού	90
Σχήμα 9-10: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών	91
Σχήμα 9-11: Συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης κύκλου.....	91
Σχήμα 9-12: Ετήσιες χρηματορροές και αθροιστική χρηματορροή.....	97
Σχήμα 9-13: Σενάρια βελτιστοποίησης	99
Σχήμα 9-14: Βαθμοί απόδοσης για τα σενάρια βελτιστοποίησης.....	99
Σχήμα 9-15: Σύγκριση χρηματορροών σταθμού συμπαραγωγής και αναβάθμισης βιοαερίου	102

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Η διεργασία της φωτοσύνθεσης. [1]	3
Εικόνα 2-2: Ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα για καύση και αποσύνθεση.[1]	5
Εικόνα 2-3: Ορολογία σύμφωνα με το EN 14588.[2]	7
Εικόνα 2-4: Διάφοροι τύποι βιομάζας.[1]	8
Εικόνα 2-5: Γενική απεικόνιση λέβητα κινούμενης σχάρας.[9]	20
Εικόνα 3-1: Δεξαμενή αποθήκευσης υγρών υποστρωμάτων.	36
Εικόνα 3-2: Σιλό αποθήκευσης στερεών υποστρωμάτων.	36
Εικόνα 3-3: Διάφοροι τύποι αντλιών.	38
Εικόνα 3-4: Διάταξη τροφοδοσίας στερεών υποστρωμάτων.	38

Εικόνα 3-5: Διάταξη κατακόρυφων χωνευτήρων.	39
Εικόνα 3-6: Θέρμανση χωνευτήρα.....	40
Εικόνα 3-7: Σύστημα μηχανικής ανάδευσης.....	41
Εικόνα 3-8: Εξωτερική δεξαμενή αποθήκευσης βιοαερίου.	41
Εικόνα 3-9: Μηχανή εσωτερικής καύσης βιοαερίου.	44
Εικόνα 3-10: Αεριοστρόβιλος βιοαερίου.	44
Εικόνα 3-11: Σύστημα παρακολούθησης σταθμού βιοαερίου.	45
Εικόνα 3-12: Πυρσός καύσης βιοαερίου.....	47

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, παρατίθεται μια ανασκόπηση της σχετικής με την εργασία βιβλιογραφίας και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της μεταπτυχιακής εργασίας.

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Τα συστήματα συμπαραγωγής από καύση βιοαερίου είναι τα τελευταία χρόνια στο προσκήνιο λόγω της εξάπλωσης χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της πρόθεσης μείωσης χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Διάφορα απόβλητα και υπολείμματα παραγωγικών διαδικασιών, που στο παρελθόν δεν είχαν καμία χρήση και ήταν δύσκολα στην απόρριψή τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατάλληλους αναερόβιους χωνευτήρες για την παραγωγή βιοαερίου. Το βιοαέριο καίγεται σε μηχανές για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Παράλληλα τα υπολείμματα της χώνευσης χρησιμοποιούνται σα λίπασμα στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Η δυσκολία στην εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης έγκειται στο ότι η ποιότητα και η ποσότητα των υποστρωμάτων μπορεί να διαφοροποιηθεί λόγω διάφορων παραγόντων και έτσι να μεταβληθεί η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μερική λειτουργία του συστήματος ή τη λειτουργία με μικρότερο βαθμό απόδοσης και επομένως απώλεια εσόδων.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία προσφέρει έναν οδηγό για τη σχεδίαση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης, υπολογίζονται η ηλεκτρική και η θερμική ενέργεια που παράγονται και τα οικονομικά στοιχεία για τη βιωσιμότητα μιας τέτοιας επένδυσης. Παράλληλα παρουσιάζονται σενάρια αναφορικά με τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της παραγόμενης ισχύος από το σύστημα συμπαραγωγής.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία που είναι σχετική με την εκτίμηση της απόδοσης συστημάτων αναερόβιας χώνευσης, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσεται βιβλιογραφία που σχετίζονται με τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και την παραγωγή βιοαερίου (π.χ. [1], [2], [3]). Στην δεύτερη κατηγορία, εντάσσεται βιβλιογραφία που αναφέρεται στη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με αεριοστρόβιλο και τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς (π.χ. [4], [5], [6], [7]).

1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας χωρίζεται σε τρεις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 10, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Η πρώτη ενότητα καλύπτει τα Κεφάλαια 2-3 που αναφέρονται σε βασικά στοιχεία σχετικά με τη βιομάζα και την αναερόβια χώνευση.

Η δεύτερη ενότητα καταλαμβάνει τα Κεφάλαια 4-8. Στην ενότητα αυτή αναπτύσσονται οι υπολογισμοί σχετικά με τη διαστασιολόγηση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης, οι θερμοδυναμικοί και εξεργειακοί υπολογισμοί του κύκλου

συμπαγωγής, τα οικονομικά στοιχεία της επένδυσης και της λειτουργίας και το επιχειρηματικό πλάνο και στο τέλος η βελτιστοποίηση.

Η τρίτη ενότητα περιλαμβάνει τα κεφάλαια 9-10. Στο Κεφάλαιο 9 παραθέτονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των υπολογισμών. Τα τελικά συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και οι κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 10.

Κεφάλαιο 2 Ενέργεια από Βιομάζα

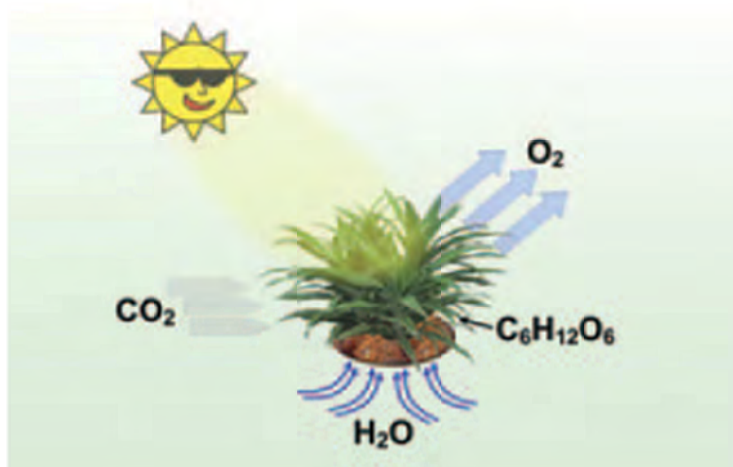
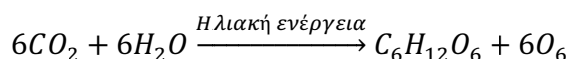
Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η έννοια της βιομάζας. Παρουσιάζονται οι διάφορες πηγές βιομάζας και οι διεργασίες για την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα.

2.1 Εισαγωγή

Ο άνθρακας είναι ένα στοιχείο κεφαλαιώδους σημασίας για το σχηματισμό οργανικής ζωής. Μαζί με το οξυγόνο και το υδρογόνο είναι τα κύρια στοιχεία σχηματισμού των υδρογονανθράκων που απαρτίζουν τους ζωντανούς ιστούς τόσο των ζώων όσο και των φυτών. Καθώς οι οργανισμοί αναπτύσσονται και μεγαλώνουν, ο άνθρακας δεσμεύεται από το ζωντανό ιστό και η ίδια ποσότητα άνθρακα ελευθερώνεται στο περιβάλλον μετά το θάνατο και την αποσύνθεση των οργανισμών.

2.1.1 Η φωτοσύνθεση

Ο πιο σημαντικός μηχανισμός δέσμευσης άνθρακα σε ζωντανούς ιστούς είναι η φωτοσύνθεση. Μέσω της φωτοσύνθεσης το διοξείδιο του άνθρακα απορροφάται από την ατμόσφαιρα σε φυτά που αναπτύσσονται. Μαζί με νερό και με την ηλιακή ενέργεια, το διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε πλούσια ενεργειακά σάκχαρα τα οποία χρειάζονται τα φυτά (Εικόνα 2.1) και τα οποία μετατρέπονται με τη σειρά τους σε άλλες ουσίες, όπως η κυτταρίνη που χρησιμοποιούμε για ρουχισμό (το βαμβάκι και το λινάρι δεν είναι τίποτα περισσότερο από ίνες κυτταρίνης) και χαρτί και μετασχηματίζονται σε ξύλο (το ξύλο αποτελείται από κυτταρίνη και άλλη μια ουσία που ονομάζεται λιγνίνη) το οποίο χρησιμοποιούμε σε οικίες και άλλες κατασκευές, καθώς και σε άλλες χρήσεις. Παραπροϊόν της φωτοσύνθεσης είναι το παραγόμενο οξυγόνο το οποίο ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Η αντίδραση της φωτοσύνθεσης για την παραγωγή σακχάρων παίρνει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 2-1: Η διεργασία της φωτοσύνθεσης. [1]

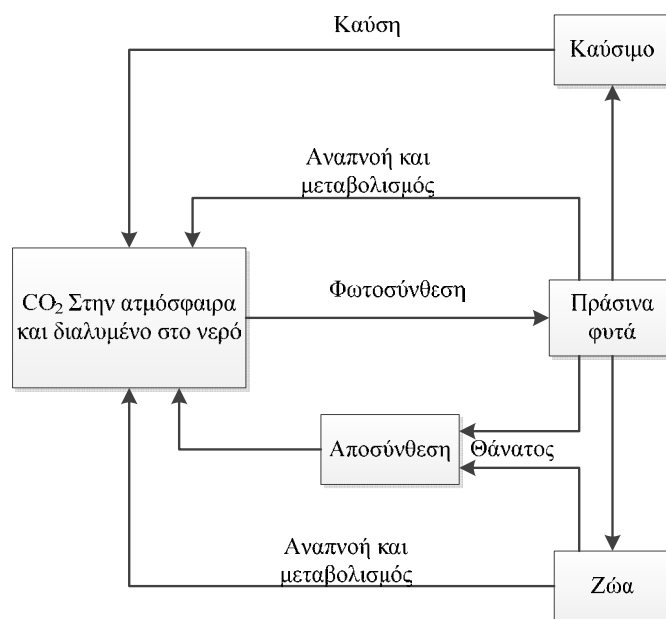
Για τη μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού σε γλυκόζη και κυτταρίνη, τα φυτά χρησιμοποιούν ένζυμα, πρωτεΐνες και αμινοξέα, ένα από τα πλέον γνωστά είναι η χλωροφύλλη.

Η φωτοσύνθεση είναι η μόνη πηγή οξυγόνου, που οι άνθρωποι και τα ζώα χρειάζονται για να ζήσουν, στον πλανήτη. Η ιδιαίτερη σημασία της φωτοσύνθεσης για τη ζωή στη γη γίνεται αντιληπτή, αν αναλογιστούμε τις παγκόσμιες διαστάσεις της διεργασίας αυτής και την ιστορική επιρροή της στο κλίμα της γης.

2.1.2 Ο φυσικός κύκλος του άνθρακα

Στον πλανήτη μας, το στοιχείο του άνθρακα βρίσκεται σε ένα συνεχή κύκλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Σε αυτόν τον κύκλο, ο άνθρακας μετασχηματίζεται σε αλυσίδες άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης στα φυτά. Οι οργανισμοί που δεν μπορούν να δεσμεύσουν απευθείας τον άνθρακα από την ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν νέους ζωτικούς ιστούς, εξαρτώνται από την πρόσληψη ήδη σχηματισμένων αποθεμάτων δεσμευμένου άνθρακα για την ανάπτυξή τους. Οι άνθρωποι και τα ζώα είναι δυο παραδείγματα τέτοιων οργανισμών. Οι φυτοφάγοι οργανισμοί εξαρτώνται πλήρως από την κατανάλωση φυτών για την παροχή του άνθρακα και της ενέργειας που απαιτείται για την ανάπτυξη και τη ζωή τους. Μεγάλο μέρος του φαγητού που καταναλώνουν είναι κυτταρίνη, την οποία το πεπτικό τους σύστημα μπορεί να χωνέψει και να διασπάσει σε μικρότερα μέρη τα οποία θα συνθέσουν τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τις άλλες ουσίες που χρειάζονται. Αντίστοιχα στους παμφάγους οργανισμούς, το πεπτικό τους σύστημα μπορεί να χωνέψει την κυτταρίνη μέχρι κάποιο βαθμό αλλά είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί βέλτιστα με ένα μείγμα πρωτεϊνών και λιπαρών από μια μεικτή διαίτα αποτελούμενη από φυτικές και ζωικές πρωτεΐνες.

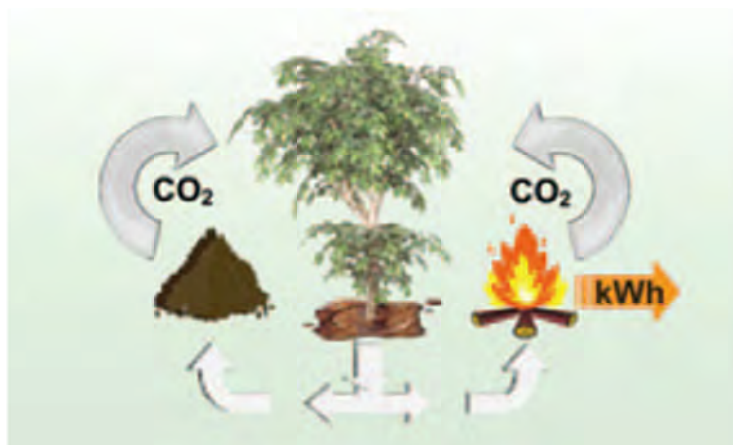
Σε κάθε περίπτωση, ο άνθρακας που βρίσκεται σε κάθε αναπτυσσόμενο, ζωντανό οργανισμό προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από άνθρακα που απομακρύνθηκε από την ατμόσφαιρα και δεσμεύτηκε σε ένα αναπτυσσόμενο φυτό μέσω της φωτοσύνθεσης.



Σχήμα 2-1: Ο φυσικός κύκλος του άνθρακα.

Όταν ένας οργανισμός πεθαίνει, η οργανική ύλη αποσυντίθεται και μετασηματίζεται ξανά στα αρχικά της συστατικά: νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Η διεργασία αυτή μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή, όπως στις ερήμους όπου οργανικά υλικά όπως κομμάτια ρούχων και προϊστορικά υφαντά έχουν βρεθεί μετά από χιλιάδες χρόνια, ή πολύ γρήγορη, όπως στους κάδους κομποστοποίησης. Όπως ακριβώς το οξυγόνο ελευθερώνεται κατά το σχηματισμό νέας οργανικής ύλης κατά τη φωτοσύνθεση, έτσι και η ίδια ποσότητα οξυγόνου καταναλώνεται κατά την αποσύνθεση. Επίσης, το ίδιο ποσό ενέργειας που δεσμεύεται κατά τη φωτοσύνθεση, ελευθερώνεται κατά την αποσύνθεση.

Η αργή και φυσική αποσύνθεση του οργανικού υλικού μπορεί να αντικατασταθεί από μια γρήγορη και ελεγχόμενη διαδικασία που ονομάζεται καύση. Το πλεονέκτημα της καύσης του οργανικού υλικού σε σχέση με την αργή αποσύνθεσή του είναι ότι στην πρώτη περίπτωση μπορεί να γίνει πρακτική χρήση της ενέργειας που ελευθερώνεται, κάτι το οποίο είναι πολύ δύσκολο να γίνει στην αργή βιολογική αποσύνθεση. Η παραγωγή ενέργειας από ξηρή βιομάζα είναι πολύ πιο εύκολη με την άμεση καύση.



Εικόνα 2-2: Ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα για καύση και αποσύνθεση.[1]

Η καύση είναι ουσιαστικά μια διαδικασία ενός βήματος: το καύσιμο έρχεται σε άμεση επαφή με τη σωστή ποσότητα οξυγόνου, το μείγμα αναφλέγεται και μετά η διαδικασία αφήνεται να εξελιχθεί μέχρι τέλους. Πρακτικά από τη διαδικασία της καύσης εκλύεται η ίδια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με την αργή αποσύνθεση. Στην εικόνα 2.2 φαίνονται οι δρόμοι του διοξειδίου του άνθρακα για τις διεργασίες της καύσης και της αποσύνθεσης. Όπως φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις ο κύκλος είναι κλειστός. Επομένως, η χρήση βιομάζας για παραγωγή ενέργειας είναι απλά η αντικατάσταση της αργής αποσύνθεσης που συμβαίνει αυθόρμητα σε νεκρούς οργανικούς ιστούς με μια γρήγορη και επιβαλλόμενη διεργασία που συμβαίνει σε κλειστό χώρο και από την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε πρακτικά την παραγόμενη ενέργεια.

2.1.3 Ο κύκλος του άνθρακα με τα ορυκτά καύσιμα

Σε αντίθεση με τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τα καύσιμα που σήμερα ονομάζουμε «ορυκτά» σχηματίστηκαν πριν περίπου 100 εκατομμύρια χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι ο άνθρακας δεσμεύτηκε σε αυτά τα καύσιμα με φωτοσύνθεση πριν αιώνες, αλλά ελευθερώνεται στον τρέχον κύκλο του άνθρακα. Η έκφραση «ο τρέχων

κύκλος άνθρακα» αναφέρεται στην κυκλοφορία του άνθρακα στο ισοζύγιο των τελευταίων εκατό ετών. Εκατό έτη είναι περίπου ο χρόνος που απαιτείται για την ανάπτυξη δέντρων στις υποαρκτικές περιοχές και χρησιμοποιείται ως μια παγκόσμια και κοινή βάση για το ισοζύγιο του άνθρακα. Έτσι, ο άνθρακας που δεσμεύεται και ελευθερώνεται εντός ενός αιώνα θεωρείται να βρίσκεται σε ισορροπία, ενώ ο αρχαιότερος άνθρακας θεωρείται προσθήκη στον κύκλο. Φυσικά, το όριο αυτό δεν είναι αυστηρό, αλλά μια μέση τιμή. Τα εκατό έτη είναι ένας αυθαίρετα ορισμένος αριθμός επιλεγμένος έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει ένα αργά αναπτυσσόμενο, αλλά μεγάλο και σημαντικό σε παγκόσμιο επίπεδο οικοσύστημα, την τσίγκα.

Μέχρι τώρα πρέπει να έχει γίνει σαφές τα ορυκτά καύσιμα, από την πλευρά της ισορροπίας του άνθρακα, αντιπροσωπεύουν ορυκτοποιημένο άνθρακα και επομένως, από την ίδια οπτική γωνία, μπορεί να φαίνονται αντίστοιχα με τον ασβεστόλιθο. Στην πράξη, αποτελεί μέρος του πολύ αργού, αλλά φυσικού, κύκλου του ορυκτοποιημένου άνθρακα.

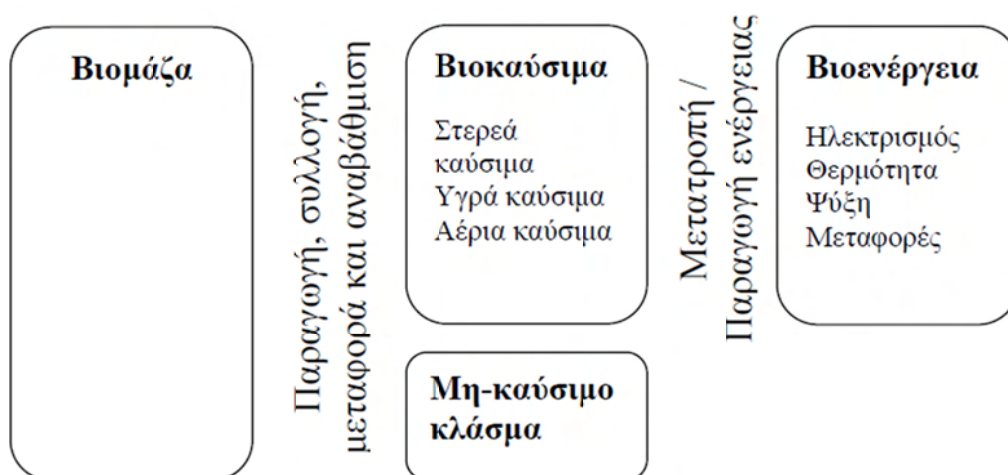
Ανεξάρτητα από την πηγή και τη διεργασία, η απελευθέρωση ορυκτοποιημένου άνθρακα στην ατμόσφαιρα αυξάνει την ποσότητα του άνθρακα που κυκλοφορεί στο σύντομο κύκλο άνθρακα, δηλαδή αυτόν που αφορά τους αναπτυσσόμενους ζωντανούς οργανισμούς, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει αργά το ρυθμό με τον οποίο ο άνθρακας δεσμεύεται σε ορυκτή μορφή. Ο αργός και γρήγορος κύκλος άνθρακα, που αφορά ζωντανή και νεκρή βιομάζα, τους ωκεανούς και την ατμόσφαιρα, είναι αυτός που επηρεάζει το κλίμα.

Για να διατηρηθεί η βραχυχρόνια ισορροπία (δηλαδή η ισορροπία από την οπτική των εκατό περίπου ετών) απαιτείται η αύξηση του δυναμικού δέσμευσης του άνθρακα έτσι ώστε οι πρόσθετες ποσότητες που εκλύονται στην ατμόσφαιρα να δεσμευτούν και να μην οδηγήσουν σε αύξηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Οι ωκεανοί διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτή την ιστορία, καθώς οι τεράστιες ποσότητες νερού στις θάλασσες έχουν την ικανότητα να διαλύσουν τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, όπως πράγματι συμβαίνει. Δυστυχώς, αυτό έχει και αρνητικές επιδράσεις. Για παράδειγμα, οι ζημιές που αναφέρονται τα τελευταία χρόνια στους κοραλλιογενείς υφάλους μπορεί να αποδοθούν εν μέρει στην αύξηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στο θαλασσινό νερό.

Ο άλλος τρόπος να αυξηθεί το παγκόσμιο δυναμικό δέσμευσης άνθρακα είναι να αυξηθούν οι εκτάσεις στο στερεό φλοιό της γης που φιλοξενούν αποθέματα βιομάζας. Παγκοσμίως, οι κύριες εκτάσεις που φιλοξενούν οικοσυστήματα με μεγάλο δυναμικό δέσμευσης άνθρακα είναι τα δάση σε τροπικά, ήπια ή υποαρκτικά κλίματα. Αν η συνολική ποσότητα των δέντρων, μετρούμενη σε τόνους ή m^3 στερεής, ζωντανής ξυλείας, αφήνονταν να αυξηθεί, τότε θα επιτυγχάνονταν μια σημαντική αύξηση της αποθηκευόμενης ποσότητας άνθρακα. Δυστυχώς, αυτό δε συμβαίνει, ενώ η αποψίλωση δασών συνεχίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.2 Βιομάζα

Για την αποφυγή συγχύσεων σχετικά με ορισμένους βασικούς όρους των συστημάτων βιοενέργειας, ακολουθείται η ορολογία σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 14588. Η φιλοσοφία του προτύπου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2-3: Ορολογία σύμφωνα με το EN 14588.[2]

Οι ορισμοί που περιλαμβάνονται στο πρότυπο είναι οι ακόλουθοι [2]:

Βιομάζα είναι μια ύλη βιολογικής προέλευσης που δεν έχει υποστεί χημική μετατροπή και δεν περιέχει πρόσθετα.

Βιοκαύσιμο είναι μια καύσιμη ύλη που προέρχεται από τη βιομάζα. Το καύσιμο μπορεί να έχει υποστεί μια χημική μετατροπή, όπως αεριοποίηση, υδροποίηση, πυρόλυση, ζύμωση, αναερόβια χώνευση ή άλλη αντίστοιχη, ή μια φυσική μετατροπή, όπως άλεση, τεμαχισμό, πελλετοποίηση, μπρικετοποίηση. Το βιοκαύσιμο μπορεί επίσης να περιέχει πρόσθετα, με την προϋπόθεση ότι δεν περιέχουν βαρέα μέταλλα ή άλλες επιβλαβείς ουσίες.

Βιοενέργεια είναι ο (εμπορικός) φορέας ενέργειας που προέρχεται από τη χρήση του βιοκαυσίμου. Ο φορέας ενέργειας μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, για παράδειγμα μια φιάλη (βιο-)μεθανίου, η (βιο-)αιθανόλη που προσφέρεται σε πρατήρια, ο ηλεκτρισμός, η θερμότητα σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης, οι πελλέτες ξύλου και άλλες αντίστοιχες.

2.2.1 Προέλευση βιομάζας

Η βιομάζα μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή της. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- **Ενεργειακά φυτά**

Τα ενεργειακά φυτά καλλιεργούνται κυρίως για την παραγωγή ενέργειας. Η λειτουργία τους είναι να συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και να την αποθηκεύουν στη βιομάζα τους για μελλοντική χρήση. Παραδείγματα ενεργειακών φυτών είναι το καλαμπόκι, το σόργο, ο ηλιάνθος, η ελαιοκράμβη και το γαϊδουράγκαθο.

- **Αγροτικά υπολείμματα**

Τα υπολείμματα που παραμένουν μετά από το θερισμό, όπως το άχυρο, και τα υπολείμματα υλοτομίας, όπως κλαδιά, είναι φυσικά απορρίμματα. Αυτή η ομάδα φυσικών παραπροϊόντων βοηθά στην εξοικονόμηση της ενέργειας καθώς επιδρά στο

μικρότερο κόστος παραγωγής κυρίως προϊόντων ή στην αύξηση της απόδοσης της εφοδιαστικής αλυσίδας.



Εικόνα 2-4: Διάφοροι τύποι βιομάζας.[1]

- **Οργανικά παραπροϊόντα**

Η επεξεργασία βιομάζας από τους ανθρώπους για την παραγωγή προϊόντων οδηγεί στη δημιουργία σειράς παραπροϊόντων. Αυτά τα παραπροϊόντα περιλαμβάνουν την κοπριά και την υδαρή κοπριά από εκτροφεία ζώων και τα υπολείμματα από βιομηχανική επεξεργασία ξύλου και φυτικών υλών. Εδώ επίσης η χρήση της βιομάζας μπορεί να οδηγήσει σε κερδοφορία και να επιτευχθεί μέρος της παραγωγικής διαδικασίας να γίνεται με ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

- **Οργανικά απόβλητα**

Τα οργανικά απόβλητα αποτελούνται από τα απόβλητα κοινωνικών δραστηριοτήτων. Τέτοια είναι τα οικιακά και αστικά απορρίμματα, τα αστικά λύματα και τα υπολείμματα από επεξεργασία τροφίμων, όπως τα απόβλητα των σφαγείων. Στην περίπτωση των οργανικών αποβλήτων θα πρέπει να ακολουθείται η νομοθεσία και οι υγειονομικοί κανόνες για την αποφυγή μολύνσεων.

Για την παραγωγή βιοκαυσίμου με τις κατάλληλες ιδιότητες, είναι απαραίτητη η επεξεργασία της βιομάζας. Το βιοκαύσιμο που προκύπτει μετά την επεξεργασία, κατατάσσεται ανάλογα με την κατάστασή του σε τρεις κατηγορίες: στερεό, υγρό ή αέριο.

2.3 Διεργασίες παραγωγής βιοκαυσίμων και βιοενέργειας

Η βιομάζα δεν αποτελεί ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, αλλά πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική απόδοση. Ο απώτερος στόχος, με οποιαδήποτε διεργασία μετατροπής ενέργειας είναι, να

παραδώσει έναν ενεργειακό φορέα όσο γίνεται καταλληλότερο για τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη και με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες σε όλη την αλυσίδα από τον εφοδιασμό, δηλαδή τις πρώτες ύλες (π.χ. βιομάζα) μέχρι τον τελικό ενεργειακό φορέα. Όπως αναφέρθηκε, η ενέργεια που περιέχεται στα βιοκαύσιμα αποθηκεύτηκε αρχικά από τη φωτοσύνθεση και βρίσκεται σε λανθάνουσα κατάσταση, με τη μορφή πλούσιων σε ενέργεια (θερμικό περιεχόμενο) χημικών ενώσεων. Η θερμοχημική επεξεργασία της βιομάζας χρησιμοποιεί θερμότητα και καταλύτες για τη μετατροπή αυτών των χημικών ενώσεων σε καύσιμα, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Αντιθέτως, κατά τη βιοχημική επεξεργασία της βιομάζας γίνεται χρήση μικροοργανισμών και ενζύμων για την μετατροπή του στερεού υλικού σε βιοκαύσιμο. Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν οι δύο αυτοί τρόποι επεξεργασίας της βιομάζας.

2.3.1 Θερμοχημικές διεργασίες

Στη θερμοχημική μετατροπή γίνεται χρήση υψηλής θερμοκρασίας, τουλάχιστον μερικών εκατοντάδων βαθμών Κελσίου και μερικές φορές 1000°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, και σε ορισμένες περιπτώσεις, αυξημένης πίεσης, για την μετατροπή του στερεού. Σε αυτές τις συνθήκες, οι θερμοχημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα πολύ γρήγορα, ανεξάρτητα από την παρουσία ή όχι καταλυτών. Στις περισσότερες διεργασίες, η θερμότητα που απαιτείται για τη πραγματοποίηση της χημικής διεργασίας παράγεται από τη μερική καύση της πρώτης ύλης. Ανάλογα με την πραγματική θερμοκρασία και τη διάταξη της διεργασίας, πιο συγκεκριμένα το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, η διαδικασία που ακολουθείται της μερικής οξείδωσης θα προκαλεί απώλειες ενέργειας από την πρώτη ύλη στο τελικό προϊόν. Επίσης, η θερμοκρασία του παραγόμενου καυσίμου θα είναι αυτή της παραπάνω διεργασίας. Εκτός και αν αυτή η αναμενόμενη θερμότητα ανακτάται και χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία, θα παρουσιάζονται πρόσθετες απώλειες. Οι θερμοχημικές διεργασίες που περιγράφονται είναι: απευθείας καύση, πυρόλυση χαμηλής θερμοκρασίας, πυρόλυση υψηλής θερμοκρασίας, θερμική υγροποίηση και θερμική αεριοποίηση.

- **Απευθείας καύση**

Η καύση είναι η πλήρης οξείδωση του περιεχομένου άνθρακα και υδρογόνου των καυσίμων, σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και υδρατμό (H_2O (g)). Κατά τη διάρκεια της διεργασίας καύσης, πολλές από τις προσμίξεις των καυσίμων οξειδώνονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, και κάποιες από αυτές, όπως το άζωτο και το θείο, παράγουν επιβλαβείς εκπομπές (NO_x και SO_x). Αναλόγως με τη θερμογόνο δύναμη και το ποσοστό υγρασίας του καυσίμου, το λόγο αέρα-καύσιμου και την κατασκευή του λέβητα καύσης, η θερμοκρασία της φλόγας μπορεί να ξεπεράσει τους 1650°C. Το πλεονέκτημα της απευθείας καύσης είναι ότι χρησιμοποιεί απλή τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την απευθείας καύση έχει τη μορφή των προϊόντων της θερμής καύσης ή των καυσαερίων και η διεργασία η οποία εκμεταλλεύεται αυτή τη θερμότητα σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας από τα θερμά αέρια στο επιθυμητό προϊόν.

Η στερεή βιομάζα αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό καυσίμου για διεργασίες απευθείας καύσης. Οι κυριότερες πηγές καυσίμου είναι η ξυλώδης βιομάζα και τα ξυλώδη υπολείμματα, τα αγροτικά υπολείμματα και τα αστικά στερεά απόβλητα.

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί αναφέρονται αναλυτικά οι πηγές βιομάζας για απευθείας καύση, η προ-επεξεργασία που απαιτείται και το τελικό προϊόν που προκύπτει για καύση.

Βιομάζα	Προ-επεξεργασία	Βιοκαύσιμο	Τελική διεργασία
Ευλώδης βιομάζα υπολείμματα υλοτομίας, κλαδέματα κλπ.	Μείωση μεγέθους και ξήρανση	Κούτσουρα Τεμάχια ξύλου	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού
Ευλώδη υπολείμματα πριονίδι, ξέσματα κλπ.	Μείωση μεγέθους και ξήρανση, άλεση και συμπύκνωση	Μπριγκέτες ξύλου Πελλέτες ξύλου Υψηλή ποιότητα	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού
Ευλώδη υπολείμματα πριονίδι, ξέσματα κλπ.	Μείωση μεγέθους και ξήρανση, άλεση και συμπύκνωση	Μπριγκέτες ξύλου Πελλέτες ξύλου Χαμηλή ποιότητα	<u>Άλεση, καύση κονιοποιημένου καυσίμου</u> Παραγωγή θερμότητας / ατμού
Αγροτικά υπολείμματα συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών καλλιεργειών	Μείωση μεγέθους και ξήρανση	Κομμάτια	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού
Αγροτικά υπολείμματα συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών καλλιεργειών	Μείωση μεγέθους, ξήρανση, άλεση, ανάμειξη με συνδετικό υλικό (λιγνίνη) και συμπύκνωση	Αγρό-Μπριγκέτες Αγρό-Πελλέτες Υψηλή ποιότητα	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού
Αγροτικά υπολείμματα συμπεριλαμβανομένων των ενεργειακών καλλιεργειών	Μείωση μεγέθους, ξήρανση, άλεση και συμπύκνωση	Αγρό-Μπριγκέτες Αγρό-Πελλέτες Χαμηλή ποιότητα	<u>Άλεση, καύση κονιοποιημένου καυσίμου</u> Παραγωγή θερμότητας / ατμού, μικτή καύση
Αστικά στερεά απόβλητα Μόνο καθαρά κλάσματα	Μείωση μεγέθους	Κομμάτια	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού
Αστικά στερεά απόβλητα Μόνο καθαρά κλάσματα	Μείωση μεγέθους, ξήρανση, άλεση, ανάμειξη με συνδετικό υλικό (λιγνίνη) και συμπύκνωση	Μπριγκέτες αποβλήτων Πελλέτες αποβλήτων Υψηλή ποιότητα	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού
Αστικά στερεά	Μείωση μεγέθους,	Μπριγκέτες	<u>Άλεση, καύση</u>

απόβλητα Μόνο καθαρά κλάσματα	ξήρανση, άλεση και συμπύκνωση	αποβλήτων Πελλέτες αποβλήτων Χαμηλή ποιότητα	<u>κονιοποιημένου καυσίμου</u> Παραγωγή θερμότητας / ατμού, μικτή καύση
Βιομηχανικά /Αστικά λύματα Ξυλεία κατεδάφισης, καλούπια από εργασίες ξυλείας κτλ.	Μείωση μεγέθους	Τεμάχια / Κομμάτια	<u>Άμεση καύση</u> Παραγωγή θερμότητας Παραγωγή ατμού

Πίνακας 2-1: Συνήθειες διεργασίες για στερεή βιομάζα

Από τις δέκα αλυσίδες διεργασιών στον παραπάνω πίνακα, τρεις καταλήγουν στην καύση κονιοποιημένου καυσίμου αφού προηγηθεί άλεση των στερεών καυσίμων, ενώ οι υπόλοιπες επτά είναι οι πλέον κατάλληλες για την απευθείας καύση του καυσίμου, ως έχει.

Μηχανικά ανθεκτικές πελλέτες ή μπριγκέτες, δηλαδή προϊόντα υψηλής ποιότητας, αποτελούν κατάλληλη επιλογή για χρήση σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως μονοκατοικίες.

Για τη χρήση άλλων μορφών βιομάζας, όπως τεμάχια ξύλου, η κλίμακα εφαρμογής δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή εκτός και αν η απόδοση της καύσης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες «θυσιαστούν». Η τηλεθέρμανση είναι συνήθως η πλέον ενδεδειγμένη. Τα καυσόξυλα και τα κομμάτια ξύλου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μονοκατοικίες.

Η καύση κονιοποιημένου καυσίμου χρησιμοποιείται συνήθως σε μεγάλης κλίμακας μονάδες καύσης άνθρακα. Στερεά βιοκαύσιμα «εύκολα» στην άλεση, όπως μη ανθεκτικές πελλέτες και μπριγκέτες, είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικό καύσιμο στις μονάδες αυτές.

- **Πυρόλυση υψηλών θερμοκρασιών (ή εξανθράκωση)**

Ως πυρόλυση ορίζεται η χημική διάσπαση οργανικών υλικών με την θέρμανση απουσία οξυγόνου και άλλων αντιδραστηρίων εκτός πιθανόν από ατμό. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία πυρόλυσης, τόσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα των πτητικών συστατικών που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και τόσο μικρότερο το κλάσμα των στερεών υπολειμμάτων. Τελικά, περίπου 70-80% της ξηράς ουσίας μπορεί να απελευθερωθεί ως προϊόν πυρόλυσης και μόνο το 20-30% του ξηρού βάρους να διατηρηθεί ως στερεός, μόνιμος άνθρακας, έτσι ώστε η μείωση της πυκνότητας να είναι σημαντική. Δεδομένου ότι σχεδόν όλοι οι υδρογονάνθρακες εκπέμπονται κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, το προϊόν δεν θα έχει καθόλου υγροσκοπικές ιδιότητες. Η υψηλή θερμοκρασία της διεργασίας θα απελευθερώσει το κύριο μέρος των πτητικών προσμίξεων όπως το θείο και το χλώριο, τα οποία στη συνέχεια θα μετατραπούν σε υδρόθειο και υδροχλώριο στα αέρια της πυρόλυσης.

Η θερμαντική αξία του εναπομένου άνθρακα, που στην περίπτωση αυτή είναι σχεδόν καθαρός άνθρακας με την προσθήκη όμως του κύριου μέρους των ορυκτών συστατικών τέφρας που παραμένουν, μπορεί να φτάνει τις τιμές των 30-35 MJ/kg, αλλά η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη διεργασία πυρόλυσης αντιπροσωπεύει περίπου 10 -20% της συνολικής ενέργειας που περιέχεται στη πρώτη ύλη - και πάλι ανάλογα με την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία.

Ο στερεός άνθρακας που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία διεργασιών.

Η πυρόλυση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ένα υγρό προϊόν, με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στους 500°C περίπου και μειώνοντας το χρόνο παραμονής. Το προϊόν που παράγεται ονομάζεται έλαιο πυρόλυσης (pyrolysis oil) ή βιοέλαιο (bio-oil). Στις συνήθεις περιπτώσεις, περίπου 50-75% κατά βάρος της τροφοδοτούμενης βιομάζας μετατρέπεται σε έλαιο πυρόλυσης. Για να θερμανθεί η πρώτη ύλη μέσα στο σύντομο χρονικό διάστημα παραμονής που απαιτείται για τη μέγιστη απόδοση της πυρόλυσης του καυσίμου (περίπου 1 δευτερόλεπτο) απαιτείται μια εκ των προτέρων άλεση του υλικού.

Το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο, συμπεριλαμβανομένου του καυσίμου πυρόλυσης και του στερεού υπολείμματος, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις άλλες διεργασίες πυρόλυσης, δηλαδή περίπου 80-90% της ενεργειακής τροφοδοσίας διατηρείται στα προϊόντα.

Το παραγόμενο καύσιμο πυρόλυσης θα αποτελείται από ένα μείγμα υδρογονανθράκων και οργανικών οξέων, νερό, πτητικές προσμείξεις καυσίμου και άλλες ενώσεις ενώ απαιτείται περαιτέρω καθαρισμός και «αναβάθμιση» αυτού εκτός και αν καεί αμέσως.

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.

- **Πυρόλυση χαμηλών θερμοκρασιών (ή φρύξη)**

Ενώ μία πλήρης διεργασία πυρόλυσης απαιτεί θερμοκρασίες στην περιοχή των 700 - 900°C, η διεργασία αυτή ουσιαστικά αρχίζει σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες, περίπου 100°C. Όταν η βιομάζα θερμαίνεται, απουσία οξυγόνου, σε θερμοκρασίες περίπου 300°C, θα ξεκινήσει μία μερική διεργασία πυρόλυσης με αποτέλεσμα την ξήρανση του υλικού. Η πυρόλυση σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες δεν θα προκαλέσει την πλήρη εξάτμιση των βαρύτερων υδρογονανθράκων που παράγονται, αλλά αυτοί θα διατηρηθούν ως ξηρό υπόλειμμα προσδίδοντας στο προϊόν κάποιες υγροσκοπικές ιδιότητες. Ταυτόχρονα, το προϊόν γίνεται εύθραυστο, η θερμογόνο δύναμή του αυξάνεται και η πυκνότητα του μειώνεται. Το κύριο μέρος

της τέφρας διατηρείται στο στερεό προϊόν και ως εκ τούτου η περιεκτικότητα σε τέφρα αυξάνεται. Μερικές προσμίξεις καυσίμου, όπως μέρους του θείου και του χλωρίου, θα ελευθερωθούν με την πυρόλυση του αερίου, ενώ άλλες θα παραμείνουν στο στερεό καύσιμο.

Η θερμότητα που απαιτείται για τη διεργασία αντιπροσωπεύει μια απώλεια, αλλά παρέχεται από την καύση των αέριων και υγρών προϊόντων της πυρόλυσης και μπορεί να διατηρηθεί πολύ κάτω του 10% της συνολικής ενέργειας που περιέχεται στο αρχικό καύσιμο ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία της πρώτης ύλης.

Το στερεό καύσιμο που παράγεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία διεργασιών.

- **Αεριοποίηση**

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια ενδόθερμη θερμική διεργασία κατά την οποία η στερεή βιομάζα μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο. 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 θερμογόνο δύναμη του αερίου μπορεί ακόμα και να τριπλασιασθεί. Για να επιτευχθεί το παραπάνω, απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες διεργασίας (στην περιοχή $700 - 1100^\circ\text{C}$) και ένα σημαντικό τμήμα της ενεργειακής πρώτης ύλης θα μετατραπεί ως αισθητή θερμότητα στο αέριο προϊόν. 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 οξείδωση 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. 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.

Αναφορικά με το είδος και τον σχεδιασμό του αντιδραστήρα αεριοποίησης, οι παραλλαγές και η κατηγοριοποίηση τους, ύστερα από πολλές δεκαετίες έρευνας στην τεχνολογία αεριοποίησης είναι πολλές. Έτσι, οι αντιδραστήρες αυτοί διακρίνονται ανάλογα με το μέσο αεριοποίησης (αέρας, οξυγόνο ή ατμός), τον τρόπο παροχής της απαιτούμενης θερμότητας (αυτοθερμικοί ή αλλοθερμικοί αεριοποιητές), την πίεση λειτουργίας (ατμοσφαιρικοί ή υπό πίεση αντιδραστήρες) και τον σχεδιασμό τους (σταθερής ή ρευστοποιημένης κλίνης).

Πρέπει να τονισθεί ότι το αέριο σύνθεσης δεν χρησιμοποιείται απευθείας, καθώς εξέρχεται από τον αντιδραστήρα, στις μηχανές παραγωγής ενέργειας. Είναι απαιτούμενη η προ-επεξεργασία 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 πίεσης 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.

Ανεξάρτητα από το μέσο αεριοποίησης που χρησιμοποιείται, παραμένει το γεγονός ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας της πρώτης ύλης θα παραμένει στην μορφή της αισθητής θερμότητας. Έτσι, ο συνολικός βαθμός απόδοσης που λαμβάνεται κατά τη θερμική αεριοποίηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σχεδιασμό του συστήματος και από την ανάκτηση και τη χρήση της αισθητής θερμότητας του αέριου καυσίμου.

Η επιλογή του μέσου αεριοποίησης και της τεχνολογίας είναι πρωτεύουσας σημασίας για την τελική χρησιμότητα του αέριου καυσίμου, την άμεση καύση ή τη μεταγενέστερη σύνθεση «εξευγενισμένων» χημικών προϊόντων.

- **Θερμική υγροποίηση**

Σε περίπτωση που η βιομάζα θερμαίνεται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, περίπου 400°C και σε πίεση περίπου 10 bar, παρουσία ατμού και μονοξειδίου του άνθρακα, μεγιστοποιείται η πιθανότητα δημιουργίας ενός υγρού καυσίμου. Η ποιότητα του παραγόμενου υγρού καυσίμου μπορεί, σε κάποιο βαθμό, να ελεγχθεί με τη χρήση καταλυτών. Δεδομένου ότι η διακύμανση των μοριακών βαρών στο υγρό καύσιμο μπορεί να περιοριστεί, το καύσιμο θα έχει γενικά πολύ υψηλότερη ποιότητα από το υγρό της πυρόλυσης αν και ακόμα θα περιέχει ένα σημαντικό ποσό πτητικών προσμείξεων.

Η απαίτηση για μια διεργασία υπό πίεση θα περιορίσει τη συνολική απόδοση περίπου στο 80-90%, παρά τη σχετικά χαμηλή θερμοκρασία διεργασίας. Το παραγόμενο προϊόν μπορεί να αναβαθμιστεί περαιτέρω και να μετατραπεί σε ένα καύσιμο υψηλής ποιότητας.

2.3.2 Βιοχημικές διεργασίες

Κατά τη βιοχημική μετατροπή γίνεται χρήση μικροοργανισμών για την μετατροπή του στερεού υλικού. Οι μικροοργανισμοί κατατάσσονται, ανάλογα με τις θερμοκρασίες ανάπτυξης σε ψυχρόφιλους (-15 έως 15°C), μεσόφιλους (5 - 50°C) και θερμόφιλους (50 - 100°C). Οι κύριες διεργασίες που χρησιμοποιούνται λαμβάνουν χώρα στις μεσοφιλικές, περίπου 30 - 45°C, και οι απώλειες θερμότητας των προϊόντων είναι περιορισμένες. Ωστόσο, ο λόγος για τον οποίο οι μικροοργανισμοί είναι ενεργοί είναι γιατί αποκτούν ενέργεια από τη διεργασία και αυτή η ενέργεια λαμβάνεται από τις πρώτες ύλες. Έτσι, και σε αυτή την περίπτωση, η διεργασία μετατροπής παρουσιάζει απώλειες ενέργειας.

Οι βιοχημικές διεργασίες που παρουσιάζονται εδώ είναι η ζύμωση και η αναερόβια χώνευση.

- **Ζύμωση**

Η ζύμωση συνιστά μία αναερόβια βιολογική διεργασία που καταλύεται με τη δράση μικροοργανισμών, συνήθως ενζύμων. Η ζύμωση της βιομάζας σε αλκοόλη από κοινή ζύμη περιορίζεται από το γεγονός ότι οι ζυμομύκητες ουσιαστικά μπορούν να ζυμώσουν μόνο τα σάκχαρα με 6 άτομα άνθρακα (εξόζες), ενώ πολλά από τα σάκχαρα που υπάρχουν στη βιομάζα είναι πεντόζες, δηλαδή περιέχουν 5 άτομα άνθρακα. Με φυσική ζύμη η ζύμωση περιορίζεται μόνο στην γλυκόζη, αλλά το άμυλο, καθώς και ορισμένα άλλα είδη σακχάρων, μπορούν να μετατρέπονται ενζυμικά σε γλυκόζη και συνεπώς χαρακτηρίζονται ως ζυμώσιμα. Έτσι, μόνο ορισμένα από τα υλικά εκείνα που χαρακτηρίζονται ως ζυμώσιμα σάκχαρα είναι άμεσα διαθέσιμα για τα ένζυμα και τη ζύμη και είναι φυσικά κατάλληλα για την αλκοολική ζύμωση ενώ τα περισσότερα όχι. Ωστόσο, δύο από τα κύρια συστατικά στα κυτταρικά τοιχώματα των φυτών, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, δημιουργούνται από ζυμώσιμα σάκχαρα. Το πρόβλημα είναι ότι είναι εν μέρει κρυσταλλικά και είναι ενσωματωμένα σε λιγνίνη, με αποτέλεσμα τα σάκχαρα τους να μην είναι προσβάσιμα. Διαφορετικές προ-επεξεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης αραιών οξέων, ζεστού νερού ή αμμωνίας επιτρέπουν να σπάσει αυτή η δομή, αποκρυσταλλώνουν (καταστρέφουν το κρυσταλλικό πλέγμα) της κυτταρίνης και καθιστούν τα σάκχαρα της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης προσβάσιμα για μετέπειτα ζυμώσεις. Οι διαδικασίες αυτές βρίσκονται ακόμη υπό εξέλιξη και μέχρι στιγμής χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος καθώς και από το γεγονός ότι μερικά από τα παραπροϊόντα τους είναι αναστολείς της διαδικασίας ζύμωσης. Υπάρχει επίσης έρευνα σε εξέλιξη που αφορά τη γενετική τροποποίηση των μικροοργανισμών, έτσι ώστε να καταστεί η προ-επεξεργασία περιττή.

Το προϊόν από τη ζύμωση είναι μία αραιή αλκοόλη η συγκέντρωση της οποίας πρέπει να αυξηθεί μέσω απόσταξης προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα καυσίμου.

- **Αναερόβια χώνευση**

Αυτή είναι μια εντελώς διαφορετική διαδικασία από τη ζύμωση και η οποία μπορεί να λειτουργήσει με ένα ευρύτερο φάσμα υποστρωμάτων. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι σε αυτή τη διεργασία γίνεται χρήση της πρώτης ύλης με τη μορφή πολτού ή ιλύος, όπως η ιλύς λυμάτων ή η βιομηχανική λάσπη από ίνες, η υγρή ζωική κοπριά, τα απορρίμματα τροφίμων και άλλα συναφή υλικά που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας με οποιονδήποτε άλλο τρόπο. Ενώ οι ζυμομύκητες είναι οι κύριοι παράγοντες της ζύμωσης, η χώνευση πραγματοποιείται μέσα από μία πολύπλοκη και διαδοχική αλληλεπίδραση, κυρίως, βακτηρίων. Απλοποιημένη, η αναερόβια χώνευση ξεκινά με το υπόστρωμα που υδρολύεται σε διαλυτές οργανικές ενώσεις, όπως λιπαρά οξέα, σάκχαρα και αμινομάδες. Οι ενώσεις αυτές είναι στη συνέχεια διασπώνται περαιτέρω σε αλκοόλες και οξικό οξύ, το οποίο (οξικό οξύ) τελικά διασπάται σε διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο. Παράλληλα, με το σχηματισμό οξικού οξέος υπάρχει επίσης άμεσος σχηματισμός υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία εν μέρει συνδυάζονται προς μεθάνιο. Δεδομένου κατά τη διάρκεια της χώνευσης σχηματίζεται ένας μεγάλος αριθμός ενδιάμεσων προϊόντων και δεδομένου ότι οι μικροοργανισμοί είναι πολύ ευαίσθητοι στο περιβάλλον διαβίωσής τους, απαιτείται πλήρης έλεγχος της διαδικασίας για να αποφευχθεί συσσώρευση των αναστολέων της διεργασίας. Θερμοκρασία, pH,

περιεκτικότητα σε υδρογόνο και άλλοι παράμετροι πρέπει να βρίσκονται υπό παρακολούθηση έτσι ώστε να εξελίσσεται η διεργασία ομαλά. Επίσης, η διεργασία είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγή της ποιότητας των πρώτων υλών. Η αναερόβια χώνευση αναλύεται περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο.

Το προϊόν από την αναερόβια χώνευση είναι ένα μίγμα αερίων, κυρίως μεθανίου, περίπου 55 – 70%, διοξειδίου του άνθρακα κατά 30 – 45% και υδρόθειου, αμμωνίας, υδροχλωρίου και άλλων προσμίξεων.

Το αέριο μπορεί να καεί σε λέβητες ή σε μηχανές εσωτερικής καύσης χωρίς αναβάθμιση, ωστόσο είναι πιο συνηθισμένο να πραγματοποιείται πρώτα η αναβάθμιση του αερίου σε ποσοστά μεθανίου άνω του 95% με προσρόφηση ή πλύση υπό πίεση.

2.4 Παραγωγή ενέργειας

Η τελική χημική διεργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί για να απελευθερωθεί το 100% της ενέργειας της βιομάζας ή των βιοκαυσίμων είναι πάντα η καύση. Η ενέργεια που παράγεται είναι:

- Θερμική ενέργεια
- Ηλεκτρική ενέργεια με συμπαραγωγή θερμότητας

Σε όλους τους τομείς, τα βιοκαύσιμα μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, το λιγνίτη και το φυσικό αέριο.

Ο κύριος τομέας που χρησιμοποιούνται τα στερεά βιοκαύσιμα είναι η παραγωγή θερμικής ενέργειας. Μπορεί να παραχθεί με υψηλή απόδοση σε λέβητες μικρού (από 3kW) και μεσαίου μεγέθους (περίπου 100kW), αλλά και σε μεγάλους θερμικούς σταθμούς (περίπου 10MW) που μπορούν να συνδυάζονται με δίκτυο τηλεθέρμανσης.

Τα βιοκαύσιμα υγρής και αέριας μορφής σπάνια χρησιμοποιούνται για παραγωγής θερμικής ενέργειας. Αντίθετα, ο κύριος τομέας εκμετάλλευσής τους είναι η ηλεκτροπαραγωγή.

Η τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, από τους μικρούς σταθμούς με μηχανές εσωτερικής καύσης μέχρι τους μεγάλους σταθμούς με τους ατμοστροβίλους.

2.4.1 Παραγωγή θερμικής ενέργειας

Η θερμότητα μπορεί να παράγεται χρησιμοποιώντας όλες τις πηγές βιοενέργειας σε στερεά, υγρή ή αέρια κατάσταση. Αν και η ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας εξαρτάται μόνο από τη θερμογόνο δύναμη του συγκεκριμένου καυσίμου που χρησιμοποιείται, οι βασικές προϋποθέσεις που απαιτούνται για την πλήρη καύση με χαμηλές εκπομπές διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την κατάσταση του.

Από τις μικρές οικιακές μονάδες θέρμανσης, που χρησιμοποιούν στερεή βιομάζα, μέχρι τους θερμικούς σταθμούς, η διεργασία της καύσης στερεού καυσίμου περιλαμβάνει τέσσερα στάδια:

1. Ξήρανση. Αυτή είναι η απελευθέρωση της υγρασίας των καυσίμων με τη μορφή ατμού και αποτελεί μία ενδοθερμική διεργασία ή μία διεργασία θερμικής κατανάλωσης.
2. Πυρόλυση. Αυτή είναι η απελευθέρωση των πτητικών ουσιών, τα οποία είναι εν μέρει εύφλεκτα, ενώ η συγκεκριμένη διεργασία είναι και πάλι ενδοθερμική.

3. Καύση αερίου. Αυτή είναι η καύση των συστατικών των πτητικών ουσιών τα οποία είναι εύφλεκτα. Το στάδιο αυτό είναι εξώθερμο, δηλαδή η θερμότητα απελευθερώνεται.
4. Καύση εξανθρακώματος. Αυτή είναι η τελική καύση των στερεών υπολειμμάτων και είναι πάλι μια εξώθερμη διαδικασία.

Αυτά τα τέσσερα βήματα, τα οποία συμβαίνουν μεμονωμένα ή ταυτόχρονα, αποτελούν την πλήρη καύση του καυσίμου. Τα παραπάνω μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στην περίπτωση της καύσης μεγάλου κομματιού ξύλου ή στην περίπτωση της καύσης ξύλου από κορμό δέντρου.

Μονοκατοικίες

Για τις κατοικίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ατομικές μονάδες ή κεντρικές μονάδες θέρμανσης σε περιπτώσεις κεντρικής θέρμανσης πολυκατοικιών. Η πρώτη επιλογή προϋποθέτει ότι το ατομικό σπίτι είναι εξοπλισμένο με το δικό του λέβητα ή τη δική του εστία και αυτό σημαίνει ότι κάθε μονάδα είναι μικρή (συνήθως μικρότερη από 25kW θερμικής ενέργειας). Οι επιμέρους μονάδες αποτελούν αποκλειστικούς παραγωγούς θερμότητας με στόχο να παρέχουν στο σπίτι θερμική άνεση και ζεστό νερό χωρίς να επηρεάζουν την κατανάλωση ρεύματος. Το καλό με τη συγκεκριμένη λύση είναι ότι, εφ' όσον η παροχή καυσίμου λειτουργεί, είναι εύρωστη.

Κεντρική θέρμανση

Η κεντρική θέρμανση σε μονοκατοικίες μπορεί να λειτουργεί με νερό, η οποία προτιμάται στην περίπτωση των βιοκαυσίμων, ή μπορεί να λειτουργεί με τον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση, η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, εντάσσεται κατά κανόνα στον ίδιο λέβητα, αλλά με ξεχωριστό εναλλάκτη θερμότητας. Στη δεύτερη περίπτωση, η παραγωγή του ζεστού νερού χρήσης γίνεται από ένα εντελώς ξεχωριστό σύστημα.

Στα συστήματα με νερό, ο λέβητας μπορεί να συνδεθεί με ένα δοχείο αδράνειας για να εξομαλύνει το θερμικό φορτίο. Το δοχείο αδράνειας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να καλύπτει τη μέση ζήτηση θερμότητας του σπιτιού, το ζεστό νερό χρήσης και τη παραγωγή θερμότητας μαζί, κατά τη διάρκεια 24 ωρών με μία πτώση της θερμοκρασίας 20°C περίπου. Με ένα δοχείο αδράνειας ενσωματωμένο στο σύστημα γίνεται εφικτό να ενσωματωθεί ηλιακή θέρμανση στο σύστημα με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας. Υπάρχουν επίσης ορισμένοι λέβητες που λειτουργούν με εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες νερού, βέβαια όχι τόσο μεγάλες όσο στις περιπτώσεις ξεχωριστών δοχείων, που περιλαμβάνουν και αυτοί συνδέσεις ηλιακής θέρμανσης.

Δεδομένου ότι ο όγκος του νερού στο λέβητα, ή στο συνδυασμό λέβητα και δοχείων αδράνειας, είναι σημαντικός, ένα σύστημα νερού πρέπει να παρέχει μια θερμική αδράνεια η οποία να απλοποιεί τον έλεγχο του συστήματος. Μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης ζεστού νερού, για παράδειγμα, μπορεί στη συνέχεια να παρέχεται από την αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα, έτσι ώστε η ζήτηση να μπορεί να ικανοποιηθεί, ενώ η παροχή θερμότητας (για παράδειγμα, ένας καυστήρας πελλετών) ενδεχομένως να χρειαστεί κάποιο χρόνο για να τεθεί σε λειτουργία. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αδράνεια, τόσο μεγαλύτερος μπορεί να είναι ο χρόνος εκκίνησης.

Σε ένα σύστημα με αέρα, η θερμική αδράνεια είναι κοντά στο μηδέν και το σύστημα θέρμανσης πρέπει να αποκριθεί σχεδόν ακαριαία. Για αυτά τα είδη των συστημάτων,

φούρνοι πελλετών είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Για την παροχή ζεστού νερού, εν τούτοις, ξεχωριστές συσκευές θέρμανσης νερού είναι αναγκαίες.

Τηλεθέρμανση

Ο ενεργειακός εφοδιασμός σε ένα συγκρότημα κτιρίων μπορεί να προγραμματιστεί βάσει δύο εντελώς διαφορετικών στρατηγικών:

- τη διανομή καυσίμων σε συνδυασμό με μια αποκεντρωμένη (δηλαδή ατομική) παραγωγή ενέργειας.
- τη κεντρική παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με τη διανομή της ενέργειας.

Η πρώτη στρατηγική αναπτύχθηκε στις προηγούμενες παραγράφους και προϋποθέτει ότι η μονοκατοικία είναι εξοπλισμένη με το δικό της λέβητα ή τη δική της θερμάστρα. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης επιλογής είναι ότι τέτοιου είδους συστήματα δεν μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για ηλεκτροπαραγωγή και για ψύξη ενώ δε συμπεριλαμβάνουν κανένα προηγμένο περιβαλλοντικό έλεγχο.

Η δεύτερη στρατηγική, η οποία περιλαμβάνει την κεντρική παραγωγή ενέργειας και τη διανομή της ενέργειας σε ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών, έχει το πλεονέκτημα ότι η μονάδα παραγωγής γίνεται μεγαλύτερη και, ως εκ τούτου, μπορεί όχι μόνο να προσφέρει προηγμένο περιβαλλοντικό έλεγχο αλλά και επίσης μια σύγχρονη διεργασία, ανάλογα με την κλίμακα εφαρμογής. Δεν υπάρχουν αυστηρά όρια για τις κλίμακες, αλλά από μία ποιοτική σκοπιά, μπορούν να διακριθούν τρεις γενικές κατηγορίες, με ελάχιστη απαίτηση την εμπλοκή τουλάχιστον δύο ξεχωριστών κτιρίων, ώστε να έχει νόημα ο όρος «διανομή»:

Μικρά συστήματα. Στην παρούσα συζήτηση, το σύστημα θεωρείται μικρό, αν το θερμικό φορτίο για ένα ολόκληρο έτος είναι τόσο μικρό ώστε να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά για παραγωγή ατμού. Αυτό το είδος των συστημάτων θα μπορούσε, για παράδειγμα, να παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για το ζεστό νερό χρήσης και την θέρμανση χώρων σε μια πανεπιστημιούπολη, ή σε ένα μεγάλο αριθμό δημόσιων κτιρίων ή στα κτίρια ενός νοσοκομείου.

Ενδιάμεσα συστήματα. Στην ενδιάμεση κλίμακα, το σύστημα μπορεί να ενσωματώσει την παραγωγή ατμού. Μπορεί να υπάρχουν πολλοί λόγοι για αυτό: Μπορεί να υπάρξει μία βιομηχανία ή ένα εργαστήριο που απαιτούν ατμό για τη λειτουργία τους ανάμεσα στους καταναλωτές ή απλώς το σύστημα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να απορροφήσει το επιπλέον ενός ατμολέβητα.

Μεγάλα συστήματα. Ως «μεγάλο» θεωρείται ένα σύστημα που μπορεί να παράγει ισχύ, δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή, ο βασικός στόχος συχνά μετατίθεται από τη πώληση της θερμικής ενέργειας στην πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, όμως είναι λάθος να μην λαμβάνεται υπόψη η αγορά της θερμικής ενέργειας.

Οι διαφορετικές κλίμακες δεν θα επηρεάσουν μόνο τους τύπους των προϊόντων, αλλά και την ποιότητα καυσίμων. Κάθε εστία καύσης έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί καλύτερα με ένα συγκεκριμένο καύσιμο. Ένας καλός εξοπλισμός καύσης, τροφοδοτούμενος με το κατάλληλο καύσιμο στο κατάλληλο ποσοστό, θα παρέχει μια πλήρη καύση του καυσίμου σε συνδυασμό με ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Καθώς το μέγεθος της εστία καύσης αυξάνεται, η διεργασία καύσης είναι πιο εύρωστη και πιο ανεκτή σε διάφορους τύπους καυσίμων. Αυτό επίσης συνδέεται με το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες μονάδες καύσης είναι συνήθως εξοπλισμένες με συστήματα ελέγχου καύσης, ενώ οι μικρές μονάδες εξοπλίζονται μόνο με τον πλέον στοιχειώδη έλεγχο.

Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι ένα σύστημα θέρμανσης ($<0,1\text{MW}_{\text{th}}$) μιας μονοκατοικίας απαιτεί υψηλής ποιότητας πελλέτες ή μπριγκέτες για να επιτύχει καλή

περιβαλλοντική απόδοση, ένας λέβητας 1MW_{th} μπορεί να τροφοδοτηθεί με νωπά τεμάχια ξυλείας κορμού ή ομοιόμορφα υπολείμματα βιομηχανικών διεργασιών. Ομοίως, ένας λέβητας 5MW_{th} μπορεί να τροφοδοτείται με υπολείμματα υλοτομίας ή γεωργικά υπολείμματα. Σε μια μεγαλύτερη κλίμακα της τάξης των 10MW_{th} , ο λέβητας μπορεί να τροφοδοτηθεί με αστικά στερεά απορρίμματα (ένα καθαρό κλάσμα χωρίς βαρέα μέταλλα ή άλλα ανόργανα και επικίνδυνα συστατικά) μεγάλης υγρασίας και να παραμένει ωστόσο εντός αυστηρών περιβαλλοντικών προδιαγραφών.

2.4.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας – Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Η ηλεκτρική ενέργεια από την εκμετάλλευση των βιοκαυσίμων παράγεται κυρίως σε μονάδες συμπαγωγής.

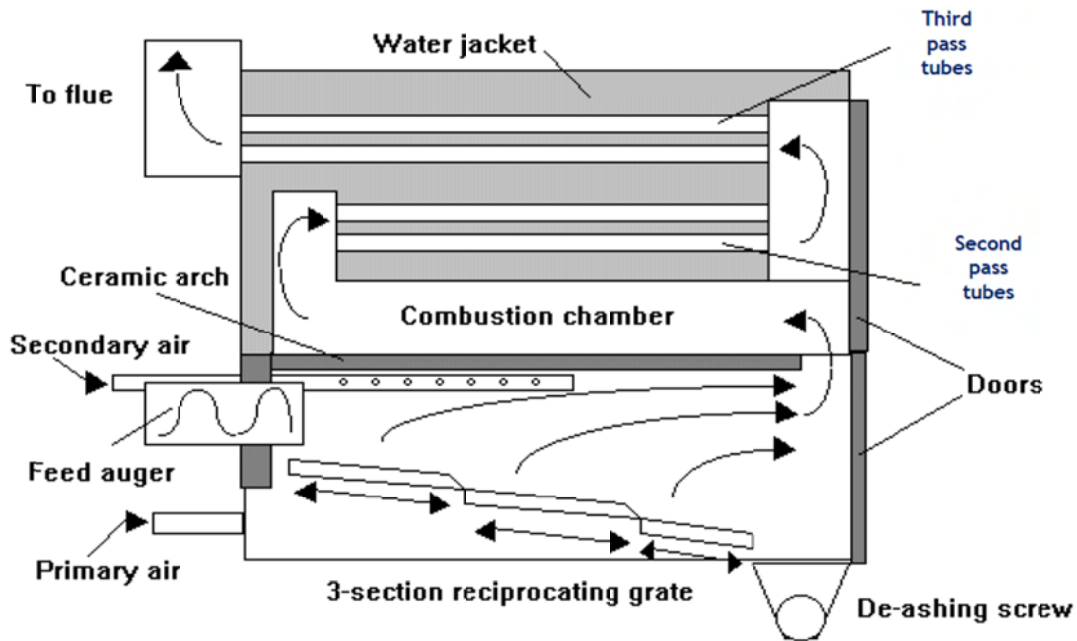
Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστρόβιλων, κινητήρων, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαγωγής φθάνει το 80-85%.

2.4.3 Συμπαγωγή με καύση στερεών καυσίμων

Η πλειοψηφία των συστημάτων χρησιμοποιούν λέβητες με κινούμενη εσχάρα, με σκοπό την παραγωγή θερμού νερού ή ατμού. Κύριο κριτήριο επιλογής των συγκεκριμένων λεβήτων είναι η ευρωστία κατασκευής τους, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία με τους περισσότερους τύπους στερεών καυσίμων. Οι λέβητες με κινούμενη εσχάρα χρησιμοποιούνται για αποτέφρωση απορριμμάτων καθώς και για καύση πελλετών, σε λέβητες καύσης άχυρου καθώς και σε διάφορες άλλες εφαρμογές. Οι συγκεκριμένοι λέβητες δύνανται να λειτουργήσουν με καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα ή/και χαμηλού σημείου τήξης τέφρας. Υπάρχει μία πληθώρα κατασκευαστών σε διάφορες χώρες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επιλογή κατασκευάστριας εταιρείας με τη μεγαλύτερη εμπειρία στη διαχείριση συγκεκριμένου καυσίμου.

Οι λέβητες σχεδιάζονται για διαφορετικές περιεκτικότητες του καυσίμου σε υγρασία. Το περιεχόμενο σε υγρασία θα καθορίσει τις μέγιστες θερμοκρασίες το θάλαμο καύσης. Το επίπεδο της θερμοκρασίας καθορίζεται από την ψύξη του θαλάμου καύσης, τα ξηρά καύσιμα απαιτούν πιο έντονη ψύξη, ενώ τα υγρά καύσιμα μπορεί να μη χρειάζονται καθόλου ψύξη.

Οι μπάρες της σχάρας κινούνται μπρος - πίσω ωθώντας το καύσιμο στο κοχλία απομάκρυνσης τέφρας, που βρίσκεται κάτω από το τελευταίο «σκαλί», όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.5.

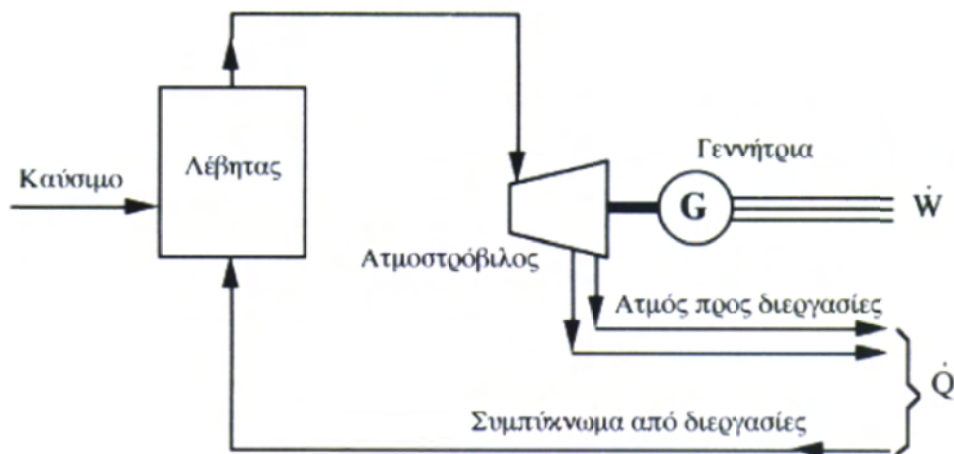


Εικόνα 2-5: Γενική απεικόνιση λέβητα κινούμενης σχάρας.[9]

Τα δύο χαμηλότερα «σκαλιά» της κινούμενης σχάρας είναι ξεκάθαρα ορατά, όπως και ο κοχλίας απομάκρυνσης της τέφρας.

Η διαφορά ανάμεσα σε ένα λέβητα ζεστού νερού και έναν λέβητα ατμού έγκειται στη κατασκευή των τοιχωμάτων, καθώς ο λέβητας ατμού πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να αντέχει σε υψηλές εσωτερικές πιέσεις στο εσωτερικό των τοιχωμάτων.

Μια απλουστευμένη σχηματική παράσταση συμπαραγωγικού σταθμού με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2-2: Απλουστευμένη σχηματική παράσταση συμπαραγωγικού σταθμού με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.[10]

Ο ατμός υψηλής πίεσης (20-100 bar) και θερμοκρασίας (480-540°C) που παράγεται στο λέβητα με κατανάλωση καυσίμου και χρησιμοποιείται για την κίνηση αμοστροβίλου, 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). Απομάστευση (δηλ. εξαγωγή) μέρους του ατμού από ενδιάμεσες βαθμίδες του στροβίλου στις επιθυμητές πιέσεις είναι επίσης δυνατή.

2.4.4 Συμπαράγωγή με καύση αέριων και υγρών καυσίμων

Η μόνη διαφορά ανάμεσα σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης που χρησιμοποιεί στερεά βιοκαύσιμα και ενός άλλου που χρησιμοποιεί υγρά ή αέρια βιοκαύσιμα βρίσκεται στο λέβητα. Τα ακαθάριστα έλαια πυρόλυσης μπορούν να καούν σε καυστήρες βαρέων κλασμάτων πετρελαίου που είναι τοποθετημένοι σε συμβατικούς λέβητες πετρελαίου, αλλά δε πρέπει να ξεχνάμε πως το έλαιο πυρόλυσης θα περιέχει ακαθαρσίες που προέρχονται από την αρχική στερεή πρώτη ύλη. Έτσι, η αντικατάσταση των βαρέων κλασμάτων του πετρελαίου με έλαιο πυρόλυσης ίσως απαιτεί και την εγκατάσταση φίλτρων και την αύξηση της φθοράς αντλιών και των καυστήρων στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου. Η χρήση τέτοιων καυσίμων αποτελεί αφορμή για την τροποποίηση του συστήματος ελέγχου της φλόγας και την εξέταση της ενδεχόμενης εγκατάστασης πιλοτικών καυστήρων συνεχούς καύσης, ώστε να εξασφαλιστεί η έναυση.

Τα καθαρά υγρά βιοκαύσιμα όπως η αιθανόλη ή η μεθανόλη δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα λειτουργικά προβλήματα κατά την αντικατάσταση ελαφριών κλασμάτων πετρελαίου σε λέβητες, αλλά πιθανώς να απαιτούν την αλλαγή της ποιότητας των ελαστικών στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου.

Η συμπαράγωγή στην περίπτωση των υγρών καυσίμων γίνεται με τις ίδιες διεργασίες όπως στην περίπτωση των στερεών καυσίμων.

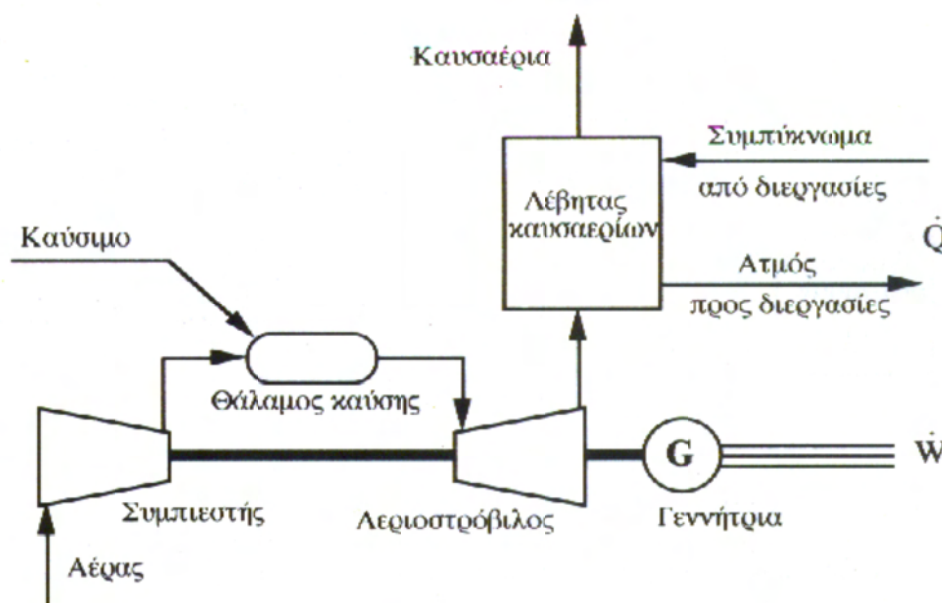
Κατά τη χρήση αέριων βιοκαυσίμων σε λέβητες παρουσιάζονται κάποια προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με τη ποιότητα των αερίων καυσίμων.

Σε περίπτωση χρήσης θερμικής αεριοποίησης για την παραγωγή ενός αερίου χαμηλής ή μέσης θερμογόνου ικανότητας, για παράδειγμα αν χρησιμοποιήσουμε έναν αεριοποιητή με ροή αέρα και το αέριο ψυχθεί ώστε να καθαριστεί προτού εισέλθει στο λέβητα, το παραγόμενο αέριο μπορεί να αποδειχθεί πολύ επικίνδυνο. Η χαμηλή θερμογόνος ικανότητα σε συνδυασμό με μια ποιότητα καυσίμου που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη πρώτη ύλη και από τις συνθήκες που αναπτύσσονται στιγμιαία στον αεριοποιητή καθιστούν το καύσιμο ιδιαίτερα ασταθές σε ό,τι έχει να κάνει με τη καύση του. Σε περίπτωση αντικατάστασης καυσίμου, πιθανότατα θα χρειαστεί να εγκατασταθούν νέα συστήματα παρακολούθησης φλόγας μαζί με καυστήρες αερίου για να εξασφαλιστούν σταθερές συνθήκες έναυσης του αερίου της αεριοποίησης. Ανάλογες προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν σε περίπτωση χρήσης ανεπεξέργαστου βιοαερίου ως καύσιμο σε λέβητα.

Σε περίπτωση χρήσης μιας διεργασίας θερμικής αεριοποίησης για τη παραγωγή ενός καυσίμου αερίου ποιότητας ανάλογης του αερίου σύνθεσης ή στη περίπτωση ενός αναβαθμισμένου αερίου καυσίμου από αναερόβια χώνευση, το καύσιμο αέριο μπορεί να αντικαταστήσει το φυσικό αέριο σε σχεδόν όλους τους τύπους λεβήτων. Πιθανότητα πάντως, να χρειαστεί αντικατάσταση των καυστήρων.

Σε μερικές εφαρμογές μικρής κλίμακας και όταν είναι διαθέσιμα αέρια καύσιμα, όπως αέρια χωνοματερών ή βιοαέριο από ένα χωνευτή μιας μέσης αγροικίας, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Σε αυτή τη περίπτωση, η γεννήτρια συνδέεται απευθείας με τον άξονα της μηχανής και το ψυκτικό νερό χρησιμοποιείται για θέρμανση. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις διαβρωτικές ιδιότητες του αερίου. Η εγκατάσταση μιας διάταξης καθαρισμού του αερίου, για παράδειγμα μια απλή έκπλυση, κρίνεται φρόνιμη. Για συστήματα τέτοιου τύπου, η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται από 15 έως 30% και η ολική απόδοση είναι περίπου 50-80%, εξαρτώμενες σε μεγάλο βαθμό από τη ποιότητα του αερίου και από τη μηχανή.

Πέρα από τους ατμοστρόβιλους και τις μηχανές εσωτερικής καύσης, μία ακόμη σημαντική μέθοδος για τη παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η χρήση αεριοστρόβιλων. Οι αεριοστρόβιλοι διαφέρουν από τους ατμοστρόβιλους στο ότι περιέχουν ενσωματωμένο ένα θάλαμο καύσης και ένα συμπιεστή, ακριβώς όπως οι φυγοκεντρικοί κινητήρες ροής (jet) των αεροπλάνων. Η αρχή λειτουργίας των αεριοστρόβιλων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2-3: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου.[10]

Ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένος σε έναν κοινό άξονα μαζί με ένα συμπιεστή και μία γεννήτρια.

Αφού η μονάδα τεθεί σε λειτουργία, ατμοσφαιρικός αέρας εισάγεται στο συμπιεστή, συμπιέζεται σε πίεση 15-25 bar και διανέμεται σε θάλαμο καύσης. Στο θάλαμο καύσης εισάγεται και το καύσιμο.

Τα θερμά (σχεδόν 1100°C) και υπό πίεση καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο.

Στην έξοδό τους από το στρόβιλο τα αέρια εξακολουθούν να είναι θερμά, περίπου 400-600°C.

Σε μια διεργασία με χρήση αεριοστρόβιλου, το καύσιμο πέρα από το στρόβιλο και τη γεννήτρια, πρέπει να τροφοδοτήσει και το συμπιεστή. Έτσι, η συνολική απόδοση γίνεται σχετικά χαμηλή και κυμαίνεται σε τιμές κάτω του 40%. Για εφαρμογές

συμπαραγωγής, τα θερμά καυσαέρια χρησιμοποιούνται για εφαρμογές τηλεθέρμανσης. Ενώ στους ατμοστρόβιλους η τηλεθέρμανση μειώνει τη μέγιστη ηλεκτρική απόδοση, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στους αεριοστρόβιλους.

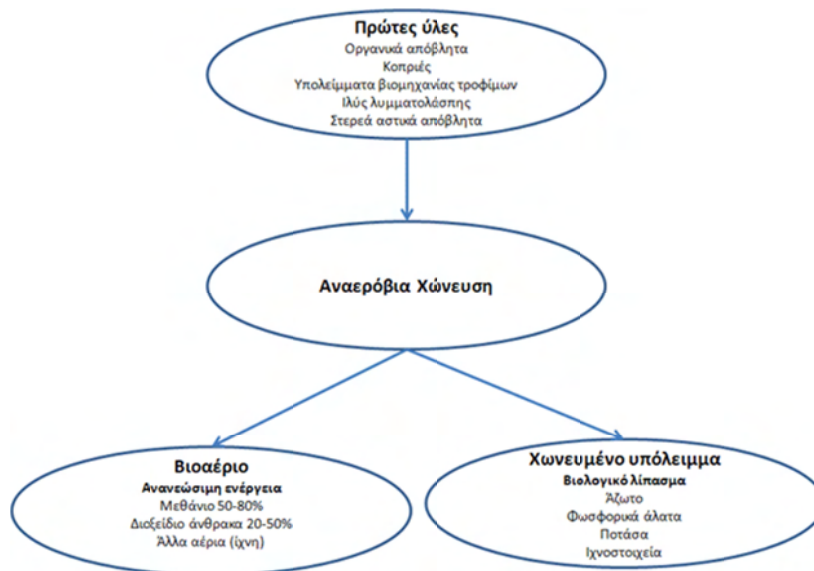
Οι στρόβιλοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι όσον αφορά τις επικαθίσεις και τη διάβρωση των πτερυγίων τους και στην περίπτωση των αεριοστρόβιλων, τα πτερύγια εκτίθενται άμεσα στα καυσαέρια της καύσης. Για το λόγο αυτό το καύσιμο πρέπει να είναι απαλλαγμένο από τέφρα και από ακαθαρσίες που σχηματίζουν διαβρωτικά αέρια. Στερεά βιοκαύσιμα, τα κλάσματα αποβλήτων που έχουν περάσει από διαλογή και πρακτικά όλα τα στερεά καύσιμα κρίνονται ακατάλληλα για χρήση σε αεριοστρόβιλους, ενώ καύσιμα όπως το βιομεθάνιο, η βιοαιθανόλη και άλλα συναφή ενδείκνυνται για χρήση σε αυτούς.

Κεφάλαιο 3 Αναερόβια χώνευση

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης με σκοπό την παραγωγή βιοαερίου. Αναφέρονται τα στάδια για την παραγωγή βιοαερίου, οι συνθήκες χώνευσης, τα κατάλληλα υποστρώματα και περιγράφονται τα διάφορα συστήματα ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης.

3.1 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μία διεργασία η οποία συναντάται ευρέως στη φύση και ορίζεται ως η βιολογική διεργασία με την οποία τα οργανικά υλικά σε ένα κλειστό δοχείο διασπώνται από μικροοργανισμούς, απουσία οξυγόνου και παράγεται βιοαέριο. Το βιοαέριο αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό από μεθάνιο (55-70%).



Σχήμα 3-1: Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.[2]

Η παραγωγή βιοαερίου είναι μία περίπλοκη διαδικασία, που μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια. Τα στάδια αυτά περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

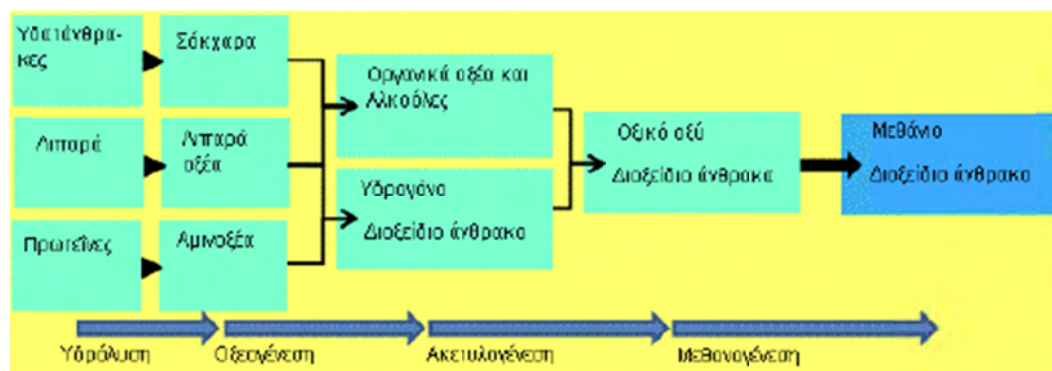
- **Υδρόλυση**

Κατά το στάδιο της υδρόλυσης, αδιάλυτα οργανικά μόρια όπως πρωτεΐνες, λιπίδια, πολυσακχαρίτες διασπώνται σε μονομερή μόρια από εξωκυτταρικά ένζυμα όπως η υδρολάση, η λιπάση και η κυτταρινάση και από αναερόβια βακτήρια. Το στάδιο της υδρόλυσης είναι σχετικά αργό και επιδρά στο δεύτερο στάδιο, καθώς αν γίνει γρήγορα, η ποσότητα του CO₂ στο βιοαέριο αυξάνεται, η οξύτητα ανεβαίνει και το pH πέφτει κάτω από 7.

- **Οξεογένεση**

Στο στάδιο της οξεογένεσης τα μονομερή που σχηματίστηκαν κατά την υδρόλυση μεταβολίζονται σε οργανικά οξέα (προπιονικό, βουτιρικό, οξικό οξύ), αλκοόλες, H₂

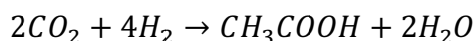
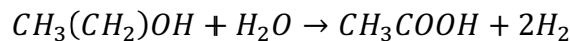
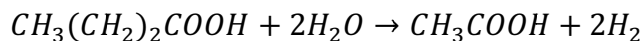
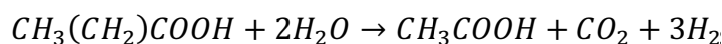
και CO₂ από οξεογόνα βακτήρια. Τα οξεογόνα βακτήρια αποτελούν το 90% του συνολικού πληθυσμού μικροοργανισμών σε ένα αναερόβιο χωνευτήρα.



Σχήμα 3-2: Κύρια συστατικά των τροφίμων και οι διεργασίες μετατροπής τους κατά την αναερόβια χώνευση.[2]

• Οξικογένεση

Τα προϊόντα της οξεικόγνωσης λειτουργούν σαν υπόστρωμα για τα οξικογόνα βακτήρια της τρίτης φάσης. Τα οργανικά οξέα, οι αλκοόλες, το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα που σχηματίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο μετατρέπονται σε οξικό οξύ σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις.

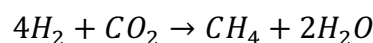


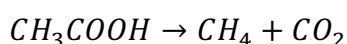
Σχήμα 3-3: Αντιδράσεις προπιονικού οξέος, βουτιρικού οξέος, αιθανόλης, υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα για παραγωγή οξικού οξέος.

Για το σχηματισμό οξικού οξέος απαιτείται χαμηλή μερική πίεση υδρογόνου. Ωστόσο οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να επιβιώσουν μόνο σε υψηλή μερική πίεση υδρογόνου. Οι οξικογόνοι και οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν μεταξύ τους μια συμβιωτική σχέση καθώς οι μεθανογόνοι συνεχώς απομακρύνουν τα προϊόντα μεταβολισμού των οξικογόνων βακτηρίων από το υπόστρωμα και κρατούν τη μερική πίεση του υδρογόνου σε χαμηλά επίπεδα.

• Μεθανογένεση

Κατά το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης παράγεται μεθάνιο από τα μεθανογόνα βακτήρια. Τα βακτήρια αυτής της φάσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα μεθανογόνα υδρογονοτρόφα που μετατρέπουν το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα σε μεθάνιο και τα μεθανογόνα οξικοτρόφα που μετατρέπουν το οξικό οξύ σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.





Όταν η φάση της μεθανογένεσης λειτουργεί σωστά, τότε και η οξικογένεση λειτουργεί χωρίς προβλήματα. Προβλήματα δημιουργούνται όταν οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί συμβιώνουν με άλλους οργανισμούς αντί για μεθανογόνους, χρησιμοποιώντας υδρογόνο. Επίσης και το υδρόθειο επηρεάζει τη μεθανογένεση τοξικά.

3.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση, σαν μια βιολογική διεργασία, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες περιβαλλοντικούς και λειτουργικούς, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ελεγχθούν για μία βέλτιστη διεργασία. Οι κυριότεροι παράγοντες αναφέρονται παρακάτω.

- Μερική πίεση υδρογόνου

Όπως αναφέρθηκε, η μερική πίεση του υδρογόνου πρέπει να είναι σωστά ισορροπημένη για να λειτουργήσουν οι φάσεις της οξικογένεσης και της μεθανογένεσης. Η μέγιστη μερική πίεση του υδρογόνου εξαρτάται από το είδος των βακτηρίων και το υπόστρωμα.

- Συγκέντρωση μικροοργανισμών

Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί έχουν σχετικά μεγάλο χρόνο αναγέννησης. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του υποστρώματος στο χωνευτή θα πρέπει να είναι δέκα με δεκαπέντε ημέρες έτσι ώστε να υπάρχει πάντα επαρκής αριθμός μεθανογόνων μικροοργανισμών.

Αντίθετα για τα υδρολυτικά και οξεογόνα βακτήρια ο χρόνος αναγέννησης είναι σημαντικά πιο μικρός και δεν υπάρχει τέτοιος κίνδυνος.

Σε γενικές γραμμές μια εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης απαιτεί περίπου τρεις μήνες ώσπου να ξεκινήσουν να αναπτύσσονται τα βακτήρια και να αρχίσει η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

- Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία εκτός από την επίδραση που έχει στις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροβιακών πληθυσμών, επιδρά καθοριστικά και σε παράγοντες όπως ο ρυθμός μεταφοράς αερίων και στα χαρακτηριστικά καθίζησης των βιολογικών στερεών. Ανάλογα με τη θερμοκρασία χώνευσης οι διεργασίες χώνευσης χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

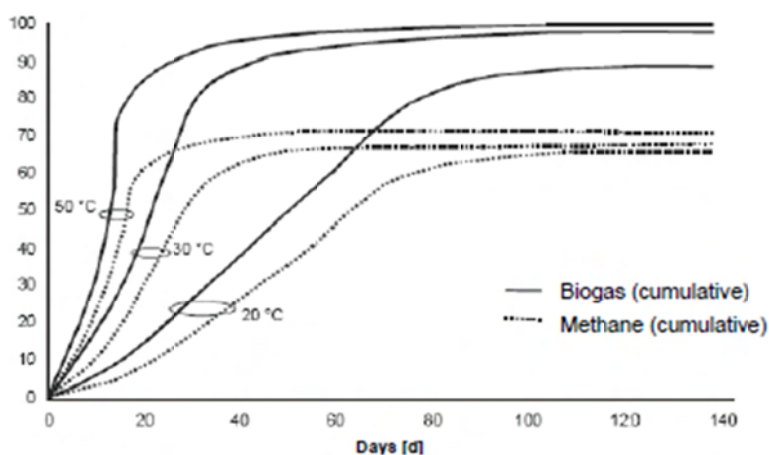
Διεργασία	Τυπικές θερμοκρασίες (°C)	Τυπικοί χρόνοι παραμονής
Ψυχρόφιλη	15-22	μήνες
Μεσόφιλη	25-38	25-50 ημέρες
Θερμόφιλη	50-70	10-30 ημέρες

Πίνακας 3-1: Τύποι διεργασιών της αναερόβιας χώνευσης

Η ψυχροφιλική αναερόβια χώνευση έχει αποδειχτεί ως βιώσιμη τεχνολογία για την επεξεργασία ενός εύρους βιομηχανικών απόνερων και αντιπροσωπεύει μια σημαντική τεχνολογική καινοτομία στις μεθόδους περιβαλλοντικής προστασίας. Έτσι η ψυχροφιλική αναερόβια επεξεργασία είναι μια ελκυστική εναλλακτική ως προς συμβατική αναερόβια χώνευση απόνερων που εκλύονται σε μέσες προς χαμηλές θερμοκρασίες.

Στη μεσοφιλική χώνευση ο χωνευτήρας θερμαίνεται στους 30-35 °C και η πρώτη ύλη παραμένει για περίπου 25-50 ημέρες. Η μεσοφιλική χώνευση τείνει να είναι περισσότερο εύρωστη και ανεκτική από τη θερμοφιλική διαδικασία, αλλά η παραγωγή βιοαερίου είναι μικρότερη, απαιτούνται μεγαλύτερες δεξαμενές χώνευσης και η απολύμανση, εάν απαιτείται, χρειάζεται ένα ξεχωριστό στάδιο διεργασίας. Η μεσοφιλική χώνευση είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διεργασία καθώς είναι σταθερή, παράγει ικανοποιητικές ποσότητες βιοαερίου και σε λογικά χρονικά πλαίσια.

Κατά τη θερμοφιλική χώνευση ο χωνευτήρας θερμαίνεται περίπου στους 55 °C και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 12-14 ημερών. Η θερμοφιλική διεργασία προσφέρει μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου, ταχύτερη επεξεργασία, καλύτερη απολύμανση από παθογόνους οργανισμούς και ιούς, αλλά απαιτεί ακριβότερη τεχνολογία, μεγαλύτερη εισροή ενέργειας και πιο περίπλοκα συστήματα ασφαλείας και ελέγχου.



Σχήμα 3-3: Απόδοση βιοαερίου ανάλογα με τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής.[12]

Καθώς όπως είδαμε η επιλογή των λειτουργικών θερμοκρασιών είναι σημαντική, η επίτευξη μιας σταθερής θερμοκρασίας στον χωνευτήρα θεωρείται περισσότερο σημαντική καθώς τα βακτήρια, ειδικότερα τα μεθανογόνα, είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές ακόμη και 1 °C.

- Υδραυλικός χρόνος παραμονής

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι ο χρόνος που το υπόστρωμα είναι στο χωνευτήρα. Ο βέλτιστος χρόνος παραμονής εξαρτάται από τη θερμοκρασία της χώνευσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής καθορίζει και το μέγεθος του δοχείου χώνευσης και αποτελεί σημαντικό κριτήριο στο σχεδιασμό αναερόβιων συστημάτων.

- pH

Η τιμή του pH έχει σημαντική επίδραση στις αναερόβιες διεργασίες. Τα περισσότερα μεθανογόνα βακτήρια αναπτύσσονται χωρίς προβλήματα μεταξύ pH 6,7 και 7,5. Εάν η τιμή του pH πέσει κάτω από 6,7, η δραστηριότητα των περισσότερων μεθανογόνων βακτηρίων μειώνεται σημαντικά. Τα οξεογόνα βακτήρια αντιθέτως έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και επηρεάζονται λιγότερο από τις μεταβολές του pH. Σημαντική προσοχή θα πρέπει να δοθεί σε χώνευση οξικών υποστρωμάτων, όπως απόβλητα από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων, που μπορούν να μειώσουν την τιμή pH στο χωνευτήρα.

- Οργανικό φορτίο

Τα βακτήρια χρειάζονται μια ελάχιστη ποσότητα οργανικού φορτίου για να επιβιώσουν. Το οργανικό φορτίο θα πρέπει να είναι μεταξύ 0,5 και 5 κιλών ανά κυβικό μέτρο του χωνευτήρα, ενώ το βέλτιστο είναι μεταξύ 1 και 3 κιλών ανά κυβικό μέτρο του χωνευτήρα.

- Αναλογία άνθρακα-αζώτου

Στις διεργασίες αναερόβιας χώνευσης, η αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C/N) θεωρείται μεγάλης σημασίας. Σε υποστρώματα με χαμηλό λόγο C/N έχουμε αυξημένη παραγωγή αμμωνίας και η διεργασία μπορεί να ανασταλεί. Ένας υψηλός λόγος C/N σημαίνει έλλειψη αζώτου και τα βακτήρια που μετέχουν στη διεργασία μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά.

Είναι δύσκολο να εντοπιστεί ποια είναι η σωστή αναλογία, καθώς αυτή εξαρτάται από το υπόστρωμα και από τις συνθήκες της διεργασίας. Στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί, φαίνονται οι λόγοι C/N για διάφορα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υπόστρωμα.

Υλικό	Λόγος C/N
Κοπριά βοοειδών, υγρή	6-20
Απόβλητα πουλερικών	3-10
Κοπριά χοίρων, υγρή	5
Άχυρο	50-150
Γρασίδι	12-26
Δημητριακά	16-40
Φρούτα και λαχανικά	7-35
Υπολείμματα τροφίμων	15-32
Απόβλητα σφαγείων, μαλακοί ιστοί	4
Απόβλητα σφαγείων, εντόσθια	22-37
Απορριπτέα τρόφιμα	3-17
Απόβλητα διύλισης	8

Πίνακας 3-2: Αναλογία C/N υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα για παραγωγή βιοαερίου.

- Μέγεθος σωματιδίων

Τα σωματίδια στο υπόστρωμα θα πρέπει να μην είναι πολύ μεγάλα, γιατί τα βακτήρια δε θα μπορούν να τα διασπάσουν.

3.1.2 Ιδιότητες βιοαερίου

Το παραγόμενο βιοαέριο είναι ένα εύφλεκτο αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η σύσταση του βιοαερίου φαίνεται στον Πίνακα 3.3.

Συστατικό	Ποσοστό κατ' όγκο
Μεθάνιο CH ₄	50-75
Διοξείδιο του άνθρακα CO ₂	25-45
Νερό H ₂ O	2-7
Οξυγόνο O ₂	<2
Άζωτο N ₂	<2
Αμμωνία NH ₃	<1
Υδρόθειο H ₂ S	<1

Πίνακας 3-3: Σύσταση του βιοαερίου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις το βιοαέριο περιέχει σιλοζάνες. Αυτές δημιουργούνται από την αναερόβιο αποσύνθεση υλικών που συνήθως συναντώνται σε σαπούνια και απορρυπαντικά. Κατά την καύση βιοαερίου που περιέχει σιλοζάνες, εκλύεται πυρίτιο το οποίο μπορεί να αντιδράσει με ελεύθερο οξυγόνο ή άλλα συστατικά του αερίου καύσης. Μπορεί να σχηματιστούν αποθέσεις, οι οποίες περιέχουν κυρίως σίλικα (SiO₂) ή άλλα οξείδια του πυρίτιου (Si_xO_y) και μπορεί ακόμα να περιέχουν ασβέστιο, θείο, ψευδάργυρο ή φώσφορο.

Η θερμογόνο ικανότητα του βιοαερίου είναι περίπου 6 kWh/m³ ή 20-22 MJ/m³ και αυτή η ποσότητα ενέργειας είναι περίπου ίση με αυτή μισού λίτρου ντήζελ. Για τη χρήση ως καύσιμο, το βασικό συστατικό είναι το μεθάνιο.

3.1.3 Υποστρώματα

Σαν υπόστρωμα ορίζεται η ουσία που πρόκειται να χωνευθεί. Ένα μεγάλο εύρος βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υπόστρωμα για παραγωγή βιοαερίου από αναερόβια χώνευση. Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες βιομάζας σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (European Waste Catalogue and Hazardous Waste List) είναι οι παρακάτω:

- Κοπριά ζώων
- Αγροτικά υπολείμματα και παραπροϊόντα
- Χωνεύσιμα οργανικά απόβλητα από βιομηχανίες
- Αστικά οργανικά απόβλητα

- Ενεργειακά φυτά (πχ καλαμπόκι, σόργο, τριφύλλι)

Η ομαδοποίηση και η κωδικοποίηση των αποβλήτων – υποστρωμάτων σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων φαίνεται στον Πίνακα 3.4 που ακολουθεί.

Κωδικός αποβλήτου	Περιγραφή αποβλήτου	
02 00 00	Απόβλητα από γεωργία, κηπευτική, υδατοκαλλιέργεια, δασοκομία, θήρα και αλιεία, προετοιμασία και επεξεργασία τροφίμων	Απόβλητα από γεωργία, κηπευτική, υδατοκαλλιέργεια, δασοκομία, θήρα και αλιεία
		Απόβλητα από την προπαρασκευή και επεξεργασία κρέατος, ψαριού και άλλων τροφίμων ζωικής προέλευσης
		Απόβλητα από φρούτα, λαχανικά, δημητριακά, βρώσιμα έλαια, κακάο, την προετοιμασία και την κονσερβοποιία τσαγιού και καπνού: παραγωγή μαγιός και εκχύλισμα μαγιός, προετοιμασία και ζύμωση μελάσας
		Απόβλητα από την επεξεργασία ζάχαρης
		Απόβλητα από τη βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων
		Απόβλητα από τη βιομηχανία αρτοποιίας και ζαχαροπλαστικής
03 00 00	Απόβλητα από την κατεργασία ξύλου και την παραγωγή των πάνελ και έπιπλα, χαρτοπολτού, χαρτί και χαρτόνι	Απόβλητα από την κατεργασία ξύλου και την παραγωγή των πάνελ
		Απόβλητα από την παραγωγή και επεξεργασία χαρτοπολτού, χαρτιού και χαρτονιού
04 00 00	Απόβλητα από τις βιομηχανίες δέρματος, γούνας και υφαντουργίας	Απόβλητα από τις βιομηχανίες δέρματος και γούνας
		Απόβλητα από τη βιομηχανία υφαντουργίας
15 00 00	Απόβλητα συσκευασίας: Απορροφητικά υλικά, υφάσματα σκουπίσματος, υλικά φίλτρων και προστατευτικός ρουχισμός	Συσκευασία (συμπεριλαμβανομένων των αστικών αποβλήτων συσκευασίας που συλλέγονται ξεχωριστά)
19 00 00	Απόβλητα από τις εγκαταστάσεις διαχείρισης των αποβλήτων, εκτός του χώρου των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και η προετοιμασία του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση και νερού για βιομηχανική χρήση	Απόβλητα από την αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων
		Απόβλητα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων
		Απόβλητα από την προπαρασκευή νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση ή νερό για βιομηχανική χρήση
20 00 00	Αστικά απόβλητα (οικιακά απόβλητα και παρόμοια εμπορικά και βιομηχανικά	Χωριστά συλλεγόμενα κλάσματα (εκτός 15 01)
		Απόβλητα κήπων και πάρκων (περιλαμβάνονται απόβλητα νεκροταφείων)

Πίνακας 3-4: Απόβλητα κατάλληλα για βιολογική επεξεργασία σύμφωνα με ΕΚΑ.[13]

Η κοπριά και τα άλλα παραπροϊόντα της κτηνοτροφίας είναι η πρώτη ύλη για τις περισσότερες μονάδες παραγωγής γεωργικού βιοαερίου στην Ευρώπη. Το είδος του εξοπλισμού και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να συλλεχθούν και να επεξεργαστούν οι κοπριές εξαρτώνται κυρίως από τη συνοχή ή το «πάχος» της κοπριάς. Ο όρος «περιεχόμενα στερεά» ή «% στερεά» χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει αυτήν την ιδιότητα της κοπριάς.

Η αξιοποίηση της κοπριάς και της λάσπης ως πρώτη ύλη για την αναερόβια χώνευση έχει κάποια πλεονεκτήματα λόγω των ιδιοτήτων τους:

- Το φυσικό περιεχόμενο τους σε αναερόβια βακτήρια
- Η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (4-8% ΞΜ στις λάσπες), που ενεργεί ως διαλύτης για τα άλλα υποστρώματα και εξασφαλίζει την ανάμειξη και ροή της βιομάζας
- Η φθηνή τιμή
- Η υψηλή προσβασιμότητα, καθώς συλλέγονται ως υπόλειμμα από την κτηνοτροφία

Κατά τα τελευταία χρόνια, μια νέα κατηγορία της πρώτης ύλης αναερόβιας χώνευσης έχει δοκιμαστεί και έχει εισαχθεί σε πολλές χώρες, οι ενεργειακές καλλιέργειες. Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι ειδικές καλλιέργειες για την παραγωγή ενέργειας, ειδικότερα την παραγωγή βιοαερίου. Οι καλλιέργειες μπορεί να είναι ποώδης (γρασίδι, αραβόσιτος, άχυρο) αλλά και ξυλώδεις καλλιέργειες (ιτιά, λεύκα, βελανιδιά), αν και οι ξυλώδεις καλλιέργειες χρειάζονται ειδική προ-επεξεργασία απολιγνινοποίησης πριν την αναερόβια χώνευση. Γενικά αυτού του είδους υποστρώματα παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου ανά (υγρό) τόνο από την κοπριά. Ωστόσο όταν προστίθενται τέτοια υποστρώματα, πρέπει να τηρούνται οι απαιτούμενες συνθήκες διεργασίας, όπως οργανικό φορτίο ή pH.

Τα υποστρώματα της χώνευσης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με διάφορα κριτήρια: προέλευση, περιεχόμενο ξηρής μάζας (ΞΜ), παραγωγή μεθανίου κλπ. Ο Πίνακας 3.5 δίνει μια γενική εικόνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά ορισμένων χωνεύσιμων πρώτων υλών. Τα υποστρώματα με περιεκτικότητα σε ξηρή μάζα χαμηλότερη από το 20% χρησιμοποιούνται για τη λεγόμενη υγρή χώνευση (υγρή ζύμωση). Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τη ζωική κοπριά, ως καθώς και διάφορα υγρά οργανικά απόβλητα από βιομηχανίες τροφίμων. Όταν η περιεκτικότητα ξηρής μάζας είναι τόσο υψηλή όσο 35%, ονομάζεται ξηρή χώνευση (ξηρή ζύμωση), και αφορά υποστρώματα από ενεργειακές καλλιέργειες και γεωργικά υπολείμματα. Η επιλογή των τύπων και ποσοτήτων πρώτης ύλης για το μείγμα του υποστρώματος για την αναερόβια χώνευση εξαρτάται από το περιεχόμενο ξηρής μάζας καθώς και με το περιεχόμενο τους σε σάκχαρα, λιπίδια και πρωτεΐνες.

Τα χαρακτηριστικά των υποστρωμάτων εκφράζονται με τους παρακάτω όρους:

- Υγρασία

Το βάρος του νερού που χάνεται κατά την ξήρανση στους 105 °C μέχρι να σταματήσει η απώλεια βάρους.

- **Συνολικά Στερεά (ΣΣ)**

Το βάρος του ξηρού υλικού που απομένει μετά την ξήρανση, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Το βάρος των ΣΣ είναι συνήθως ισοδύναμο με την «ξηρή μάζα» (ΞΜ) (παρόλα αυτά, αν ξηραθεί το υλικό στον ήλιο, θεωρείται ότι περιλαμβάνει ακόμα περίπου 30% υγρασία). Τα ΣΣ αποτελούνται από χωνεύσιμα οργανικά ή «Πτητικά Στερεά» (ΠΣ) και μη χωνεύσιμα υπολείμματα ή «Παραμένοντα Στερεά».

- **Πτητικά Στερεά (ΠΣ)**

Το βάρος των οργανικών στερεών που καίγεται όταν αναφλεγεί το ξηρό υλικό (με θέρμανση στους περίπου 538 °C). Αυτή είναι μια χρήσιμη ιδιότητα των οργανικών υλικών, καθώς τα ΠΣ μπορούν να θεωρηθούν ως η ποσότητα των στερεών που χωνεύονται από τα βακτήρια.

- **Παραμένοντα Στερεά (ΠαΣ)**

Πρόκειται για το βάρος του υλικού που παραμένει μετά την ανάφλεξη. Είναι βιολογικά αδρανές υλικό.

Πρώτη Ύλη	Ξηρή μάζα ΞΜ (%)	Πτητικά στερεά ΠΣ (% της ΞΜ)	Απόδοση βιοαερίου (m ³ /tn ΠΣ)
Κοπριά βοοειδών	7-15	65-85	200-300
Κοπριά χοίρων	3-13	70-80	350-500
Κοπριά πουλερικών	10-30	70-80	350-550
Εντόσθια	15	80	400-680
Τυρόγαλα	8-12	80-90	500-800
Άχυρο	70-90	80-90	150-350
Γρασίδι	25-40	90-90	500-700
Αραβόσιτος	15-40	75-95	500-900
Υπολείμματα φρούτων - λαχανικών	15-20	70-80	400-500

Πίνακας 3-5: Ενδεικτικές τιμές για μερικά είδη υποστρωμάτων.[1], [2], [3]

Στα υποστρώματα υπάρχουν πολλές παράμετροι που θα πρέπει να προσεχθούν. Εκτός από τη διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών για την αναερόβια χώνευση, οι ακόλουθες παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- **Χημική μόλυνση**

Τα υποστρώματα μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα (όπως ο ψευδάργυρος και χαλκός) ή άλλους ανόργανους ρύπους και επίμονους οργανικούς ρύπους. Όταν το χωνεμένο υπόλειμμα είναι να χρησιμοποιηθεί σε λίπασμα σε γεωργική γη, καλό είναι να ελεγχθεί αν οι συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων στο λίπασμα πληρούν τα απαιτούμενα εθνικά και περιφερειακά πρότυπα. Τα

υποστρώματα μπορεί επίσης να περιέχουν άζωτο, φώσφορο και κάλιο, μερικές φορές σε σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις από την κοπριά. Αυτό πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν το χωνεμένο υπόλειμμα χρησιμοποιείται ως λίπασμα.

- Φυσικές ακαθαρσίες

Είναι δυνατόν φυσικές ακαθαρσίες να είναι παρούσες στο υπόστρωμα. Αυτές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν πλαστικό και καουτσούκ, μέταλλο, γυαλί και κεραμικά, άμμο και πέτρες, υλικά κυτταρίνης (ξύλο, χαρτί, κλπ.), και άλλες ακαθαρσίες. Αυτές οι ακαθαρσίες μπορούν να επηρεάσουν την λειτουργική σταθερότητα της εγκατάστασης, ή ακόμα και ζημιά στον εξοπλισμό της εγκατάστασης. Οι περισσότερες από αυτές τις προσμίξεις είναι επίσης ανεπιθύμητες αν το χωνεμένο υπόλειμμα χρησιμοποιείται ως λίπασμα στη γεωργική γη. Είναι σκόπιμο να διασφαλιστεί ότι το υπόστρωμα έχει όσο το δυνατόν λιγότερες φυσικές ακαθαρσίες και να πληρεί τα εθνικά πρότυπα.

- Παθογόνοι οργανισμοί και σπόροι

Τα υποστρώματα μπορεί να περιέχουν διάφορους παθογόνους οργανισμούς και σπόρους, ανάλογα με την προέλευσή τους. Αυτό αποτελεί επίσης ένα πρόσθετο κίνδυνο για την εξάπλωση ασθενειών ή για την πρόκληση ζιζανίων, ειδικά όταν το χωνεμένο υπόλειμμα χρησιμοποιείται ως λίπασμα στη γεωργική γη.

3.2 Συστήματα παραγωγής βιοαερίου

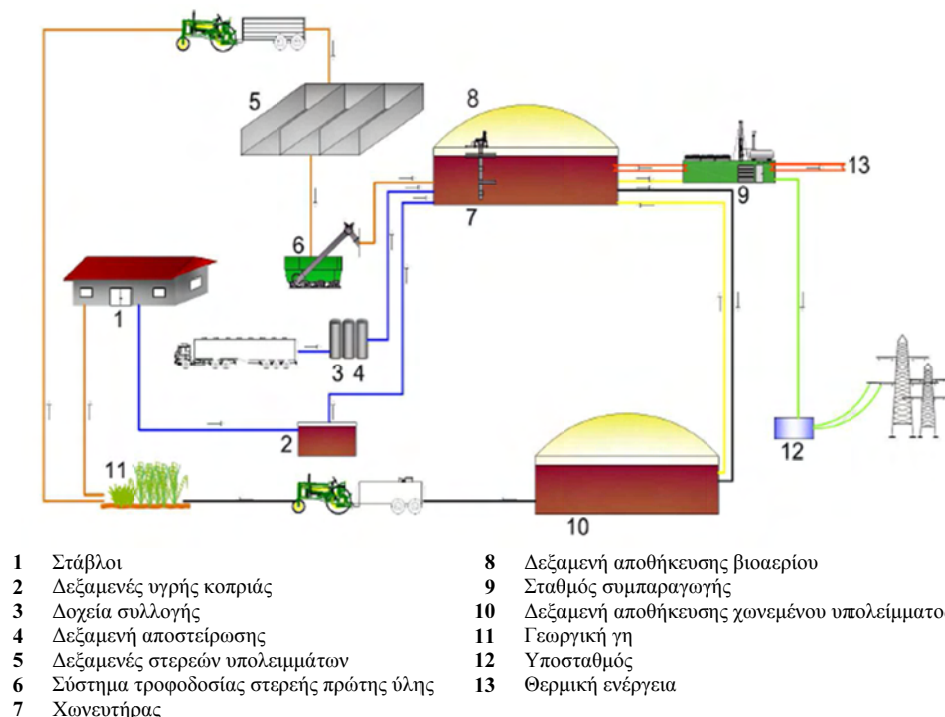
Μια εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου είναι μια σύνθετη εγκατάσταση, που αποτελείται διάφορα υποσυστήματα. Η διάταξη μιας τέτοιας εγκατάστασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους τύπους και τις ποσότητες των πρώτων υλών που παρέχονται. Καθώς υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι πρώτης ύλης που είναι κατάλληλοι για χώνευση σε μονάδες παραγωγής βιοαερίου, υπάρχουν, αντίστοιχα, διάφορες τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτών των τύπων πρώτης ύλης και διαφορετικοί τύποι χωνευτήρα και συστήματα λειτουργίας. Επιπλέον, ανάλογα με το είδος, το μέγεθος και τις συνθήκες λειτουργίας της κάθε μονάδας βιοαερίου, διάφορες τεχνολογίες για την προετοιμασία, την αποθήκευση και αξιοποίηση του βιοαερίου είναι δυνατόν να εφαρμοστούν. Όσον αφορά την αποθήκευση και τη χρήση του χωνεμένου υπολείμματος, αυτή είναι κυρίως προσανατολισμένη προς την αξιοποίηση του ως λίπασμα.

Η διαδικασία παραγωγής βιοαερίου χωρίζεται σε τέσσερα στάδια, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4, που δείχνει μία απλοποιημένη αναπαράσταση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης κοπριάς και αγροτικών υπολειμμάτων. Τα στάδια είναι με τη σειρά τα ακόλουθα:

1. Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας (αποθήκευση, συσκευασία, μεταφορά και εισαγωγή της πρώτης ύλης) περιλαμβάνει τη δεξαμενή αποθήκευσης κοπριάς (2), τα δοχεία συλλογής (3), τη δεξαμενή αποστείρωσης (4), τις δεξαμενές αποθήκευσης στερεών (5) και το σύστημα τροφοδοσίας στερεής πρώτης ύλης (6).
2. Το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας περιλαμβάνει την παραγωγή του βιοαερίου στον αντιδραστήρα βιοαερίου (7), που αναφέρεται ως χωνευτήρας.

3. Το τρίτο στάδιο της διεργασίας αντιπροσωπεύεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης του χωνεμένου υπολείμματος (10) και την αξιοποίησή του ως λίπασμα στα χωράφια (11).
4. Το τέταρτο στάδιο της διεργασίας (αποθήκευση του βιοαερίου, βελτίωση και χρήση) αποτελείται από το δεξαμενή αποθήκευσης αερίου (8) και το σύστημα συμπαραγωγής (9).

Αυτά τα τέσσερα στάδια της διεργασίας συνδέονται στενά μεταξύ τους (π.χ. στάδιο 4 παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για το στάδιο 2).



Σχήμα 3-4: Εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή βιοαερίου από κοπριά και αγροτικά υπολείμματα.

Κατά την οικοδόμηση μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου, η επιλογή του τύπου και του σχεδιασμού των εγκαταστάσεων κυρίως προσδιορίζεται από την ποσότητα και τον τύπο των διαθέσιμων πρώτων υλών. Η ποσότητα της πρώτης ύλης καθορίζει τη διαστασιολόγηση του μεγέθους του χωνευτήρα, τις δυνατότητες αποθήκευσης και της μονάδας ΣΗΘ. Η ποιότητα της πρώτης ύλης (περιεχόμενο ΞΜ, δομή, προέλευση κλπ.) καθορίζει τον τύπο επεξεργασίας.

Ανάλογα με τη σύνθεση της πρώτης ύλης, μπορεί να είναι απαραίτητο να διαχωριστούν τα προβληματικά υλικά, να τεμαχιστεί η πρώτη ύλη ή ακόμη να προστεθεί νερό, με σκοπό να το μετατρέψει σε ένα αντλήσιμο μίγμα. Εάν η παρεχόμενη πρώτη ύλη είναι επιρρεπής στη μόλυνση, είναι αναγκαίο να περιλαμβάνουν ένα στάδιο αποστείρωσης στο συνολικό σχεδιασμό της μελλοντικής εγκατάστασης.

Στην περίπτωση της υγρής χώνευσης, χρησιμοποιούνται μονοβάθμια συστήματα αναερόβιας χώνευσης, που λειτουργούν με τη απευθείας ροή του υποστρώματος. Στην διαδικασία δύο σταδίων, ένα προ-χωνευτήρας τοποθετείται πριν από τον κύριο χωνευτήρα. Ο προ-χωνευτήρας δημιουργεί τις βέλτιστες συνθήκες για τα δύο πρώτα στάδια της διαδικασίας της διεργασίας της χώνευσης (σχηματισμός οξέων). Μετά την

προ-χωνευτή, η πρώτη ύλη εισάγεται στον κύριο χωνευτήρα, όπου τα επόμενα βήματα λαμβάνουν χώρα.

Το χωνεμένο υπόλειμμα (κομπόστ) αντλείται από το χωνευτήρα και αποθηκεύεται σε δεξαμενές αποθήκευσης. Αυτές οι δεξαμενές αποθήκευσης πρέπει να καλύπτονται με αεροστεγείς μεμβράνες, για τη διευκόλυνση της συλλογής του βιοαερίου που παράγεται μέσα σε αυτές τις δεξαμενές, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (μεταχώνευση). Εναλλακτικά, το κομπόστ μπορεί να αποθηκευτεί σε δοχεία ανοικτής ζύμωσης, με φυσικό ή τεχνητό επιφανειακό στρώμα, με στόχο την ελαχιστοποίηση των εκπομπών από την επιφάνεια.

Το παραγόμενο βιοαέριο αποθηκεύεται, συντηρείται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Η πραγματική τυπική χρήση του βιοαερίου είναι για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

3.2.1 Μέρη σταθμού βιοαερίου

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν τα επιμέρους συστήματα ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης, με παραγωγή βιοαερίου και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

3.2.1.1 Αποθήκευση και διατήρηση πρώτων υλών

Η μεταφορά και προμήθεια της πρώτης ύλης παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας εγκατάστασης βιοαερίου. Επομένως, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί μια σταθερή και συνεχής παροχή της πρώτης ύλης, σε κατάλληλη ποιότητα και ποσότητα. Εάν ο διαχειριστής της εγκατάστασης βιοαερίου είναι ταυτοχρόνως και ο παραγωγός της πρώτης ύλης, τότε η παροχή πρώτης ύλης μπορεί εύκολα να διασφαλίζεται. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μονάδες παραγωγής βιοαερίου λαμβάνουν πρώτη ύλη, που παράγεται από γειτονικά αγροκτήματα, βιομηχανίες ή νοικοκυριά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η διαχείριση της ποιότητας της τροφοδοσίας είναι απαραίτητη, προκειμένου να ελεγχθεί, να μετρηθεί και να επαληθευτεί το παρεχόμενο υλικό. Σε ένα πρώτο βήμα, είναι απολύτως αναγκαίο να γίνει οπτικός έλεγχος κάθε φορτίου πρώτης ύλης. Στη συνέχεια, το βάρος παράδοσης και όλα τα στοιχεία της πρώτης ύλης (προμηθευτής, ημερομηνία, ποσότητα, το είδος της πρώτης ύλης, διαδικασίες προέλευσης και ποιότητας) θα πρέπει να καταγράφονται. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τους τύπους πρώτης ύλης που ταξινομούνται ως απόβλητα, τα οποία θα πρέπει να πληρούν ορισμένα πρότυπα.

Ο τύπος των εγκαταστάσεων αποθήκευσης εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης ταξινομούνται σε σιλό αποθήκευσης για στερεή πρώτη ύλη (π.χ. αραβόσιτο) και δεξαμενές αποθήκευσης υγρών πρώτων υλών (π.χ. κοπριά). Συνήθως, τα σιλό έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν πρώτη ύλη για περισσότερο από ένα έτος και οι δεξαμενές αποθήκευσης για την κοπριά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν την πρώτη ύλη για αρκετές ημέρες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, επίσης κάθετα κυλινδρικά σιλό μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Η διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων αποθήκευσης καθορίζεται από τις ποσότητες που πρόκειται να αποθηκευτούν, τα χρονικά διαστήματα παραδόσεων και τις καθημερινές ποσότητες που τροφοδοτούνται στον χωνευτήρα.

Δεξαμενές αποθήκευσης υγρών υποστρωμάτων

Η αντλήσιμη πρώτη ύλη γενικά αποθηκεύεται σε σφραγισμένες, υδατοστεγείς δεξαμενές, υπόγειες ή υπέργειες. Αυτές οι δεξαμενές, παρόμοιες με αυτές που

χρησιμοποιούνται στη γεωργία, για την αποθήκευση των υγρών πρώτων υλών, έχουν συνήθως χωρητικότητα αποθήκευσης που επαρκεί για μία έως δύο ημέρες. Μετά από αυτό το διάστημα μπορεί να αρχίσει η διαδικασία της χώνευσης και να χαθεί το βιοαέριο που θα παραχθεί. Για την αποφυγή των εκπομπών, όλες οι δεξαμενές αποθήκευσης πρέπει να καλύπτονται. Η λύση που επελέγη για την κάλυψη πρέπει να εξασφαλίζει εύκολο άνοιγμα και την απομάκρυνση των ιζημάτων. Εάν οι δεξαμενές αποθήκευσης τοποθετηθούν σε ένα υψηλότερο επίπεδο σε σχέση με το χωνευτήρα, η υδραυλική κλίση εξαλείφει την ανάγκη για τον εξοπλισμό μεταφοράς (αντλίες) και εξοικονομείται ενέργεια. Στην Εικόνα 3.1 που ακολουθεί φαίνεται μια δεξαμενή αποθήκευσης υγρών υποστρωμάτων.



Εικόνα 3-1: Δεξαμενή αποθήκευσης υγρών υποστρωμάτων.

Σιλό αποθήκευσης

Τα σιλό αναπτύχθηκαν αρχικά για την αποθήκευση της ζωοτροφής. Σήμερα αυτό το είδος της αποθήκευσης χρησιμοποιείται συχνά για την αποθήκευση των προϊόντων των ενεργειακών καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου.



Εικόνα 3-2: Σιλό αποθήκευσης στερεών υποστρωμάτων.

Η πρώτη ύλη συμπυκνώνεται από τρακτέρ προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο περιεχόμενος αέρας. Η ελαχιστοποίηση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφευχθούν οι αερόβιες διεργασίες. Για τον ίδιο λόγο, η πρώτη ύλη καλύπτεται συνήθως από πλαστική μεμβράνη που πιέζεται με ελαστικά ή σάκους άμμου. Εναλλακτικά, φυσικά καλύμματα μπορούν να δημιουργηθούν, όπως ένα στρώμα χλόης.

3.2.1.2 Προετοιμασία υποστρωμάτων

Πριν την εισαγωγή τους στο χωνευτήρα, τα υποστρώματα θα πρέπει να προετοιμαστούν κατάλληλα. Η προετοιμασία διαφέρει για υγρά και στερεά απόβλητα.

Προετοιμασία υγρών υποστρωμάτων

Σε περίπτωση χρήσης υποστρωμάτων από κτηνοτροφικά παραπροϊόντα, απόβλητα σφαγίων και αστικά απόβλητα, πριν την τροφοδοσία στο χωνευτήρα, τα υγρά απόβλητα περνούν από ένα στάδιο αποστείρωσης για την εξόντωση των παθογόνων οργανισμών. Η αποστείρωση διεξάγεται συνήθως σε ξεχωριστές, θερμαινόμενες χαλύβδινες δεξαμενές, που συνδέονται με το σύστημα τροφοδοσίας του χωνευτήρα.

Προετοιμασία στερεών υποστρωμάτων

Συνήθως τα στερεά υποστρώματα χρειάζεται να περάσουν από μια διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους τους πριν την είσοδο στο χωνευτήρα. Το μέγεθος των σωματιδίων του υποστρώματος πρέπει να είναι μικρό ώστε να μπορεί να προστεθεί και να αναμειχθεί με την κοπριά. Ο τεμαχισμός του υποστρώματος γίνεται, τις περισσότερες φορές, ταυτόχρονα με την τροφοδοσία στο χωνευτήρα.

3.2.1.3 Σύστημα τροφοδοσίας

Μετά την ολοκλήρωση των απαραίτητων σταδίων προετοιμασίας, το υπόστρωμα είναι έτοιμο για να μεταφερθεί στο χωνευτήρα. Ο χωνευτήρας τροφοδοτείται συνήθως μία ή δύο φορές την ημέρα. Ανάλογα με την προέλευση του υποστρώματος διακρίνονται δύο είδη τροφοδοσίας.

Τροφοδοσία υγρών υποστρωμάτων

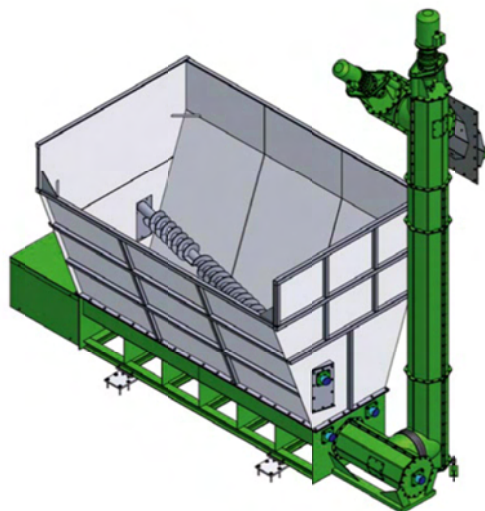
Για τη μεταφορά των υγρών υποστρωμάτων στο χωνευτήρα χρησιμοποιούνται φυγοκεντρικές αντλίες. Οι αντλίες αυξάνουν την ταχύτητα του ρευστού και έτσι επιτυγχάνεται η κίνηση μέσα στις σωληνώσεις. Προκειμένου να διευκολυνθεί η λειτουργία των αντλιών, οι σωληνώσεις θα πρέπει να εγκατασταθούν με μια κλίση 1-2%, ούτως ώστε η αντλία να μπορεί να αδειάσει αυτόματα κατά τη διάρκεια μη λειτουργίας. Αυτό αποτρέπει τη συσσώρευση των ιζημάτων στην αντλία. Στην Εικόνα 3.3 φαίνονται διάφοροι τύποι αντλιών.



Εικόνα 3-3: Διάφοροι τύποι αντλιών.

Τροφοδοσία στερεών υποστρωμάτων

Η τροφοδοσία των στερεών υποστρωμάτων στο χωνευτήρα γίνεται με ειδικούς κοχλίες, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4. Στις διατάξεις αυτές συνήθως συνδυάζεται και η ελάττωση μεγέθους του υποστρώματος. Η μεταφορά του υποστρώματος από το σιλό αποθήκευσης μέχρι τον κοχλία γίνεται με φορτωτές.



Εικόνα 3-4: Διάταξη τροφοδοσίας στερεών υποστρωμάτων.

3.2.1.4 Σύστημα σωληνώσεων

Οι σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις βιοαερίου πρέπει να έχουν αντιδιαβρωτική προστασία και να είναι κατάλληλες ώστε να μπορούν να χειρίζονται συγκεκριμένα είδη υλικών (βιοαέριο και βιομάζα). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για αγωγούς εξαρτώνται από το μεταφερόμενο φορτίο και επίπεδο πίεσης και περιλαμβάνουν το PVC, HDPE, χάλυβα και ανοξείδωτο χάλυβα.

Οι σωληνώσεις βιομάζας πρέπει να έχουν ελάχιστη διάμετρο 300mm για να αποφεύγονται εμφράξεις. Επίσης προκειμένου να αποφευχθούν ιζήματα στις σωληνώσεις μια ελάχιστη ταχύτητα μεταφοράς περίπου 1m/s θα πρέπει να διατηρείται.

3.2.1.5 Χωνευτήρας

Το κύριο μέρος ενός σταθμού παραγωγής βιοαερίου είναι ο χωνευτήρας. Ο χωνευτήρας είναι μία στεγανή δεξαμενή (Εικόνα 3.5), όπου λαμβάνει χώρα η αποσύνθεση των υποστρωμάτων, απουσία οξυγόνου, και παράγεται το βιοαέριο. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης απαιτεί θερμοκρασίες που είναι πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι είναι αναγκαίο να εγκατασταθεί σύστημα πρόσδοσης θερμότητας στο χωνευτήρα, αλλά και κατάλληλη μόνωση ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας.



Εικόνα 3-5: Διάταξη κατακόρυφων χωνευτήρων.

Οι χωνευτήρες μπορούν να κατασκευαστούν από σκυρόδεμα, χάλυβα, τούβλο ή πλαστικό και μπορούν να τοποθετούνται υπόγεια ή επί της επιφανείας. Το μέγεθος των χωνευτήρων καθορίζει την κλίμακα των εγκαταστάσεων βιοαερίου και ποικίλλει από λίγα κυβικά μέτρα στην περίπτωση των μικρών οικιακών εγκαταστάσεων έως αρκετές χιλιάδες κυβικά μέτρα, όπως στην περίπτωση των μεγάλων σταθμών. Υπάρχουν δύο τύποι χωνευτήρων, οι οριζόντιοι και οι κατακόρυφοι.

Ανάλογα με τον τύπο τροφοδοσίας και εξαγωγής του χωνεμένου υπολείμματος, οι διαδικασίες χώνευσης διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

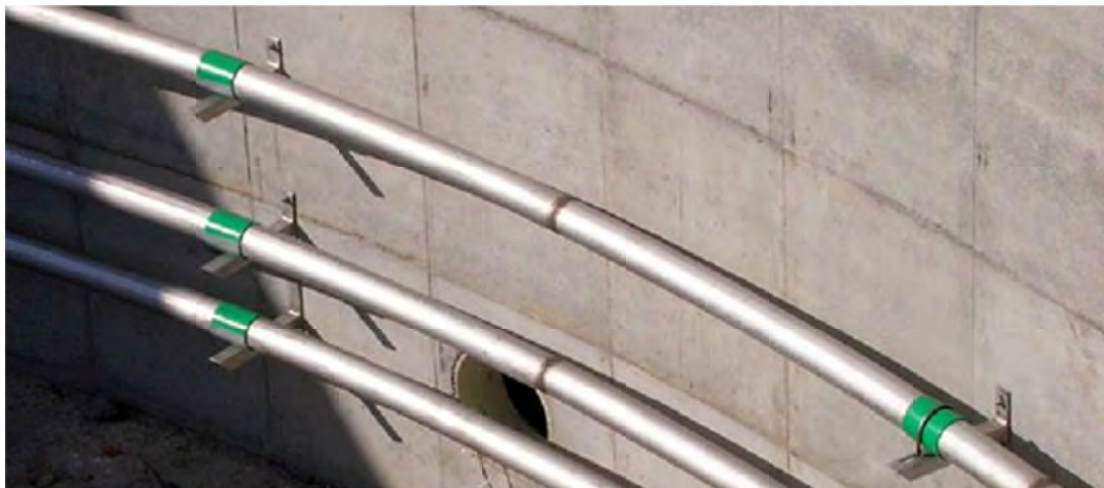
- Συνεχής διαδικασίες
- Ασυνεχής διαδικασίες – ανά παρτίδα

Κατά τη συνεχή διαδικασία χώνευσης, ο χωνευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς με υπόστρωμα. Αντίστοιχη ποσότητα με αυτή που εισέρχεται, εξέρχεται από το χωνευτήρα από μια βαλβίδα υπερχειλίσης. Έτσι η ποσότητα στο χωνευτήρα παραμένει συνέχεια σταθερή, όπως σταθερή είναι και η παραγωγή βιοαερίου. Συχνά το χωνεμένο υπόλειμμα μεταφέρεται σε μία δεξαμενή μετα-χώνευσης όπου θα συνεχίσει η παραγωγή βιοαερίου. Αυτού του είδους η διαδικασία έχει εφαρμογή σε εγκαταστάσεις όπου χωνεύεται κοπριά, καθώς δε μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Κατά τις ασυνεχείς διαδικασίες χώνευσης ο χωνευτήρας τροφοδοτείται πλήρως με υπόστρωμα και ξεκινά η διεργασία της χώνευσης. Η παραγωγή βιοαερίου ξεκινά και αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, ώσπου φτάνει μια μέγιστη τιμή. Όταν η παραγωγή πέσει σε ένα επίπεδο 90-95% του μεγίστου, το υπόλειμμα μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης και ο χωνευτήρας συμπληρώνεται με φρέσκο υπόστρωμα. Για να επιτευχθεί μια σταθερή παραγωγή βιοαερίου συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας χωνευτήρες, οι οποίοι λειτουργούν παράλληλα σε διαφορετικά στάδια.

3.2.1.6 Σύστημα θέρμανσης χωνευτήρα

Για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας χώνευσης ανάλογα με τον τύπο της διεργασίας (μεσοφιλική, θερμοφιλική) είναι αναγκαία η θέρμανση του υποστρώματος στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η πρόσδοση θερμότητας πετυχαίνεται με σωληνώσεις που εγκαθίστανται στον εσωτερικό τοίχο του χωνευτήρα (Εικόνα 3.6) και μέσα τους ρέει θερμό ρευστό που παράγεται κατά την συμπαραγωγή. Έτσι το υπόστρωμα θερμαίνεται ομοιόμορφα σε όλο το ύψος.



Εικόνα 3-6: Θέρμανση χωνευτήρα.

Για τη μείωση των θερμικών απωλειών από τα τοιχώματα του χωνευτήρα είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί μόνωση. Η μόνωση είναι από υλικά όπως πετροβάμβακας, πολυστερίνη ή αφρός πολυουρεθάνης. Το πάχος της μόνωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού που θα τοποθετηθεί.

3.2.1.7 Σύστημα ανάδευσης χωνευτήρα

Η λειτουργία των συσκευών ανάδευσης εκπληρώνει διάφορους σκοπούς σε ένα χωνευτήρα:

- Ομοιομορφία της θερμοκρασίας του υποστρώματος
- Ανάμειξη του παλιού με το νέο υπόστρωμα, έτσι ώστε ενεργά βακτήρια να βρίσκονται παντού στο υπόστρωμα
- Πρόληψη του σχηματισμού συσσωμάτων και στρωμάτων

Η ανάδευση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, μηχανικά ή υδραυλικά. Κοινά μηχανικά συστήματα ανάδευσης είναι με χρήση προπελών (Εικόνα 3.7). Ένας ηλεκτρικός κινητήρας δίνει κίνηση στους αναδευτήρες και αυτοί δημιουργούν ροή προς την επιθυμητή κατεύθυνση.



Εικόνα 3-7: Σύστημα μηχανικής ανάδευσης.

Η υδραυλική ανάδευση γίνεται με τη ροή από την κίνηση του υποστρώματος όταν μια αντλία αφαιρεί υπόστρωμα από ένα σημείο του χωνευτήρα και το επανατροφοδοτεί από άλλο σημείο. Η υδραυλική ανάδευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με υγρά υποστρώματα.

3.2.1.8 Αποθήκευση βιοαερίου

Η παραγωγή βιοαερίου πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή και διαρκής. Μέσα στο χωνευτήρα, το βιοαέριο παράγεται σε κυμαινόμενες ποσότητες και με διαφορετικό ρυθμό. Όταν το βιοαέριο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε π.χ. μια μονάδα συμπαραγωγής, η ζήτηση για το βιοαέριο μπορεί να ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να αντισταθμιστεί για αυτή η διακύμανση, τότε είναι αναγκαίο να αποθηκεύει προσωρινά τα παραγόμενο βιοαέριο, σε κατάλληλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3-8: Εξωτερική δεξαμενή αποθήκευσης βιοαερίου.

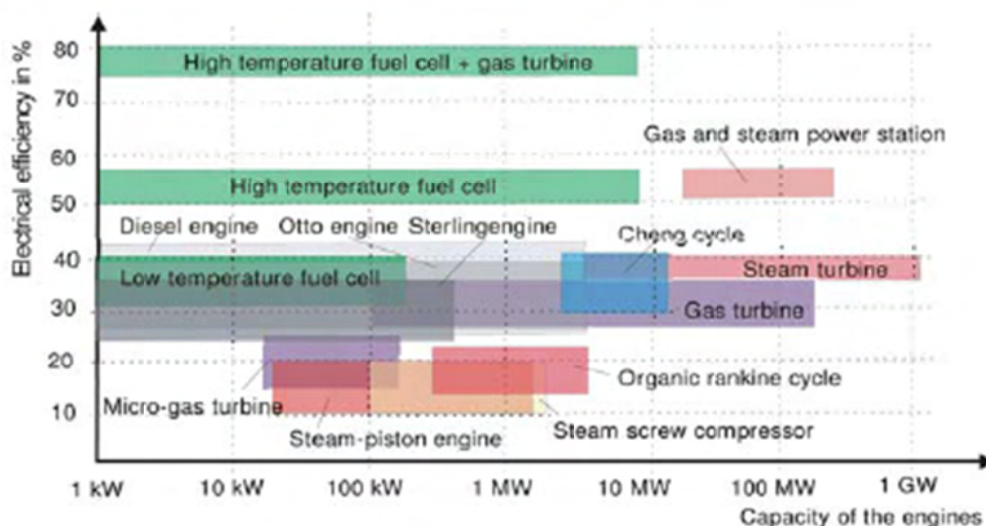
Διάφοροι τύποι εγκαταστάσεων αποθήκευσης του βιοαερίου είναι διαθέσιμες σήμερα. Η απλούστερη λύση είναι η αποθήκευση του βιοαερίου στο επάνω μέρος των χωνευτήρων, χρησιμοποιώντας μια αεροστεγή μεμβράνη, η οποία έχει επίσης το σκοπό του καλύμματος του χωνευτήρα. Όμως έτσι είναι αδύνατη η μόνωση της οροφής του χωνευτήρα. Για τις μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής βιοαερίου, χρησιμοποιούνται ξεχωριστές εγκαταστάσεις αποθήκευσης βιοαερίου, είτε ως αυτόνομες μονάδες ή περιλαμβάνονται σε κτίρια αποθήκευσης.

Η σωστή επιλογή και διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης έχει μια ουσιαστική συμβολή για την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την ασφάλεια των εγκαταστάσεων βιοαερίου, εξασφαλίζοντας τον σταθερό εφοδιασμό του συστήματος συμπαραγωγής με βιοαέριο και μειώνοντας τις απώλειες βιοαερίου.

Όλες οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης βιοαερίου πρέπει να είναι αεροστεγείς και ανθεκτικές στην πίεση, και στην περίπτωση της αποθήκευσης σε εγκαταστάσεις οι οποίες δεν προστατεύονται από κτίρια, αυτοί πρέπει να είναι ανθεκτικές στα καιρικά φαινόμενα. Συνήθως, τα συστήματα αποθήκευσης βιοαερίου έχουν χωρητικότητα μιας ή δύο ημερών.

3.2.1.9 Σταθμός συμπαραγωγής

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας ή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, συνήθως παράγεται παράλληλα και θερμότητα (ΣΗΘ). Οι κυριότεροι τύποι μηχανών που χρησιμοποιούνται είναι τετράχρονοι μηχανές εσωτερικής καύσης, κινητήρες Diesel και αεριοστρόβιλοι. Εκτός αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανές Stirling, μικρο-αεριοστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμου, ή συνδυασμός κυψέλης καυσίμου με έναν αεριοστρόβιλο.



Σχήμα 3-5: Εύρη λειτουργίας και αποδόσεις διάφορων τύπων μηχανών.[12]

Το Σχήμα 3.5 δείχνει το εύρος των δυνατοτήτων για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες διατίθενται στην αγορά. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αναφέρεται στο λόγο της ηλεκτρικής ισχύος προς το συνολικό περιεχόμενο ενέργειας του βιοαερίου.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε στο χώρο της εγκατάστασης ή να διοχετεύεται στο δημόσιο δίκτυο. Υπάρχουν δύο διαφορετικές επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

- Σταθερή ονομαστική παραγωγή. Για τη βέλτιστη διάρκεια ζωής του κινητήρα, είναι καλύτερο ο κινητήρας να λειτουργεί συνεχώς. Σε αυτήν τη ρύθμιση η μονάδα ΣΗΘ θα είναι ως όσο το δυνατόν μικρή, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος επένδυσης. Ωστόσο, δεν υπάρχει δυνατότητα διεύρυνσης της ικανότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους αιχμής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανάλογα με τη ζήτηση. Ο κινητήρας θα λειτουργεί κυρίως όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη (ώρες αιχμής).

Η βιωσιμότητα μιας μονάδας βιοαερίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται από το βιοαέριο. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η θερμότητα παράγεται κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου και όχι μόνο το χειμώνα, όταν μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί. Η θερμότητα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών του σταθμού παραγωγής βιοαερίου αλλά και για τις αγροτικές ή κτηνοτροφικές ανάγκες. Η υπόλοιπη ενέργεια μπορεί να διατεθεί σε δίκτυο τηλεθέρμανσης σε κοντινά κτίρια.

Ένα αξιοσημείωτο βήμα θα μπορούσε να είναι η χρήση της θερμότητας για τη λειτουργία ενός ψύκτη απορρόφησης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Το ψυκτικό φορτίο θα μπορούσε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί σε κτηνοτροφικές μονάδες για διατήρηση των προϊόντων.

Η θερμότητα που παράγεται εν μέρει διαφεύγει με τα καυσαέρια και μπορεί να ανακτηθεί σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για περαιτέρω χρήση. Ανάλογα με τον σχεδιασμό, η θερμότητα που παράγεται εκεί μεταφέρεται στο ψυκτικό νερό στα τοιχώματα της μηχανής ή σε ένα ξεχωριστό κύκλο νερού μέσω εναλλάκτη.

Το νερό, που μεταφέρει τη θερμότητα από τη διάταξη καύσης του βιοαερίου στους καταναλωτές, συνήθως θερμαίνεται στους 90-130°C και επιστρέφει πίσω σε θερμοκρασία 70-110°C.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κινητήρες που διαφέρουν ευρέως στην τεχνολογία τους είναι διαθέσιμοι για ΣΗΘ. Κυρίως θα αναφερθούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι αεριοστρόβιλοι.

Μηχανές εσωτερικής καύσης

Οι τετράχρονοι κινητήρες βιοαερίου που αναπτύχθηκαν αρχικά για το φυσικό αέριο μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του βιοαερίου (Εικόνα 3.9). Η ηλεκτρική απόδοση δεν υπερβαίνει το 34 - 40%, καθώς η έξοδος του οξειδίου του αζώτου NO_x πρέπει να διατηρείται κάτω από τις προδιαγραφόμενες τιμές. Σε διατάξεις με αναγεννητή η ηλεκτρική απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 40%. Η ικανότητα των κινητήρων κυμαίνεται μεταξύ 100kW και 1MW και η διάρκεια ζωής δίνεται ως 60.000 ώρες.

Η θερμότητα αποδίδεται από το σύστημα ψύξης της μηχανής και από τα καυσαέρια μέσω εναλλάκτη.

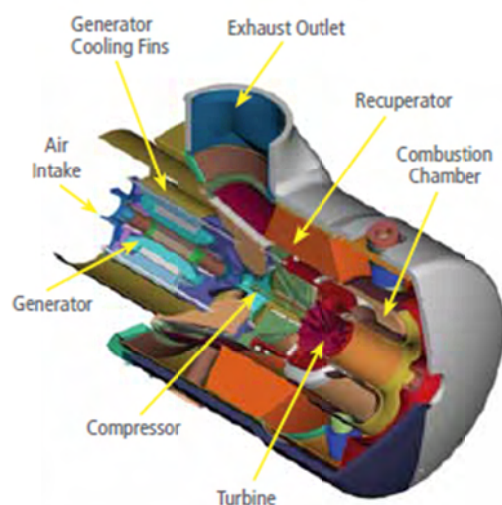


Εικόνα 3-9: Μηχανή εσωτερικής καύσης βιοαερίου.

Αεριοστρόβιλοι

Το βιοαέριο μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω αεριοστροβίλων σε μία μέγιστη θερμοκρασία περίπου $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η τάση είναι να πηγαίνουμε σε ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, οπότε η ηλεκτρική απόδοση μπορεί να αυξηθεί.

Τα κύρια μέρη ενός αεριοστροβίλου είναι ο συμπιεστής, ο θάλαμος καύσης, και ο στρόβιλος (Εικόνα 3.10). Ο αέρας του περιβάλλοντος συμπιέζεται εις τον συμπιεστή και οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου το βιοαέριο εισάγεται και η καύση λαμβάνει χώρα. Το καυσαέριο που σχηματίζεται περνάει σε ένα στρόβιλο, όπου διαστέλλεται και μεταφέρει ενέργεια στο στρόβιλο. Ο στρόβιλος κινεί από τη μία πλευρά το συμπιεστή και από την άλλη τη γεννήτρια. Το καυσαέριο εγκαταλείπει τον στρόβιλο σε θερμοκρασία περίπου $400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του αέρα που αναρροφάται στο συμπιεστή και για την παραγωγή θερμού νερού.



Εικόνα 3-10: Αεριοστρόβιλος βιοαερίου.

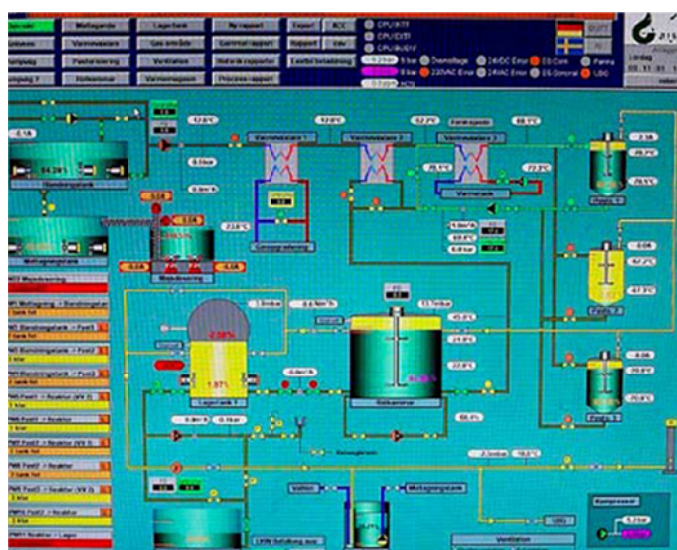
Ο στρόβιλος ρυθμίζεται με την αλλαγή της τροφοδοσίας του βιοαερίου στο θάλαμο καύσης. Οι αεριοστρόβιλοι χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές τιμές εκπομπών.

3.2.1.10 Αποθείωση

Το βιοαέριο μπορεί να περιέχει περίπου 1% το υδρόθειο (H_2S). Αυτό έχει διαβρωτική επίδραση στα μέταλλα, και κατά συνέπεια μπορεί να βλάψει τον κινητήρα και τις σωληνώσεις. Είναι επομένως σημαντικό να αφαιρεθεί. Αυτό μπορεί να γίνει απλά με την προσθήκη λίγου αέρα (2-6% κ.ο.) στο πάνω μέρος του χωνευτήρα, κοντά στο σημείο εξόδου του βιοαερίου προς τη δεξαμενή αποθήκευσης. Τα οξειδωτικά βακτήρια θα μετατρέψουν το υδρόθειο σε θείο, το οποίο θα πέσει μέσα στο υπόστρωμα ως επιπλέον θείο. Όταν η ποσότητα του αέρα δοσολογείται σωστά, η ποσότητα του υδρόθειου στο βιοαέριο μπορεί να μειωθεί μέχρι 95%. Ωστόσο, εάν πάρα πολύ αέρας προστεθεί, το υδρόθειο μπορεί να μετατραπεί σε θειικό οξύ. Επιπλέον, ο συνδυασμός του αέρα και βιοαερίου μπορεί να είναι πολύ εκρηκτικός. Επομένως είναι πολύ σημαντικό να περιοριστεί η ποσότητα του αέρα που προστίθεται.

3.2.1.11 Σύστημα ελέγχου

Μια μονάδα βιοαερίου είναι μια σύνθετη μονάδα με στενές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ όλων των μερών. Για αυτό το λόγο, η κεντρική ηλεκτρονική παρακολούθηση και ο έλεγχος είναι ουσιαστικό μέρος της συνολικής λειτουργίας των εγκαταστάσεων, με σκοπό να εγγυηθεί την επιτυχία και να αποφεύγει τις αποτυχίες (Εικόνα 3.11). Η τυποποίηση και η περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνολογιών της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι δυνατή μόνο με τακτική παρακολούθηση και τεκμηρίωση των σημαντικών στοιχείων. Η παρακολούθηση και η τεκμηρίωση είναι επίσης απαραίτητη για τη σταθερότητα της διαδικασίας, προκειμένου να μπορούν να αναγνωριστούν αποκλίσεις από τις τυπικές τιμές και να καταστεί δυνατή η έγκαιρη παρέμβαση και τα αντίστοιχα διορθωτικά μέτρα.



Εικόνα 3-11: Σύστημα παρακολούθησης σταθμού βιοαερίου.

Οι κυριότεροι μετρητές και αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι:

- Αισθητήρες θερμοκρασίας. Αυτοί συνήθως στα τοιχώματα του χωνευτήρα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος. Επίσης, προκειμένου να καθοριστεί η κατανάλωση της παραγόμενης θερμότητας, πρέπει να μετρούνται οι θερμοκρασίες προσαγωγής και επιστροφής του δικτύου θέρμανσης. Εάν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ένα ροόμετρο η κατανάλωση θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί.
- Δείκτες του επιπέδου υποστρώματος. Ένας δείκτης επίπεδο βοηθά το χειριστή να αξιολογήσει την απόδοση του χωνευτή και ως εκ τούτου το ποσό του βιοαερίου που παράγεται. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις καθημερινές ποσότητες προστιθέμενου υποστρώματος και επομένως τη ροή του υποστρώματος.
- Μετρητές ηλεκτρικού ρεύματος. Δύο μετρητές απαιτούνται: ένας για τη μέτρηση της εσωτερικής κατανάλωσης του συστήματος και ένας για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας που διοχετεύεται στο δίκτυο.
- Μετρητές βιοαερίου. Τουλάχιστον δύο μετρητές βιοαερίου θα πρέπει να εγκατασταθούν. Ένας για τη μέτρηση του παραγόμενου βιοαερίου και ένας για τη μέτρηση του βιοαερίου που καίγεται για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, βοηθούν στην ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Επίσης για την ορθότερη λειτουργία του σταθμού μετρούνται και ακόλουθες παράμετροι:

- pH. Η τιμή pH του υποστρώματος είναι σημαντική στην εξασφάλιση του κατάλληλου περιβάλλοντος διαβίωσης για μια καλή απόδοση των βακτηρίων.
- Σύνθεση του βιοαερίου. Ειδικότερα, το περιεχόμενο μεθάνιο και το υδρόθειο (H_2S) είναι δείκτες της απόδοσης του χωνευτήρα, και είναι απαραίτητες παραμέτροι ελέγχου για την εξασφάλιση της αποθείωσης του βιοαερίου και έτσι να αποφευχθεί διάβρωση.
- Περιεκτικότητα σε ξηρή μάζα. Η περιεκτικότητα σε ξηρή μάζα του υποστρώματος είναι σημαντική για την εκτίμηση της απόδοσης βιοαερίου και της ταχύτητας επεξεργασίας.
- Αμμωνία. Η συγκέντρωση της αμμωνίας επηρεάζει επίσης το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου από τα βακτήρια. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις το ποσοστό αυτό μειώνεται. Στο χωνεμένο υπόλειμμα, η συγκέντρωση της αμμωνίας δίνει μία ένδειξη του δυναμικού του ως λίπασμα.
- Λιπαρά οξέα. Η συγκέντρωση των αλυσίδων λιπαρών οξέων δίνει μια ένδειξη της απόδοσης της διαδικασίας χωνεύσεως, και επιτρέπει στο χειριστή να αντιδρά σε αλλαγές στο περιβάλλον χώνευσης.

3.2.1.12 Πυρσός

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου παράγεται περισσότερο βιοαέριο απ' ό,τι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω εξαιρετικά υψηλού ρυθμού παραγωγής αερίου ή σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης του συστήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι απαραίτητες κάποιες λύσεις, όπως η πρόσθετη αποθήκευση βιοαερίου ή τα πρόσθετα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Η αποθήκευση του βιοαερίου είναι δυνατή για σύντομες περιόδους χωρίς συμπίεση, αλλά για μεγάλο όγκο. Μια πρόσθετη μονάδα παραγωγής ενέργειας δεν είναι οικονομικά εφικτή. Για το λόγο αυτό, κάθε μονάδα παραγωγής βιοαερίου είναι

εξοπλισμένη με ένα πυρσό καύσης βιοαερίου (Εικόνα 3.12). Ο πυρσός βιοαερίου εμποδίζει την διαφυγή του άκαυστου βιοαερίου στην ατμόσφαιρα και συνεπώς είναι ουσιαστικής σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος και μάλιστα προβλέπεται από το νόμο σε πολλές χώρες.



Εικόνα 3-12: Πυρσός καύσης βιοαερίου.

Ο πυρσός πρέπει να εγκατασταθεί σε ύψος τέτοιο ώστε η φλόγα να είναι τουλάχιστον 4m από το έδαφος και τουλάχιστον 5m μακριά από κτίρια, οδούς, και αποθήκες εύφλεκτων υλικών, και είναι έξω από διακεκριμένες ζώνες για την προστασία από εκρήξεις.

Κεφάλαιο 4 Διαστασιολόγηση σταθμού παραγωγής βιοαερίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μεθοδολογία για τη διαστασιολόγηση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης. Διαστασιολογούνται τα επιμέρους συστήματα σε ένα σταθμό και γίνεται υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων, ηλεκτρικών και θερμικών, για την ορθή λειτουργία του σταθμού.

4.1 Διαστασιολόγηση

Η διαστασιολόγηση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης γίνεται με βάση το διαθέσιμο δυναμικό πρώτης ύλης για χώνευση. Με βάση το δυναμικό μπορεί να υπολογιστεί και η απόδοση σε βιοαέριο του σταθμού.

Έχοντας ως βάση την καθημερινή απόδοση του βιοαερίου και κάνοντας ακόμη μερικές παραδοχές, ο εξοπλισμός για ένα σταθμό παραγωγής βιοαερίου μπορεί να διαστασιολογηθεί όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

4.1.1 Δεξαμενή αποθήκευσης υγρών υποστρωμάτων

Η δεξαμενή αποθήκευσης των υγρών υποστρωμάτων είναι συνήθως μια κυλινδρική κατασκευή. Ο όγκος της εξαρτάται από τον ημερήσιο όγκο υγρού υποστρώματος που πρέπει να αποθηκευτεί για ένα χρονικό διάστημα μερικών ημερών για να υλοποιηθούν εργασίες συντήρησης στο σταθμό. Επιπλέον λαμβάνεται και ένας συντελεστής προσαύξησης για λόγους ασφαλείας.

Έτσι ο όγκος της δεξαμενής προκύπτει από τον τύπο:

$$V_{LS} = \dot{M}_{LS} / \rho_{LS} t_{LS} f_{LS}$$

Όπου V_{LS} , ο όγκος της δεξαμενής

\dot{M}_{LS} , η ροή μάζας του υγρού υποστρώματος

ρ_{LS} , η πυκνότητα του υγρού υποστρώματος (συνήθως $\rho_{LS} = 1000 \text{ kg / m}^3$)

t_{LS} , οι ημέρες παραμονής του υγρού υποστρώματος στη δεξαμενή

f_{LS} , ο συντελεστής προσαύξησης (συνήθως $f_{LS} = 1.10$)

4.1.2 Αντλία τροφοδοσίας υγρών υποστρωμάτων

Για την τροφοδοσία υποστρώματος στο χωνευτήρα χρησιμοποιούνται αντλίες, η ισχύς των οποίων δίνεται από τον τύπο:

$$P_{LP} = \dot{V}_{LP} \Delta P_{LP} / n_{LP}$$

Όπου P_{LP} , η ισχύς της αντλίας

\dot{V}_{LP} , η παροχή

ΔP_{LP} , η διαφορική πίεση (ΔP_{LP})

n_{LP} , ο βαθμός απόδοσης της αντλίας ($n_{LP} = 0.5$)

4.1.3 Σιλό αποθήκευσης στερεών υποστρωμάτων

Η συνολική ποσότητα των στερεών υποστρωμάτων για ένα χρόνο θα πρέπει να μπορεί να αποθηκευτεί σε σιλό. Ο όγκος του σιλό υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{SS} = \dot{M}_{SS} / \rho_{SS}$$

Όπου V_{SS} , ο όγκος του σιλό

\dot{M}_{SS} , η ροή μάζας του στερεού υποστρώματος

ρ_{SS} , η πυκνότητα του στερεού υποστρώματος (συνήθως $\rho_{SS} = 700 \text{ kg} / \text{m}^3$)

4.1.4 Χωνευτήρας

Ο όγκος του χωνευτήρα δίνεται από τον τύπο:

$$V_{AD} = \dot{M}_S / \rho_S t_{HRT} f_{AD}$$

Όπου V_{AD} , ο όγκος του χωνευτήρα

\dot{M}_S , η ροή μάζας του υποστρώματος ($\dot{M}_S = \dot{M}_{LS} + \dot{M}_{SS}$)

t_{HRT} , ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στο χωνευτήρα

f_{AD} , ο συντελεστής προσαύξησης (συνήθως $f_{AD} = 1.10$)

Όπως φαίνεται στον τύπο, ο όγκος του χωνευτήρα εξαρτάται σημαντικά από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Ανάλογα με τον τύπο της διεργασίας της χώνευσης (ψυχρόφιλη, μεσόφιλη, θερμοφιλή) αλλάζει και ο χρόνος παραμονής όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Συνήθως η σχέση ανάμεσα στο ύψος και τη διάμετρο του χωνευτήρα είναι $H_{AD} / D_{AD} = 1/2$. Σε περιπτώσεις μεγάλων σταθμών χώνευσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι από έναν χωνευτήρες.

Οι χωνευτήρες είναι εφοδιασμένοι με αγωγούς για την εκκένωσή τους. Η διάμετρος του αγωγού δίνεται:

$$D_{ADD} = \sqrt{V_{AD} / t_{ADD} / v_{ADD} 4 / \pi}$$

Όπου D_{ADD} , η διάμετρος του αγωγού

t_{ADD} , ο χρόνος εκκένωσης

v_{ADD} , η ταχύτητα εκκένωσης (συνήθως επιλέγεται $v_{ADD} = 0.5 \text{ m} / \text{s}$)

4.1.5 Σύστημα ανάδευσης

Για την ανάδευση του ρευστού στο χωνευτήρα χρησιμοποιείται σύστημα ανάδευσης του οποίου η ισχύς υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{ADA} = 1.3 Ne_{ADA} \rho_S n_{ADA}^3 D_{ADA}^5$$

Όπου P_{ADA} , η ισχύς του αναδευτήρα

Ne_{ADA} , ο αριθμός Newton

n_{ADA} , οι στροφές του αναδευτήρα

D_{ADA} , η διάμετρος του αναδευτήρα

Ανάλογα με το μέγεθος του χωνευτήρα χρησιμοποιούνται περισσότεροι αναδευτήρες, ο καθένας με το δικό του κινητήρα.

Η συνολική κατανάλωση του συστήματος ανάδευσης μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$(P_{ADA})_{tot} = n_A P_{ADA} t_{ADA}$$

Όπου $(P_{ADA})_{tot}$, η κατανάλωση των αναδευτήρων που χρησιμοποιούνται

n_A , ο αριθμός των αναδευτήρων

t_{ADA} , η διάρκεια ανάδευσης ανά ώρα

4.1.6 Σύστημα θέρμανσης χωνευτήρα

Το σύστημα θέρμανσης καλύπτει τις θερμικές ανάγκες που χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τις ανάγκες για τη θέρμανση του υποστρώματος στη θερμοκρασία χώνευσης και τις κάλυψη των απωλειών θερμότητας του χωνευτήρα προς το περιβάλλον.

Η ισχύς για τη θέρμανση του υποστρώματος δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{SH} = \dot{M}_S c_S \Delta\theta_{SI}$$

Όπου Q_{SH} , οι θερμικές ανάγκες

c_S , η θερμοχωρητικότητα του υποστρώματος ($c_S = 4.2 \text{ kJ} / \text{kg}$)

$\Delta\theta_{SI}$, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της διεργασίας θ_{AD} και της θερμοκρασίας εισόδου του υποστρώματος στο χωνευτήρα θ_I ($\Delta\theta_{SI} = \theta_{AD} - \theta_I$)

Οι θερμικές απώλειες του χωνευτήρα υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο:

$$Q_{AD} = k_{AD} A_{AD} \Delta\theta_{ADE}$$

Όπου Q_{AD} , οι θερμικές απώλειες

k_{AD} , ο συντελεστής θερμοπερατότητας των τοιχωμάτων του χωνευτήρα

A_{AD} , η επιφάνεια του χωνευτήρα

$\Delta\theta_{ADE}$, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της διεργασίας θ_{AD} και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος θ_E

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των τοιχωμάτων του χωνευτήρα υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$k_{AD} = 1 / ((a_{AD})_i + s_{AD} / \lambda_{AD} + (a_{AD})_\alpha)$$

Όπου $(a_{AD})_i$, η εσωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης ($(a_{AD})_i = 4000 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ για υγρά)

s_{AD} , το πάχος της μόνωσης

λ_{AD} , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης

$(a_{AD})_\alpha$ η εξωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης ($(a_{AD})_\alpha = 400 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ για αέρια)

Η επιφάνεια του χωνευτήρα υπολογίζεται:

$$A_{AD} = \pi D_{AD}^2 / 4 + \pi D_{AD} H_{AD}$$

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας της διεργασίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπολογίζεται:

$$\Delta\theta_{ADE} = \theta_{AD} - \theta_E$$

Έτσι οι συνολικές θερμικές ανάγκες θα είναι:

$$Q_T = Q_{SH} + Q_{AD}$$

Όπου Q_T , οι συνολικές θερμικές ανάγκες

Για την κάλυψη των θερμικών αναγκών εγκαθίσταται δίκτυο σωληνώσεων θερμού νερού. Η παροχή του θερμού νερού δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{V}_W = Q_T / (c_w \rho_w \Delta\theta_W)$$

Όπου \dot{V}_W , η παροχή του νερού

c_w , η θερμοχωρητικότητα του νερού ($c_w = 4.2 \text{ kJ / kg}$)

ρ_w , η πυκνότητα του νερού ($\rho_w = 1000 \text{ kg / m}^3$)

$\Delta\theta_W$, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της προσαγωγής θ_{WW} και της επιστροφής θ_{WR} του νερού ($\Delta\theta_W = \theta_{WW} - \theta_{WR}$)

Η διάμετρος των σωληνώσεων υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D_W = \sqrt{\dot{V}_W / v_W 4 / \pi}$$

Όπου D_W , η διάμετρος του σωλήνα

v_W , η ταχύτητα ροής ($v_W = 1 \text{ m / s}$)

Τέλος το συνολικό μήκος των σωληνώσεων θέρμανσης υπολογίζεται:

$$L_W = Q_T / (k_W \Delta\theta_{WS} \pi D_W)$$

Όπου L_W , το μήκος του σωλήνα

k_W , ο συντελεστής θερμοπερατότητας του τοιχώματος των σωληνώσεων

$\Delta\theta_{WS}$, η μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμού μέσου και του υποστρώματος

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του τοιχώματος των σωληνώσεων υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$k_W = 1 / (1 / (a_W)_i + 1 / (a_W)_\alpha)$$

Όπου $(a_W)_i$, η εσωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης ($(a_W)_i = 400 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

$(a_W)_\alpha$ η εξωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης ($(a_W)_\alpha = 400 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμού μέσου και του υποστρώματος δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\theta_{WS} = (\theta_{WV} + \theta_{WR}) / 2 - \theta_{AD}$$

4.1.7 Αποθήκευση βιοαερίου

Ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης βιοαερίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{GH} = V_{AD} / (V_{AD} / V_{GH})$$

Όπου V_{GH} , ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης

V_{AD} / V_{GH} , ο λόγος μεταξύ του χωνευτήρα και της δεξαμενής αποθήκευσης βιοαερίου ($V_{AD} / V_{GH} = 0.5$)

4.2 Ενεργειακές ανάγκες του σταθμού

Οι ενεργειακές ανάγκες για ένα σταθμό παραγωγής βιοαερίου από αναερόβια χώνευσης χωρίζονται σε ηλεκτρικές και θερμικές. Οι συνολικές ανάγκες υπολογίζονται παρακάτω.

4.2.1 Ηλεκτρικές ανάγκες

Οι ηλεκτρικές ανάγκες του σταθμού αφορούν τις καταναλώσεις για τη μετάδοση κίνησης από τους διάφορους κινητήρες. Η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση δίνεται από τον τύπο:

$$E_e = P_{LP} + (P_{ADA})_{tot} + (P_{SS})_{tot}$$

Όπου E_e , η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση

$(P_{SS})_{tot}$, η ισχύς του συστήματος τροφοδοσίας στερεών υποστρωμάτων

4.2.2 Θερμικές ανάγκες

Οι συνολικές θερμικές ανάγκες για ένα σταθμό βιοαερίου αφορούν τη θέρμανση του χωνευτήρα για την αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος στην επιθυμητή θερμοκρασία χώνευσης και την κάλυψη των θερμικών απωλειών από τα τοιχώματα του χωνευτήρα και δίνονται από τον τύπο :

$$Q_T = Q_{SH} + Q_{AD}$$

Κεφάλαιο 5 Θερμοδυναμική ανάλυση συστήματος ΣΗΘ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η θερμοδυναμική ανάλυση του συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο. Θα υπολογιστούν τα θερμοδυναμικά στοιχεία για κάθε στάδιο της συμπαραγωγής και η συνολική ηλεκτρική και θερμική ισχύς που παράγεται από το σύστημα.

5.1 Εισαγωγή

Η θερμοδυναμική ανάλυση του συστήματος συμπαραγωγής θα γίνει με τη χρήση όγκων ελέγχου. Σε έναν όγκο ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν ισοζύγια μάζας, ενέργειας και εντροπίας για την ανάλυσή του.

Ισοζύγιο μάζας

Η αρχή διατήρησης της μάζας όταν εφαρμόζεται σε έναν όγκο ελέγχου διατυπώνεται ως εξής: Ο ρυθμός μεταβολής της μάζας εντός του όγκου ελέγχου ισούται με τη διαφορά μεταξύ των συνολικών ρυθμών ροής μάζας προς και από την επιφάνεια του όγκου ελέγχου. Εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e$$

Όπου $\frac{dm_{cv}}{dt}$, ο ρυθμός μεταβολής της μάζας του όγκου ελέγχου

\dot{m}_i , η ροή μάζας στην είσοδο

\dot{m}_e , η ροή μάζας στην έξοδο

Η παροχή μάζας διαμέσου μιας πεπερασμένης επιφάνειας A , υπολογίζεται με ολοκλήρωση σε όλη την επιφάνεια:

$$\dot{m} = \int_A \rho V_n dA$$

Για μονοδιάστατη ροή, η σχέση γίνεται:

$$\dot{m} = \rho VA = \frac{VA}{u}$$

Ισοζύγιο ενέργειας

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας σε όγκο ελέγχου διατυπώνεται ως εξής: Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας εντός του όγκου ελέγχου ισούται με τον καθαρό ρυθμό εισροής (εισροές μείον εκροές) ενέργειας από την επιφάνεια του όγκου ελέγχου.

$$\frac{d(U + KE + PE)_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i (h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gz_i) - \sum_e \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gz_e)$$

Η ενέργεια εισρέει και εκρέει από έναν όγκο ελέγχου με τη μορφή έργου \dot{W}_{cv} ή/και μεταφοράς θερμότητας \dot{Q}_{cv} καθώς επίσης και ως περιεχόμενο της ροής μάζας.

Ισοζύγιο εντροπίας

Επειδή η ροή μάζας αποτελεί τη βασική διαφορά μεταξύ ενός κλειστού συστήματος και του όγκου ελέγχου, ο ρυθμός μεταβολής της εντροπίας στον όγκο ελέγχου υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις μεταφορές εντροπίας:

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen}$$

Για να εφαρμοστούν τα ισοζύγια μάζας, ενέργειας και εντροπίας σ' ένα σύστημα, θα πρέπει να είναι γνωστές οι ιδιότητες του συστήματος και η μεταξύ τους σχέση. Η ειδική μοριακή ενθαλπία δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{h}_0 = 10^3 [H^+ + ay + \frac{b}{2} y^2 - cy^{-1} + \frac{d}{3} y^3]$$

Όπου $y = 10^3 T$.

Η ειδική μοριακή εντροπία δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{s}(T, p) = \bar{s}^0(T) - \bar{R} \ln \frac{p}{p_{ref}}$$

Με $\bar{s}^0(T) = S^+ + a \ln T + by - \frac{c}{2} y^{-2} + \frac{d}{2} y^2$.

Για μίγματα k συστατικών η ειδική μοριακή ενθαλπία και η ειδική μοριακή εντροπία δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\bar{h} = \sum_{k=1}^N x_k \bar{h}_k$$

$$\bar{s}_k(T, p_k) = \bar{s}_k^0(T) - \bar{R} \ln \frac{x_k p}{p_{ref}}$$

$$\bar{s} = \sum_{k=1}^N x_k \bar{s}_k$$

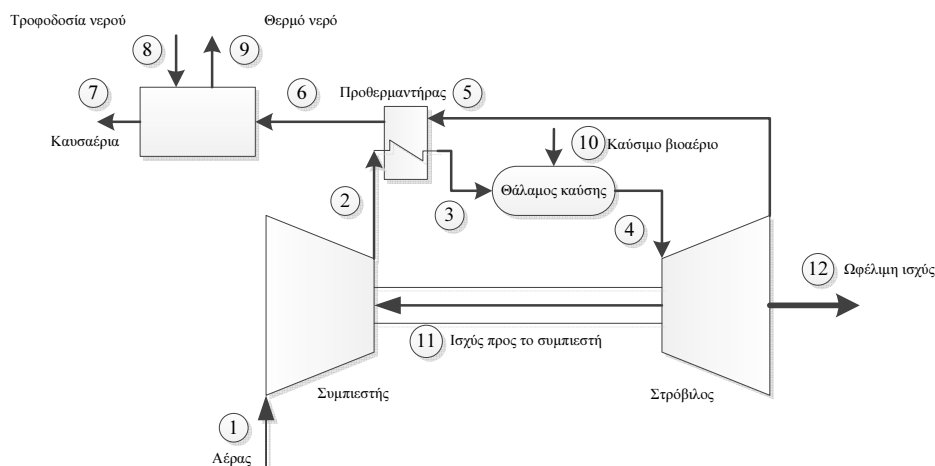
Οι συντελεστές a, b, c, d, H^+, S^+ δίνονται στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί.

Συστατικό	Τύπος	H^+	S^+	a	b	c	d
Άζωτο	N_2	-9,982	16,203	30,418	2,544	-0,238	0
Οξυγόνο	O_2	-9,589	36,116	29,154	6,477	-0,184	-1,017
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	-413,886	-87,078	51,128	4,368	-1,469	0
Νερό	$H_2O(g)$	-253,871	-11,750	34,376	7,841	-0,423	0
Νερό	$H_2O(l)$	-283,932	-67,147	20,355	109,198	2,033	0
Μεθάνιο	CH_4	-81,242	96,731	11,933	77,647	0,142	-18,414

Πίνακας 5-1: Πίνακας συντελεστών για διάφορες ουσίες.

5.2 Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί

Το σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας που χρησιμοποιείται, αναπτύσσεται στο σχήμα 5.1. Τα κύρια τμήματα του συστήματος είναι ο συμπιεστής, ο προθερμαντήρας, ο θάλαμος καύσης, ο αεριοστρόβιλος και ο εναλλάκτης θερμότητας.



Σχήμα 5-1: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο.

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται παραδοχές και μεταβλητές.

Παραδοχές

Οι παραδοχές του συστήματος συμπαραγωγής είναι:

- Το σύστημα συμπαραγωγής λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση.
- Ο αέρας και τα καυσαέρια θεωρούνται μίγματα ιδανικών αερίων.
- Το καύσιμο (βιοαέριο) που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, θεωρείται μίγμα ιδανικού αερίου. Το καύσιμο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης στην επιθυμητή πίεση μετά από στραγγαλισμό.
- Η καύση είναι πλήρης και το άζωτο αδρανές.
- Η μετάδοση θερμότητας από το θάλαμο καύσης είναι 2% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου. Όλα τα άλλα τμήματα του συστήματος λειτουργούν χωρίς απώλειες θερμότητας.

Μεταβλητές

Για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ενός θερμικού συστήματος συχνά χρησιμοποιούνται δύο είδη ανεξάρτητων μεταβλητών, οι μεταβλητές απόφασης και οι παράμετροι. Οι μεταβλητές απόφασης παίρνουν διάφορες τιμές ανάλογα με τη βελτιστοποίηση, οι παράμετροι όμως παίρνουν σταθερές τιμές. Όλες οι άλλες μεταβλητές είναι εξαρτημένες και οι τιμές τους υπολογίζονται από το θερμοδυναμικό μοντέλο.

Μεταβλητές απόφασης

Σε αυτό το μοντέλο, ο λόγος πιέσεων του συμπιεστή P_2 / P_1 , ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή n_{sc} και του στρόβιλου n_{st} , η θερμοκρασία του αέρα που

εισέρχεται στο θάλαμο καύσης T_3 και η θερμοκρασία των καυσαερίων T_4 που εισέρχονται στο στρόβιλο είναι μεταβλητές απόφασης.

Παρόλο που οι μεταβλητές απόφασης πιθανόν να μεταβάλλονται κατά τη βελτιστοποίηση, κάθε μια από αυτές απαιτείται συνήθως να βρίσκεται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών. Στην παρούσα εφαρμογή, δίνονται μόνο οι μέγιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης.

- Ο λόγος των πιέσεων των συμπιεστών που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο δεν υπερβαίνει το 16.
- Για λόγους κόστους, απαιτείται επίσης οι μέγιστες τιμές του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου να είναι μικρότερες από 90 και 92%, αντίστοιχα.
- Λόγω της περιορισμένης αντοχής των υλικών των αεροστροβίλων σε υψηλές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία T_4 δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 1550K.

Παράμετροι

Οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταβλητές με συγκεκριμένες τιμές και θεωρούνται σταθερές κατά τη βελτιστοποίηση. Στο μοντέλο αυτό, υπάρχουν οι παρακάτω παράμετροι.

- Συμπιεστής

$$T_1 = 298.15K \quad p_1 = 1.013bar$$

Γραμμομοριακή σύσταση αέρα (%): $77.48N_2, 20.59O_2, 0.03CO_2, 1.90H_2O(g)$

- Προθερμαντήρας

Πτώση πίεσης: 3% στην πλευρά των καυσαερίων και 5% στην πλευρά του αέρα.

- Εναλλάκτης θερμότητας

$$T_7 = 430K, \quad p_7 = 1.013bar$$

$$T_8 = 353.15K, \quad p_8 = 5bar$$

$$T_9 = 378.15K, \quad p_9 = 5bar$$

Πτώση πίεσης: 5% στην πλευρά των καυσαερίων.

- Θάλαμος καύσης

$T_{10} = 298.15K, \quad p_{10} = 12bar$, ροή καυσίμου \dot{m}_f και περιεκτικότητα καυσίμου σε μεθάνιο x_f προκύπτουν από την αναερόβια χώνευση.

Πτώση πίεσης: 5%

Εξαρτημένες μεταβλητές

Οι εξαρτημένες μεταβλητές περιλαμβάνουν την παροχή μάζας του αέρα, τα προϊόντα της καύσης, την απαιτούμενη ισχύ του συμπιεστή, την ισχύ που αναπτύσσεται στο στρόβιλο, την ωφέλιμη ισχύ που παράγεται από το σύστημα, την παροχή μάζας του θερμού νερού και τις ακόλουθες θερμοκρασίες και πιέσεις:

- Συμπιεστής

$$T_2, \quad p_2$$

- Προθερμαντήρας

$$p_3, \quad p_6, \quad T_6$$

- Θάλαμος καύσης

$$p_4$$

- Αεριοστρόβιλος

T_5, p_5

Εξισώσεις μοντέλου

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραδοχές μπορούν να παραχθούν οι εξισώσεις του μοντέλου. Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση διάφορων όγκων ελέγχου.

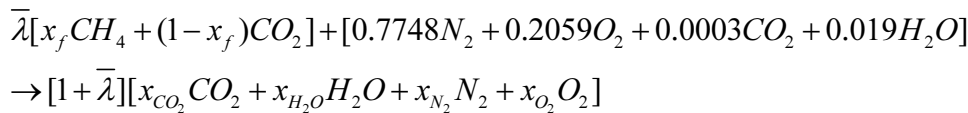
Όγκος ελέγχου του θαλάμου καύσης

Ο λόγος καυσίμου-αέρα $\bar{\lambda}$ και ο λόγος καυσαερίων-αέρα ορίζονται:

$$\frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_a} = \bar{\lambda}, \quad \frac{\dot{n}_p}{\dot{n}_a} = 1 + \bar{\lambda}$$

Με τους δείκτες f, a, p να αντιστοιχούν σε καύσιμο, αέρα και καυσαέρια.

Για την πλήρη καύση του βιοαερίου, η χημική αντίδραση γράφεται:



Εξισώνοντας, τα γραμμομοριακά κλάσματα στα καυσαέρια προκύπτουν:

$$\begin{aligned} x_{CO_2} &= \frac{\bar{\lambda} + 0.0003}{1 + \bar{\lambda}}, & x_{H_2O} &= \frac{2\bar{\lambda}x_f + 0.019}{1 + \bar{\lambda}} \\ x_{N_2} &= \frac{0.7748}{1 + \bar{\lambda}}, & x_{O_2} &= \frac{0.2059 - 2\bar{\lambda}x_f}{1 + \bar{\lambda}} \end{aligned}$$

Τα γραμμομοριακά κλάσματα υπολογίζονται μόλις προσδιοριστεί ο λόγος καυσίμου-αέρα. Ο λόγος προκύπτει αν εφαρμοστεί ισοζύγιο ενέργειας στον όγκο ελέγχου, οπότε προκύπτει:

$$0 = \dot{Q}_{CV} + \dot{n}_f \bar{h}_f + \dot{n}_a \bar{h}_a - \dot{n}_p \bar{h}_p$$

Από την παραδοχή, οι απώλειες θερμότητας του θαλάμου καύσης υπολογίζονται 2% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης \overline{LHV} .

$$\dot{Q}_{CV} = -0.02\dot{n}_f \overline{LHV} = \dot{n}_a (-0.02\bar{\lambda} \overline{LHV})$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$0 = -0.02\bar{\lambda} \overline{LHV} + \bar{\lambda} \bar{h}_f + \bar{h}_a - (1 + \bar{\lambda}) \bar{h}_p$$

Για ιδανικά αέρια, οι ενθαλπίες του αέρα και των καυσαερίων είναι αντίστοιχα:

$$\bar{h}_a = [0.7748\bar{h}_{N_2} + 0.2059\bar{h}_{O_2} + 0.0003\bar{h}_{CO_2} + 0.019\bar{h}_{H_2O}](T)$$

$$(1 + \bar{\lambda})\bar{h}_p = [0.7748\bar{h}_{N_2} + (0.0003 + \bar{\lambda})\bar{h}_{CO_2} + (0.019 + 2\bar{\lambda}x_f)\bar{h}_{H_2O} + (0.2059 - 2\bar{\lambda}x_f)\bar{h}_{O_2}](T)$$

Όπου οι ειδικές ενθαλπίες υπολογίζονται από τον πίνακα 5.1, σε θερμοκρασία T_3 για τον αέρα και σε θερμοκρασία T_4 για τα καυσαέρια.

Από τις τρεις τελευταίες σχέσεις και λύνοντας ως προς $\bar{\lambda}$ προκύπτει:

$$\bar{\lambda} = \frac{0,7748\Delta\bar{h}_{N_2} + 0,2059\Delta\bar{h}_{O_2} + 0,0003\Delta\bar{h}_{CO_2} + 0,019\Delta\bar{h}_{H_2O}}{\bar{h}_f - 0,02LHV - [-2x_f\bar{h}_{O_2} + \bar{h}_{CO_2} + 2x_f\bar{h}_{H_2O}]}(T_4)$$

Από τη σχέση $\bar{\lambda} = \dot{n}_f / \dot{n}_a$ προκύπτει η παροχή μάζας του αέρα:

$$\dot{m}_a = \frac{x_f \dot{m}_f M_a}{\lambda M_f}$$

Και επομένως η παροχή μάζας των καυσαερίων θα είναι:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_f + \dot{m}_a$$

Η πίεση p_4 προσδιορίζεται μετά τις πτώσεις πίεσης σε προθερμαντήρα και θάλαμο καύσης. Έτσι:

$$p_4 = 0,95p_3, \quad p_3 = 0,95p_2$$

Όγκος ελέγχου συμπίεστή-στροβίλου

Για τον όγκο ελέγχου, το ισοζύγιο ενέργειας γράφεται:

$$0 = -\dot{W}_{CV} + \dot{n}_a(\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + \dot{n}_p(\bar{h}_4 - \bar{h}_5)$$

Με χρήση της σχέσης $\dot{n}_p / \dot{n}_a = 1 + \bar{\lambda}$, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$0 = -\frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{n}_a} + (\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + (1 + \bar{\lambda})(\bar{h}_4 - \bar{h}_5)$$

Για το συμπίεστή, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης δίνεται:

$$n_{sc} = \frac{\bar{h}_{2s} - \bar{h}_1}{\bar{h}_2 - \bar{h}_1}$$

Με \bar{h}_{2s} να ορίζεται ως η ειδική μοριακή ενθαλπία για ισεντροπική συμπίεση. Η κατάσταση $2s$ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας $\bar{s}_{2s} - \bar{s}_1 = 0$ για την ισεντροπική συμπίεση. Η ειδική μοριακή ενθαλπία \bar{h}_2 προκύπτει από τη σχέση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης και στη συνέχεια ορίζεται και η θερμοκρασία T_2 .

Για το στρόβιλο, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης δίνεται:

$$n_{st} = \frac{\bar{h}_4 - \bar{h}_5}{\bar{h}_4 - \bar{h}_{5s}}$$

Με \bar{h}_{5s} να ορίζεται ως η ειδική μοριακή ενθαλπία για ισεντροπική εκτόνωση. Αντίστοιχα με το συμπίεστή υπολογίζονται η ειδική μοριακή ενθαλπία ενθαλπία \bar{h}_5 και η θερμοκρασία T_5 για το στρόβιλο. Η πίεση p_5 υπολογίζεται από τις παραδοχές για την πτώση πίεσης στον εναλλάκτη και στον προθερμαντήρα:

$$p_5 = p_6 / 0,97, \quad p_6 = p_7 / 0,95$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στο ισοζύγιο ενέργειας και λύνοντας ως προς την ωφέλιμη ισχύ προκύπτει:

$$\dot{W}_{CV} = \frac{\dot{m}_a}{M_a} [(\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + (1 + \bar{\lambda})(\bar{h}_4 - \bar{h}_5)]$$

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W_e = n_{gen} \dot{W}_{CV}$$

Όπου W_e , η ηλεκτρική ισχύς

n_{gen} , ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας

Όγκος ελέγχου προθερμαντήρα

Το ισοζύγιο ενέργειας γράφεται:

$$0 = \dot{n}_a(\bar{h}_2 - \bar{h}_3) + \dot{n}_p(\bar{h}_5 - \bar{h}_6)$$

Επιλύοντας ως προς την ειδική μοριακή ενθαλπία \bar{h}_6 προκύπτει:

$$\bar{h}_6 = \bar{h}_5 + \frac{\bar{h}_2 - \bar{h}_3}{1 + \bar{\lambda}}$$

Και προσδιορίζεται η θερμοκρασία T_6 .

Όγκος ελέγχου εναλλάκτη

Για αυτόν τον όγκο ελέγχου, το ισοζύγιο ενέργειας γράφεται:

$$0 = \dot{n}_p(\bar{h}_6 - \bar{h}_7) + \dot{m}_8(h_8 - h_9)$$

Και η παροχή μάζας του θερμού νερού προκύπτει:

$$\dot{m}_8 = \frac{\dot{n}_p(\bar{h}_6 - \bar{h}_7)}{h_9 - h_8}$$

Ενώ η θερμική ισχύς που παράγεται είναι:

$$\dot{W}_{th} = \dot{m}_8(h_9 - h_8)$$

Βαθμοί απόδοσης

Για κύκλους συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλους η απόδοση του συστήματος μετριέται με τους θερμικούς βαθμούς απόδοσης. Για το συγκεκριμένο σύστημα μπορούν να οριστούν ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, ο θερμικός βαθμός απόδοσης και ο συνολικός ηλεκτρικός απόδοσης.

$$n_e = \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}_f \cdot LHV}, \quad n_{th} = \frac{\dot{W}_{th}}{\dot{m}_f \cdot LHV}, \quad n = \frac{\dot{W}_{CV} + \dot{W}_{th}}{\dot{m}_f \cdot LHV}$$

Κεφάλαιο 6 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος ΣΗΘ

Σε συνέχεια της θερμοδυναμικής ανάλυσης παρουσιάζεται η εξεργειακή ανάλυση. Η εξέργεια είναι ένα σημαντικό εργαλείο για το σχεδιασμό και την ανάλυση θερμικών συστημάτων. Στον παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται η εξεργειακή ανάλυση του συστήματος συμπαράγωγής, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης των επιμέρους συστημάτων και ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης.

6.1 Εισαγωγή

Ως εξέργεια ορίζεται το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση και σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Ένα σύστημα λέγεται ότι βρίσκεται σε νεκρή κατάσταση όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του. Στην κατάσταση αυτή το σύστημα έχει τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντός του, δεν έχει καθόλου κινητική ή δυναμική ενέργεια σε σχέση με το περιβάλλον του, δεν αντιδρά με το περιβάλλον του και ανάμεσα στο σύστημα και στο περιβάλλον του δεν υπάρχουν ασταθή φαινόμενα μαγνητικών, ηλεκτρικών ή επιφανειακών τάσεων.

Εξέργεια

Η συνολική εξέργεια ενός συστήματος, απουσία πυρηνικών, μαγνητικών, ηλεκτρικών επιδράσεων και επιφανειακών τάσεων, δίνεται ως άθροισμα της φυσικής εξέργειας E^{PH} , της κινητικής εξέργειας E^{KN} , της δυναμικής εξέργειας E^{PT} και της χημικής εξέργειας E^{CH} .

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH}$$

Ενώ η ειδική εξέργεια ανά μονάδα μάζας δίνεται:

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH}$$

Η ειδική κινητική και η ειδική δυναμική εξέργεια δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$e^{KN} = \frac{1}{2}v^2 \quad e^{PT} = gz$$

Όπου v , η ταχύτητα και z , το υψόμετρο

Η φυσική εξέργεια ενός κλειστού συστήματος σε μια συγκεκριμένη κατάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$E^{PH} = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$

Όπου E^{PH} , η φυσική εξέργεια

U , V , S , η εσωτερική ενέργεια, ο όγκος και η εντροπία σε μια συγκεκριμένη κατάσταση

U_0 , V_0 , S_0 , αντίστοιχα οι τιμές των ιδιοτήτων σε συνθήκες νεκρής κατάστασης

Με χρήση της εξίσωσης $H = U + pV$, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί:

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$$

Η χημική εξέργεια σχετίζεται με την απόκλιση της χημικής σύστασης του συστήματος από εκείνη του περιβάλλοντος χώρου. Για τον υπολογισμό της χημικής εξέργειας, οι ουσίες που συνιστούν το σύστημα πρέπει να έχουν ως αναφορά τον κατάλληλα επιλεγμένο περιβάλλοντα χώρο που συνίσταται από συγκεκριμένες ουσίες.

Η χημική εξέργεια για μίγμα δίνεται από τον τύπο:

$$e^{-CH} = \sum x_k \bar{e}_k^{-CH} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k$$

Όπου \bar{e}_k^{-CH} , η χημική εξέργεια κάθε συστατικού που δίνεται στον Πίνακα 6.1 x_k , το μοριακό κλάσμα του συστατικού k στο μίγμα

Συστατικό	Τύπος	Χημική εξέργεια \bar{e}^{-CH} (kJ/kmol)
Αζωτο	N_2	639
Οξυγόνο	O_2	3.951
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	14.176
Νερό	$H_2O(g)$	8.636
Νερό	$H_2O(l)$	45
Μεθάνιο	CH_4	824.348

Πίνακας 6-1: Πίνακας χημικών εξεργειών για διάφορες ουσίες.

Ισοζύγιο εξέργειας

Όπως και η ενέργεια, έτσι και η εξέργεια μπορεί να εκφραστεί σε έναν όγκο ελέγχου. Το ισοζύγιο εξέργειας δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - (\dot{W}_{CV} - p_0 \frac{dV_{CV}}{dt}) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D$$

Όπου dE_{CV} / dt , ο ρυθμός μεταβολής της εξέργειας του όγκου ελέγχου

\dot{Q}_j , ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στο όριο του όγκου ελέγχου, που η στιγμιαία θερμοκρασία είναι T_j και η μεταφορά εξέργειας δίνεται από τον τύπο

$$\dot{E}_{q,j} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j$$

\dot{W}_{CV} , ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας μέσω έργου. Η μεταφορά εξέργειας δίνεται από

$$\dot{E}_w = \dot{W}_{CV} - p_0 \frac{dV_{CV}}{dt}$$

$\dot{m}_i e_i$ και $\dot{m}_e e_e$, ο ρυθμός μεταφοράς εξέργειας με μάζα στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα

\dot{E}_D , ο ρυθμός καταστροφής εξέργειας εντός των ορίων του όγκου ελέγχου, που δίνεται από τον τύπο $\dot{E}_D = T_0 \dot{S}_{gen}$

Καταστροφή και απώλεια εξέργειας

Αν οριστεί ένας όγκος ελέγχου, τότε η εξέργεια που εισέρχεται $\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i$ ισούται με το άθροισμα της εξέργειας $\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e$ που εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου, της καταστροφής εξέργειας \dot{E}_D και της απώλειας εξέργειας \dot{E}_L .

$$\dot{E}_i = \dot{E}_e + \dot{E}_D + \dot{E}_L$$

Επιπλέον ορίζονται και οι όροι καταστροφής και απώλειας εξέργειας. Ο λόγος καταστροφής εξέργειας ορίζεται ως το πηλίκο του ρυθμού καταστροφής εξέργειας προς το ρυθμό εξέργειας του καυσίμου που παρέχεται στο σύστημα και δίνεται από τον τύπο:

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F,tot}}$$

Ο λόγος καταστροφής εξέργειας του συστατικού ορίζεται ως το πηλίκο του ρυθμού καταστροφής εξέργειας προς τη συνολική καταστροφή εξέργειας του συστήματος και δίνεται από τον τύπο:

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,tot}}$$

Ο λόγος απώλειας εξέργειας ορίζεται ως το πηλίκο του ρυθμού απώλειας εξέργειας προς το ρυθμό εξέργειας του καυσίμου που παρέχεται στο σύστημα και δίνεται από τον τύπο:

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F,tot}}$$

Εξεργειακός βαθμός απόδοσης

Για τον ορισμό του εξεργειακού βαθμού απόδοσης είναι χρήσιμο να οριστούν τα προϊόντα και το καύσιμο του συστήματος. Το καύσιμο συνιστά την είσοδο του συστήματος ενώ το προϊόν το επιθυμητό αποτέλεσμα που παράγεται από το σύστημα. Το ισοζύγιο εξέργειας για το σύστημα με καύσιμο F και προϊόντα P διατυπώνεται:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος μεταξύ ρυθμού μεταβολής εξέργειας προϊόντος και καυσίμου και γράφεται:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F}$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δείχνει πόσο ποσοστό εξέργειας του καυσίμου που παρέχεται στο σύστημα βρίσκεται στην εξέργεια του προϊόντος.

6.2 Εξεργειακοί υπολογισμοί

Για το σύστημα συμπαραγωγής υπολογίζονται σε κάθε θέση οι ρυθμοί μεταβολής εξέργειας καθώς και οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης των επιμέρους συσκευών και ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης.

6.2.1 Ρυθμοί μεταβολής εξέργειας

Σε κάθε θέση ο ρυθμός μεταβολής της εξέργειας δίνεται σαν άθροισμα των συνιστωσών. Η κινητική και η δυναμική εξέργεια είναι μηδέν, οπότε υπολογίζονται μόνο η φυσική και η χημική εξέργεια. Έτσι ο ρυθμός μεταβολής εξέργειας θα δίνεται από τη σχέση $\dot{E} = \dot{E}^{PH} + \dot{E}^{CH}$.

Θέση 1

Στη θέση 1 ισχύει $T_1 = T_0$ και $p_1 = p_0$. Οπότε $\dot{E}_1^{PH} = 0$.

Ο ρυθμός μεταβολής χημικής εξέργειας υπολογίζεται:

$$\dot{E}_1^{CH} = \frac{\dot{m}_{air}}{MB_{air}} \bar{e}_1^{CH}$$

Όπου $\bar{e}_1^{CH} = \sum x_{k,a} \bar{e}_k^{CH} + \bar{R}T_0 \sum x_{k,a} \ln x_{k,a}$, με τους συντελεστές $x_{k,a}$ να προκύπτουν από τη σύνθεση του αέρα και \bar{e}_k^{CH} για τα διάφορα συστατικά από Πίνακα 6.1. Επομένως $\dot{E}_1 = \dot{E}_1^{CH}$.

Θέση 2

Για τη θέση 2, ο ρυθμός μεταβολής φυσικής εξέργειας υπολογίζεται:

$$\dot{E}_2^{PH} = \frac{\dot{m}_{air}}{MB_{air}} [\bar{h}_2 - \bar{h}_0 - T_0 (\bar{s}_2 - \bar{s}_0)]$$

Και ο χημικός όπως στη θέση 1:

$$\dot{E}_2^{CH} = \frac{\dot{m}_{air}}{MB_{air}} \bar{e}_2^{CH}$$

Επομένως $\dot{E}_2 = \dot{E}_2^{PH} + \dot{E}_2^{CH}$.

Θέση 3

Αντίστοιχα για τη θέση 3:

$$\dot{E}_3^{PH} = \frac{\dot{m}_{air}}{MB_{air}} [\bar{h}_3 - \bar{h}_0 - T_0 (\bar{s}_3 - \bar{s}_0)] \quad \dot{E}_3^{CH} = \frac{\dot{m}_{air}}{MB_{air}} \bar{e}_3^{CH}$$

Και ο συνολικός $\dot{E}_3 = \dot{E}_3^{PH} + \dot{E}_3^{CH}$.

Θέση 4

Στη θέση 4 υπάρχουν τα καυσαέρια μετά το θάλαμο καύσης. Αν το μίγμα καυσαερίων της θέσης 4 έρθει σε συνθήκες p_0, T_0 , τότε θα υπάρξει συμπύκνωση. Σε $25^\circ\text{C}, 1\text{atm}$ το μίγμα θα αποτελείτο από N_2 , O_2 , CO_2 και κορεσμένο ατμό σε

ισορροπία με κορεσμένο νερό. Η μερική πίεση του ατμού p_u μπορεί να θεωρηθεί ίση με την πίεση κορεσμού $p_g(25^\circ\text{C}) = 0.0317\text{bar}$. Η μερική πίεση του ατμού δίνεται από τον τύπο:

$$p_u = x_u p$$

Όπου x_u , το μοριακό κλάσμα του ατμού, για το οποίο ισχύει:

$$x_u = \frac{n_u}{(x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2}) + n_u}$$

Και προκύπτει για τον ατμό:

$$n_u = \frac{p_u(x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2})}{p - p_u}$$

Η σύσταση των καυσαερίων σε $25^\circ\text{C}, 1\text{atm}$ θα είναι:

$$x_{N_2} N_2, x_{O_2} O_2, x_{CO_2} CO_2, n_u H_2O(g), (x_{H_2O} - n_u) H_2O(l)$$

Τα νέα γραμμομοριακά κλάσματα για την αέρια φάση γίνονται:

$$x'_{N_2} = \frac{x_{N_2}}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + n_u}, \quad x'_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + n_u}$$

$$x'_{CO_2} = \frac{x_{CO_2}}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + n_u}, \quad x'_{H_2O(g)} = \frac{n_u}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + n_u}$$

Η ειδική μοριακή ενθαλπία (kJ/kmol) και η ειδική μοριακή εντροπία (kJ/kmol*K) για διάφορες ουσίες σε $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ και $p_{ref} = 1\text{bar}$ δίνονται στον Πίνακα 6.2.

Συστατικό	Τύπος	\bar{h}^0	\bar{s}^0	$\bar{\sigma}^0$
Αζωτο	N_2	0	191,610	-57.128
Οξυγόνο	O_2	0	205,146	-61.164
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	-393.521	213,794	-457.264
Νερό	$H_2O(g)$	-241.856	188,824	-298.153
Νερό	$H_2O(l)$	-285.829	69,948	-306.684
Μεθάνιο	CH_4	-74.872	186,251	-130.403

Πίνακας 6-2: Πίνακας ειδικών μοριακών ενθαλπιών και εντροπιών σε συνθήκες αναφοράς για διάφορες ουσίες.

Έτσι η ειδική μοριακή ενθαλπία για την κατάσταση αναφοράς υπολογίζεται:

$$\bar{h}_0 = \sum x_k \bar{h}_k^0$$

Για τον υπολογισμό της ειδικής μοριακής εντροπίας, υπολογίζεται πρώτα η συνεισφορά κάθε συστατικού.

$$\bar{s}_k(T_0, x'_k p_0) = \bar{s}_k(T_0) - \bar{R} \ln \frac{x'_k p_0}{p_{ref}}$$

Και η ειδική μοριακή ενθαλπία για την κατάσταση αναφοράς προκύπτει:

$$\bar{s}_0 = \sum x_k \bar{s}_k$$

Για τη θέση 4, ο ρυθμός μεταβολής φυσικής εξέργειας υπολογίζεται:

$$\dot{E}_4^{PH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} [\bar{h}_4 - \bar{h}_0 - T_0(\bar{s}_4 - \bar{s}_0)]$$

Για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής χημικής εξέργειας, στη νεκρή κατάσταση θα υπάρχει πάλι μίγμα αερίων και το συμπύκνωμα νερού. Η συνεισφορά της αέριας φάσης στην ειδική μοριακή χημική εξέργεια προκύπτει από το άθροισμα:

$$\sum x'_k \bar{e}_k^{-CH} + \bar{R}T_0 \sum x'_k \ln x'_k$$

Η ειδική μοριακή χημική εξέργεια για τη θέση 4 υπολογίζεται:

$$\bar{e}_4^{-CH} = (x_{N_2} + x_{CO_2} + x_{O_2} + n_u) \cdot (\sum x'_k \bar{e}_k^{-CH} + \bar{R}T_0 \sum x'_k \ln x'_k) + (x_{H_2O} - n_u) \bar{e}_{H_2O(l)}^{-CH}$$

Ο ρυθμός μεταβολής χημικής εξέργειας υπολογίζεται:

$$\dot{E}_4^{CH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} \bar{e}_4^{-CH}$$

$$\text{Επομένως } \dot{E}_4 = \dot{E}_4^{PH} + \dot{E}_4^{CH} .$$

Θέση 5

Για τη θέση 5 οι υπολογισμοί είναι αντίστοιχοι με τη θέση 4. Έτσι προκύπτουν:

$$\dot{E}_5^{PH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} [\bar{h}_5 - \bar{h}_0 - T_0(\bar{s}_5 - \bar{s}_0)] \quad \dot{E}_5^{CH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} \bar{e}_5^{-CH}$$

$$\text{Και συνολικά } \dot{E}_5 = \dot{E}_5^{PH} + \dot{E}_5^{CH} .$$

Θέση 6

Αντίστοιχα και για τη θέση 6 υπολογίζονται:

$$\dot{E}_6^{PH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} [\bar{h}_6 - \bar{h}_0 - T_0(\bar{s}_6 - \bar{s}_0)] \quad \dot{E}_6^{CH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} \bar{e}_6^{-CH}$$

$$\text{Και συνολικά } \dot{E}_6 = \dot{E}_6^{PH} + \dot{E}_6^{CH} .$$

Θέση 7

Για τη θέση 7, που εξέρχονται τα καυσαέρια, υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο:

$$\dot{E}_7^{PH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} [\bar{h}_7 - \bar{h}_0 - T_0(\bar{s}_7 - \bar{s}_0)] \quad \dot{E}_7^{CH} = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} \bar{e}_7^{-CH}$$

Και συνολικά $\dot{E}_7 = \dot{E}_7^{PH} + \dot{E}_7^{CH}$.

Θέση 8

Για τη θέση 8, ο ρυθμός μεταβολής φυσικής εξέργειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{E}_8^{PH} = \dot{m}_w [h_8 - h_0 - T_0 (s_8 - s_0)]$$

Όπου η ειδική ενθαλπία και εντροπία του νερού λαμβάνονται από πίνακες ιδιοτήτων κορεσμένου νερού.

Ο ρυθμός μεταβολής χημικής εξέργειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{E}_8^{CH} = \frac{\dot{m}_w}{MB_w} e_{H_2O}^{-CH}$$

Και ο συνολικός ρυθμός μεταβολής εξέργειας για τη θέση 8: $\dot{E}_8 = \dot{E}_8^{PH} + \dot{E}_8^{CH}$.

Θέση 9

Για τη θέση 9 οι υπολογισμοί είναι αντίστοιχοι με τη θέση 8. Έτσι προκύπτουν:

$$\dot{E}_9^{PH} = \dot{m}_w [h_9 - h_0 - T_0 (s_9 - s_0)] \quad \dot{E}_9^{CH} = \frac{\dot{m}_w}{MB_w} e_{H_2O}^{-CH}$$

Και συνολικά $\dot{E}_9 = \dot{E}_9^{PH} + \dot{E}_9^{CH}$.

Θέση 10

Για την είσοδο του καυσίμου στη θέση 10 ισχύουν:

$$\dot{E}_{10}^{PH} = \dot{m}_f [h_{10} - h_0 - T_0 (s_{10} - s_0)]$$

Επειδή $T_{10} = T_0$, η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε:

$$\dot{E}_{10}^{PH} = \dot{m}_f RT_0 \ln \frac{P_{10}}{P_0}$$

Και για το ρυθμό μεταβολής χημικής εξέργειας:

$$\dot{E}_{10}^{CH} = \frac{\dot{m}_f}{MB_f} e_{10}^{-CH}$$

Και ο συνολικός ρυθμός μεταβολής εξέργειας για τη θέση 10: $\dot{E}_{10} = \dot{E}_{10}^{PH} + \dot{E}_{10}^{CH}$.

6.2.2 Καταστροφή εξέργειας στις συσκευές και εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης

Για κάθε συσκευή του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν οι λόγοι καταστροφής εξέργειας και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, αφού πρώτα υπολογιστεί από το ισοζύγιο εξέργειας ο ρυθμός καταστροφής εξέργειας. Έτσι υπολογίζονται οι ρυθμοί καταστροφής εξέργειας:

- Συμπιεστής

$$\dot{E}_{D,com} = -\dot{W}_{CV} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2$$

$$\text{Όπου } \dot{W}_{CV} = \dot{m}_{air} (h_1 - h_2) = \frac{\dot{m}_{air}}{MB_{air}} (\bar{h}_1 - \bar{h}_2)$$

- Προθερμαντήρας

$$\dot{E}_{D,preh} = \dot{E}_2 + \dot{E}_5 - \dot{E}_3 - \dot{E}_6$$

- Θάλαμος καύσης

$$\dot{E}_{D,cc} = \dot{E}_3 + \dot{E}_{10} - \dot{E}_4$$

- Στρόβιλος

$$\dot{E}_{D,tur} = -\dot{W}_{CV} + \dot{E}_4 - \dot{E}_5$$

Όπου $\dot{W}_{CV} = \dot{m}_p (h_4 - h_5) = \frac{\dot{m}_p}{MB_p} (\bar{h}_4 - \bar{h}_5)$

- Εναλλάκτης θερμότητας

$$\dot{E}_{D,hex} = \dot{E}_6 + \dot{E}_8 - \dot{E}_7 - \dot{E}_9$$

Ο συνολικός ρυθμός καταστροφής εξέργειας προκύπτει σαν άθροισμα των παραπάνω:

$$\dot{E}_{D,tot} = \dot{E}_{D,com} + \dot{E}_{D,preh} + \dot{E}_{D,cc} + \dot{E}_{D,tur} + \dot{E}_{D,hex}$$

Οι λόγοι καταστροφής εξέργειας για κάθε συσκευή προκύπτουν:

- Συμπιεστής

$$y_{D,com} = \frac{\dot{E}_{D,com}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad y_{D,com}^* = \frac{\dot{E}_{D,com}}{\dot{E}_{D,tot}}$$

- Προθερμαντήρας

$$y_{D,preh} = \frac{\dot{E}_{D,preh}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad y_{D,preh}^* = \frac{\dot{E}_{D,preh}}{\dot{E}_{D,tot}}$$

- Θάλαμος καύσης

$$y_{D,cc} = \frac{\dot{E}_{D,cc}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad y_{D,cc}^* = \frac{\dot{E}_{D,cc}}{\dot{E}_{D,tot}}$$

- Στρόβιλος

$$y_{D,tur} = \frac{\dot{E}_{D,tur}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad y_{D,tur}^* = \frac{\dot{E}_{D,tur}}{\dot{E}_{D,tot}}$$

- Εναλλάκτης θερμότητας

$$y_{D,hex} = \frac{\dot{E}_{D,hex}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad y_{D,hex}^* = \frac{\dot{E}_{D,hex}}{\dot{E}_{D,tot}}$$

Όπου $\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{10}$.

Τέλος οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης των συσκευών δίνονται:

- Συμπιεστής

$$\varepsilon_{com} = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{|\dot{W}_{CV}|}$$

- Προθερμαντήρας

$$\varepsilon_{preh} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_2}{\dot{E}_5 - \dot{E}_6}$$

- Θάλαμος καύσης

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\dot{E}_4}{\dot{E}_3 + \dot{E}_{10}}$$

- Στρόβιλος

$$\varepsilon_{tur} = \frac{\dot{W}_{el} - \dot{W}_{CV}}{\dot{E}_4 - \dot{E}_5}$$

- Εναλλάκτης θερμότητας

$$\varepsilon_{hex} = \frac{\dot{E}_9 - \dot{E}_8}{\dot{E}_6 - \dot{E}_7}$$

6.2.3 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος συμπαγωγής

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του ρυθμού μεταβολής των προϊόντων προς το ρυθμό μεταβολής εξέργειας του καυσίμου. Στην προκειμένη περίπτωση ως προϊόντα έχουμε την ισχύ που παράγεται στο στρόβιλο και την αύξηση της εξέργειας του θερμού νερού και ως καύσιμο το βιοαέριο και τον αέρα. Έτσι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ορίζεται:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_e + (\dot{E}_9 - \dot{E}_8)}{\dot{E}_{10} + \dot{E}_1}$$

Κεφάλαιο 7 Οικονομική ανάλυση

Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του σταθμού απαιτείται η εκτίμηση των σημαντικότερων οικονομικών στοιχείων που αφορούν την εγκατάσταση, τη λειτουργία και την απόδοση της επένδυσης σε βάθος χρόνου. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μεθοδολογία για τον υπολογισμό αυτών των στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικές και τεχνολογικές παραδοχές για την εγκατάσταση και τη λειτουργία.

7.1 Οικονομική ανάλυση

Για να είναι οικονομικά σκόπιμη μία επένδυση θα πρέπει τα κεφάλαια που επενδύονται να μπορούν να ξανασυγκεντρωθούν και επίσης να αποδίδουν, στη χρονική διάρκεια που είναι δεσμευμένα, τουλάχιστον όσο θα απέδιδαν αν είχαν χρησιμοποιηθεί αλλιώς. Για παράδειγμα, αν είχαν κατατεθεί σε κάποια τράπεζα, η απόδοσή τους θα ήταν ο τραπεζικός τόκος.

Η οικονομική αξιολόγηση και ο υπολογισμός της απόδοσης γίνεται συνήθως σε τέσσερα στάδια:

- Εκτίμηση του συνολικού κεφαλαίου επένδυσης
- Προσδιορισμός δαπανών λειτουργίας και συντήρησης
- Εκτίμηση εσόδων από την πώληση των προϊόντων
- Εκτίμηση απόδοσης

7.1.1 Εκτίμηση Συνολικού Κεφαλαίου Επένδυσης

Το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης (TCI) αφορά το αρχικό κόστος για τη λειτουργία του σταθμού και καταβάλλεται εφάπαξ. Το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης είναι το άθροισμα του σταθερού κεφαλαίου επένδυσης (FCI) και άλλων δαπανών και αντιπροσωπεύει το ολικό κόστος του συστήματος για υποτιθέμενο σχεδιασμό και υλοποίηση σε μηδενικό χρόνο. Η ανάλυση του συνολικού κεφαλαίου επένδυσης γίνεται στον Πίνακα 7.1. Σταθερό κεφάλαιο επένδυσης ονομάζεται το απαιτούμενο κεφάλαιο για την αγορά του οικοπέδου, την οικοδόμηση των απαραίτητων εγκαταστάσεων και την αγορά και εγκατάσταση του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού. Η εκτίμηση κόστους για το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης συνίσταται από δύο σημαντικές δαπάνες: τα άμεσα και τα έμμεσα κόστη. Άμεσες είναι εκείνες που αφορούν το μόνιμο εξοπλισμό, τα υλικά κατασκευής, τα εργατικά και άλλες δαπάνες σχετικές με την κατασκευή και ανέγερση μόνιμων εγκαταστάσεων. Τα έμμεσα κόστη δεν αποτελούν τμήμα των δαπανών για υποδομές, αλλά απαιτούνται για την ολοκλήρωση του έργου. Οι άλλες δαπάνες αποτελούνται από τα έξοδα εκκίνησης, το κεφάλαιο κίνησης, τις δαπάνες για την απόκτηση της άδειας λειτουργίας, τις δαπάνες για έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και τα ομόλογα που εκδίδονται για την προσέλκυση κεφαλαίων απαραίτητων για την κατασκευή της εγκατάστασης.

Οι άλλες δαπάνες μπορούν να εκτιμηθούν ως εξής:

- Κόστη έναρξης λειτουργίας. Τα κόστη εκκίνησης περιλαμβάνουν το κόστος εργασίας, των υλικών, του εξοπλισμού, τις λειτουργικές δαπάνες και επιπλέον το κόστος απώλειας εσόδων ενόσω το σύστημα δεν λειτουργεί ή λειτουργεί σε μέρος της δυναμικότητάς του, κατά την διάρκεια της εκκίνησης. Ανάλογα με την φορολογική κατηγορία στην οποία εντάσσεται η επιχείρηση, το κόστος

εκκίνησης παρουσιάζεται, είτε ως μέρος της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου, είτε ως εφάπαξ δαπάνη κατά το πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος. Εν απουσία στοιχείων εκτιμάται 10% του σταθερού κεφαλαίου επένδυσης.

- Κεφάλαιο κίνησης. Το κεφάλαιο κίνησης είναι το κεφάλαιο που χρειάζεται η παραγωγική μονάδα για να χρηματοδοτεί την παραγωγή στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στην έναρξη των δαπανών και στις εισπράξεις από πωλήσεις της παραγωγής. Το κεφάλαιο κίνησης αποτελείται από το συνολικό ποσό των χρημάτων που επενδύεται σε: (α) πρώτες ύλες, καύσιμα και προμήθειες σε αποθήκευση, (β) τελικά προϊόντα σε απόθεμα και ενδιάμεσα προϊόντα στη διαδικασία παραγωγής, (γ) λογαριασμοί που δεν έχουν εισπραχθεί, (δ) μετρητά που βρίσκονται στο ταμείο για κάλυψη λειτουργικών δαπανών (αγορές πρώτων υλών, μισθοί, ασφαλίσεις, αποζημιώσεις, κ.λπ.), φόροι και άλλες τρέχουσες υποχρεώσεις και (ε) λογαριασμοί προς πληρωμή. Το κεφάλαιο κίνησης συνήθως αντιπροσωπεύει 10-20% της συνολικής επένδυσης σε κεφάλαιο.

Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης (TCI)

- I. Επένδυση Σταθερού Κεφαλαίου (FCI)
 - A. Άμεσα Κόστη (DC)
 1. Κόστη εντός της εγκατάστασης (ONSC)
 - Κόστος αγοράς εξοπλισμού (PEC)
 - Κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού
 - Σωληνώσεις
 - Όργανα ελέγχου και μετρήσεων
 - Ηλεκτρικός εξοπλισμός και υλικά
 2. Κόστη εκτός εγκατάστασης (OFSC)
 - Αγορά γης
 - Έργα πολιτικού μηχανικού
 - Παροχές της εγκατάστασης
 - B. Έμμεσα κόστη (INC)
 1. Επίβλεψη και κατασκευή
 2. Κατασκευαστικά κόστη συμπεριλαμβανομένης της αμοιβής του εργολάβου
 3. Απρόβλεπτα έξοδα
 - II. Άλλες Δαπάνες
 - A. Κόστη έναρξης λειτουργίας
 - B. Κεφάλαιο κίνησης
 - Γ. Κόστος αδειοδότησης, έρευνας και ανάπτυξης
 - Δ. Φοροαπαλλαγή κεφαλαίων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής
-

Πίνακας 7-1: Ανάλυση του Συνολικού Κεφαλαίου Επένδυσης.

- Δικαιώματα άδειας, έρευνας και ανάπτυξης. Αποτελούν τα κόστη που σχετίζονται με τα δικαιώματα άδειας και οι δαπάνες του παρελθόντος για έρευνα και ανάπτυξη του συστήματος.
- Κόστος κεφαλαίου που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Αποτελεί το κόστος των κεφαλαίων κατασκευής της εγκατάστασης (μερικές

φορές καλείται τόκος κατά τη διάρκεια της κατασκευής) και αντιπροσωπεύει την αξία του χρήματος στο χρόνο στο διάστημα κατασκευής της εγκατάστασης.

7.1.2 Εκτίμηση δαπανών λειτουργίας και συντήρησης

Για να παραχθούν τα προϊόντα πρέπει να δραστηριοποιηθούν οι διεργασίες του εφοδιασμού της παραγωγής, της εμπορίας και της διοίκησης. Καθεμία από τις διεργασίες για να δραστηριοποιηθεί και να εκτελέσει το έργο της κάνει δαπάνες. Οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθος της παραγωγικής δραστηριότητας σε σταθερές και μεταβλητές.

Οι σταθερές δαπάνες συνίστανται από:

- Άμεσα εργατικά κόστη. Είναι τα κόστη για ημερομίσθια του προσωπικού. Για τον προσδιορισμό τους μπορούν να ληφθούν υπόψη οι συλλογικές συμβάσεις εργασίας ή οποιαδήποτε άλλη πληροφορία.
- Δαπάνες συντήρησης και επισκευών. Για να διατηρηθεί το σύνολο της παραγωγικής μονάδας σε καλή κατάσταση πρέπει να γίνονται σημαντικές δαπάνες για να συντηρείται και να επισκευάζεται ο εξοπλισμός. Στις δαπάνες συμπεριλαμβάνονται η αξία των υλικών που χρησιμοποιούνται, η αμοιβή της εργασίας του προσωπικού που τις εκτελεί, εκείνου που τις προγραμματίζει και εκείνου που εποπτεύει την εκτέλεσή τους.
- Ασφάλιστρα. Είναι το κόστος για την ασφάλιση των περιουσιακών στοιχείων της παραγωγικής μονάδας.
- Αποσβέσεις. Καθώς χρησιμοποιούνται οι εγκαταστάσεις της παραγωγικής μονάδας χάνουν την αξία τους. Η μείωση της αξίας ανά χρονική περίοδο είναι η απόσβεση. Η απόσβεση δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{C_0 - S}{n}$$

Όπου C_0 , η συνολική επένδυση υποκείμενη σε απόσβεση στην αρχή της οικονομικής ζωής του έργου

S , η αξία εκποίησης της περιουσίας στο τέλος της οικονομικής ή φορολογικής ζωής, που χρησιμοποιείται κατά την απόσβεση

n , η φορολογική ή οικονομική ζωή που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς

- Τόκοι. Για όσα κεφάλαια είναι δανειακά πρέπει να πληρώνεται τόκος, ο οποίος έχει συμφωνηθεί κατά το δανεισμό. Η τοκοχρεολυτική δόση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

Όπου A , η τοκοχρεολυτική δόση

P , το δανειακό κεφάλαιο

i , το επιτόκιο

n , η χρονική περίοδος

Οι τόκοι για κάθε έτος k μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$T_{(k)} = [P - [(k-1)A - \sum_{j=1}^{k-1} T_{(j)}]]i$$

Όπου $T_{(k)}$, οι τόκοι για το έτος k

- Φόροι. Οι διάφοροι φόροι που επιβαρύνουν την παραγωγική μονάδα, όπως είναι τα τέλη χαρτοσήμου, οι δημοτικοί φόροι, φόροι μεταφορικών μέσων, οι φόροι εισοδήματος, κτλ.

Οι μεταβλητές δαπάνες είναι:

- Δαπάνες πρώτων και βοηθητικών υλών. Οι δαπάνες πρώτων υλών ανά χρονική περίοδο πρέπει να εκτιμώνται από τις τιμές τους. Η κατανάλωση πρώτων υλών εκτιμάται από τη δυναμικότητα της παραγωγικής μονάδας και λαμβάνοντας υπόψη το ενδεχόμενο να γίνεται ανακύκλωση κάποιου ποσοστού πρώτων υλών.

7.1.3 Εκτίμηση εσόδων από την πώληση των προϊόντων

Τα έσοδα δημιουργούνται από τις πωλήσεις. Συνεπώς τα έσοδα μπορούν να υπολογιστούν γνωρίζοντας την παραγωγή και την τιμή πώλησης.

7.1.4 Εκτίμηση απόδοσης

Πρωτού υπολογιστεί η απόδοσης της επένδυσης πρέπει να υπολογιστούν τα καθαρά κέρδη και η χρηματοροπή. Τα καθαρά κέρδη υπολογίζονται ως εξής:

Έσοδα από πωλήσεις
MEION: Κόστος πωληθέντων (δαπάνες πρώτων υλών, άμεσα εργαστικά, γενικές δαπάνες)
= Μικτά κέρδη
MEION: Γενικά έξοδα (Φόροι πλην εισοδήματος, τόκοι, χρηματοοικονομικά έξοδα)
= Κέρδη προ αποσβέσεων
MEION: Αποσβέσεις
= Καθαρά κέρδη

Η χρηματοροπή διαμορφώνεται ως εξής:

Καθαρά κέρδη
+ αποσβέσεις
= ΕΙΣΡΟΗ
Κόστος επένδυσης
+ κεφάλαιο κίνησης

= ΕΚΡΟΗ

ΕΙΣΡΟΗ-ΕΚΡΟΗ=ΧΡΗΜΑΤΟΡΡΟΗ

Στο κόστος επένδυσης συμπεριλαμβάνονται:

Αποσβεστέα στοιχεία
+ αναλωθέντα κεφάλαια
+ οικόπεδο
= ΚΟΣΤΟΣ
ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Η εκτίμηση της απόδοσης γίνεται με τη μέθοδο της Καθαρής Παρούσας Αξίας. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι παρούσες αξίες όλων των μελλοντικών χρηματοροών. Αυτό γίνεται με τον τύπο:

$$NPV_{(i)} = \sum_{t=0}^n CF_t(1+i)^{-t}$$

Όπου $NPV_{(i)}$, η παρούσα αξία για επιτόκιο i

CF_t , η χρηματοροή για έτος t

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, αν η παρούσα αξία είναι θετική, η επένδυση κρίνεται οικονομικά σκόπιμη. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η παρούσα αξία, τόσο καλύτερη η επένδυση. Αν η παρούσα αξία είναι ίση με το μηδέν, η επένδυση κρίνεται αδιάφορη. Σε περίπτωση αρνητικής παρούσας αξίας, η επένδυση κρίνεται οικονομικά ασύμφορη.

Μια ειδική περίπτωση της Καθαρής Παρούσας Αξίας είναι η μέθοδος της εσωτερικής απόδοσης. Σε αυτή την περίπτωση αναζητείται η τιμή του επιτοκίου για την οποία η παρούσα αξία των μελλοντικών χρηματικών ποσών γίνεται ίση με το μηδέν. Αυτή η τιμή του επιτοκίου ονομάζεται εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης. Η επένδυση κρίνεται συμφέρουσα μόνο όταν το επιτόκιο που υπολογίζεται είναι μεγαλύτερο του κόστους κεφαλαίου, δηλαδή του επιτοκίου της χρηματαγοράς.

7.2 Οικονομικοί υπολογισμοί

Το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης για ένα σταθμό παραγωγής βιοαερίου και συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας εκτιμάται σε $C_{spec}=4.400€/kW_e$. Ειδικότερα για την αναερόβια χώνευση το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης εκτιμάται $CAD_{spec}=3.400€/kW_e$ και για τη συμπαραγωγή $CCHP_{spec}=1.000€/kW_e$. Έτσι:

$$FCI = (CAD_{spec} + CCHP_{spec})W_e$$

Το κεφάλαιο κίνησης και τα υπόλοιπα κόστη για την εκκίνηση λειτουργίας υπολογίζονται:

$$WC = 0.05FCI$$

Και το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης δίνεται:

$$TCI = FCI + WC$$

Από τη λειτουργία του σταθμού προκύπτουν έσοδα από την πώληση της ενέργειας και του λιπάζματος που παράγεται. Τα έσοδα υπολογίζονται ανά έτος:

$$ER = (W_e - E_e)t_e FIT_e$$

$$ThR = (W_{th} - Q_V)t_{th} FIT_{th} (1 - DHL)$$

$$FR = 2500 \text{ €/a}$$

$$TR = ER + ThR + FR$$

Όπου ER , τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας

t_e , οι ώρες λειτουργίας της γεννήτριας ανά έτος

FIT_e , η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας

ThR , τα έσοδα από την πώληση θερμικής ενέργειας

t_{th} , οι ώρες λειτουργίας του εναλλάκτη για πώληση θερμικής ενέργειας

FIT_{th} , η τιμή πώλησης θερμικής ενέργειας στους καταναλωτές

DHL , οι απώλειες του δικτύου τηλεθέρμανσης

FR , τα έσοδα από την πώληση λιπάζματος

TR , τα συνολικά έσοδα

Το ετήσιο κόστος για τη λειτουργία του σταθμού αποτελείται από το άθροισμα του κόστους μεταφοράς των υποστρωμάτων, του κόστους καλλιέργειας γης για τα ενεργειακά φυτά, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης και του κόστους ασφάλισης.

Το κόστος για τη μεταφορά των υποστρωμάτων από το χώρο παραγωγής τους έως το σταθμό υπολογίζεται σε κατανάλωση καυσίμου ανά τόνο και χιλιόμετρο μεταφοράς. Στον Πίνακα 7.2 δίνονται οι καταναλώσεις καυσίμου πετρελαίου για διάφορα υποστρώματα ανάλογα με την απόσταση μεταφοράς.

	Κατανάλωση πετρελαίου $\text{lt} \cdot \text{t} \cdot \text{km}^{-1}$		
	$\leq 2\text{km}$	$2 \leq 20\text{km}$	$> 20\text{km}$
Κοπριά βοοειδών	0.09	0.08	0.06
Άχυρο	0.42	0.19	0.12
Ενσίρωμα καλαμποκιού	0.35	0.21	0.12
Ενσίρωμα γρασιδιού	0.24	0.10	0.07

Πίνακας 7-2: Κατανάλωση πετρελαίου για μεταφορά υποστρωμάτων[21]

Το κόστος για τη μεταφορά του υποστρώματος i προκύπτει από τον τύπο:

$$TC_{(i)} = FCon_{(i)} \dot{M}_{(i)} d_{(i)} FC$$

Όπου $TC_{(i)}$, το κόστος μεταφοράς του υποστρώματος i

$FCon_{(i)}$, η κατανάλωση καυσίμου για τη μεταφορά, όπως δίνεται στον Πίνακα 7.2

$\dot{M}_{(i)}$, η μάζα του υποστρώματος

$d_{(i)}$, η απόσταση μεταφοράς

FC , το κόστος αγοράς καυσίμου

Το συνολικό κόστος μεταφοράς είναι:

$$TC = \sum_i TC_{(i)}$$

Για την παραγωγή των ενεργειακών φυτών που χρησιμοποιούνται σαν υποστρώματα, υπολογίζεται το κόστος καλλιέργειας. Το κόστος προκύπτει με βάση την απόδοση του φυτού σε μάζα ανά εκτάριο καλλιέργειας και το κόστος καλλιέργειας ανά εκτάριο. Στον Πίνακα 7.3 δίνονται οι αποδόσεις διαφόρων καλλιεργειών σε τόνους ανά εκτάριο.

Απόδοση ενσιρώματος σε τόνους ανά εκτάριο καλλιέργειας	
Καλαμπόκι	80
Τριφύλλι	15
Σόργο	150

Πίνακας 7-3: Απόδοση καλλιεργειών σε ενσίρωμα

Έτσι το κόστος ανά τύπο καλλιέργειας προκύπτει:

$$CC_{(i)} = CC_h \dot{M}_{(i)} / SY_{(i)}$$

Όπου $CC_{(i)}$, το κόστος καλλιέργειας ανά τύπο προϊόντος

CC_h , το κόστος καλλιέργειας ανά εκτάριο (περίπου 1000€)

$SY_{(i)}$, η απόδοση ενσιρώματος σε τόνους ανά εκτάριο

Και το συνολικό κόστος καλλιέργειας είναι:

$$CC = \sum_i CC_{(i)}$$

Το κόστος της ετήσιας ασφάλισης του σταθμού υπολογίζεται:

$$IC = 0.003FCI$$

Το κόστος για τις αμοιβές του προσωπικού υπολογίζεται:

$$PC = PC_{spec} t_p$$

Όπου PC , το κόστος αμοιβών προσωπικού

PC_{spec} , το κόστος της εργατοώρας

t_p , οι εργατοώρες

Τέλος υπολογίζεται το κόστος για τη συντήρηση του εξοπλισμού:

$$MC = 0.02FCI$$

Το συνολικό κόστος για τη λειτουργία του σταθμού προκύπτει:

$$OMC = TC + CC + IC + PC + MC$$

Σε αυτό το σημείο υπολογίζεται ο δείκτης των κερδών προ τόκων, φόρων και αποσβέσεων EBITDA.

$$EBITDA = TCI - OMC$$

Από τα EBITDA αφαιρούνται τα τοκοχρεολύσια και οι διάφοροι φόροι (εκτός φόρων εισοδήματος) και προκύπτουν τα κέρδη προ αποσβέσεων.

Οι αποσβέσεις μπορούν να υπολογιστούν ξεχωριστά για τον εξοπλισμό της αναερόβιας χώνευσης και τον εξοπλισμό για τη συμπαραγωγή. Έτσι οι αποσβέσεις για κάθε χρόνο υπολογίζονται:

$$D_{AD} = CAD / t_{AD}$$

$$D_{CHP} = CCHP / t_{CHP}$$

Όπου D_{AD} , οι αποσβέσεις του εξοπλισμού αναερόβιας χώνευσης

t_{AD} , τα έτη απόσβεσης του εξοπλισμού αναερόβιας χώνευσης (20 έτη)

D_{CHP} , οι αποσβέσεις του εξοπλισμού συμπαραγωγής

t_{CHP} , τα έτη απόσβεσης του εξοπλισμού συμπαραγωγής (4 έτη)

Αν από τα κέρδη προ αποσβέσεων αφαιρεθούν οι αποσβέσεις, προκύπτουν τα καθαρά κέρδη.

Κεφάλαιο 8 Βελτιστοποίηση

Στα προηγούμενα κεφάλαια οι υπολογισμοί αποσκοπούσαν στην εύρεση ενός αποδεκτού σχεδιασμού για το σύστημα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία για την βελτιστοποίηση του συστήματος για διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

8.1 Βελτιστοποίηση

Βελτιστοποίηση σημαίνει η αλλαγή της δομής και των μεταβλητών απόφασης ενός συστήματος με σκοπό τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, εντός ορισμένων οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να σχετίζονται με κατασκευαστικούς περιορισμούς, περιορισμούς των υλικών, οικονομικούς περιορισμούς και γενικότερα με τη λειτουργία και συντήρηση του συστήματος.

Συχνά η απόκτηση της βέλτιστης επιθυμητής λύσης δεν επιτυγχάνεται στον αρχικό σχεδιασμό, αλλά χρειάζεται να επαναληφθούν οι υπολογισμοί ώστε να προσεγγιστεί η βέλτιστη λύση. Τα κύρια στοιχεία για τη βελτιστοποίηση είναι:

- Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης. Οποιαδήποτε διαδικασία βελτιστοποίησης απαιτεί τον καθορισμό μιας ποσότητας ή συνάρτησης που πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί. Αν και το κόστος, τόσο το αρχικό όσο και το κόστος συντήρησης, και το κέρδος είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ποσότητες που πρέπει να βελτιστοποιηθούν, πολλές άλλες συνθήκες μπορούν να βελτιστοποιηθούν, ανάλογα με το σύστημα και με την εφαρμογή. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που βελτιστοποιούνται σε θερμικά συστήματα είναι συχνά βασισμένες σε χαρακτηριστικά όπως η παραγόμενη ισχύς, η ειδική κατανάλωση καυσίμου, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος ή οι απώλειες.
- Οριακές συνθήκες - περιορισμοί. Οι περιορισμοί σε ένα δεδομένο πρόβλημα σχεδιασμού προκύπτουν λόγω περιορισμών στις φυσικές μεταβλητές και λόγω των βασικών αρχών διατήρησης που πρέπει να ικανοποιηθούν. Υπάρχουν δύο τύποι περιορισμών. Οι περιορισμοί ισότητας και οι περιορισμοί ανισότητας. Οι ισότητες είναι γενικά ευκολότερο να εξετασθούν σε σχέση με τις ανισότητες δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές μέθοδοι για να λύσουν τους διαφορετικούς τύπους εξισώσεων και τα συστήματά τους και καμία μέθοδος δεν είναι διαθέσιμη για τις ανισότητες. Συχνά για την επίλυση ανισοτήτων, αυτές πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε εξισώσεις πριν εφαρμοστούν οι μέθοδοι βελτιστοποίησης.
- Μεταβλητές. Ο ορισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών που περιγράφουν τις πιθανές επιλογές σχεδίασης είναι ιδιαίτερης σημασίας. Στην επιλογή των μεταβλητών είναι χρήσιμο να περιλαμβάνονται όλες οι σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, να μην περιλαμβάνονται μεταβλητές μικρής σημασίας και να διαχωρίζονται, ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές, οι μεταβλητές απόφασης που οι τιμές τους επιδέχονται αλλαγής και οι παράμετροι, των οποίων οι τιμές είναι σταθερές. Οι μεταβλητές των οποίων οι τιμές υπολογίζονται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, μέσω του μαθηματικού μοντέλου, είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές.

8.2 Βελτιστοποίηση συστήματος ΣΗΘ

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα συμπαραγωγής εφαρμόζεται η θερμοδυναμική βελτιστοποίηση. Κατά τη θερμοδυναμική βελτιστοποίηση μπορούν να διακριθούν δύο περιπτώσεις; η μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος και η μεγιστοποίηση της θερμικής ισχύος. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις θα είναι αντίστοιχα:

$$\max W_e = n_{gen} \dot{W}_{CV} = \frac{\dot{m}_a}{M_a} [(\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + (1 + \bar{\lambda})(\bar{h}_4 - \bar{h}_5)]$$

που με αντικατάσταση των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης γίνεται:

$$\max W_e = \frac{\dot{m}_a}{M_a} \left[\left(\frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_{2s}}{n_{sc}} \right) + (1 + \bar{\lambda}) n_{st} (\bar{h}_4 - \bar{h}_{5s}) \right]$$

Και

$$\max \dot{W}_{th} = \dot{m}_8 (h_9 - h_8)$$

Στο κεφάλαιο της θερμοδυναμικής ανάλυσης έχουν αναφερθεί οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί που ορίζουν το πρόβλημα.

Κεφάλαιο 9 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου και τα αποτελέσματα μετά τη βελτιστοποίηση.

9.1 Διαστασιολόγηση σταθμού αναερόβιας χώνευσης

Η θέση του σταθμού επιλέγεται σε τοποθεσία όπου υπάρχουν φάρμες βοοειδών και χοιρινών, σε μία απόσταση περίπου 10-15χλμ, ώστε να υπάρχει διαθέσιμο υπόστρωμα χωρίς μεγάλο κόστος μεταφοράς. Παράλληλα υπάρχουν διαθέσιμες εκτάσεις για καλλιέργεια ενεργειακών φυτών που θα χρησιμοποιηθούν σαν υποστρώματα, αλλά και για τη διάθεση του χωνεμένου υπολείμματος. Έτσι η κατασκευή ενός κεντρικού σταθμού που θα συγκεντρώνει όλα τα υποστρώματα της περιοχής κρίνεται ως η πιο βιώσιμη λύση. Συνολικά στο σταθμό θα καταλήγουν τα παρακάτω υποστρώματα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 9.1:

Υπόστρωμα	Ποσότητα (t/έτος)
Κοπριά βοοειδών	16.000
Κοπριά χοίρων	8.000
Κοπριά πουλερικών	1.000
Απόβλητα λαχανικών	5.000
Ενσίρωμα καλαμποκιού	5.000
Σύνολο	35.000

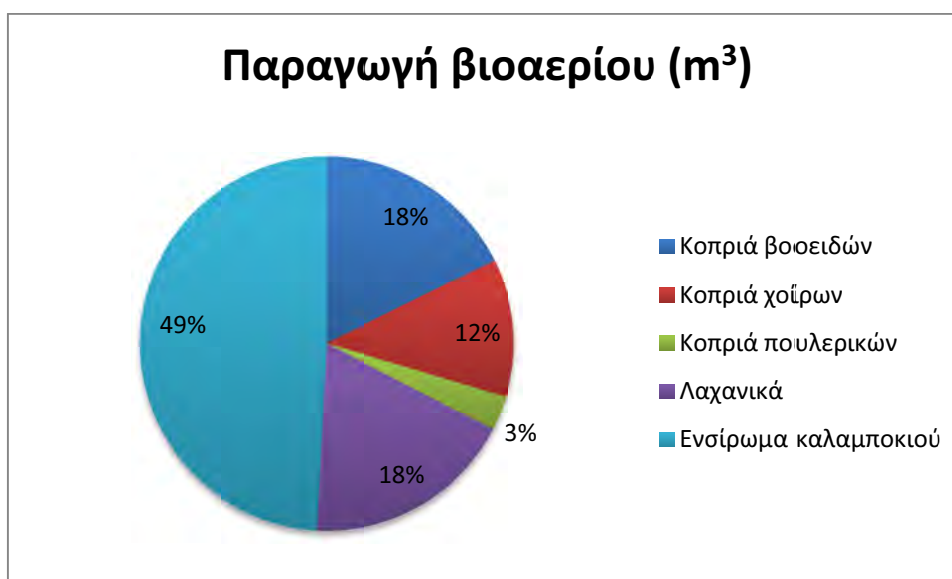
Πίνακας 9-1: Ποσότητες υποστρωμάτων ανά έτος

Η παραγωγή βιοαερίου, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 3.5, θα είναι:

Υπόστρωμα	Ποσότητα (t/έτος)	Ξηρή Μάζα ΞΜ(%)	Πτητικά Στερεά (% της ΞΜ)	Απόδοση βιοαερίου (m ³ /tn ΠΣ)	Παραγωγή βιοαερίου (m ³ /έτος)
Κοπριά βοοειδών	16.000	10	75	250	300.000,00
Κοπριά χοίρων	8.000	8	75	420	201.600,00
Κοπριά πουλερικών	1.000	15	75	450	50.625,00
Απόβλητα λαχανικών	5.000	15	75	550	309.375,00
Ενσίρωμα καλαμποκιού	5.000	28	85	700	833.000,00
Σύνολο	35.000				1.694.600,00

Πίνακας 9-2: Παραγωγή βιοαερίου ανά τύπο υποστρώματος

Η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο για τη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι 65% ή $x_f = 0.65$.



Σχήμα 9-1: Παραγωγή βιοαερίου ανά τύπο υποστρώματος

Ο εξοπλισμός και οι εγκαταστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την αναερόβια χώνευση των υποστρωμάτων είναι ο χωνευτήρας με το σύστημα ανάδευσης και το σύστημα θέρμανσης, τα σιλό υποδοχής των στερεών και υγρών υποστρωμάτων, τα συστήματα τροφοδοσίας, η δεξαμενή αποθήκευσης του βιοαερίου και η συσκευή αποθείωσης. Η διαστασιολόγησή τους γίνεται σύμφωνα με τους τύπους του Κεφαλαίου 4.

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα στους 38°C, είναι δηλαδή μεσοφιλική διεργασία. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής θεωρείται 40 ημέρες. Έτσι ο χωνευτήρας που θα χρησιμοποιηθεί θα έχει διαστάσεις:

Διαστασιολόγηση χωνευτήρα			
Υδραυλικός χρόνος παραμονής	T_{HRT}	d	40,00
Συντελεστής προσαύξησης	F_{AD}	%	1,10
Όγκος χωνευτήρα	V_{AD}	m ³	4219,18
Ύψος χωνευτήρα	H_{AD}	m	7,50
Διάμετρος χωνευτήρα	D_{AD}	m	26,76

Πίνακας 9-3: Διαστασιολόγηση χωνευτήρα

Για την εκκένωση του χωνευτήρα θα χρησιμοποιηθούν αγωγοί. Η διάμετρος προκύπτει:

Αγωγός εκκένωσης			
Χρόνος εκκένωσης	T_{ADD}	h	7
Ταχύτητα ροής	V_{ADD}	m/s	0,5
Διάμετρος αγωγού εκκένωσης	D_{ADD}	m	0,65

Πίνακας 9-4: Διαστασιολόγηση αγωγού εκκένωσης

Για τη θέρμανση του υποστρώματος και τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας χώνευσης 38°C εγκαθίσταται σωληνώσεις όπου θα ρέει θερμό νερό. Για ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία -10°C υπολογίζονται οι ανάγκες σε θέρμανση του υποστρώματος.

Σύστημα θέρμανσης χωνευτήρα			
Θερμοκρασία χώνευσης	θ_{AD}	°C	38
Ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία	θ_E	°C	-10
Θερμοκρασιακή διαφορά χώνευσης και εξωτερικής θερμοκρασίας	$\Delta\theta_{ADE}$	°C	48
Θερμοκρασία εισόδου υποστρώματος	θ_I	°C	5
Θερμοκρασιακή διαφορά	$\Delta\theta_{SI}$	°C	33
Θερμοχωρητικότητα υποστρώματος	c_S	kJ/kg*K	4,2
Πάχος μόνωσης	s_{AD}	m	0,05
Θερμική αγωγιμότητα μόνωσης	λ_{AD}	W/m*K	0,035
Εσωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης τοιχώματος χωνευτήρα	$(\alpha_{AD})_i$	W/m ² *K	4000
Εξωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης τοιχώματος χωνευτήρα	$(\alpha_{AD})_{out}$	W/m ² *K	400
Συντελεστής θερμοπερατότητας τοιχώματος χωνευτήρα	k_{AD}	W/m ² *K	0,70
Θερμοκρασία προσαγωγής νερού	θ_{WV}	°C	60
Θερμοκρασία επιστροφής νερού	θ_{WR}	°C	40
Θερμοκρασιακή διαφορά νερού	$\Delta\theta_W$	°C	20
Ταχύτητα ροής	v_W	m/s	1
Εσωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης αγωγού	$(\alpha_W)_i$	W/m ² *K	400
Εξωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης αγωγού	$(\alpha_W)_{out}$	W/m ² *K	400
Συντελεστής θερμοπερατότητας αγωγού	k_W	W/m ² *K	200
Θερμοκρασιακή διαφορά θερμού μέσου και υποστρώματος	$\Delta\theta_{WS}$	°C	12
Θερμικές ανάγκες υποστρώματος	Q_S	kW	153,95
Επιφάνεια χωνευτήρα	$(A_{AD})_{tot}$	m ²	1193,15
Θερμικές απώλειες χωνευτήρα	Q_{AD}	kW	40,01
Συνολική θερμική απαίτηση	Q_T	kW	147,31
Παροχή θερμού νερού	V_W	m ³ /h	8,31
Διάμετρος αγωγού θέρμανσης	D_W	m	0,05
Μήκος αγωγού θέρμανσης	L_W	m	73,20

Πίνακας 9-5: Σύστημα θέρμανσης χωνευτήρα

Για την ανάδευση του υποστρώματος ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφία στο μίγμα και να μην υπάρχουν ιζήματα χρησιμοποιούνται αναδευτήρες.

Αναδευτήρες			
Αριθμός Newton	N_{eADA}		0,5
Πυκνότητα υποστρώματος	ρ_s	kg/m^3	1000
Διάμετρος αναδευτήρα	D_{ADA}	m	3
Ανάδευση	n_{ADA}	rpm	5
Ισχύς αναδευτήρα	P_{ADA}	kW	22,67
Αριθμός αναδευτήρων ανά χωνευτήρα		#	3
Χρόνος λειτουργίας	t_{ADA}	min/h	10
Συνολική ηλεκτρική ισχύς	$(P_{ADA})_{tot}$	kW	11,34

Πίνακας 9-6: Διαστασιολόγηση συστήματος ανάδευσης

Μετά την παραλαβή των υποστρωμάτων αυτά αποθηκεύονται σε δεξαμενές ή σιλό ανάλογα με την κατάσταση τους. Έτσι για τα υγρά υποστρώματα η δεξαμενή θα έχει όγκο:

Δεξαμενή υγρών υποστρωμάτων			
Χρόνος αποθήκευσης	t_{LS}	d	10
Συντελεστής προσαύξησης	f_{LS}	%	1,10
Πυκνότητα	ρ_{LS}	kg/m^3	1000
Όγκος δεξαμενής	V_{LS}	m^3	753,42

Πίνακας 9-7: Διαστασιολόγηση δεξαμενής υγρών υποστρωμάτων

Και η αντλία τροφοδοσίας θα έχει ισχύ:

Αντλίες τροφοδοσίας υγρών υποστρωμάτων			
Αριθμός αντλιών		#	4,00
Παροχή	V_{LP}	m^3/h	20
Διαφορά πίεσης	ΔP_{LP}	bar	1
Βαθμός απόδοσης αντλίας	η_{LP}	%	0,5
Ισχύς	P_{LP}	kW	1,11
Ηλεκτρική ισχύς αντλιών	$(P_{LP})_{tot}$	kW	4,44

Πίνακας 9-8: Διαστασιολόγηση αντλιών τροφοδοσίας

Αντίστοιχα για τα στερεά υποστρώματα απαιτείται η κατασκευή σιλό που θα έχει όγκο:

Σιλό			
Πυκνότητα στερεών	ρ_{SS}	kg/m^3	700
Όγκος σιλό	V_{SS}	m^3	14285,71

Πίνακας 9-9: Διαστασιολόγηση σιλό

Το σύστημα τροφοδοσίας των στερεών υποστρωμάτων ελαττώνει το μέγεθος των στερεών και στη συνέχεια τα τροφοδοτεί στο χωνευτήρα. Για τη λειτουργία του απαιτείται κινητήρας που έχει ισχύ:

Τροφοδοτές στερεών υποστρωμάτων			
Παροχή	V_{SS}	m^3/h	10
Ισχύς κινητήρα	P_{SS}	kW	15
Χρόνος λειτουργίας	t_{SS}	h/d	2,5
Αριθμός τροφοδοτών		#	2
Ηλεκτρική ισχύς	$(P_{SS})_{tot}$	kW	3,13

Πίνακας 9-10: Διαστασιολόγηση συστήματος τροφοδοσίας στερεών

Το παραγόμενο βιοαέριο αποθηκεύεται σε δεξαμενή πριν οδηγηθεί στο σύστημα συμπαραγωγής. Ο όγκος της δεξαμενής προκύπτει ως ποσοστό σε σχέση με τον όγκο του χωνευτήρα.

Δεξαμενή αποθήκευσης		
Ποσοστό	%	50
Όγκος δεξαμενής	V_{GH}	m^3 2.321,37

Πίνακας 9-11: Διαστασιολόγηση δεξαμενής αποθήκευσης βιοαερίου

Για την αποθείωση χρησιμοποιείται ρεύμα αέρα το οποίο υπολογίζεται:

Αποθείωση			
Λόγος παροχών αέρα	V_A/V_{AD}		0,04
Πίεση	p_{k2}	bar	6
Ταχύτητα αέρα	v_A	m/s	2
Παροχή αέρα	V_A	m^3/h	7,74
Διάμετρος αγωγού	D_A	m	0,04

Πίνακας 9-12: Διαστασιολόγηση αποθείωσης

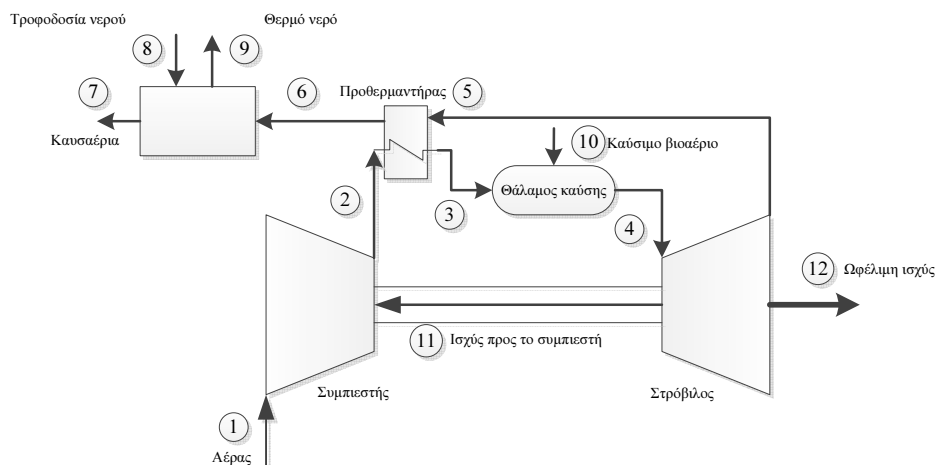
Οι συνολικές ιδιοκαταναλώσεις για την αναερόβια χώνευση είναι τελικά:

Ιδιοκαταναλώσεις			
Ηλεκτρικές ιδιοκαταναλώσεις	$(E_{tot})_e$	kW	18,91
Θερμικές ιδιοκαταναλώσεις	$(Q_{tot})_{th}$	kW	147,31

Πίνακας 9-13: Συνολικές ιδιοκαταναλώσεις σταθμού αναερόβιας χώνευσης

9.2 Αποτελέσματα θερμοδυναμικών υπολογισμών

Το σύστημα συμπαραγωγής που χρησιμοποιείται φαίνεται στο Σχήμα 9.2. Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις θέσεις όπου γίνονται οι υπολογισμοί.



Σχήμα 9-2: Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο

Για το μοντέλο συμπαραγωγής οι μεταβλητές απόφασης παίρνουν τιμές όπως φαίνονται στον Πίνακα 9.14.

Μεταβλητές Απόφασης	
P_2/P_1	8
n_{sc}	82,00%
n_{st}	86,00%
T_3	900,00
T_4	1450,00

Πίνακας 9-14: Μεταβλητές απόφασης

Για τον υπολογισμό του λόγου καυσίμου-αέρα πρέπει πρώτα να προσδιοριστούν οι τιμές των ειδικών μοριακών ενθαλπιών. Οι τιμές δίνονται στον Πίνακα 9.15.

Συστατικό	Ενθαλπίες (T_3)	Ενθαλπίες (T_4)	Ενθαλπίες Δh
N_2	18688,96	36962,62	18273,65
O_2	19230,10	38586,66	19356,56
CO_2	-364469,54	-334145,44	30324,10
H_2O	-219287,00	-195491,22	23795,77

Πίνακας 9-15: Ειδικές μοριακές ενθαλπίες (απόλυτες) για τον υπολογισμό του λόγου καυσίμου-αέρα

Επίσης υπολογίζονται η ειδική μοριακή ενθαλπία του καυσίμου και η κατώτερη θερμογόνο δύναμη.

$$\bar{h}_f = -186.399,13 \text{ kJ / kmol} \quad \overline{LHV} = 521.534,65 \text{ kJ / kmol}$$

Έτσι προκύπτει $\bar{\lambda} = 0.0421$.

Μετά την καύση οι περιεκτικότητες των καυσαερίων είναι:

Περιεκτικότητες καυσαερίων	
N ₂	0,7435
O ₂	0,1450
CO ₂	0,0407
H ₂ O	0,0708

Πίνακας 9-16: Περιεκτικότητες καυσαερίων

Οι παροχές μάζας υπολογίζονται από το λόγο καυσίμου-αέρα:

Ροές μάζας	m[kg/s]
Αέρας	1,5485
Καύσιμο	0,0562
Καυσαέρια	1,6047

Πίνακας 9-17: Παροχές αέρα, καυσίμου, καυσαερίων

Συγκεντρωτικά για κάθε θέση τα χαρακτηριστικά συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΘΕΣΗ	Ουσία	Παροχή m[kg/s]	Θερμοκρασία T[K]	Πίεση P[bar]	Ενθαλπία h[kJ/kg]	Εντροπία s[kJ/kgK]
1	Αέρας	1,55	298,15	1,01	-164,73	6,96
2	Αέρας	1,55	579,01	8,10	133,22	7,05
3	Αέρας	1,55	900,00	7,70	494,40	7,57
4	Καυσαέρια	1,60	1.450,00	7,31	197,45	8,29
5	Καυσαέρια	1,60	925,48	1,10	-358,39	8,36
6	Καυσαέρια	1,60	707,60	1,07	-706,35	7,98
7	Καυσαέρια	1,60	430,00	1,01	-1.021,28	7,44
8	Νερό	4,80	353,15	5,00	335,31	1,08
9	Νερό	4,80	378,15	5,00	440,49	1,36
10	Βιοαέριο	0,06	298,15	12,00	-7.215,98	9,25

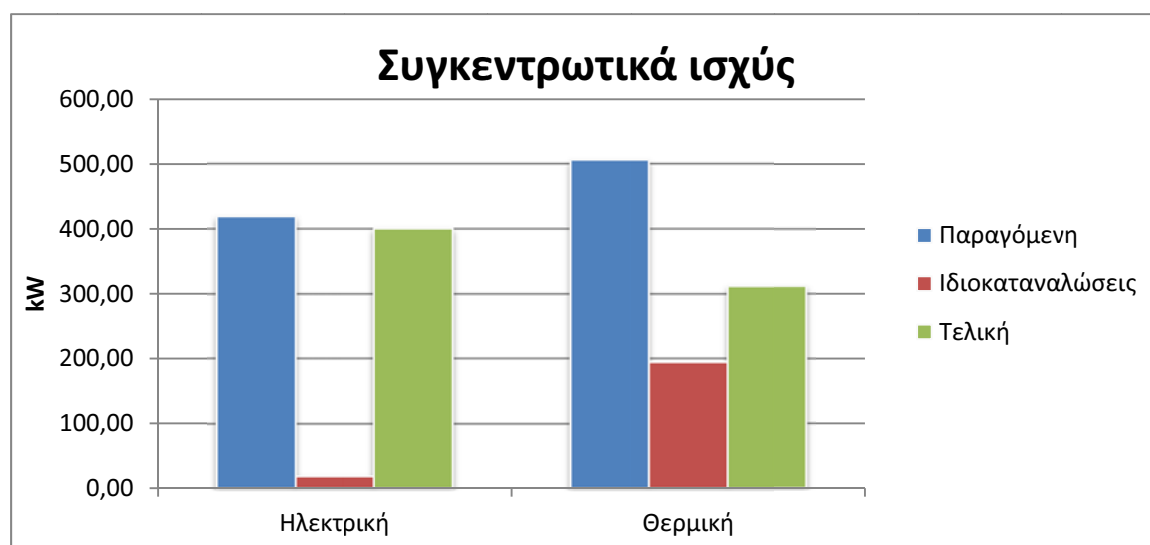
Πίνακας 9-18: Θερμοδυναμικά στοιχεία ανά θέση

Η ισχύς στην έξοδο προκύπτει έτσι:

Συγκεντρωτικά, Ισχύς	
W _{CV} (kW)	432,0401
W _e (kW)	419,0789
W _{th} (kW)	505,7959

Πίνακας 9-19: Παραγόμενη ισχύς

Στο Σχήμα 9.3 φαίνονται συνολικά η παραγόμενη ισχύς, ηλεκτρική και θερμική, και η τελική ισχύς που μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο αν αφαιρεθούν οι ιδιοκαταναλώσεις.



Σχήμα 9-3: Συγκεντρωτικά ισχύς

Επίσης μπορούν να υπολογιστούν οι βαθμοί απόδοσης για τον κύκλο της συμπαραγωγής. Αυτοί φαίνονται στον Πίνακα 9.20.

Βαθμοί απόδοσης	
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	38,55%
Θερμικός βαθμός απόδοσης	46,53%
Συνολικός βαθμός απόδοσης	85,07%

Πίνακας 9-20: Βαθμοί απόδοσης κύκλου συμπαραγωγής

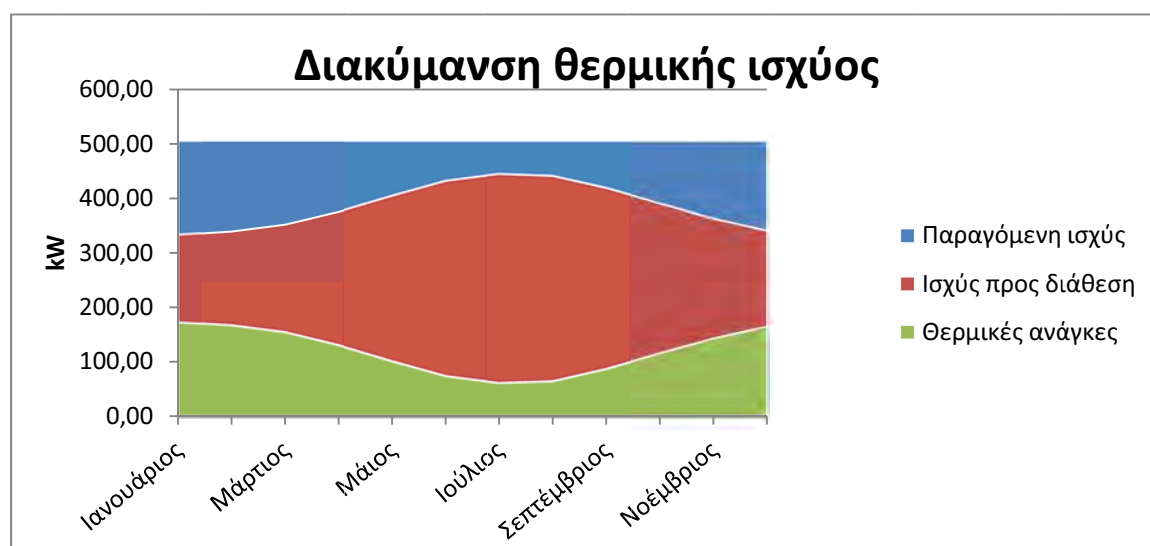
Αν ληφθούν υπόψη οι μέσες θερμοκρασίες ανά μήνα για την περιοχή της Μαγνησίας, μπορεί να γίνει μία ακριβέστερη προσέγγιση των θερμικών απαιτήσεων της αναερόβιας χώνευσης. Έτσι προκύπτει η θερμική ισχύς που είναι προς διάθεση στους καταναλωτές.

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
Μέση θερμοκρασία	6,60	7,70	10,00	14,30	19,60	24,60
Θερμικές ανάγκες	172,66	166,61	153,96	130,32	101,18	73,68
Παραγόμενη ισχύς	505,80	505,80	505,80	505,80	505,80	505,80
Ισχύς προς διάθεση	333,14	339,19	351,84	375,48	404,62	432,12

	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
Μέση θερμοκρασία	26,90	26,30	22,20	17,00	12,10	8,10
Θερμικές ανάγκες	61,04	64,33	86,88	115,47	142,42	164,41
Παραγόμενη ισχύς	505,80	505,80	505,80	505,80	505,80	505,80
Ισχύς προς διάθεση	444,76	441,47	418,92	390,33	363,38	341,39

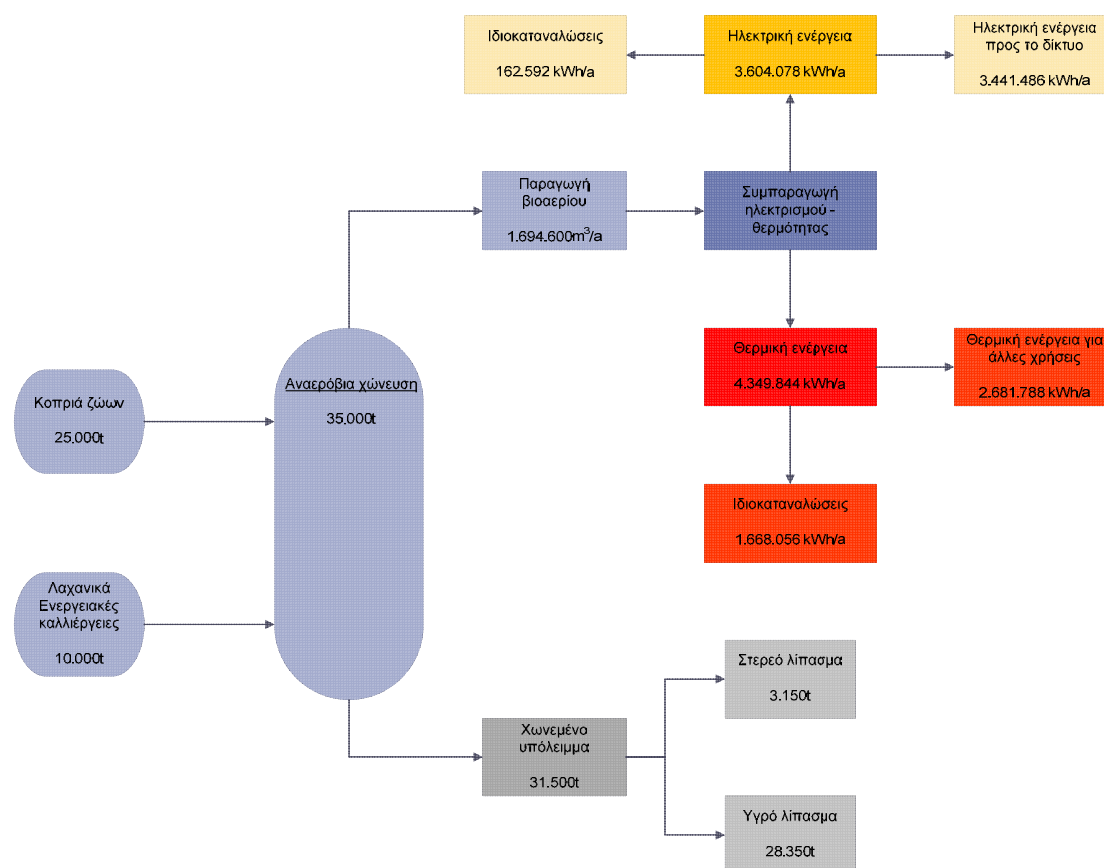
Πίνακας 9-21: Διακύμανση μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας, θερμικών αναγκών και διαθέσιμης θερμικής ισχύος

Η διακύμανση φαίνεται πιο αναλυτικά στο Σχήμα 9.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 9-4: Διακύμανση θερμικών αναγκών και διαθέσιμης θερμικής ισχύος

Στο Σχήμα 9.5 που ακολουθεί φαίνεται ένα ολοκληρωμένο ισοζύγιο μάζας και ενέργειας για τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και της συμπαραγωγής.



Σχήμα 9-5: Ισοζύγιο μάζας, ενέργειας και τελικό λίπασμα που προκύπτει

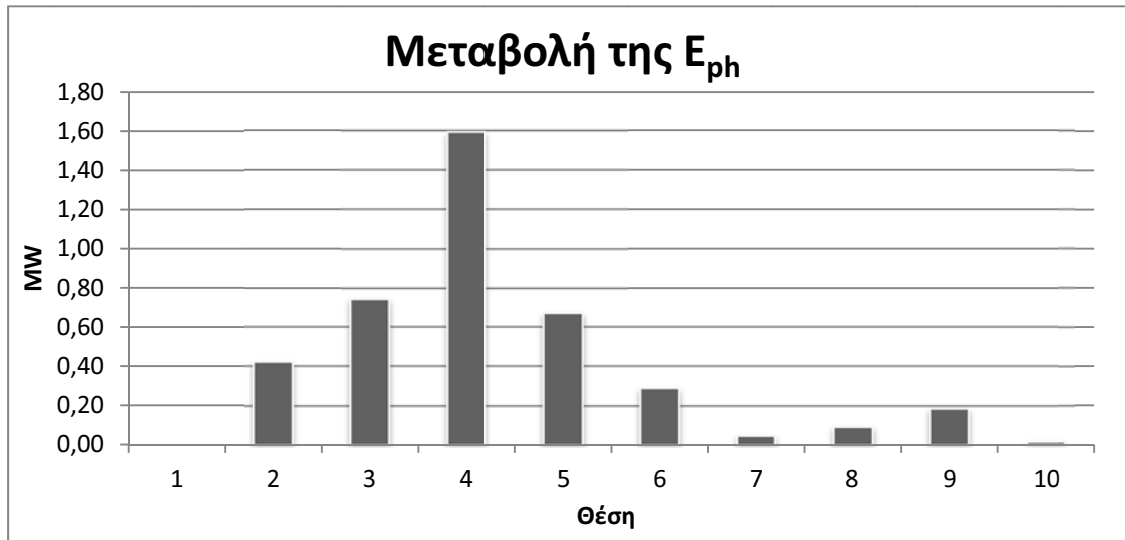
9.3 Αποτελέσματα εξεργειακών υπολογισμών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις εξέργειες ανά θέση του συστήματος συμπαγωγής. Στον Πίνακα 9.22 παρουσιάζονται αρχικά οι τιμές των φυσικών, χημικών και ολικών εξεργειών ανά θέση.

ΘΕΣΗ	E_{ph} [MW]	E_{ch} [MW]	E_{tot} [MW]
1	0,00	0,00	0,00
2	0,42	0,00	0,42
3	0,74	0,00	0,74
4	1,59	0,01	1,60
5	0,67	0,01	0,68
6	0,29	0,01	0,30
7	0,05	0,01	0,06
8	0,09	0,01	0,10
9	0,19	0,01	0,20
10	0,02	1,88	1,90
11			0,47

Πίνακας 9-22: Εξέργειες ανά θέση

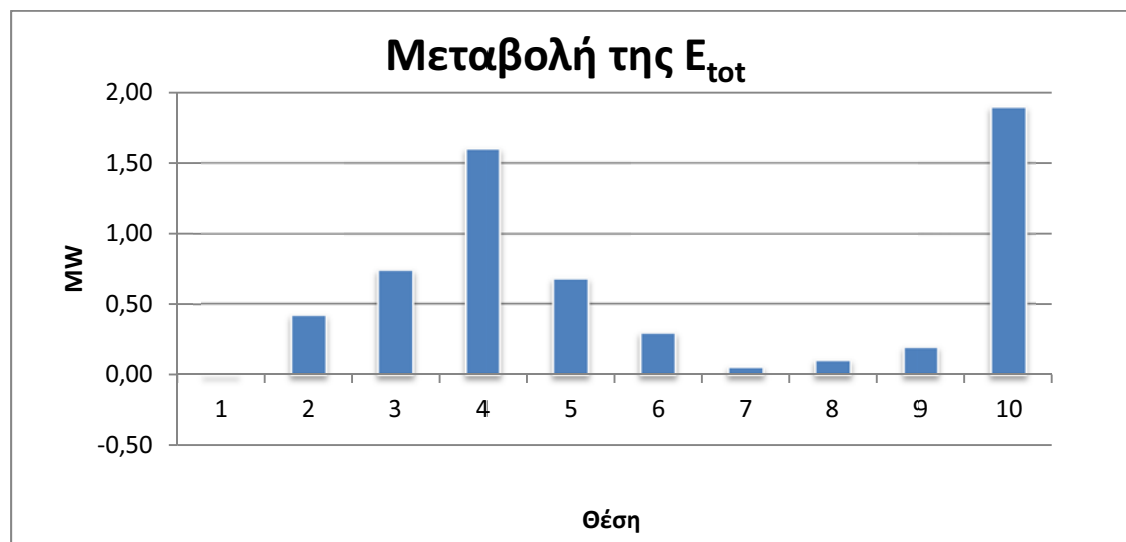
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι μεταβολές της φυσικής, της χημικής και της ολικής εξέργειας ανά θέση.



Σχήμα 9-6: Μεταβολή της φυσικής εξέργειας ανά θέση



Σχήμα 9-7: Μεταβολή της χημικής εξέργειας ανά θέση



Σχήμα 9-8: Μεταβολή της ολικής εξέργειας ανά θέση

Επίσης για κάθε συσκευή προκύπτουν η καταστροφή ενέργειας, ο λόγος καταστροφής εξέργειας του συστατικού και ο λόγος καταστροφής εξέργειας και στο τέλος υπολογίζεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της συσκευής.

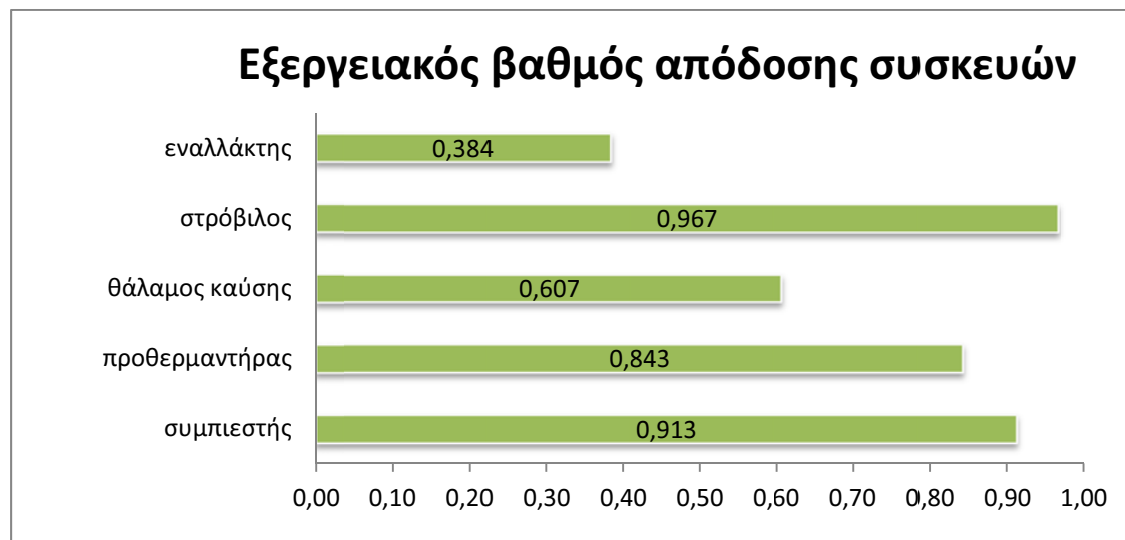
Συσκευή	Ισχύς (MW) καταστροφής εξέργειας	Ποσοστό (γ^*_{D})	Ποσοστό (γ_D)	Εξεργειακός βαθμός απόδοσης
Συμπιεστής	0,040	0,030	2,116	0,913
Προθερμαντήρας	0,060	0,045	3,134	0,843
Θάλαμος καύσης	1,038	0,787	54,606	0,607
Στρόβιλος	0,032	0,024	1,695	0,967
Εναλλάκτης	0,150	0,113	7,877	0,384
Σύνολο	1,319	1,000	69,429	0,270

Πίνακας 9-23: Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης

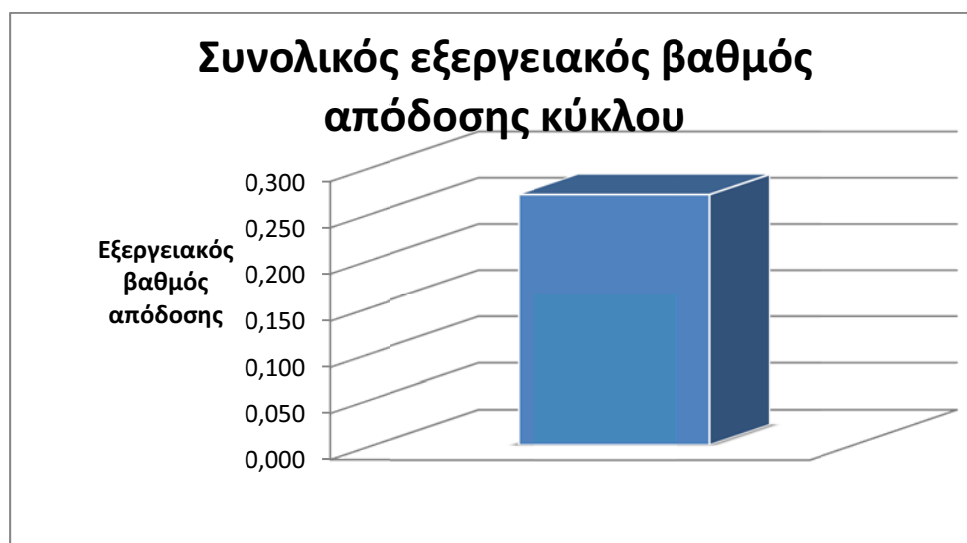


Σχήμα 9-9: Λόγοι καταστροφής εξέργειας συστατικού

Στα Σχήματα 9.10 και 9.11 παρουσιάζονται οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης των συσκευών και ο συνολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής με καύσιμο βιοαέριο.



Σχήμα 9-10: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών



Σχήμα 9-11: Συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης κύκλου

9.4 Αποτελέσματα οικονομικών υπολογισμών

Το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης για το σταθμό βιοαερίου και το σύστημα συμπαραγωγής προκύπτει με βάση την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Για το συγκεκριμένο σταθμό όπου $W_e = 419.08kW$ το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης προκύπτει:

Κόστος εγκατάστασης σταθμού Α.Χ.	ADC	€	1.424.868,15
Κόστος εγκατάστασης συμπαραγωγής	CHPC	€	419.078,87
Σταθερό κεφάλαιο επένδυσης	FCI	€	1.843.947,02

Πίνακας 9-24: Σταθερό κεφάλαιο επένδυσης

Το κεφάλαιο κίνησης και το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης είναι τελικά:

Κεφάλαιο κίνησης	WC	€	92.197,35
Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης	TCI	€	1.936.144,37

Πίνακας 9-25: Κεφάλαιο κίνησης και συνολικό κεφάλαιο επένδυσης

Τα έσοδα του σταθμού προκύπτουν από τη διοχέτευση της ηλεκτρικής ενέργειας στο δημόσιο δίκτυο, την πώληση θερμικής ενέργειας σε καταναλωτές και την πώληση του λιπάσματος που παράγεται από τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.

Έσοδα ανά έτος			
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας	t_e	ώρες	8600
Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	FIT_e	€/kWh	0,253
Έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	ER	€/έτος	870.695,88
Ώρες λειτουργίας εναλλάκτη για πώληση θερμικής ενέργειας	t_{th}	ώρες	3720
Θερμικές απώλειες δικτύου		%	13,50%
Τιμή πώλησης θερμικής ενέργειας	FIT_{th}	€/kWh	0,05
Έσοδα από την πώληση θερμικής ενέργειας	ThR	€/έτος	50.171,25
Έσοδα από την πώληση λιπάσματος	FR	€/έτος	2.500,00
Συνολικά έσοδα	TR	€/έτος	923.367,13

Πίνακας 9-26: Έσοδα από τη λειτουργία του σταθμού ανά έτος

Από τη λειτουργία του σταθμού προκύπτουν τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Αυτά, όπως φαίνεται στην παράγραφο 7.2, είναι το άθροισμα των επιμέρους εξόδων μεταφοράς υποστρωμάτων, καλλιέργειας των ενεργειακών φυτών, συντήρησης, αμοιβών προσωπικού και ασφάλισης. Για τον υπολογισμό του κόστους μεταφοράς θεωρείται ότι η μέση απόσταση είναι η ίδια για όλα τα υποστρώματα και η κατανάλωση καυσίμου είναι η ίδια για τα διάφορα είδη ζωικών αποβλήτων και αντίστοιχα για τα στερεά υποστρώματα.

Ετήσια κόστη λειτουργίας			
Ποσοστό κόστους συντήρησης επί FCI		%	2,00%
Ετήσιο κόστος συντήρησης	MC	€/έτος	36.878,94
Θερμογόνος δύναμη πετρελαίου		MJ/l	35,94
Κόστος πετρελαίου		€/l	1,35
Μέση απόσταση		km	15
Κόστος μεταφοράς	TC	€/έτος	70.993,32

Κόστος καλλιέργειας ανά εκτάριο		€/he	1.000,00
Κόστος καλλιέργειας	CC	€/έτος	62.500,00
Κόστος εργατοώρας	PC _{spec}	€/ώρα	20
Εργατοώρες ανά έτος	t _p	ώρες	3000
Κόστος αμοιβών προσωπικού	PC	€/έτος	60.000,00
Ποσοστό ασφάλισης επί TCI	z	%	0,3
Κόστος ασφάλισης	IC	€/έτος	5.531,84
Συνολικό κόστος	OMC	€/έτος	235.904,10

Πίνακας 9-27: Κόστος λειτουργίας του σταθμού

Οι αποσβέσεις για τον εξοπλισμό αναερόβιας χώνευσης και συμπαραγωγής υπολογίζονται για 20 και 4 έτη αντίστοιχα.

Αποσβέσεις			
Αποσβέσεις αναερόβιας χώνευσης	D _{AD}	€/έτος	71.243,41
Αποσβέσεις συμπαραγωγής	D _{CHP}	€/έτος	104.769,72

Πίνακας 9-28: Αποσβέσεις

Για την κατάρτιση του επιχειρηματικού πλάνου για τα είκοσι έτη που διαρκεί η σύμβαση του επενδυτή με τον λειτουργό αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι χρήσιμα τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τη χρηματοδότηση του έργου. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 9.29.

Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης	1.936.144 €
Ιδία κεφάλαια	1.000.000 €
Τραπεζικός δανεισμός	936.144 €
Διάρκεια δανείου	10 έτη
Επιτόκιο	9,50%
Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	0,253€
Τιμή πώλησης θερμικής ενέργειας	0,05€
Πληθωρισμός	3%
Ετήσια αναπροσαρμογής τιμής πώλησης ενέργειας	0%
Ετήσια μείωση απόδοσης	1,0%
Διάφοροι φόροι (εκτός εισοδήματος)	5,0%

Πίνακας 9-29: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης

Στον Πίνακα 9.30 και στο Σχήμα 9.12 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικές χρηματοροές της επένδυσης για είκοσι έτη λειτουργίας. Η πληρωμή του δανείου γίνεται με δύο δόσεις ανά έτος.

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Χρηματορροές	-έτος 1	έτος 0	έτος 1	έτος 2	έτος 3	έτος 4	έτος 5	έτος 6	έτος 7	έτος 8
Έσοδα										
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας			870.695,88 €	861.988,92 €	853.369,03 €	844.835,34 €	836.386,98 €	828.023,11 €	819.742,88 €	811.545,45 €
Έσοδα από πώληση θερμικής ενέργειας			50.171,25 €	49.669,54 €	49.172,85 €	48.681,12 €	48.194,31 €	47.712,36 €	47.235,24 €	46.762,89 €
Έσοδα από πώληση λιπάσματος			2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €
Συνολικά έσοδα			923.367,13 €	914.158,46 €	905.041,88 €	896.016,46 €	887.081,29 €	878.235,48 €	869.478,12 €	860.808,34 €
Έξοδα										
Συνολικά κόστη λειτουργίας			235.904,10 €	242.981,23 €	250.270,66 €	257.778,78 €	265.512,15 €	273.477,51 €	281.681,84 €	290.132,29 €
EBITDA			687.463,03 €	671.177,23 €	654.771,21 €	638.237,67 €	621.569,14 €	604.757,97 €	587.796,29 €	570.676,05 €
Υποχρεώσεις										
Χρεολύσια			60.162,40 €	65.877,82 €	72.136,22 €	78.989,16 €	86.493,13 €	94.709,97 €	103.707,42 €	113.559,63 €
Τόκοι			88.933,71 €	83.218,29 €	76.959,89 €	70.106,95 €	62.602,98 €	54.386,14 €	45.388,69 €	35.536,48 €
Συνολικές υποχρεώσεις			149.096,11 €	149.096,11 €	149.096,11 €	149.096,11 €	149.096,11 €	149.096,11 €	149.096,11 €	149.096,11 €
Φόροι			34.373,15 €	33.558,86 €	32.738,56 €	31.911,88 €	31.078,46 €	30.237,90 €	29.389,81 €	28.533,80 €
Κέρδη προ αποσβέσεων		-1.936.144,37 €	503.993,77 €	488.522,26 €	472.936,54 €	457.229,68 €	441.394,58 €	425.423,96 €	409.310,36 €	393.046,14 €
Αποσβέσεις										
Συνολικές αποσβέσεις			176.013,12 €	176.013,12 €	176.013,12 €	176.013,12 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €
EBIT			327.980,64 €	312.509,14 €	296.923,42 €	281.216,55 €	370.151,17 €	354.180,55 €	338.066,95 €	321.802,73 €
Χρηματοροή	0,00 €	-1.936.144,37 €	-1.432.150,60 €	-943.628,34 €	-470.691,80 €	-13.462,12 €	427.932,45 €	853.356,41 €	1.262.666,77 €	1.655.712,91 €

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

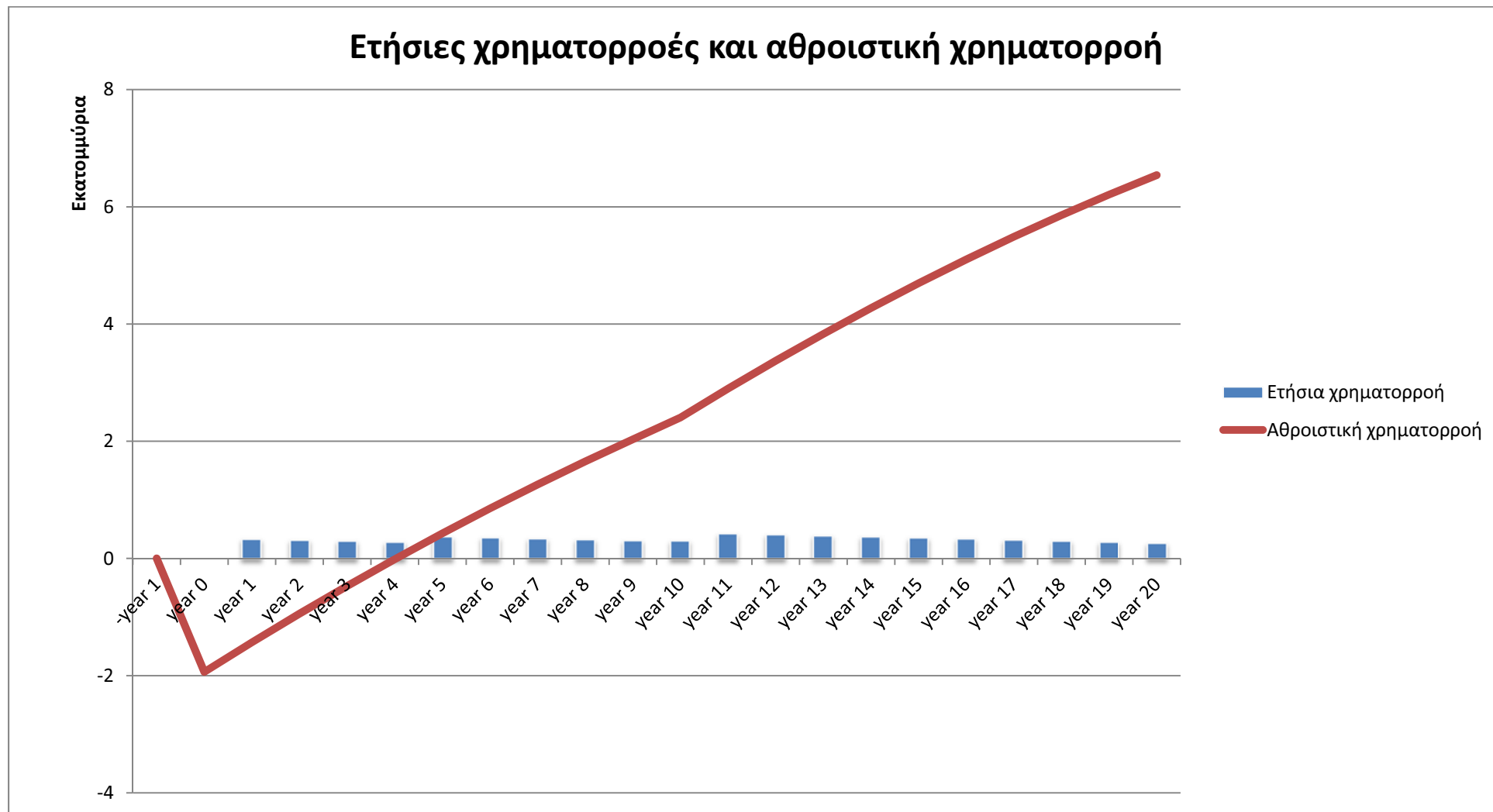
Χρηματορροές	έτος 9	έτος 10	έτος 11	έτος 12	έτος 13	έτος 14	έτος 15	έτος 16	έτος 17
Έσοδα									
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	803.430,00 €	795.395,70 €	787.441,74 €	779.567,33 €	771.771,65 €	764.053,94 €	756.413,40 €	748.849,26 €	741.360,77 €
Έσοδα από πώληση θερμικής ενέργειας	46.295,26 €	45.832,31 €	45.373,98 €	44.920,24 €	44.471,04 €	44.026,33 €	43.586,07 €	43.150,21 €	42.718,70 €
Έσοδα από πώληση λιπασματος	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €
Συνολικά έσοδα	852.225,26 €	843.728,01 €	835.315,73 €	826.987,57 €	818.742,69 €	810.580,27 €	802.499,46 €	794.499,47 €	786.579,47 €
Έξοδα									
Συνολικά κόστη λειτουργίας	298.836,26 €	307.801,35 €	317.035,39 €	326.546,45 €	336.342,84 €	346.433,13 €	356.826,12 €	367.530,91 €	378.556,83 €
EBITDA	553.389,00 €	535.926,66 €	518.280,34 €	500.441,12 €	482.399,85 €	464.147,14 €	445.673,34 €	426.968,56 €	408.022,64 €
Υποχρεώσεις									
Χρεολύσια	124.347,79 €	123.225,55 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Τόκοι	24.748,32 €	12.935,28 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Συνολικές υποχρεώσεις	149.096,11 €	136.160,83 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Φόροι	27.669,45 €	26.796,33 €	25.914,02 €	25.022,06 €	24.119,99 €	23.207,36 €	22.283,67 €	21.348,43 €	20.401,13 €
Κέρδη προ αποσβέσεων	376.623,44 €	372.969,49 €	492.366,32 €	475.419,06 €	458.279,86 €	440.939,78 €	423.389,67 €	405.620,13 €	387.621,51 €
Αποσβέσεις									
Συνολικές αποσβέσεις	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €
EBIT	305.380,03 €	301.726,09 €	421.122,91 €	404.175,66 €	387.036,45 €	369.696,37 €	352.146,27 €	334.376,73 €	316.378,10 €
Χρηματοροή	2.032.336,35 €	2.405.305,84 €	2.897.672,16 €	3.373.091,23 €	3.831.371,09 €	4.272.310,87 €	4.695.700,54 €	5.101.320,67 €	5.488.942,18 €

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Χρηματοροές	έτος 18	έτος 19	έτος 20
Έσοδα			
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	733.947,16 €	726.607,69 €	719.341,61 €
Έσοδα από πώληση θερμικής ενέργειας	42.291,52 €	41.868,60 €	41.449,92 €
Έσοδα από πώληση λιπάσματος	2.500,00 €	2.500,00 €	2.500,00 €
Συνολικά έσοδα	778.738,68 €	770.976,29 €	763.291,53 €
Έξοδα			
Συνολικά κόστη λειτουργίας	389.913,54 €	401.610,95 €	413.659,27 €
EBITDA	388.825,14 €	369.365,35 €	349.632,26 €
Υποχρεώσεις			
Χρεολύσια	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Τόκοι	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Συνολικές υποχρεώσεις	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Φόροι	19.441,26 €	18.468,27 €	17.481,61 €
Κέρδη προ αποσβέσεων	369.383,88 €	350.897,08 €	332.150,64 €
Αποσβέσεις			
Συνολικές αποσβέσεις	71.243,41 €	71.243,41 €	71.243,41 €
EBIT	298.140,48 €	279.653,67 €	260.907,24 €
Χρηματοροή	5.858.326,07 €	6.209.223,15 €	6.541.373,79 €

Πίνακας 9-30: Βασικές χρηματοροές επένδυσης



Σχήμα 9-12: Ετήσιες χρηματοροές και αθροιστική χρηματοροή

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης IRR που προκύπτει είναι 23%.

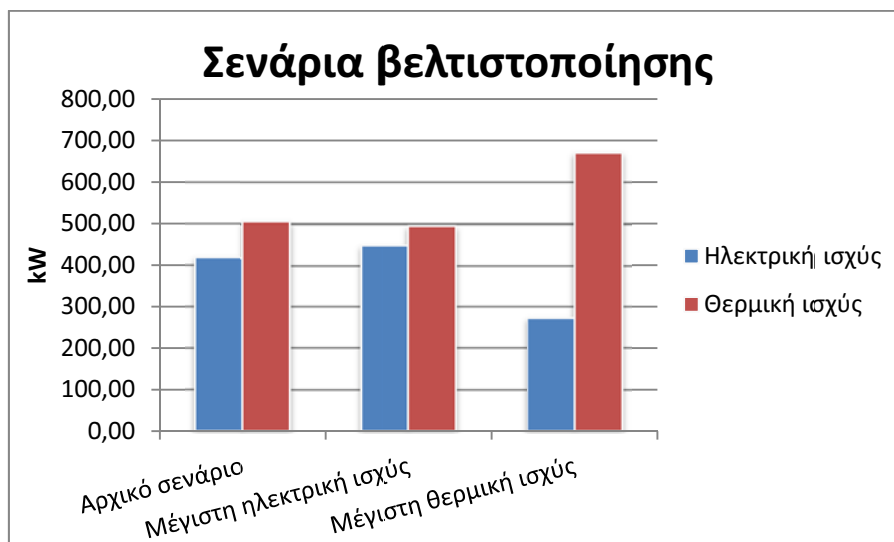
9.5 Βελτιστοποίηση

Αλλάζοντας τις τιμές των μεταβλητών απόφασης γίνεται η βελτιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η βελτιστοποίηση αφορά τη μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος και επομένως του εξεργειακού βαθμού απόδοσης και η μεγιστοποίηση της θερμικής ισχύος. Στον Πίνακα 9.31 που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι μεταβλητές απόφασης για κάθε περίπτωση και τα αποτελέσματα όπως ισχύς, θερμικοί βαθμοί απόδοσης και εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης.

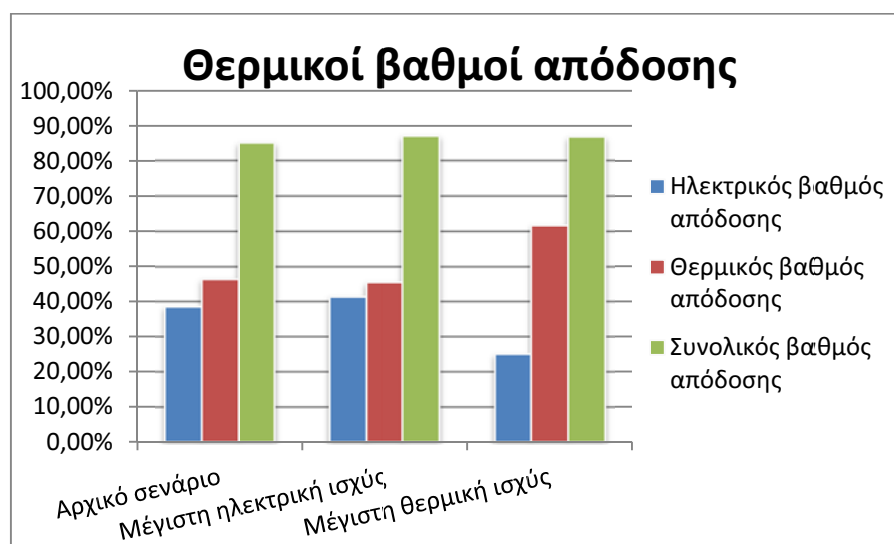
Μεταβλητές Απόφασης	W_e (kW)	n_e (%)	W_{th} (kW)	n_{th} (%)	n (%)	Εξ.Βαθμ.Απ.	
Αρχικό σενάριο							
P_2/P_1	8,00						
n_{sc}	82,00%						
n_{st}	86,00%	419,08	38,55%	505,80	46,53%	85,07%	26,97%
T_3	900						
T_4	1450						
Βελτιστοποίηση προς ηλεκτρική ισχύ							
P_2/P_1	8,89						
n_{sc}	83,00%						
n_{st}	86,00%	449,66	41,36%	496,22	45,64%	87,01%	28,48%
T_3	950						
T_4	1550						
Βελτιστοποίηση προς θερμική ισχύ							
P_2/P_1	12,68						
n_{sc}	80,00%						
n_{st}	80,00%	272,49	25,06%	670,73	61,70%	86,76%	20,85%
T_3	751						
T_4	1356						

Πίνακας 9-31: Βελτιστοποίηση προς ηλεκτρική ισχύ και θερμική ισχύ

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται η ηλεκτρική και η θερμική ισχύς που παράγονται και οι θερμικοί βαθμοί απόδοσης για κάθε σενάριο. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι κατά τη βελτιστοποίηση με σκοπό τη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ πετυχαίνεται και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης και ο μέγιστος εξεργειακός βαθμός απόδοσης για τον κύκλο της συμπαραγωγής.



Σχήμα 9-13: Σενάρια βελτιστοποίησης



Σχήμα 9-14: Βαθμοί απόδοσης για τα σενάρια βελτιστοποίησης

9.6 Εναλλακτικό σενάριο αξιοποίησης βιοαερίου

Εναλλακτικά το παραγόμενο βιοαέριο αντί να οδηγηθεί στη μηχανή συμπαραγωγής δύναται να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο και να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση ο εξοπλισμός της αναερόβιας χώνευσης παραμένει ο ίδιος και αντί για συμπαραγωγή υπάρχει ο εξοπλισμός αναβάθμισης του βιοαερίου. Στο παρόν μελετάται η αναβάθμιση βιοαερίου με τη μέθοδο της απορρόφησης νερού.

Το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης υπολογίζεται:

Κόστος εγκατάστασης σταθμού Α.Χ.	ADC	€	1.424.868,15
Κόστος εγκατάστασης συμπαραγωγής	CHPC	€	1.000.000,00
Σταθερό κεφάλαιο επένδυσης	FCI	€	2.424.868,15

Κεφάλαιο κίνησης	WC	€	121.243,41
Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης	TCI	€	2.546.111,56

Πίνακας 9-32: Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης αναβάθμισης βιοαερίου

Τα έσοδα του σταθμού προκύπτουν από την πώληση του βιομεθανίου, σύμφωνα με την τιμή πώλησης φυσικού αερίου από τη ΔΕΠΑ για κίνηση οχημάτων και την πώληση του χωνεμένου υπολείμματος. Κατά την αναβάθμιση του βιοαερίου θεωρούνται απώλειες μεθανίου 2% και στο βιομεθάνιο η περιεκτικότητα είναι 97% μεθάνιο.

Έσοδα ανά έτος			
Παραγόμενο βιομεθάνιο	t_e	$m^3/έτος$	699.814,05
Τιμή πώλησης βιομεθανίου	FIT_b	€/kg	0,977
Έσοδα από την πώληση βιομεθανίου	BR	€/έτος	683.718,32
Έσοδα από την πώληση λιπάσματος	FR	€/έτος	2.500,00
Συνολικά έσοδα	TR	€/έτος	686.218,32

Πίνακας 9-33: Έσοδα από τη λειτουργία του σταθμού βιομεθανίου ανά έτος

Από τη λειτουργία του σταθμού προκύπτουν τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Αυτά, όπως φαίνεται στην παράγραφο 7.2, είναι το άθροισμα των επιμέρους εξόδων μεταφοράς υποστρωμάτων, καλλιέργειας των ενεργειακών φυτών, συντήρησης, αμοιβών προσωπικού και ασφάλισης. Για τον υπολογισμό του κόστους μεταφοράς θεωρείται ότι η μέση απόσταση είναι η ίδια για όλα τα υποστρώματα και η κατανάλωση καυσίμου είναι η ίδια για τα διάφορα είδη ζωικών αποβλήτων και αντίστοιχα για τα στερεά υποστρώματα. Για το σύστημα αναβάθμισης προκύπτει ένα επιπλέον κόστος λειτουργίας ανά έτος.

Ετήσια κόστη λειτουργίας			
Κόστος λειτουργίας συστήματος αναβάθμισης	BC	€/έτος	50.000,00
Ποσοστό κόστους συντήρησης επί FCI		%	2,00%
Ετήσιο κόστος συντήρησης	MC	€/έτος	48.498,36
Θερμογόνος δύναμη πετρελαίου		MJ/l	35,94
Κόστος πετρελαίου		€/l	1,35
Μέση απόσταση		km	15
Κόστος μεταφοράς	TC	€/έτος	70.993,32
Κόστος καλλιέργειας ανά εκτάριο		€/he	1.000,00
Κόστος καλλιέργειας	CC	€/έτος	62.500,00
Κόστος εργατοώρας	PC_{spec}	€/ώρα	20
Εργατοώρες ανά έτος	t_p	ώρες	3000
Κόστος αμοιβών προσωπικού	PC	€/έτος	60.000,00
Ποσοστό ασφάλισης επί TCI	z	%	0,3
Κόστος ασφάλισης	IC	€/έτος	4.274,60
Συνολικό κόστος	OMC	€/έτος	296.265,29

Πίνακας 9-34: Κόστος λειτουργίας του σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου

Οι αποσβέσεις για τον εξοπλισμό αναερόβιας χώνευσης και αναβάθμισης βιοαερίου υπολογίζονται για 20 και 15 έτη αντίστοιχα.

Αποσβέσεις			
Αποσβέσεις αναερόβιας χώνευσης	D _{AD}	€/έτος	71.243,41
Αποσβέσεις αναβάθμισης	D _{BU}	€/έτος	66.666,67

Πίνακας 9-35: Αποσβέσεις σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου

Για την κατάρτιση του επιχειρηματικού πλάνου για είκοσι έτη είναι χρήσιμα τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τη χρηματοδότηση του έργου. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 9.36.

Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης	2.546.112 €
Ιδία κεφάλαια	1.000.000 €
Τραπεζικός δανεισμός	1.546.112 €
Διάρκεια δανείου	10 έτη
Επιτόκιο	9,50%
Τιμή πώλησης βιομεθανίου	0,977 €
Πληθωρισμός	3%
Ετήσια αναπροσαρμογής τιμής πώλησης βιομεθανίου	1,0%
Ετήσια μείωση απόδοσης	1,0%
Διάφοροι φόροι (εκτός εισοδήματος)	5,0%

Πίνακας 9-36: Οικονομικά στοιχεία επένδυσης σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου

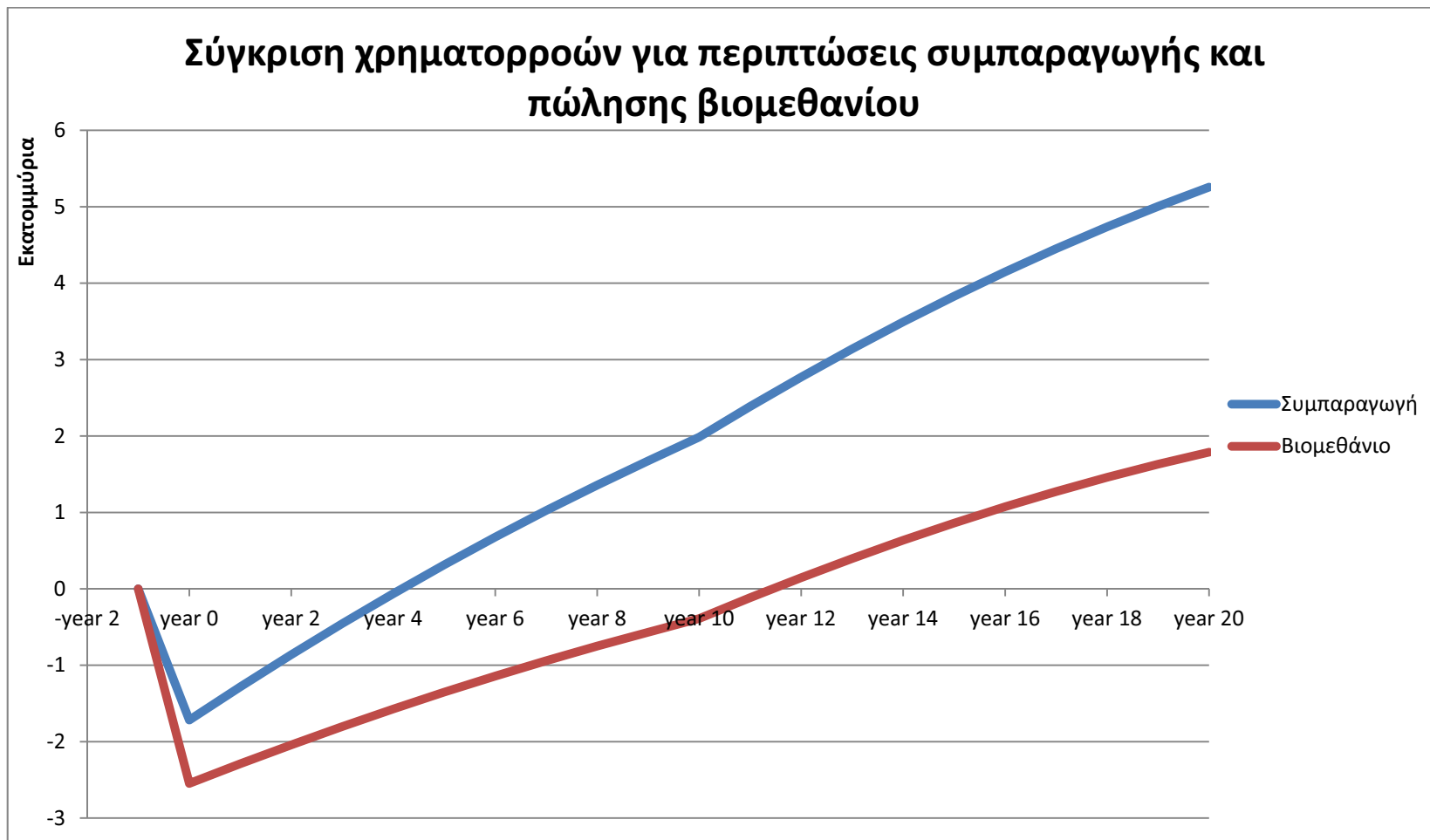
Στον Πίνακα 9.37 που ακολουθεί παρουσιάζεται η χρηματορροή της επένδυσης για είκοσι έτη λειτουργίας. Η πληρωμή του δανείου γίνεται με δύο δόσεις ανά έτος.

	έτος -1	έτος 0	έτος 1	έτος 2	έτος 3	έτος 4	έτος 5	έτος 6
Χρηματορροή	0,00 €	-2.546.111,56 €	-2.289.971,91 €	-2.042.317,03 €	-1.803.399,98 €	-1.573.481,42 €	-1.352.829,82 €	-1.141.721,74 €
	έτος 7	έτος 8	έτος 9	έτος 10	έτος 11	έτος 12	έτος 13	έτος 14
Χρηματορροή	-940.442,02 €	-749.284,06 €	-568.550,05 €	-388.633,48 €	-115.374,82 €	146.497,75 €	396.644,06 €	634.713,77 €
	έτος 15	έτος 16	έτος 17	έτος 18	έτος 19	έτος 20		
Χρηματορροή	860.345,98 €	1.073.168,99 €	1.272.799,93 €	1.458.844,42 €	1.630.896,28 €	1.788.537,12 €		

Πίνακας 9-37: Χρηματορροή για είκοσι έτη λειτουργίας σταθμού αναβάθμισης βιοαερίου

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR υπολογίζεται 6% και κρίνεται χαμηλός. Η επένδυση κρίνεται σκόπιμη για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις όπου μειώνεται το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης.

Στο Σχήμα 9.15 παρουσιάζεται η σύγκριση των χρηματορροών για το σταθμό συμπαραγωγής και αναβάθμισης βιοαερίου.



Σχήμα 9-15: Σύγκριση χρηματοροών σταθμού συμπαραγωγής και αναβάθμισης βιοαερίου

Κεφάλαιο 10 Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να τονιστούν τα κυριότερα στοιχεία που προκύπτουν από τη σχεδίαση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης για παραγωγή βιοαερίου και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Βασική πηγή υποστρωμάτων για το σταθμό αναερόβιας χώνευσης αποτελούν τα ζωικά απόβλητα από φάρμες που βρίσκονται γύρω από την εγκατάσταση. Γι αυτό το λόγο επιλέγεται η εγκατάσταση να κατασκευαστεί σε τοποθεσία ανάμεσα σε φάρμες, ώστε να είναι μικρή η απόσταση μεταφοράς των υποστρωμάτων. Παράλληλα για την ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου, λόγω της μικρής απόδοσης των ζωικών αποβλήτων, χρησιμοποιούνται ενεργειακές καλλιέργειες και διάφορα άλλα απόβλητα, όπως λαχανικά ή φρούτα. Συνολικά στο σταθμό εισέρχονται 35.000t υποστρωμάτων ανά έτος και από την αναερόβια χώνευση παράγονται 1.694.600m³ βιοαερίου με περιεκτικότητα 65% κατ' όγκο μεθάνιο. Το χωνεμένο υπόλειμμα που προκύπτει από τη χώνευση χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό στις καλλιέργειες.

Το βιοαέριο οδηγείται σε θάλαμο καύσης όπου καίγεται και τα καυσαέρια που παράγονται κινούν αεριοστρόβιλο. Ο αεριοστρόβιλος είναι συνδεδεμένος σε άξονα με ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Με την έξοδό τους από τον αεριοστρόβιλο τα καυσαέρια περνούν από εναλλάκτη θερμότητας όπου θερμαίνουν νερό, που καλύπτει τις ανάγκες της χώνευσης ενώ η πλεονάζουσα θερμότητα μπορεί να διοχετευθεί σε καταναλωτές. Από τον κύκλο συμπαραγωγής τελικά παράγονται 419,08kW ηλεκτρικής ισχύος και 505,79kW θερμικής ισχύος. Για τις ανάγκες της χώνευσης απαιτούνται 18,91kW ηλεκτρικής ισχύος και 147,31kW θερμικής ισχύος. Οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί έδειξαν έναν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 38,55%, θερμικό βαθμό απόδοσης 46,53% ενώ συνολικά για τον κύκλο συμπαραγωγής ο βαθμός απόδοσης είναι 85,07%. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για τη συμπαραγωγή προκύπτει 26,97%.

Σαν επένδυση, η εγκατάσταση ενός σταθμού αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει πού υψηλό εσωτερικό βαθμό απόδοσης (23%), κατά πολύ υψηλότερο από τα επιτόκια των χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων. Το συνολικό κεφάλαιο επένδυσης αρχικά είναι 1.936.144,37€, ενώ η πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται αποφέρει έσοδα 870.695,88€ για τον πρώτο χρόνο και έτσι επιτυγχάνεται απόσβεση σε περίπου τέσσερα έτη.

Όταν ο σταθμός λειτουργεί με σκοπό την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο και δεν χρειάζεται τη θερμική ενέργεια κρίνεται σκόπιμη η βελτιστοποίηση ως προς τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Σε αυτή την περίπτωση η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς γίνεται 449,66kW και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 41,36%. Τα έσοδα επίσης, σε βάθος είκοσι ετών, είναι περισσότερα.

Η θερμική ενέργεια που παράγεται μπορεί να αποτελέσει επιπλέον πηγή εσόδων. Εκτός από την κάλυψη των αναγκών της χώνευσης και της θέρμανσης των κτιριακών εγκαταστάσεων, θα μπορούσε να κατασκευαστεί δίκτυο τηλεθέρμανσης για τη θέρμανση κοντινών κτιρίων. Επίσης σημαντική ποσότητα θερμικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση γειτονικών θερμοκηπίων. Για την αξιοποίηση

της θερμικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου είναι δυνατή η εγκατάσταση ψυκτών απορρόφησης για κλιματισμό χώρων.

Η επένδυση της αναβάθμισης σε βιομεθάνιο στην Ελλάδα δεν κρίνεται οικονομικά σκόπιμη εξαιτίας του χαμηλού βαθμού εσωτερικής απόδοσης. Αντίθετα προκρίνεται η συμπαραγωγή με καύσιμο βιοαέριο κυρίως εξαιτίας της υψηλής τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] D. G. f. Sonnenenergie, and ECOFYS, *Planning and Installing Bioenergy Systems: A Guide for Installers, Architects, and Engineers*: James & James/Earthscan, 2005.
- [2] *BISYPLAN web-based Handbook*, 2012.
- [3] D. Deublein, and A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*: Wiley, 2011.
- [4] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*: Wiley, 1996.
- [5] P. P. Walsh, and P. Fletcher, *Gas Turbine Performance, Second Edition*: Blackwell Science, Limited, 2004.
- [6] M. P. Boyce, *Gas turbine engineering handbook, fourth edition*: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2011.
- [7] Y. A. Çengel, and M. A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*: McGraw-Hill Higher Education, 2006.
- [8] R. C. Brown, and C. Stevens, *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*: Wiley, 2011.
- [9] D. Palmer, *Principles & Fundamentals of Biomass Boiler System Design*: Carbon Trust, 2010.
- [10] Γ. Κοντοκόστας, “Τηλεθέρμανση Κοζάνης - Ενεργειακά ισοζύγια περιόδου 2007-2008,” Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009.
- [11] Κ. Δραβίλλας, “Ανάπτυξη Διβάθμιου Συστήματος Παραγωγής Βιοαερίου από Στερεά Απόβλητα και Βιομάζα,” Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- [12] T. A. Seadi, D. Rutz, H. Prassl *et al.*, *Biogas Handbook*: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- [13] E. P. Agency, "European Waste Catalogue and Hazardous Waste List," Environmental Protection Agency, 2002.
- [14] T. A. Seadi, *Good Practice in Quality Management of AD Residues from Biogas Production*: University of Southern Denmark.
- [15] S. Khanal, *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*: Wiley, 2011.
- [16] R. F. Daniel de Graaf, *Biogas Production in Germany*: Federal Environment Agency, 2010.
- [17] S. Van Loo, and J. Koppejan, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*: Earthscan LLC, 2007.
- [18] A. Wellinger, J. Murphy, and D. Baxter, *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*: Woodhead Publishing Limited, 2013.

- [19] Δ. Χατζηγεωργίου, *Σημειώσεις Ηλεκτροτεχνίας Ηλεκτρικών μηχανών*: ΑΠΘ, 2003.
- [20] Δ. Π. Ψωινός, *Οργάνωση και Διοίκηση Εργοστασίων*: Ζήτη, 1990.
- [21] M. Pöschl, S. Ward, and P. Owende, “Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways,” *Applied Energy*, vol. 87, no. 11, pp. 3305-3321, 11//, 2010.
- [22] T. Spachos, and A. Stamatis, “Thermal analysis and optimization of an anaerobic treatment system of whey,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2097-2105, 8//, 2011.
- [23] Y. Jaluria, *Design and Optimization of Thermal Systems, Second Edition*: Taylor & Francis, 2007.
- [24] Α. Σταμάτης, *Σημειώσεις μαθήματος "Σχεδιασμός Ενεργειακών Συστημάτων"*: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2006.
- [25] Χ. Ζαφείρης, “Αναβάθμιση Βιοαερίου σε Βιομεθάνιο, Χρήση σαν Καύσιμο Μεταφορών ή Έγχυση του στο Δίκτυο του Φυσικού Αερίου,” in ΚΑΠΕ, pp. 8.
- [26] E. H. M. Dirkse, “Biogas Upgrading Using the DMT TS-PWS Technology.”