



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ **ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΣΥΜΕΩΝΙΔΗ**

ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής

Γεράσιμος Λυμπεράτος

ΑΘΗΝΑ, 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΣΥΜΕΩΝΙΔΗ

ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής

Γεράσιμος Λυμπεράτος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Γεράσιμος Λυμπεράτος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Απόστολος Βλυσίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ελένη Γρηγοροπούλου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....
Χαράλαμπος Σ. Συμεωνίδης

Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Copyright © Χαράλαμπος Σ. Συμεωνίδης, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αν και αποτελεί επιστέγασμα των προπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δεν θα μπορούσε να θεωρηθεί έργο αποκλειστικά ενός ατόμου. Υπήρξαν πολλοί που στάθηκαν αρωγοί για την διεκπεραίωση της και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Κύριο Γεράσιμο Λυμπεράτο. Τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα αλλά και τις πολύτιμες κατευθυντήριες συμβουλές και γνώσεις του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Γιώργο Λύτρα για τη καθημερινή παρακολούθηση της εργασίας από την αρχή ως το τέλος, και την παρότρυνση για περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη του θέματος. Καθοριστικό ρόλο για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αποτέλεσαν επίσης οι συμβουλές του διδάκτορα Δημήτρη Μαθιουδάκη τον οποίο και ευχαριστώ πολύ. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συνεργασία που είχαμε και την συνεισφορά της στην υλοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας τη συνάδελφο από το εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον κύριο Απόστολο Βλυσίδα, καθηγητή Ε.Μ.Π. και την κυρία Ελένη Γρηγοροπούλου, καθηγήτρια Ε.Μ.Π. για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην αξιολόγηση της προσπάθειας μου καθώς και για τον χρόνο που διέθεσαν στην ανάγνωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή, συνεργάτη και συνοδοιπόρο σε αυτό το όμορφο ταξίδι της κοινής ακαδημαϊκής μας πορείας, Χρήστο Βλόντζο. Ευχαριστώ επίσης την ξαδέρφη μου Ελένη, η οποία με βοήθησε με τις πολύτιμες συμβουλές της να διεκπεραιώσω τη διπλωματική μου εργασία. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για όλα αυτά που περάσαμε αυτά τα χρόνια και τις κοινές αναμνήσεις που μοιραζόμαστε. Ιδιαίτερο ευχαριστώ στη φίλη μου Κατερίνα, για την διαρκή στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Στρατούλα και Μάκη αλλά και τον παππού μου Χαράλαμπο, και την γιαγιά μου Ελένη, για την ανατροφή και τα εφόδια που μου έχουν δώσει ώστε να φθάσω έως εδώ, την αγάπη τους αλλά και την διαρκή τους καθημερινή στήριξη.

Πίνακας περιεχομένων

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	10
Περιεχόμενα Εικόνων.....	11
Περιεχόμενα Πινάκων	12
Περίληψη	13
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	17
1.1 Εισαγωγή στα Απόβλητα	17
1.1.1 Αστικά στερεά απορρίμματα	17
1.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά συστατικών των αποβλήτων	20
1.3 Εισαγωγή στη διαχείριση αποβλήτων	20
1.4 Μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης των απορριμμάτων	23
1.5 Η Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική.....	24
1.6 Ευρωπαϊκοί στόχοι.....	25
1.7 Η τρέχουσα κατάσταση στην Ελλάδα	28
Κεφάλαιο 2 - Κυκλική Οικονομία και Πράσινη Επιχειρηματικότητα	30
2.1 Από το γραμμικό μοντέλο οικονομίας σε αυτό της Κυκλικής Οικονομίας.....	30
2.2 Ο ρόλος των επιχειρήσεων	31
2.3 Ο ρόλος του Βιοαερίου στο μοντέλο ανάπτυξης της Κυκλικής Οικονομίας	34
2.4 Εφαρμογές και οφέλη του βιοαερίου στο μοντέλο ανάπτυξης της κυκλικής οικονομίας..	36
2.4.1 Case Study σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	36
2.5 Η εξέλιξη των μονάδων βιοαερίου στην Ε.Ε.....	37
2.6 Η θέση της Ελλάδας στην παραγωγή Βιοαερίου	41
2.7 Το πρόγραμμα Waste4Think στα πλαίσια της Κυκλικής Οικονομίας	42
Κεφάλαιο 3 – Θεωρητικό υπόβαθρο	44

3.1 Η Αναερόβια Χώνευση (Anaerobic Digestion-AD).....	44
3.1.1 Τα βασικά στάδια της αναερόβιας χώνευσης	46
3.1.2 Παράμετροι της αναερόβιας χώνευσης	48
3.2 Βιοαέριο και σύσταση.....	50
3.3 Τεχνικές αναβάθμισης βιοαερίου	51
3.3.2 Φυσική απορρόφηση με νερό (Water Scrubbing)	53
3.3.2 Πλυντρίδα με Οργανικούς διαλύτες (Organic Solvent Scrubbing)	55
3.3.3 Μέθοδος χημικής απορρόφησης με τη χρήση Αμίνης.....	56
3.3.4 Διαχωρισμός μέσω Μembranών	57
3.3.5 Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (Pressure swing absorption-PSA).....	59
3.3.6 Κρυογενική μέθοδος (Cryogenic).....	60
3.4 Επιλογή διαλύτη.....	63
3.5 Αντίδραση MEA με CO ₂ και H ₂ S.....	63
3.6 Τεχνολογίες απομάκρυνσης για τις Σιλοξάνες (Siloxanes), Πτητικά στερεά (VOCs) και Halocarbons	64
3.6 Τεχνολογίες απομάκρυνσης για το O ₂ και το N ₂	65
Κεφάλαιο 4 – Ο σχεδιασμός της διεργασίας.....	66
4.1 Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας και απαιτήσεις τελικού προϊόντος.....	66
4.2 Σχεδιαστικοί Υπολογισμοί και Διαστασιολόγηση.....	67
4.2.1 Υπολογισμός του τελικού ρυθμού ροής	68
4.2.2 Διάμετρος της στήλης	74
Κεφάλαιο 5 – Υλικά και Μέθοδοι Πειραματικής διαδικασίας.....	78
5.1 Αντιδραστήρας αναερόβιας χώνευσης	78
5.1.1 Υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης - FORBI.....	78
5.2 Στήλη απορρόφησης εργαστηριακής κλίμακας και διάταξη αναγέννησης	79

5.3 Διάταξη αναγέννησης των κορεσμένων διαλυμάτων αμίνης σε ατμοσφαιρική πίεση.....	81
5.4 Διάταξη αναγέννησης κορεσμένου διαλύματος MEA υπό κενό	82
5.5 Μελέτη της κινητικής του κορεσμού των διαλυμάτων αμίνης σε CO ₂	82
5.6 MEA και MDEA.....	83
6. Πειραματική Διαδικασία.....	84
6.1 Μελέτη απορρόφησης CO ₂ από 30% διάλυμα MEA	84
6.1.1 Κινητική μελέτη του κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) σε CO ₂ για διαφορετικούς χρόνους αναγέννησης	84
6.1.2 Μέτρηση εκπομπών CO ₂ κατά την αναγέννηση του κορεσμένου υδατικού διαλύματος 30% MEA	90
6.1.3 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MEA με ταυτόχρονη συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση νερού	91
6.1.4 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MEA με ταυτόχρονη συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση MEA και καταιονισμό της στήλης ..	97
6.2 Συγκριτική ανάλυση αναβάθμισης του βιοαερίου με τη χρήση μίγματος 15% MEA-15% MDEA και 30% MDEA	105
6.3 Προοπτικές αναγέννησης κορεσμένου διαλύματος MEA υπό κενό	107
6.4. Συνολικό Διάγραμμα Ροής της Διεργασίας πιλοτικής κλίμακας (PID).....	109
6.5 Υπολογισμοί σχεδιασμού βάσει πειραματικών δεδομένων για το Scale-up της εγκατάστασης.....	110
6.5.1 Διαστασιολόγηση εγκατάστασης πιλοτικής κλίμακας	110
6.5.2 Προσδιορισμός της παροχής του φυσητήρα για την ανακυκλοφορία του βιοαερίου δια μέσω της στήλης απορρόφησης.....	111
6.7 Διάταξη της πιλοτικής κλίμακας.....	113
Κεφάλαιο 7 - Οικονομοτεχνική Ανάλυση Επενδυτικού έργου Αναβάθμισης βιοαερίου -Life Cycle Costing.....	115
7.1 Μεθοδολογία.....	115
6.2 Παραδοχές.....	115

6.3 Εκτίμηση για τα κόστη επένδυσης για κάθε τεχνική	116
6.4 Κόστη λειτουργίας (operating costs, OPEX) για κάθε τεχνική	122
6.5 Life Cycle Costing (LCC) για κάθε τεχνική	124
6.6 Ανάλυση ευαισθησίας.....	125
I. Επιτόκιο αναγωγής (Interest rate).....	126
II. Χρόνος ζωής (Depreciation period in Years).....	127
III. Δυναμικότητα.....	128
Κεφάλαιο 7 Συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας-Combined Heat and Power (CHP)	130
7.1 Εισαγωγή στη μέθοδο Combined Heat and Power (CHP)	130
7.2 Τεχνοοικονομική ανάλυση CHP.....	133
Συμπεράσματα	136
Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	139
Βιβλιογραφία	141

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ Α.Σ.Α. ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΙΣ Ε.Ε. ΚΑΤΑ ΤΟ ΕΤΟΣ ΤΟΥ 2016 (CEWER CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS, 2018).....	27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ Ε.Ε. ΑΝΑ ΕΤΟΣ(EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION, 2017)	38
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3. ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΗΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ (EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION, 2017)	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΣΕ GWh (EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION, 2017).....	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. Η ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΒΙΟΜΕΘΑΝΙΟ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, , 2017)	41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΧΩΡΑ ΤΗΣ Ε.Ε. (EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION, 2016).....	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ (D.J. BATSTONE, 2002)	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8. ΡΟΗ COD ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ, ΓΙΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ 10% ΑΔΡΑΝΗ ΚΑΙ 30% ΑΠΟ ΚΑΘΕΝΑ ΑΠΟ ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (ANGELIDAKI, 2002)	46
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9. ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΝΑ ΕΤΟΣ	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ (SONG ET AL.,2019)	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΦΗΣ/ΕΚΡΟΦΗΣΗΣ.....	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12. ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΔΙΑΛΥΤΗ	72
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ CO ₂ ΣΕ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ 30% ΜΕΑ ΣΤΟΥΣ 35°C.....	73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ 30% ΜΕΑ..	84
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 30% ΜΕΑ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΑΝΑΓΕΝΝΗΘΕΙ ΜΕΣΩ ΒΡΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 2 ΩΡΩΝ.....	86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ	88
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18. ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ 2 ΩΡΩΝ.	90
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ Ο ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ 30%ΜΕΑ	91
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	92
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 2Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 3Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	94
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 4Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	95
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 5Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	96
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 25. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ 30% ΜΕΑ..	98
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ	99
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 2Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ	100
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 3Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	101
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 4Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	102
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 30. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 5Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	103

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 31. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΔΙΗΛΘΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΕΑ-ΜΔΕΑ.....	105
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 32. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΔΙΗΛΘΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΔΕΑ	106
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 33. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ ΥΠΟ ΚΕΝΟ 30% ΜΕΑ.	108
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 34. ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ.....	111
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 35. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ LCC ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	125
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 36. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ LCC ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ CHEMICAL ABSORPTION ΚΑΙ ΤΟΥ CHP.	135

Περιεχόμενα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΠΥΡΑΜΙΔΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (NGAI WENG CHAN, 2016).....	21
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ, (ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ, 2018).....	30
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ (ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ, 2018).....	31
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΥΚΑΙΡΙΩΝ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΚΥΚΛΙΚΗ ΒΙΟΕΚΟΝΟΜΙΑ (IEA, 2014)	33
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΤΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ ΩΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΣ ΚΡΙΚΟΣ ΣΤΟ ΚΛΕΙΣΙΜΟ ΤΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ (ΒΙΟΓΑΣ ΑΣΤΙΟΝ-EUROPEAN UNION, 2017)	35
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΣ ΧΩΝΕΥΤΗΡΑΣ	44
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΠΙΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΕ 37 ΧΩΡΕΣ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΙΕΑ (IEA, 2013).52	
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (WATER SCRUBBING)	54
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΔΙΑΛΥΤΗ (Π.Χ ΔΙΜΕΘΥΛΛΑΙΘΕΡΩΝ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΚΗΣ ΓΛΥΚΟΛΗΣ - SELEXOL).....	56
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΚΑΤΑΡΡΑΚΤΗΣ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ ΜΕ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ (ΜΑΚΑΡΟΥΚ ΕΤ. ΑΛ., 2010).	58
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PSA	59
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	62
ΕΙΚΟΝΑ 14. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΓΙΑ ΤΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ	69
ΕΙΚΟΝΑ 15. GPDC CHART.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΣ ΧΩΝΕΥΤΗΡΑΣ 4m ³ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΤΟΥ FORBI.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ FORBI ΑΠΟ ΠΡΟΔΙΑΛΕΓΜΕΝΑ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΤΡΟΦΗΣ	79
ΕΙΚΟΝΑ 18. ΣΤΗΛΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ (ABSORBER).....	80
ΕΙΚΟΝΑ 19. ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΜΕΑ.....	81
ΕΙΚΟΝΑ 20. ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΜΕΑ ΥΠΟ ΚΕΝΟ/ROTARY ΕΒΑΠΟΡΑΤΟΡ	82
ΕΙΚΟΝΑ 21. ΔΟΧΕΙΟ ΜΟΝΟΑΙΘΑΝΟΛΑΜΙΝΗΣ (ΜΟΝΟΕΤΗΑΝΟΛΑΜΙΝ- ΜΕΑ)	83
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΕΑ (ΜΟΝΟΕΤΗΑΝΟΛΑΜΙΝΕ).....	85
ΕΙΚΟΝΑ 23. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΡΙD.	110
ΕΙΚΟΝΑ 24. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΝΔΙΑΣΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ (WBDG).....	131
ΕΙΚΟΝΑ 25. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ CHP (CLARKE ENERGY Co).	132

Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΗΣ Ε.Ε. ΚΑΤΑ ΤΑ ΕΤΗ 1995 ΕΩΣ ΚΑΙ 2017 (EUROSTAT, 2017)	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ.....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΤΟΥ FORBI.	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΡΕΥΜΑ ΑΕΡΙΟΥ CO ₂ ΚΑΙ CH ₄ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ 30% ΜΕΑ.	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΚΛΩΝ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΕΩΝ.....	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΑΛΥΤΕΡΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗ.	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 10. ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΑΛΥΤΕΡΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗ ΥΣΤΕΡΑ ΑΠΟ ΤΗ 1 ^η ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ.	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 11. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ LCC.	115
ΠΙΝΑΚΑΣ 12. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ CHEMICAL ABSORPTION.....	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 13. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ WATER SCRUBBING.	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 14. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ PSA.....	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 15. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ CRYOGENIC SEPARATION.....	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 16. ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ MEMBRANE SEPARATION.....	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 17. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΚΟΣΤΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 18. LIFE CYCLE COST ANALYSIS ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 19. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ LCC ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟ ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΑΝΑΓΩΓΗΣ (INTEREST RATE).	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 20. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ LCC ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ (DEPRECIATION PERIOD IN YEARS).	127
ΠΙΝΑΚΑΣ 21. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ LCC ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ.	128
ΠΙΝΑΚΑΣ 22. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ LCC ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ (ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ).	129
ΠΙΝΑΚΑΣ 23. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ. (ENERGINET).....	133
ΠΙΝΑΚΑΣ 24. ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ CHP ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	133
ΠΙΝΑΚΑΣ 25. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.	134
ΠΙΝΑΚΑΣ 26. . ΤΕΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ LCC ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ CHP.	134

Περίληψη

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα της σύγχρονης εποχής είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων και ο τρόπος διαχείρισής τους. Παρόλα αυτά, κυρίως τη τελευταία δεκαετία, ο άνθρωπος έχει εστιάσει ιδιαίτερα την προσοχή του στη μείωση των αποβλήτων και στην εύρεση ενός ορθολογικού συστήματος διαχείρισης και αξιοποίησής τους. Στα πλαίσια λοιπόν της κυκλικής οικονομίας, το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Waste4think στο οποίο συμμετέχει ο Δήμος Χαλανδρίου, ο οποίος συνεργάζεται με το Ε.Μ.Π., μελετά τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας, υπό τη μορφή βιοαερίου από οικιακά υπολείμματα τροφών με σκοπό την αναβάθμιση και συμπίεση του προς παραγωγή bio-CNG ή αλλιώς φυσικού αερίου κίνησης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αναβάθμισης και της συμπίεσης βιοαερίου παραγόμενου από την αναερόβια χώνευση οργανικών αποβλήτων για τη παραγωγή φυσικού αερίου κίνησης με τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω σειράς πειραμάτων για την εύρεση της βέλτιστης περιεκτικότητας αμίνης MEA (ΜonoEthanolAmine) σε υδατικό διάλυμα που χρησιμοποιείται για την αναβάθμιση του βιοαερίου, το βέλτιστο χρόνο αναγέννησης της κορεσμένης αμίνης σε CO₂ και τέλος τη σύγκριση με μια διαφορετική αμίνη MDEA (MethylDiEthanolAmine) η οποία προτείνεται ως εναλλακτική λύση και στη βιβλιογραφία. Με την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων σε εργαστηριακό επίπεδο, ακολουθείται η μελέτη σχεδιασμού της εγκατάστασης και το scale up σε πιλοτική κλίμακα. Επίσης, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε τεχνικό-οικονομική ανάλυση (Life Cycle Cost-LCC) της περίπτωσης εγκατάστασης μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου και ανάλυση ευαισθησίας με παραμέτρους ελέγχου το επιτόκιο, την διάρκεια ζωής της μονάδας και την δυναμικότητα. Τέλος, έγινε σύγκριση της μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου με την αξιοποίηση του βιοαερίου προς συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε αρχικά η μελέτη της κινητικής κορεσμού της αμίνης τόσο «φρέσκιας» όσο και αναγεννημένης. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες συνθήκες αναγέννησης της κορεσμένης αμίνης. Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο βέλτιστος χρόνος αναγέννησης αντιστοιχεί σε 2 ώρες. Στη συνέχεια έχοντας καταλήξει στον βέλτιστο χρόνο αναγέννησης της αμίνης (MEA) ακολούθησαν πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του μέγιστου αριθμού κύκλων αναγέννησης για το οποίο η διεργασία της αναβάθμισης εξακολουθεί να είναι αποδοτική. Παρατηρήθηκε ότι ακόμα και μετά από έξι κύκλους αναγέννησης στις βέλτιστες συνθήκες κατέστη δυνατή η απομάκρυνση του CO₂ στο επιθυμητό επίπεδο. Τέλος έγινε σύγκριση του υδατικού διαλύματος αμίνης περιεκτικότητας 30% σε MEA με αυτά των 15%-15% MEA-MDEA, του 30% MDEA, από την οποία αποδείχθηκε ότι το υδατικό διάλυμα περιεκτικότητας 30% σε MEA είναι το πιο αποτελεσματικό.

Ως προς το σχεδιαστικό κομμάτι και το scale up σε πιλοτική κλίμακα μελετήθηκε η δυνατότητα πραγματοποίησης της διεργασίας κατά αντιρροή κάτι το οποίο προτείνεται και από τη βιβλιογραφία, με τη δεδομένη ροή του βιοαερίου που παράγεται από τον αντιδραστήρα και ισούται με $1 \text{ m}^3/\text{day}$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με βάσει τη δεδομένη παροχή του αντιδραστήρα ($1 \text{ m}^3/\text{day}$) η αναβάθμιση του βιοαερίου με τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης κατά αντιρροή δεν είναι εφικτή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τον σχεδιασμό της διεργασίας χρησιμοποιήθηκε χρήση στήλης φυσαλίδων ύψους 3m και διαμέτρου 12cm με πληρωτικό υλικό συνολικού ύψους 2,7m.

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε ένα θεωρητικό σενάριο με τεχνοοικονομικούς όρους (Life Cycle Cost Analysis) για την εγκατάσταση μίας μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου που θα ανταποκρίνεται στα πλαίσια του προγράμματος Waste4Think για τον Δήμο Χαλανδρίου και τα ετήσια οργανικά απόβλητα που παράγονται από αυτόν (74.000 tn/y). Από τα αποτελέσματα αυτά, προέκυψε ότι η οικονομικότερη μέθοδος αναβάθμισης βιοαερίου είναι η μέθοδος του Water Scrubbing. Από το συγκερασμό των παραπάνω οικονομικών αποτελεσμάτων, τις απαιτήσεις καθαρότητας τελικού προϊόντος (97-99%) αλλά και τις απαιτήσεις για ελάχιστες απώλειες μεθανίου (<0.1), προκύπτει ότι η χημική απορρόφηση είναι η πλέον αποδοτική μέθοδος αναβάθμισης βιοαερίου για παραγωγή καυσίμου κίνησης οχημάτων. Τέλος, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με την περίπτωση εγκατάστασης μίας μονάδας CHP (Combined Heat and Power). Από τα αποτελέσματα αποδείχθηκε ότι η μέθοδος συμπαραγωγής είναι οικονομικότερη κατά $5,07 \text{ [€/tn]}$ σε σχέση με την αναβάθμιση βιοαερίου με τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης.

Λέξεις κλειδιά: Διαχείριση Αστικών Αποβλήτων, Κυκλική Οικονομία, Αναερόβια χώνευση, Waste4Think, Βιοαέριο, Βιομεθάνιο, Αναβάθμιση βιοαερίου, bio-CNG, Life Cycle Cost Analysis

Abstract

One of the most important environmental, economic, and social problems of the modern era is the ever-increasing production of waste and the way it is managed. Nevertheless, especially over the last decade, the focus has been on reducing waste and finding a rational system for managing and exploiting it. Within the context of the cyclical economy, the Municipality of Halandri in collaboration with the National Technical University of Athens participate in the European Waste4think program. The program's goal is to study the potential of energy recovery in the form of biogas from municipal food wastes. The potential energy recovery would facilitate the upgrading and compression processes of bio-CNG (i.e., natural gas for vehicles).

The purpose of this diploma thesis is to study the upgrading and compression of biogas produced by the anaerobic digestion of organic waste for the production of natural gas by the chemical absorption method. This study was carried out through a series of experiments to find the optimum amine ACE content (MonoEthanolAmine) in an aqueous solution used for upgrading biogas, the optimal time to regenerate the saturated amine in CO₂ and finally, comparing it to a different amine MDEA (Methyl Diethanol Amine), which has been proposed as an alternative amine to the literature. Upon completion of experimental measurements at the laboratory level, the design of the installation and the scale up on a pilot scale are followed. Furthermore, a Life Cycle Cost (LCC) analysis of the installation of the biogas upgrade unit and a sensitivity analysis with regards to the interest rate, unit life, and capacity were performed. Finally, biogas upgrading was compared with the use of thermal and electrical energy to be co-produced.

Initially, the kinetic saturation of the amine, both "fresh" and regenerated, was studied. The optimal conditions for the regeneration of the saturated amine were then determined. Based on the experimental results, it was concluded that the optimum regeneration time corresponds to two hours. Then, having reached the optimal amine regeneration time (MEA), experimental measurements were made to determine the maximum number of regeneration cycles for which the upgrading process is still efficient. It was observed that even after six cycles of regeneration under optimal conditions, it was possible to remove CO₂ to the desired level. Finally, a 30% MEA aqueous amine solution was compared with 15%-15% MEA-MDEA, and 30% MDEA, from which it was shown that the 30% aqueous solution in ACE is the most effective.

Regarding the design of process and scaling up for pilot testing, the counter-flow process was studied, as suggested by the literature, with the given biogas produced by the reactor, which is equal to 1 m³/day. The results showed that, based on the given reactor flow rate biogas upgrading by the counterattacking process was not feasible. The process design suggested a column with a height of 3m and a diameter of 12cm with packing material totaling a height of 2.7m.

In addition, a theoretical scenario with Life Cycle Cost Analysis for the installation of a Waste4Think program for the Municipality of Halandri and the annual organic waste produced

by it (74,000 tn / y) was studied. The results showed that the most economical method of biogas upgrading is the Water Scrubbing method. From the combination of the aforementioned economic results with the final product purity requirements (97-99%) and the minimum methane loss requirements (<0.1), chemical absorption was found to be the most cost-effective method of upgrading biogas to produce vehicle fuel. Finally, these results were compared with the potential installation of a Combined Heat and Power (CHP) unit.

Keywords: Waste management, Circular economy, anaerobic digestion, Waste4Think, biogas, biomethane, biogas upgrading, bio-CNG, Life Cycle Cost Analysis

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στα Απόβλητα

Κάθε ανθρώπινη κοινότητα παράγει υγρά και στερεά απόβλητα ως αποτέλεσμα της δραστηριότητάς της. Η δραστηριότητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μία πολύπλοκη διεργασία η οποία χρησιμοποιεί πρώτες ύλες και παράγει προϊόντα χρήσιμα για τον άνθρωπο αλλά και απόβλητα που πρέπει να απομακρυνθούν στο περιβάλλον. Φυσικά, κάθε προϊόν τελικά αποσυντίθεται και επιστρέφει στη φύση για να συμπληρωθούν οι φυσικοί κύκλοι.

Ως **Απόβλητα** ονομάζουμε τα «παραπροϊόντα» της ανθρώπινης δραστηριότητας, τα οποία μιας και δεν έχουν άμεση πλέον χρησιμότητα στον άνθρωπο πρέπει να διατεθούν στο φυσικό περιβάλλον. Τα απόβλητα διαχωρίζονται σε υγρά και στερεά ανάλογα με τη βασική τους φάση (στερεά ή υγρή φάση). (Γεράσιμος Λυμπεράτος, 2012)

Ένας παρόμοιος ορισμός δίνεται και σύμφωνα με το Νόμο-Πλαίσιο για τα απόβλητα, Οδηγία 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Νοεμβρίου 2008, στον οποίο ορίζονται ως:

απόβλητα: κάθε ουσία ή αντικείμενο, το οποίο ο κάτοχός του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει.

βιολογικά απόβλητα ή αλλιώς (βιοαπόβλητα): τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα απορρίμματα τροφών και μαγειρείων από σπίτια, εστιατόρια, εγκαταστάσεις ομαδικής εστίασης και χώρους πωλήσεων λιανικής και τα συναφή απόβλητα από εγκαταστάσεις μεταποίησης τροφίμων. (Ελληνική Κυβέρνηση, 2008)

1.1.1 Αστικά στερεά απορρίμματα

Ο όρος Αστικά Στερεά Απορρίμματα (Α.Σ.Α.) (Municipal Solid Waste, MSW) περιγράφει τα οικιακά απόβλητα αλλά και όλα τα άλλα απόβλητα που λόγω σύστασης ή φύσεως, προσομοιάζουν τα οικιακά. (Α. Βλυσίδης, 2018) Τέτοια αστικά λύματα παράγονται από τα δημόσια κτήρια, τα νοσοκομεία και άλλους δημόσιους οργανισμούς όπως στρατιωτικές μονάδες αλλά και επιχειρήσεις (τριτογενής τομέας). (Γεράσιμος Λυμπεράτος, 2012)

Στην κατηγορία των αστικών αποβλήτων συμπεριλαμβάνονται επίσης διάφορα ογκώδη απόβλητα όπως είναι τα έπιπλα, υπολείμματα κήπων (φύλλα, κηπευτικά κ.α.) καθώς και απόβλητα που προκύπτουν από τον καθαρισμό των δρόμων. (Α. Βλυσίδης, 2018)

Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμα από το μέγεθος της κοινότητας (πληθυσμός) και την προέλευσή τους. Παρ' όλα αυτά σε συνολικό επίπεδο μιας περιοχής, περιφέρειας ή ακόμα χειρότερα μιας χώρας, στην οποία διοχετεύονται αστικά απόβλητα διαφορετικής προέλευσης η σύσταση των απορριμμάτων μπορεί να διαφοροποιείται έντονα και να υφίσταται παράλληλα χρονικές μεταβολές βάσει ώρας, ημέρας αλλά και εποχής. Οι παραπάνω μεταβολές που εμφανίζονται στην ποιότητα των Α.Σ.Α είναι πολλές και οφείλονται στο σύνολο των δραστηριοτήτων των κατοίκων. Για τους παραπάνω λόγους θεωρείται απαραίτητη η προ-επεξεργασία των αστικών αποβλήτων.

Συγκεντρωτικά, σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας έχει συμπεριλάβει στα απόβλητα αστικού τύπου τα εξής:

1. τα αστικά στερεά απόβλητα (Α.Σ.Α) και
2. τις ιλύες αστικού τύπου.

Ως ιλύες (λάσπη) αστικού τύπου περιγράφονται οι λάσπες που δημιουργήθηκαν από τις διεργασίες επεξεργασίας των υγρών αστικών αποβλήτων και είναι συνήθως σε ρευστή ή ημίρευστη κατάσταση. Τυπικά περιέχει από 0.25 μέχρι 12% κατά βάρος σε στερεά, ανάλογα με τις μεθόδους και τις διεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα Α.Σ.Α. περιλαμβάνουν:

- i. Τα απόβλητα των νοικοκυριών
- ii. Τα απόβλητα που παράγονται από τις εμπορικές επιχειρήσεις, τους κοινωφελείς οργανισμούς (π.χ. λιμάνια, αεροδρόμια, σιδηροδρομικοί σταθμοί), τις βιομηχανίες, τις υγειονομικές μονάδες και τις μονάδες των ενόπλων δυνάμεων.

Στο ρεύμα των Α.Σ.Α. εμπεριέχονται επίσης:

- τα απόβλητα συσκευασιών,
- τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) οικιακής προέλευσης, καθώς και
- οι μικρές ποσότητες επικίνδυνων αποβλήτων (ΜΠΕΑ) στις οποίες συμπεριλαμβάνονται μεταξύ άλλων τα απόβλητα φορητών ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών (ΗΣ&Σ), οι λαμπτήρες φθορισμού, τα αποσυρόμενα φάρμακα, τα μελανοδοχεία και διάφορα απορρυπαντικά προϊόντα (μαζί με τη συσκευασία τους) που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό, την απολύμανση και τη συντήρηση των νοικοκυριών.

Οι *ιλύες αστικού τύπου* περιλαμβάνουν τις ιλύες που παράγονται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων:

- i. αστικής προέλευσης,
- ii. τουριστικών μονάδων,
- iii. των βιομηχανιών του κλάδου τροφίμων και ποτών, όπως ορίζονται στο Παράρτημα III της ΚΥΑ 5673/400/1997 (Β' 192), καθώς και (δ) κοινωφελών οργανισμών και άλλων πηγών. (Ελληνική Κυβέρνηση, 2015)

1.1.1.1 Κατηγοριοποίηση επιμέρους συστατικών των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (Α.Σ.Α.)

Σύμφωνα με δειγματοληψίες και αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, μια δόκιμη κατηγοριοποίηση των επιμέρους συστατικών των αστικών αποβλήτων οφείλει να περιλαμβάνει τις εξής ομάδες υλικών:

- Χαρτί: σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται χαρτιά και χαρτόνια που προέρχονται κυρίως από συσκευασίες προϊόντων και έντυπο υλικό.
- Ζυμώσιμα: σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα υπολείμματα τροφών της κουζίνας και του κήπου.
- Μέταλλα: σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται το σύνολο των μεταλλικών υλικών. Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο ο διαχωρισμός τους σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα (αλουμίνιο), κυρίως λόγω της μαγνητικής ιδιότητας των πρώτων. Οι μπαταρίες αν και συμπεριλαμβάνονται στα αστικά απόβλητα συνήθως εξετάζονται ως ξεχωριστή υποκατηγορία λόγω της υψηλής επικινδυνότητάς τους.
- Γυαλί: Η ανακύκλωση του γυαλιού χωρίζεται σε διαυγές και μη διαυγές, λόγω των τεχνικών χαρακτηριστικών των οπτικών αισθητήρων / διαχωριστών γυαλιού που χρησιμοποιούν τα κέντρα Διαλογής.
- Πλαστικό: περιλαμβάνονται τα πολυμερή απόβλητα με κύριο χαρακτηριστικό την έντονη ανομοιογένεια της, λόγω των πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PE, PP, PS, PET, ABS, κ.λπ.).
- Δέρμα-Ξύλο-Λάστιχο-Υφασμα: Χαρακτηρίζονται ως λοιπά .
- Αδρανή: στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα χημικά ανενεργά υλικά που καταλήγουν στα οικιακά απόβλητα όπως είναι το χώμα και οι πέτρες.
- Λοιπά: σε αυτή την κατηγορία ανήκουν όλα τα υλικά που δεν μπορούν να ενταχθούν σε καμία από τις ανωτέρω κατηγορίες. (Νιάκας, 2019)

Απαραίτητο κρίνεται να τονιστεί σε αυτό το σημείο, ότι στα αστικά στερεά απόβλητα εμπεριέχονται ουσίες τοξικές και επικίνδυνες για τον άνθρωπο όπως ο υδράργυρος, ο

μόλυβδος, το κάδμιο, το χρώμιο και το βρώμιο. Συνεπώς, το κακό υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων που ακολουθεί η Ελλάδα αλλά και η ελλιπής περιβαλλοντική συνείδηση των πολιτών ωθούν αυτές τις επικίνδυνες ουσίες στους χώρους υγειονομικής ταφής ενώ στη πραγματικότητα θα έπρεπε να συλλέγονται και να οδηγούνται μέσω ενός ξεχωριστού ρεύματος σε μονάδες ειδικής επεξεργασίας.

1.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά συστατικών των αποβλήτων

Ο μελέτη των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των αποβλήτων κρίνεται απαραίτητη, δεδομένου ότι από τον προσδιορισμό τους, διευκολύνεται η επεξεργασία τους και παράλληλα καθίσταται δυνατή η καταλληλότερη μέθοδος διαχείρισής τους.

Ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά, κρίνεται απαραίτητο να υπολογιστούν τα κάτωθι:

- Πυκνότητα
- Κατανομή μεγέθους
- Περιεχόμενη υγρασία

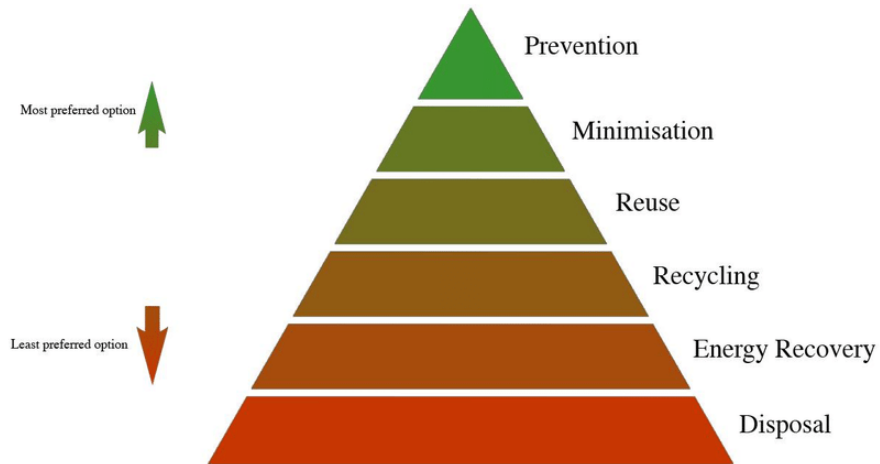
Αντίστοιχα ως προς τα χημικά χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων

- Η υγρασία
- Τα πτητικά στερεά
- Η τέφρα
- Η θερμιδική αξία
- Και το ποσοστό σε άνθρακα, υδρογόνο και θείο. (Chandrappa, 2012)

1.3 Εισαγωγή στη διαχείριση αποβλήτων

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα της σύγχρονης εποχής είναι η ολοένα αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων και ο τρόπος διαχείρισής τους. Κυρίως τη τελευταία δεκαετία, ο άνθρωπος έχει εστιάσει ιδιαιτέρως την προσοχή του στη μείωση των αποβλήτων και στην εύρεση ενός ορθού συστήματος διαχείρισης και αξιοποίησης τους. Όμως, παρ' όλη αυτή τη προσπάθεια, ο αυξανόμενος πληθυσμός, καθώς και η οικονομική ανάπτυξη έχει οδηγήσει σε μια διαρκή αύξηση παραγωγής αποβλήτων, κάνοντας επιτακτική την ανάγκη εξεύρεσης ενός αποτελεσματικού σχεδίου ορθής διαχείρισης των αποβλήτων. Με σκοπό να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τα απόβλητα, η Ευρωπαϊκή Ένωση δημοσίευσε το Waste Framework Directive (2008/98/EC) στο οποίο παρουσιάζεται η ιεράρχηση

της διαχείρισης αποβλήτων. Αυτή η ιεραρχία, καθορίζει την σειρά προτεραιότητας για τη σωστή διαχείριση των αποβλήτων, η οποία εξασφαλίζει μια διαρκής και συνεχόμενη διαχείριση αποβλήτων με τις βέλτιστες πρακτικές. (European Commission, 2014).



Εικόνα 1. Πυραμίδα διαχείρισης αποβλήτων (Ngai Weng Chan, 2016)

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη διαχείριση αποβλήτων είναι η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτή με τη σειρά της οδήγησε στην έννοια του *Waste-to-Energy (WtE)*, η οποία είναι μια διαδικασία που παράγει ενέργεια από πηγές αποβλήτων. Οι τεχνολογίες *WtE* μπορούν να παράγουν ενέργεια σε διάφορες μορφές, από διαφορετικούς τύπους αποβλήτων (Re L, et al., 2013).

Ο παγκόσμιος οργανισμός ενέργειας (International Energy Agency -IEA) υπολογίζει ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις ίσως αυξηθούν σε ποσοστό μέχρι και 37% μέχρι το 2040 (OECD/IEA, 2014). Το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας εκτιμά περαιτέρω, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά σενάρια, ότι ο συνολικός εφοδιασμός σε πρωτογενή ενέργεια παγκοσμίως θα αυξηθεί σε 61% και 27% από το 2010 έως το 2050, αντίστοιχα (Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας, 2013). Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση της ενέργειας συμβάλλει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για βέλτιστη χρήση των εναλλακτικών πηγών ενέργειας (World Energy Council, 2013).

Περίπου το 19% των ενεργειακών απαιτήσεων σε παγκόσμια κλίμακα το 2008 προήλθε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Demirel, 2012). Γενικότερα, το απόθεμα των ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένο, ενώ οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος και στην αειφόρο ανάπτυξη. Για να επιτευχθεί μια βιώσιμη ανάπτυξη, πηγές

ενέργειας με μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα πρέπει να χρησιμοποιηθούν (Dincer & Rosen, 1998). Με την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία σημαντική πρόοδος στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής (IPPC, 2012). Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, η αποδοτική χρήση της ενέργειας και ο περιορισμός στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι ζητήματα υψηλής προτεραιότητας για την Ευρωπαϊκή Ένωση (European Commission, 2014).

Η παραγωγή βιοαερίου είναι μία μέθοδος, η οποία παράγει βιοαέριο (το οποίο αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας) σε έναν αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης ανακυκλώνοντας τα οργανικά απόβλητα. Το χωνεμένο υγρό κλάσμα της αναερόβιας χώνευσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως λίπασμα. Τα υπολείμματα τροφών μπορούν να συμβάλλουν ισχυρά στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα μέσω της ανάκτησης της πράσινης ενέργειας και τη χρήση βιολογικών λιπασμάτων αντί των χημικών. Το βιοαέριο είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία θεωρείται ουδέτερη από πλευράς άνθρακα δεδομένου ότι τα οργανικά απόβλητα προέρχονται από βιομάζα που εμπεριέχει άνθρακα προερχόμενο από CO₂ που δεσμεύουν μέσω της φωτοσύνθεσης (Masse, et al., 2012). Η παραγωγή βιοαερίου από οργανικά απόβλητα έχει αποδειχθεί ότι είναι περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες επιλογές διαχείρισης αποβλήτων, όπως η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση και η κομποστοποίηση (Lin, et al., 2012). Συμπερασματικά, η παραγωγή βιοαερίου μπορεί ως εκ τούτου να θεωρηθεί μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων.

Η παραγωγή βιοαερίου για εμπορική χρήση αυξήθηκε τις τελευταίες δεκαετίες για δύο τουλάχιστον λόγους. Πρώτον, το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αυτούσιο ως καύσιμο είτε για συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (CHP). Δεύτερον, συμβάλλει σε χαμηλότερη συγκέντρωση αερίων θερμοκηπίου (GHG) όταν συλλέγεται σε κλειστή διαδικασία (Santos, et al., 2013). Το μεθάνιο θεωρείται ως ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου, και με τον περιορισμό του σε μονάδα παραγωγής βιοαερίου δεν εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα (Butz, 2014).

Συνιστάται η αναβάθμιση του βιοαερίου σε καύσιμο, παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τη συμπαραγωγή ενέργειας (López, et al., 2013). Οι αναλύσεις έχουν δείξει ότι η αναβάθμιση του βιοαερίου σε βιομεθάνιο και η αντικατάστασή του ντίζελ με αυτό, παρέχει καλύτερο αποτέλεσμα για το περιβάλλον (Agnø, et al., 2013). Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες για την αναβάθμιση του βιοαερίου, όπως η χημική πλυντρίδα, η πλυντρίδα με νερό, οργανική φυσική πλυντρίδα, μεμβράνες, προσρόφηση υπό πίεση και κρυογενική αναβάθμιση, τεχνικές οι οποίες θα αναλυθούν εκτενώς παρακάτω.

Το κόστος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας όταν εξετάζεται εάν το βιοαέριο πρέπει να αναβαθμιστεί. Οι μελέτες γίνονται σχετικά με το κόστος αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο (Persson, 2003),(Forsberg, 2009) και μερικές μελέτες συγκρίνουν το κόστος μόνο

για δύο διαφορετικές τεχνολογίες (Urban, 2009), Bauer, et al., 2013, Patterson κ.ά., 2011). Συμπεράσματα από αυτές τις μελέτες δείχνουν ότι το επενδυτικό κόστος μιας μονάδας αναβάθμισης αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας ενώ το ειδικό κόστος για την αναβάθμιση του βιοαερίου ανά κυβικό μέτρο, αυξάνεται με ένα αυξανόμενο μέγεθος μονάδας. Ωστόσο, καμία από αυτές τις μελέτες δεν περιλαμβάνει όλες τις εμπορικά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες αναβάθμισης. Ένας άλλος παράγοντας που δεν λαμβάνεται υπόψη είναι η υψηλή ενεργειακή απαίτηση σε θερμότητα από το εργοστάσιο αναβάθμισης, καθώς αυτό έχει αντίκτυπο στο κόστος κύκλου ζωής (LCC). Αν η μονάδα αναβάθμισης τοποθετηθεί σε πλαίσιο με ολόκληρη τη μονάδα παραγωγής βιοαερίου, η πλεονάζουσα θερμότητα από τη μονάδα αναβάθμισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλα τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας. Η προεπεξεργασία και ο αντιδραστήρας είναι παραδείγματα σημείων στη διαδικασία παραγωγής, οι οποίες έχουν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας υπό μορφή θερμότητας. Εάν υπάρχει έκλυση θερμότητας από ένα άλλο τμήμα της μονάδας αναβάθμισης του βιοαερίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτά τα εξαρτήματα τα οποία έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος ενέργειας για ολόκληρο το σύστημα. Για το σκοπό αυτό, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το κόστος της τεχνολογίας αναβάθμισης όταν η αρχή της ανάκτησης θερμότητας περιλαμβάνεται στο συνολικό κόστος.

1.4 Μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης των απορριμμάτων

Η ολοένα αυξανόμενη παραγωγή στερεών απορριμμάτων, θέτει το ζήτημα της διαχείρισης τους που χρήζει άμεσης εξεύρεσης λύσης. Η ΕΕ, σύμφωνα με την τελευταία οδηγία (2008/98) ανέπτυξε ένα πλαίσιο διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) με όρους αειφορικής ανάπτυξης και εξοικονόμησης των φυσικών πόρων, συστήνοντας την επεξεργασία των ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας (αρχή επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης, κ.ο.κ). Για τους παραπάνω λόγους παρουσιάζονται οι τεχνολογίες επεξεργασίας των Α.Σ.Α. με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας.

Αυτές διαχωρίζονται σε Χημικές και Βιολογικές και είναι οι εξής:

Χημικές:

- *Η καύση:* Η χημική οξείδωση των στερεών αποβλήτων, δηλαδή η ένωση των στοιχείων με το οξυγόνο. Αν και η καύση δύναται να παράξει τα υψηλότερα ποσοστά ενέργειας, σοβαρό μειονέκτημα της είναι η παραγωγή ρύπων λόγω της επεξεργασίας των σύμμεικτων Α.Σ.Α..
- *Η Αεριοποίηση/Πυρόλυση:* Θερμική διάσπαση των οργανικών ουσιών, η οποία είναι μερικής ή ολικής απουσίας οξυγόνου με σκοπό τη παραγωγή ενδιάμεσων προϊόντων

(καύσιμα). Το καύσιμο που παράγεται μπορεί να διαχωριστεί σε ένα αέριο μίγμα το οποίο παράγεται κατά τη θερμική επεξεργασία και ένα πηκτώδες στερεό υπόλειμμα.

Βιολογικές:

Σκοπός των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας στερεών αποβλήτων είναι η σταθεροποίηση του στερεού αποβλήτου, ώστε να μπορεί να διατεθεί με ασφαλή τρόπο στο περιβάλλον, αλλά συγχρόνως και την ταυτόχρονη μετατροπή του σε χρήσιμα προϊόντα όπως το βιοαέριο για ενεργειακή αξιοποίηση. Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- *Η Αναερόβια Χώνευση:* η οποία πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου και εφαρμόζεται τόσο για την σταθεροποίηση της λάσπης αλλά και για το ζυμώσιμο κλάσμα των στερεών αποβλήτων. Τελικό προϊόν είναι το μεθάνιο.
- *Η Κομποστοποίηση:* Είναι η διεργασία σταθεροποίησης των οργανικών στερεών των απορριμμάτων, με σκοπό τη παραγωγή ενός τελικού προϊόντος με σύσταση παρόμοια με αυτής του εδάφους. Κύρια εφαρμογή του είναι η χρησιμοποίηση ως εδαφοβελτιωτικό. (Α. Βλυσίδης, 2018)

1.5 Η Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για όλες τις χώρες της Ευρώπης και όχι μόνο. Οι τρέχουσες αλλαγές στο κλίμα του πλανήτη μας αναδιαμορφώνουν τον κόσμο και αυξάνουν του κινδύνους για αστάθεια σε κοινωνικό, οικονομικό και πολιτικό επίπεδο. Συγκεκριμένα οι δύο τελευταίες δεκαετίες περιλάμβαναν 18 από τα θερμότερα έτη. Το μήνυμα είναι σαφές, πως άμεση και ουσιαστική δράση για το κλίμα είναι απαραίτητη σε συλλογικό επίπεδο. (European Commission, 2018)

Η ευρωπαϊκή πολιτική υπέρ της προστασίας του περιβάλλοντος και κατά της κλιματικής αλλαγής είναι βασισμένη στις αρχές της προφύλαξης, της πρόληψης και της επανόρθωσης των καταστροφών του περιβάλλοντος στην πηγή, καθώς και στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Οι μελλοντικές ενέργειες σε κάθε τομέα της περιβαλλοντικής πολιτικής καθορίζονται από τα πολυετή προγράμματα περιβαλλοντικής δράσης. Είναι ενσωματωμένα σε οριζόντιες στρατηγικές και λαμβάνονται υπόψη στις διεθνείς περιβαλλοντικές διαπραγματεύσεις με καίρια σημασία την εφαρμογή τους από κάθε κράτος. Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα πρόβλημα μείζονος σημασίας για ολόκληρο το πλανήτη, και πλέον βασική παράμετρο για το σύνολο των διεθνών και κρατικών αποφάσεων που σχετίζονται με την εκμετάλλευση, διαχείριση και κατανάλωση των ενεργειακών πόρων. Συνεπώς, είναι εύλογο να συμπεράνουμε πως η κλιματική αλλαγή δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις για την άσκηση της οικονομικής πολιτικής και όχι μόνο. (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2019)

Διαφαίνεται λοιπόν ότι το μοντέλο ανάπτυξης που χρειάζεται σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο θα πρέπει να έχει ως κυρίαρχα στοιχεία την οικονομία χαμηλού άνθρακα, αλλά και την κυκλική οικονομία. (Bank Of Greece, 2019)

Στη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το κλίμα, που πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι τον Δεκέμβριο του 2015, συμβαλλόμενα μέρη από όλο τον κόσμο συμφώνησαν να περιορίσουν την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη σε επίπεδα σαφώς κατώτερα των 2°C πάνω από τα επίπεδα της προβιομηχανικής εποχής. Ο στόχος αυτός είναι δυνατόν να επιτευχθεί εφόσον η συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σταθεροποιηθεί στα 450 ppm. Η ΕΕ έχει δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 40% κάτω από τα επίπεδα του 1990 έως το 2030, και να περιορίσει έως το 50% περίπου μέχρι το 2050, βελτιώνοντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση κατά 27% και αυξάνοντας το ποσοστό της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 27% της τελικής κατανάλωσης. Βασικός μηχανισμός για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής είναι το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών της ΕΕ. (European Commission, 2017)

1.6 Ευρωπαϊκοί στόχοι

Η Ευρωπαϊκή ένωση έχει θέσει στόχους σχετικά με την διαχείριση των αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος σύμφωνα με την αναπτυξιακή στρατηγική «Ευρώπη 2020» (Europe 2020 growth strategy) και τον οδικό χάρτη για μια οικονομία χαμηλών εκπομπών CO₂ έως το 2050 (COM(2011)112) σε συνδυασμό με το Πακέτο Κυκλικής Οικονομίας (Circular Economy Package). (European Commission, 2019), (European Commission, 2014)

Αναλυτικότερα η στρατηγική «Ευρώπη 2020» προωθεί τους εξής περιβαλλοντικούς και ενεργειακούς στόχους :

- Μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% (έως και 30% υπό κατάλληλες προϋποθέσεις) σε σχέση με το έτος 1990
- 20% παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές
- 20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης
- Συμμετοχή των βιοκαυσίμων στο μίγμα καυσίμων που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μεταφορών σε ποσοστό 10%.

Παρόλα αυτά για να επιτευχθεί ο στόχος του περιορισμού της αύξησης της θερμοκρασίας κατά 2°C σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή, που έχει τεθεί πρώτα στην Ε.Ε. απαιτείται η σταθεροποίηση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα στα 450 ppm. (Bank Of Greece, 2019) Από τη στιγμή λοιπόν που το πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ένα παγκόσμιο φαινόμενο, το επίπεδο των εκπομπών πρέπει να μειωθεί δραστικά, έτσι ώστε μέχρι

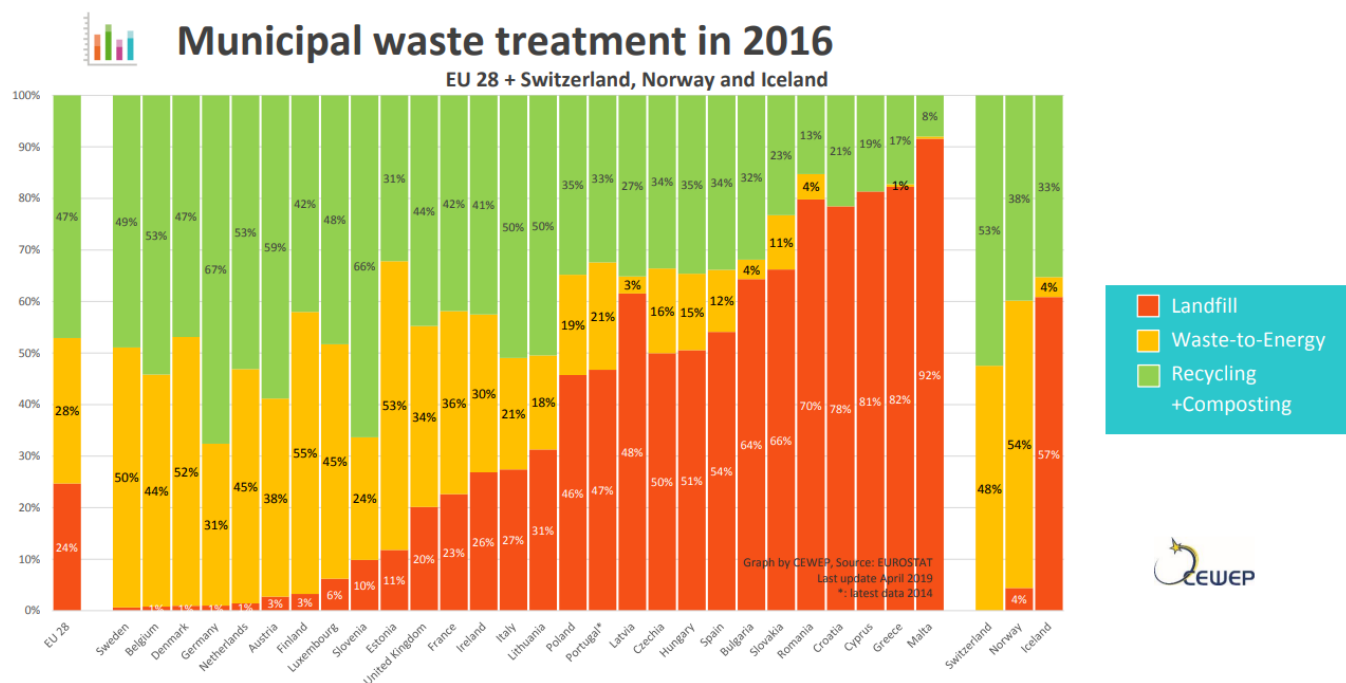
το 2050 να έχει περιοριστεί στο 50% του αντιστοίχου επιπέδου της προβιομηχανικής εποχής του 1990.

Σημαντικό εμπόδιο σε αυτό είναι ο επιμερισμός του παγκόσμιου αυτού στόχου κατά περιοχή, καθώς δεν είναι ισομερής. Λαμβάνοντας υπόψιν επίσης τη τάση αύξησης των εκπομπών αναπτυσσόμενων χωρών (όπως η Κίνα, η Ινδία κ.α.) η ανάλυση σε παγκόσμια ενεργειακά πρότυπα (Prometheus του ΕΜΠ-Ε3MLab, POLES του IPTS και WEO του IEA) δείχνει ότι οι χώρες μέλη του ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) συνεπώς και της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να διαμορφώσουν ως στόχο μείωσης εκπομπών στο 80% το 2050 σε σχέση με αυτές του 1990. Όσο αφορά τις αναπτυσσόμενες χώρες οικονομικές μελέτες έχουν δείξει ότι για την επίτευξη του στόχου οι εκπομπές πρέπει να μειωθούν στο 25% σε συγκριτικά με αυτές που είχαν το 1990, στόχος που ισοδυναμεί σε μείωση 80% από τις εκπομπές τους το 2050 στο πλαίσιο των τρεχουσών τάσεων ανάπτυξης (Bank Of Greece, 2019).

Παρόλο που η διαχείριση αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει βελτιωθεί αισθητά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, πάνω από το ¼ των αστικών αποβλήτων ακόμα καταλήγει στους ΧΥΤΑ και λιγότερο από το μισό ανακυκλώνεται ή κομποστοποιείται, με ταυτόχρονα μεγάλες αποκλίσεις ανάμεσα στα κράτη μέλη της. Έτσι βελτιώνοντας τη διαχείριση αποβλήτων μπορούν να επιτευχθούν θετικά αποτελέσματα σε διάφορους τομείς όπως το περιβάλλον, το κλίμα, η υγεία αλλά και η οικονομία. (European Commission, 2016) Για το σκοπό αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση θέσπισε ένα Πακέτο Κυκλικής Οικονομίας που έχει ως κύριο σκοπό τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά 450 εκατομμύρια τόνους (tn) στο σύνολο των 28 χωρών που ανήκουν σε αυτήν. Συνεπώς η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, ενέκρινε τη νομοθετική πρόταση και το παράρτημα για την αναθεώρηση των στόχων επάνω στην διαχείριση των αστικών αποβλήτων όπως αυτοί περιγράφονται αναλυτικά στην ΟΠΑ αλλά και μέσω των Οδηγιών 1999/31/ΕΚ για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων και 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απόβλητα συσκευασιών. Κύριος γνώμονας της ρύθμισης αυτής είναι η ενίσχυση της ανακύκλωσης όσο και η απόκτηση πρόσβασης σε δευτερεύουσες πρώτες ύλες. Συγκεκριμένα, θέτει τους ακόλουθους στόχους με χρονικό ορίζοντα το 2030:

- Η ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων να αυξηθεί σε ποσοστό 65% κατά βάρος επί του συνόλου των αποβλήτων
- Η ανακύκλωση των αποβλήτων συσκευασίας να αυξηθεί σε ποσοστό 75% κατά βάρος επί του συνόλου τους
- Μείωση της υγειονομικής ταφής στο 10% κατά βάρος επί όλων των ρευμάτων των αποβλήτων
- Απαγόρευση της υγειονομικής ταφής των χωριστά συλλεχθέντων αποβλήτων.
- Λήψη μέτρων για την προώθηση της βιομηχανικής συμβίωσης, της αξιοποίησης δηλαδή των παρελκόμενων προϊόντων (by-products) μιας βιομηχανίας ως πρώτη ύλη μιας άλλης βιομηχανίας, με απώτερο σκοπό την κυκλική οικονομία.

Παρόλο που οι Ευρωπαϊκές κατευθύνσεις είναι πολύ σαφείς και έχουν νομοθετηθεί μέσω των ΕΣΔΑ σε όλα τα Κοινοβούλια της Ε.Ε.-28, η κατάσταση που επικρατεί στον τομέα της διαχείρισης των Α.Σ.Α. παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Το **διάγραμμα 1** παρουσιάζει τις τεχνικές επεξεργασίας των Α.Σ.Α. που ακολουθεί κάθε κράτος - μέλος της Ε.Ε.-28, βάσει στατιστικών στοιχείων της Eurostat14 για το έτος του 2016.



Διάγραμμα 1. Διαχείριση Α.Σ.Α. στις χώρες της Ε.Ε. κατά το έτος του 2016 (CEWEP Confederation of European Waste-to-Energy Plants, 2018)

Σύμφωνα με το **διάγραμμα 1** παρατηρούμε πως η κυρίαρχη χώρα όσο αναφορά την ανακύκλωση είναι η Γερμανία, με 67% των αστικών αποβλήτων της να ανακυκλώνεται είτε να κομποστοποιείται. Επίσης αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι το ότι μόνο 10 κράτη-μέλη εναποθέτουν τα αστικά τους απόβλητα σε χώρους υγειονομικής ταφής σε ποσοστό λιγότερο του 10% το οποίο είναι και ο στόχος της Ε.Ε. μέχρι το 2035. Τέλος, 7 κράτη μέλη, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, εναποθέτουν πάνω από το 60% των αστικών αποβλήτων τους σε ΧΥΤΑ.

Κλείνοντας πέρα από τον προβληματισμό που δημιουργείται από την διακύμανση ανάμεσα στις μεθόδους διαχείρισης των αστικών αποβλήτων που χρησιμοποιεί κάθε χώρα λόγω της αδυναμίας από αυτές να εκσυγχρονιστούν και να προσεγγίσουν τις απαιτήσεις της Ε.Ε., στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η διαχείριση αποβλήτων στο σύνολο της Ε.Ε. διαχρονικά αφήνοντας μία ελπίδα για το μέλλον.

Municipal waste landfilled, incinerated, recycled and composted in the EU-28, 1995 to 2017

Municipal waste landfilled, incinerated, recycled and composted in the EU-28																						change (%)		
	1 995	1 996	1 997	1 998	1 999	2 000	2 001	2 002	2 003	2 004	2 005	2 006	2 007	2 008	2 009	2 010	2 011	2 012.0	2013	2014	2015	2016	2017	1995-2017
million tonnes																								
Landfill	145	143	144	141	140	140	136	132	125	118	110	108	107	101	98	93	86	79	73	68	64	60	58	-60
Incineration	32	32	35	35	36	39	40	41	41	44	48	51	52	55	54	57	60	59	62	64	65	68	68	111
Recycling	25	28	32	35	40	40	42	46	47	49	52	54	60	60	61	63	64	66	65	68	71	73	74	196
Composting	14	16	17	18	19	24	24	26	26	28	29	31	32	34	35	35	34	35	36	38	38	41	43	205
Other	10	14	12	12	12	11	12	12	12	13	16	13	11	11	9	6	5	6	6	5	7	6	6	-43
kg per capita																								
Landfill	302	296	299	290	288	288	278	269	255	239	221	220	215	201	195	185	171	156	145	134	126	117	114	-62
Incineration	67	68	72	73	75	80	82	85	85	90	98	104	104	109	111	114	119	118	122	126	127	134	133	97
Recycling	52	59	66	72	82	83	88	95	97	99	105	109	119	120	122	124	128	130	128	134	140	143	144	175
Composting	30	34	36	37	40	49	50	53	54	57	59	62	64	70	68	69	67	70	72	74	75	81	81	175
Other	22	29	26	24	25	24	24	24	24	27	33	27	22	21	15	12	12	12	12	10	12	11	15	-32

Πίνακας 1. Μέθοδοι διαχείρισης αστικών αποβλήτων στο σύνολο της Ε.Ε. κατά τα έτη 1995 έως και 2017 (Eurostat, 2017)

Το υψηλό θετικό πρόσημο που αποτυπώνεται στο κομμάτι διαχείρισης αποβλήτων μέσω της ανακύκλωσης αλλά και η μεγάλη μείωση της ταφής των απορριμμάτων αποδεικνύουν ότι η κατεύθυνση των πολιτικών της Ε.Ε. σε περιβαλλοντικά ζητήματα είναι σε σωστό δρόμο.

1.7 Η τρέχουσα κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, κατά το έτος 2016 ο ρυθμός ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων (συμπεριλαμβανομένου και της κομποστοποίησης) βάσει των στοιχείων της Eurostat και του Διαγράμματος 1 της CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants) ήταν στο 17%, ενώ η υγειονομική ταφή των απορριμμάτων στο εξωφρενικό ποσοστό του 82%. Σύμφωνα με τις ισχύουσες απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των αποβλήτων, η Ελλάδα θεωρείται πως αντιμετωπίζει υψηλό κίνδυνο να χάσει τους στόχους που έχει θέσει Ευρωπαϊκή Ένωση για τα κράτη μέλη της, οι οποίοι έχουν θέσει τον πήχη στο 50% της επαναχρησιμοποίησης/ανακύκλωσης των αστικών απορριμμάτων. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, η οποία εξέδωσε τον Σεπτέμβριο του 2018 προειδοποίηση στην Ελλάδα, η χαμηλή επίδοση της Ελλάδας στην διαχείριση αποβλήτων οφείλεται στους εξής λόγους:

- Η απουσία εγκαταστάσεων που χρειάζονται για τον διαχωρισμό των ανακυκλώσιμων υλικών

- Η απουσία περιβαλλοντικής συνείδησης των πολιτών
- Η έλλειψη οικονομικών κινήτρων
- Η απουσία σχετικών οικονομικών κυρώσεων, π.χ. (φόρος υγειονομικής ταφής).

Επίσης η οικονομική ύφεση και η επακόλουθη οικονομική κρίση στην Ελλάδα έχουν επηρεάσει τον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων. (European Commission, 2018)

Κεφάλαιο 2 - Κυκλική Οικονομία και Πράσινη Επιχειρηματικότητα

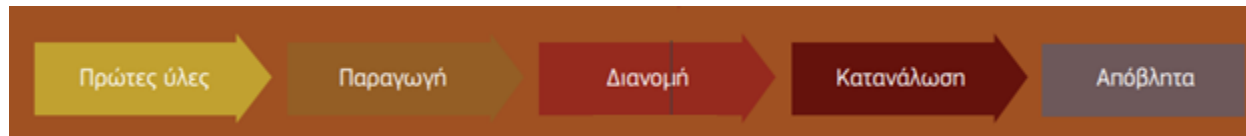
2.1 Από το γραμμικό μοντέλο οικονομίας σε αυτό της Κυκλικής Οικονομίας

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας ανταποκρίνεται πλήρως στην φιλοδοξία για αειφόρο ανάπτυξη στα πλαίσια της αυξανόμενης πίεσης από την παραγωγή και κατανάλωση των πόρων και του περιβάλλοντος του πλανήτη. Έως τώρα η οικονομία λειτουργούσε βάσει του γραμμικού μοντέλου ανάπτυξης (Εικόνα 3), το οποίο είχε ως βασική αρχή ότι οι φυσικοί πόροι ήταν άφθονοι, διαθέσιμοι και με φθινή διάθεση των αποβλήτων τους, με αποτέλεσμα κάθε προϊόν αναπόφευκτα να φθάνει γρήγορα στο «τέλος της ωφέλιμης ζωής» του. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2016)



Εικόνα 2. Διάγραμμα Κυκλικής Οικονομίας, (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018)

Γραμμική οικονομία



Εικόνα 3. Γραμμικό μοντέλο Οικονομίας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018)

Σε μία εποχή όπου ο άνθρωπος όχι μόνο φιλοξενείται από το περιβάλλον στο οποίο ζει, αλλά το καθορίζει, το διαμορφώνει και κατά γενική ομολογία σε ορισμένες περιπτώσεις το καταστρέφει, η στροφή σε ένα αναπτυξιακό μοντέλο κυκλικής οικονομίας (Εικόνα 2) είναι κάτι παραπάνω από ζωτικής σημασίας. Είναι φανερό λοιπόν πως μία οικονομία η οποία αποσπά φυσικούς πόρους με αυξανόμενους ρυθμούς, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί και γενικότερα τα φυσικά όρια του πλανήτη (planetary boundaries), δεν μπορεί να συνεχίσει επ' αόριστον (Sachs, 2015).

Συγκεκριμένα, κάθε χρόνο στην Ε.Ε., χρησιμοποιούνται σχεδόν 15 τόνοι υλικών ανά κάτοικο, ενώ κατά μέσο όρο κάθε πολίτης της Ε.Ε. παράγει πάνω από 4,5 τόνους αποβλήτων ετησίως, εκ των οποίων, όπως φάνηκε και από το *Διάγραμμα 1*, σε πολλές χώρες καταλήγει πάνω από το μισό σε ΧΥΤΑ. (Ευρωπαϊκή επιτροπή, 2017) Επίσης, με μελέτες να δείχνουν πως ο πληθυσμός της γης θα φθάσει τα εννέα δισεκατομμύρια έως το 2030, το παρόν μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης τείνει να οδηγήσει σε αύξηση κάθε τόνου υλικών, κάθε joule ενέργειας, κάθε στρέμματος γης και κάθε κυβικού μέτρου νερού. Η γραμμική οικονομία λοιπόν, η οποία βασίζεται αποκλειστικά στην εξόρυξη πόρων, είναι ολοφάνερο πως δεν αποτελεί πλέον βιώσιμη επιλογή.

2.2 Ο ρόλος των επιχειρήσεων

Η στροφή από το γραμμικό μοντέλο οικονομίας σε μία κυκλική οικονομία απαιτεί αλλαγή της εστίασης στην επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανανέωση και ανακύκλωση υφιστάμενων υλικών και προϊόντων. Ότι πριν θεωρούνταν ως «απόβλητο», τώρα πρέπει να μετατραπεί σε πρώτη ύλη. Η μετάβαση στη κυκλική οικονομία απαιτεί τη συμμετοχή όλων. Η αλλαγή αυτή βασίζεται σε τρεις κύριες συνιστώσες οι οποίες είναι:

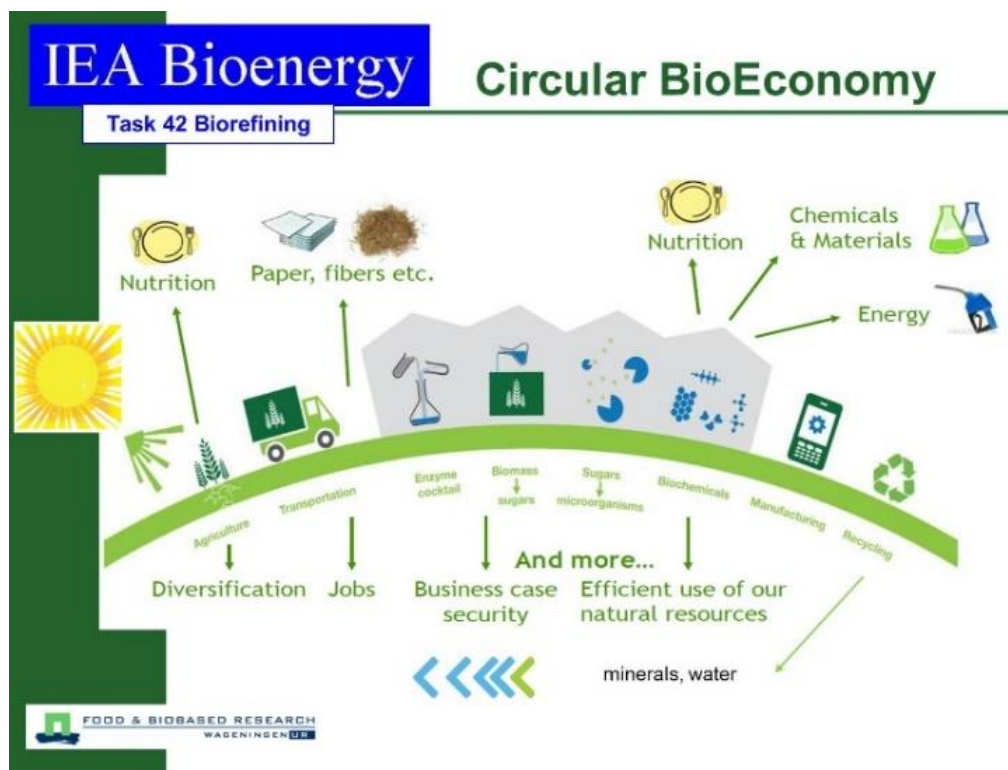
- Στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, σε Ευρωπαϊκό και εγχώριο επίπεδο, οι οποίοι είναι απαραίτητο να διαμορφώσουν ένα κλίμα εμπιστοσύνης στις επιχειρήσεις ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να επιφέρει επικερδή αποτελέσματα, οδηγώντας τις κερδισμένες

μέσα από τον ανταγωνισμό της παγκοσμιοποίησης και τις εταιρίες που δεν θα συμβαδίσουν με το πρότυπο αυτό (π.χ. επιχειρήσεις άλλων χωρών όπως αυτές τις Κίνας),

- τις επιχειρήσεις οι οποίες πρέπει να είναι σε θέση να επανασχεδιάσουν ολόκληρες αλυσίδες προσφοράς με σκοπό την αποδοτικότητα και την κυκλική οικονομία
- και τέλος τους ίδιους τους πολίτες/καταναλωτές οι οποίοι είναι απαραίτητο καλλιεργήσουν και να αναπτύξουν το αίσθημα υπέρ της προστασίας του περιβάλλοντος, στηρίζοντας κάθε τέτοια δράση από τις επιχειρήσεις (Ευρωπαϊκή επιτροπή, 2017).

Η επιχειρηματικότητα λοιπόν θα μπορούσε να πει κανείς πως βρίσκεται σε θέση οδηγού κατά τη μετάβαση σε μία κυκλική οικονομία. Στο παρελθόν, η σύντομη διάρκεια ζωής των προϊόντων αποτελούσε βασική προσέγγιση πολλών επιχειρήσεων. Πλέον τα προϊόντα σχεδιάζονται με στόχο να εντάσσονται σε κύκλους υλικών, με αποτέλεσμα τα υλικά να μεταφέρονται με τέτοιον τρόπο ώστε η προστιθέμενη αξία να διατηρείται όσο το δυνατόν περισσότερο - ενώ τα υπολειμματικά απόβλητα να προσεγγίζουν το μηδέν. Για την επίτευξη της κυκλικότητας, ο σχεδιασμός των προϊόντων είναι το σημείο αφετηρίας της ανάπτυξης κάθε νέου προϊόντος υπηρεσίας ή αγαθού. Η ανθεκτικότητα, η επαναχρησιμοποίηση, η επισκευή, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση είναι μερικές μόνο από τις παραμέτρους που τίθενται σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Ακόμα η ενδυνάμωση της συνεργασίας εντός και μεταξύ της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να επιφέρει μείωση στο κόστος, τα απόβλητα και την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Οι νέες τάσεις στην περιβαλλοντική καινοτομία δημιουργούν νέα προϊόντα, διεργασίες και τεχνολογικά επιτεύγματα. Έτσι αρκετές εταιρίες θα οδηγηθούν σε νέες αγορές, μεταβαίνοντας από τον τομέα της παραγωγής και των πωλήσεων σε αυτόν της παροχής υπηρεσιών, αναπτύσσοντας νέα επιχειρηματικά μοντέλα στη μίσθωση, τον καταμερισμό, την επισκευή, την αναβάθμιση ή την ανακύκλωση επιμέρους στοιχείων. Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση θα προκύψουν πολλές επιχειρηματικές ιδέες και ευκαιρίες για αρκετές εταιρίες σε κάθε κλάδο. (Ευρωπαϊκή επιτροπή, 2017)



Εικόνα 4. Παραδείγματα πολλαπλών ευκαιριών καινοτομίας και επιχειρηματικότητας σε μία Κυκλική BioEconomy (IEA, 2014)

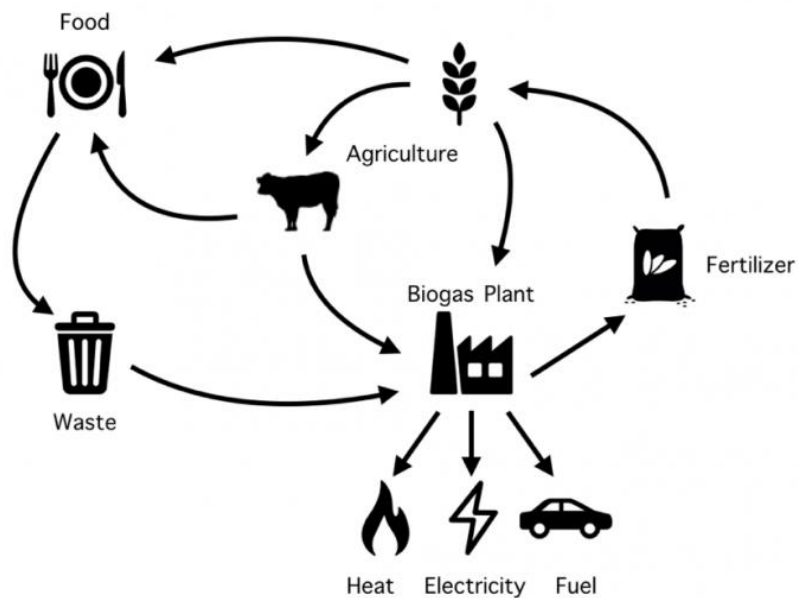
Στα πλαίσια της Κυκλικής Οικονομίας, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε το 2015 ένα πλάνο δράσης για να τονώσει την επιτάχυνση της μετάβασης της Ευρώπης από το γραμμικό μοντέλο ανάπτυξης προς μια κυκλική οικονομία, την τόνωση της παγκόσμιας ανταγωνιστικότητας, την προώθηση της βιώσιμης οικονομικής ανάπτυξης και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Το πλάνο αυτό προέβλεπε 54 μέτρα για να «κλείσει» ο κύκλος ζωής των προϊόντων, από την διαδικασία της παραγωγής, την κατανάλωση μέχρι τον τρόπο διαχείρισης των παραπροϊόντων-αποβλήτων και την μεταφορά των δευτερογενών πρώτων υλών. Συγχρόνως, καθορίζει πέντε τομείς προτεραιότητας των οποίων η μετάβαση θα επιταχυνθεί σε ολόκληρο το εύρος της αξιακής του αλυσίδας (πλαστικά, υπολείμματα τροφών, πρώτες ύλες κρίσιμης σημασίας, κατασκευές και κατεδαφίσεις, βιομάζα και υλικά βιολογικής προέλευσης). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην οικοδόμηση ισχυρών θεμελίων επί των οποίων μπορούν να στηριχθούν και να ευδοκμήσουν οι επενδύσεις και η καινοτομία. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2015)

Κύριος στόχος, όπως τονίστηκε παραπάνω αλλά και όπως είναι χαρακτηριστικό από το διάγραμμα ροής (Εικόνα 2), η αξιοποίηση των υπολλειμάτων ώστε να κλείσει πλήρως ο κύκλος της κυκλικής οικονομίας. Μελέτες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχουν δείξει πως η αποδοτική χρήση των πόρων καθ' όλο το μήκος της αλυσίδας θα μπορούσαν να επιφέρουν κέρδη 630 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως για την ευρωπαϊκή βιομηχανία. (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2015)

Είναι αντιληπτό πως ο κλάδος της διαχείρισης αποβλήτων θα διαδραματίσει καίριο ρόλο στην επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας. Η αλλαγή της νοοτροπίας των κρατών από την απόθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής προς την κατεύθυνση μιας προσέγγισης διαχείρισης των πόρων, όπου η βιομηχανία λειτουργεί ως πάροχος πρώτων υλών και ενέργειας για την υπόλοιπη οικονομία. Βάσει όλων αυτών, η βιομηχανία διαχείρισης απορριμμάτων και φυσικών πόρων αποτελεί κύριο ρυθμιστή, αξιοποιώντας τα απορρίμματα και μέσω της ανάκτησης αξίας από αυτά. Για τη μεγιστοποίηση του βαθμού αξιοποίησης της κυκλικής οικονομίας, είναι αναγκαία η εξεύρεση νέων μορφών συνεργασίας ανάμεσα στα διαφορετικά μέρη που συνιστούν το σύνολο της αλυσίδας τροφοδοσίας. Χαρακτηριστικά παράδειγμα τέτοιων δράσεων είναι τα οικιακά απορρίμματα. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ότι στην Αγγλία, με τη συλλογή οικιακών απορριμμάτων όπως υπολείμματα τροφών, χαρτιά κουζίνας κ.α., θα δημιουργώνταν στην τοπική κοινωνία ένα ετήσιο εισόδημα της τάξης του \$1.5 δισ., με σκοπό τη παραγωγή βιοαερίου και ταυτόχρονη επιστροφή των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος ως λίπασμα. Είναι φανερό, πως η ιδέα για μια κυκλική οικονομία, στην οποία όλο και περισσότερο ανακτώνται υλικά και ενέργεια από απορριπτόμενα προϊόντα κερδίζει συνεχώς έδαφος σε πολιτικό και επιχειρηματικό επίπεδο.

2.3 Ο ρόλος του Βιοαερίου στο μοντέλο ανάπτυξης της Κυκλικής Οικονομίας

Στη Κυκλική Οικονομία οι μονάδες βιοαερίου είναι κρίσιμος σύνδεσμος στον βιολογικό κύκλο. Οι μονάδες βιοαερίου είναι «μετασχηματιστές» που μετατρέπουν τα απόβλητα σε ενέργεια και πολύτιμα προϊόντα. Η αλυσίδα εφοδιασμού σε απόβλητα προς ενέργεια (waste-to-energy) διασφαλίζει τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ένα ελάχιστο επίπεδο και την αποδοτικότερη χρήση των φυσικών πόρων.



Εικόνα 5. Το βιοαέριο ως συνδεδετικός κρίκος στο κλείσιμο της αλυσίδας της Κυκλικής Οικονομίας μεταξύ αποβλήτων και πρώτων υλών (Biogas Action-European Union, 2017)

Τυπικές πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοαερίου είναι:

- η ζωική κοπριά,
- τα αστικά βιολογικά απόβλητα,
- τα οργανικά κατάλοιπα (από την παραγωγή τροφίμων)

Πολλά απ' αυτά είναι απόβλητα τα οποία, εάν δεν υποστούν επεξεργασία, θα δημιουργούσαν κίνδυνο για το περιβάλλον. Συνήθως, οι μονάδες παραγωγής βιοαερίου παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα με την καύση του παραγόμενου βιοαερίου στις εγκαταστάσεις τους, αλλά η αναερόβια χώνευση ύστερα από κατάλληλη αναβάθμιση του παραγόμενου βιοαερίου μπορεί επίσης να αποτελέσει πηγή καυσίμου υψηλής ποιότητας - βιομεθανίου. Το βιομεθάνιο είναι ένα εξευγενισμένο βιοαέριο που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο αερίου αλλά μπορεί επίσης να χρησιμεύσει και ως καύσιμο μεταφοράς, που είναι και το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Όχι μόνο ενέργεια και καύσιμα παράγονται από τις μονάδες παραγωγής βιοαερίου, αλλά παράλληλα άλλο ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα της αναερόβιας χώνευσης είναι ένα υψηλής ποιότητας λίπασμα που προκύπτει ως υπόλειμμα (παραπροϊόν της διεργασίας). Το χωνεμένο προϊόν επιστρέφει στον αγρό (συνήθως στον τομέα των αγροτών, οι οποίοι παρείχαν τις πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοαερίου), με τον τρόπο αυτό τα θρεπτικά συστατικά επανακυκλοφορούν στο έδαφος και γίνονται τρόφιμα. Πρόκειται για ένα εξαιρετικό παράδειγμα κυκλικής οικονομίας (η παροχή πόρων και εισοδημάτων σε ένα σύστημα κλειστό)

βρόχο) που είναι καλό για την κοινωνία, το περιβάλλον και χρησιμοποιεί σε ένα μεγάλο ποσοστό αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. (Biogas Action, European Union, 2017)

2.4 Εφαρμογές και οφέλη του βιοαερίου στο μοντέλο ανάπτυξης της κυκλικής οικονομίας

Η παραγωγή και η χρήση του βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης παρέχει ένα πολυδιάστατο όφελος για την κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον. Μέσω της δημιουργίας μονάδων παραγωγής βιοαερίου δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας βελτιώνοντας το βιοτικό επίπεδο της τοπικής κοινωνίας. Ακόμα μέσω της χρήσης του βιοαερίου σε μία πληθώρα εφαρμογών όπως στη χρήση του ως καύσιμο κίνησης, την έγχυση του στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου ή της συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, μειώνεται το ποσοστό συμμετοχής των ορυκτών καυσίμων οδηγώντας σε μείωση τους αέριους ρύπους στην ατμόσφαιρα. Έτσι, η συγκέντρωση ρύπων όπως αυτοί που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (GHG) μειώνονται στην ατμόσφαιρα και ειδικά στα αστικά κέντρα και τις μεγαλουπόλεις βελτιώνοντας το βιοτικό επίπεδο και την υγεία των κατοίκων. Τέλος, η μείωση των GHG βοηθάει στο πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη, ένα παγκόσμιο φαινόμενο όπου για την αντιμετώπισή του απαιτείται η δραστική μείωση στο επίπεδο των εκπομπών GHG, έτσι ώστε μέχρι το 2050 να έχει περιοριστεί στο 50% του αντιστοίχου επιπέδου της προβιομηχανικής εποχής του 1990.

2.4.1 Case Study σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τέτοιες εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί με ραγδαίο ρυθμό τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπως η Σουηδία, η Ιταλία, η Γερμανία και άλλες.

Αξιοσημείωτο παράδειγμα αποτελεί η πόλη Μιλάνο της Ιταλίας. Το 2011, το Μιλάνο είχε συνολικό ποσοστό συλλογής προδιαλεγμένων αποβλήτων 35%, με τα υπολείμματα τροφών να συλλέγονται μόνο από ιδιωτικές επιχειρήσεις όπως εστιατόρια και ξενοδοχεία. Δεδομένου ότι αυτό το επίπεδο συλλογής αποβλήτων δεν ήταν ικανοποιητικό, η επερχόμενη εξουσία της πόλης το 2012 ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την παραγωγή βιοαερίου και λιπάσματος από οικιακά απορρίμματα τροφίμων με διαλογή στην πηγή, τα οποία στη συνέχεια θα οδηγούνται σε εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης. Μέχρι τον Ιανουάριο του 2015, το συνολικό ποσοστό χωριστής συλλογής αυξήθηκε στο 54%, με τα απόβλητα τροφίμων να αποτελεί τον κύριο παράγοντα. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Το σχέδιο αυτό του Μιλάνου ήταν άκρως αποτελεσματικό καθώς πλέον καλύπτει ολόκληρο τον πληθυσμό των 1,4 εκατομμυρίων κατοίκων της πόλης, καθιστώντας το μεγαλύτερο επίσημο σύστημα συλλογής οργανικών αποβλήτων σε ολόκληρο τον κόσμο. Πριν από την έναρξη της πρωτοβουλίας ξεκίνησε μια ενημερωτική εκστρατεία και κάθε νοικοκυριό έλαβε έναν κάδο

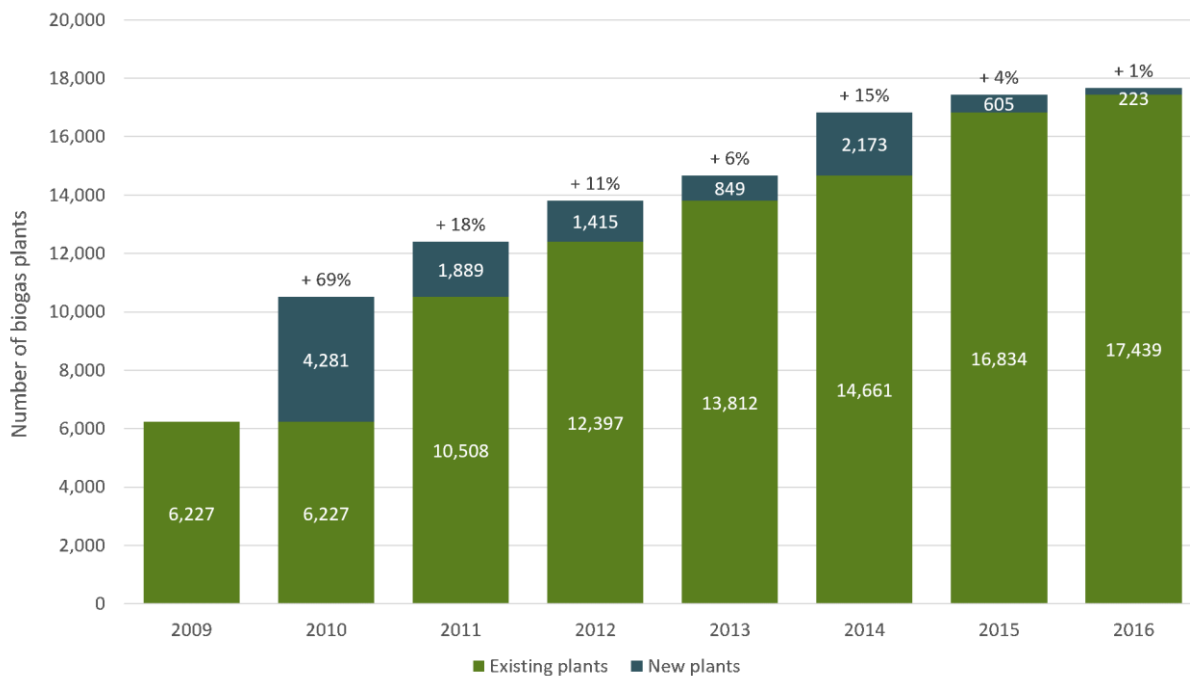
κουζίνας μαζί με έναν συγκεκριμένο αριθμό από βιοδιασπώμενες οικολογικές σακούλες για τη συλλογή των απορριμμάτων. Συλλεγόμενα δύο φορές την εβδομάδα, τα απορρίμματα τροφίμων οδηγούνται σε ένα από τους τέσσερις σταθμούς μεταφοράς, από όπου μεταφέρονται την ίδια ημέρα στην μονάδα αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για την παραγωγή βιοαερίου και λιπάσματος. Έτσι το πρόγραμμα συλλογής ανακτά πάνω από 130.000 τόνους οργανικών στερεών αποβλήτων ετησίως, περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη πόλη στον κόσμο με πληθυσμό άνω του 1 εκατομμυρίου. Κάθε τόνος μετατρεπόμενου απορρίμματος τροφίμων αντιπροσωπεύει ένα οικονομικό όφελος για την πόλη καθώς η επεξεργασία των αποβλήτων τροφίμων κοστίζει περίπου 70 ευρώ ανά τόνο, ενώ το μέσο κόστος διάθεσης για υπολείμματα οικιακών αποβλήτων είναι 100 ευρώ ανά τόνο. Το πλάνο αυτό παράλληλα δημιουργεί ένα επιπλέον έσοδο στη πόλη μέσω της παραγωγής βιοαερίου και λιπάσματος ενώ συγχρόνως εμποδίζει τα απορρίμματα τροφίμων να εκπέμπουν αέρια υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (GHG) από τους χώρους υγειονομικής ταφής. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Ταυτόχρονα, αντίστοιχες ευκαιρίες σε ολόκληρο τον κόσμο αναδεικνύονται καθημερινά. Το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ εκτιμά ότι τα πιθανά παγκόσμια έσοδα από την αλυσίδα αξίας της βιομάζας -συμπεριλαμβάνοντας την παραγωγή γεωργικών εισροών, την εμπορία βιομάζας και τα βιοποικοδομήσιμα προϊόντα- θα μπορούσαν να φθάσουν τα \$295 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2020. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη σχετικά με τα υπολείμματα οργανικών αποβλήτων στο Άμστερνταμ της Ολλανδίας, αντίστοιχη με του Μιλάνο επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε προστιθέμενη αξία 150 εκατομμυρίων ευρώ, καθώς και 900.000 τόνους εξοικονόμησης υλικών και μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 600.000 τόνους ετησίως για την πόλη. Αυτά τα πιθανά οφέλη μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας τα βιοαποικοδομήσιμα, την διαλογή των αποβλήτων στην πηγή και μέσω της ανάκτησης των θρεπτικών ουσιών. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

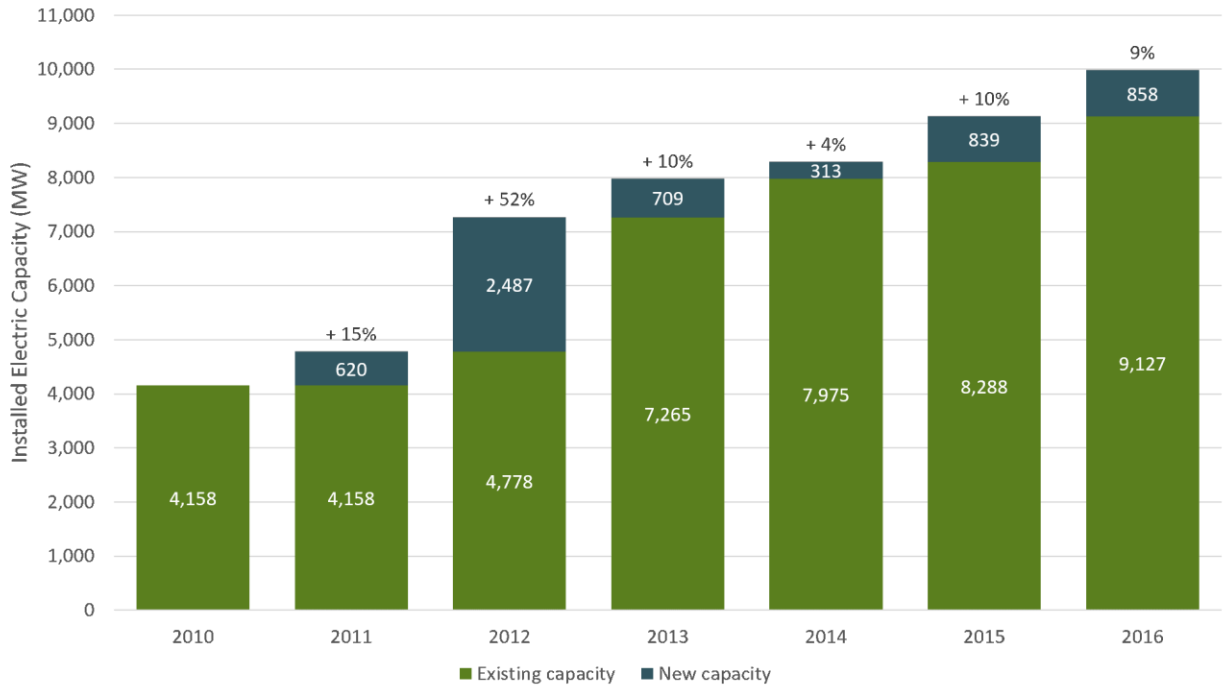
2.5 Η εξέλιξη των μονάδων βιοαερίου στην Ε.Ε.

Ο αριθμός των εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια όπως είναι εμφανές και από το *Διάγραμμα 2*. Μεταξύ του 2009 και του 2016, ο συνολικός αριθμός των μονάδων παραγωγής βιοαερίου αυξήθηκε από 6.227 σε 17.662 εγκαταστάσεις (+11.435 μονάδες, βλέπε *Διάγραμμα 2*). Η ανάπτυξη ήταν ιδιαίτερα έντονη από το 2010 έως το 2012, φθάνοντας σε διπλάσιο αριθμό. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης προέρχεται από την αύξηση των μονάδων που λειτουργούν με γεωργικά υποστρώματα: από 4.797 μονάδες το 2009 σε 12.496 εγκαταστάσεις το 2016 (+7.699 μονάδες, 67% της συνολικής αύξησης). Τις μονάδες που χρησιμοποιούν αγροτοκτηνοτροφικά υπολείμματα ακολουθούν οι μονάδες παραγωγής βιοαερίου που λειτουργούν με ιλύ επεξεργασμένων λυμάτων (2.838 εγκαταστάσεις), απόβλητα υγειονομικής ταφής (1.604 μονάδες) και διάφορα άλλα είδη αποβλήτων (688 εγκαταστάσεις). (European Biogas Association, 2018)



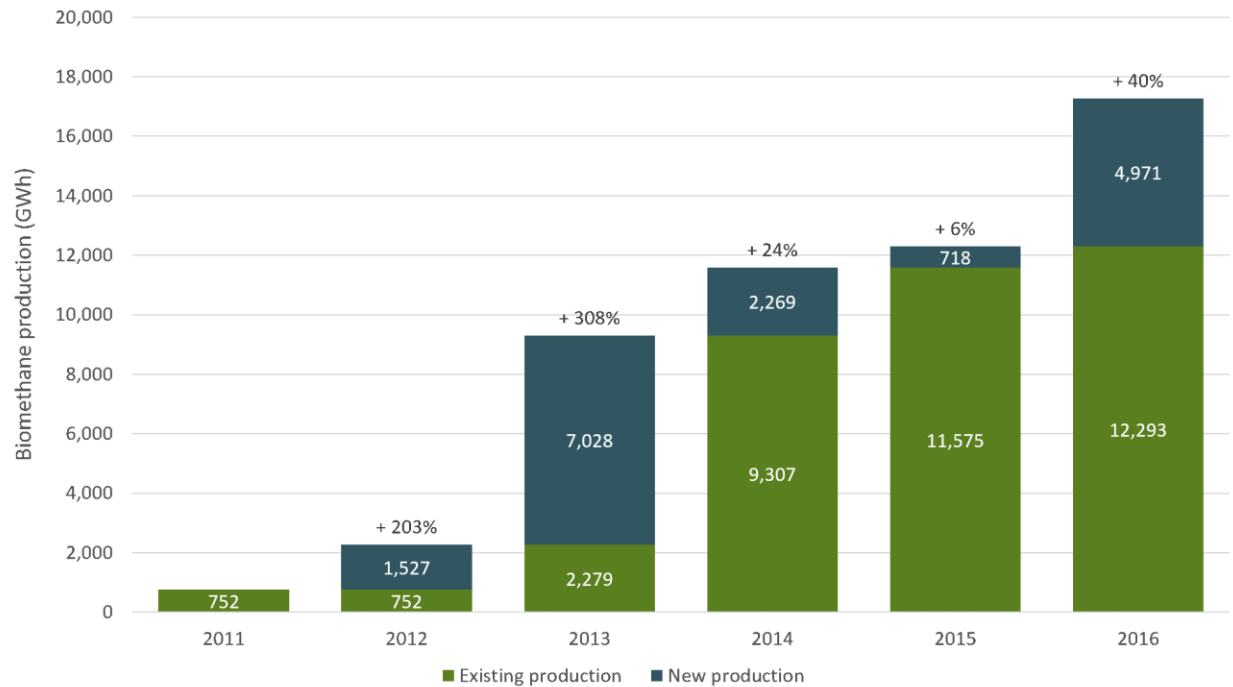
Διάγραμμα 2. Η εξέλιξη του αριθμού εγκαταστάσεων παραγωγής Βιοαερίου στην Ε.Ε. ανά έτος (European Biogas Association, 2017)

Αν και ο αριθμός των μονάδων παραγωγής βιοαερίου στην Ευρώπη σταθεροποιείται από το 2015, η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική χωρητικότητα (IEC) αυξάνεται. Η IEC αυξήθηκε στην Ευρώπη από 4.158 MW το 2010 σε 9.985 MW το 2016 (+5.827 MW, βλ. Διάγραμμα 3). Μόνο το 2016, ο IEC αυξήθηκε κατά 858 MW (+9%). Η αύξηση της εγκατεστημένης ηλεκτρικής χωρητικότητας (IEC) από το 2011 οφείλεται κυρίως στην κατασκευή μονάδων που λειτουργούν με γεωργικά υποστρώματα: οι εγκαταστάσεις αυτές αυξήθηκαν από 3.408 MW το 2011 σε 6.348 MW το 2016 (+2.940 MW δηλαδή 56.5% της συνολικής αύξησης των μονάδων). (European Biogas Association, 2018)



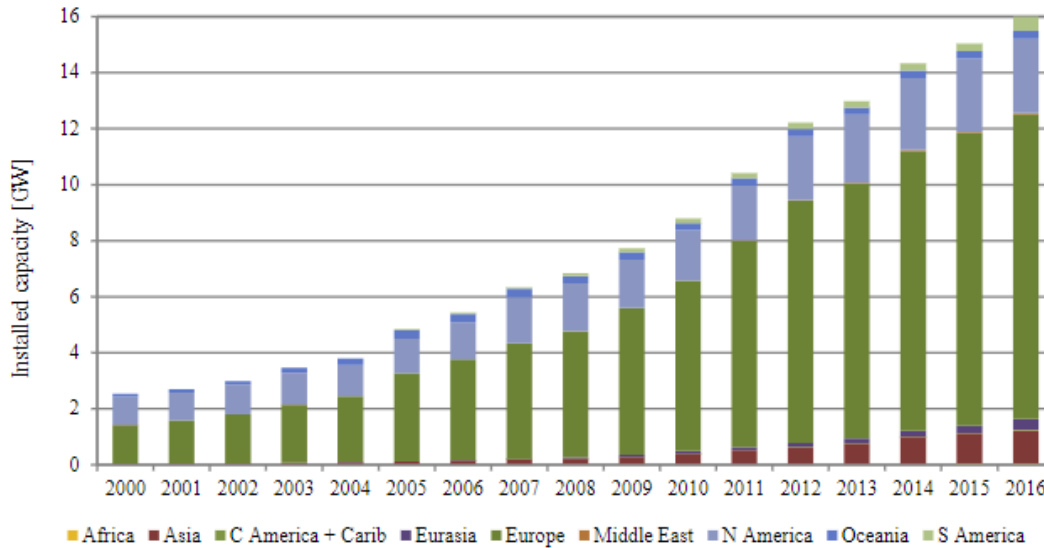
Διάγραμμα 3. Εξέλιξη συνολικής εγκαταστημένης ηλεκτρικής χωρητικότητας στις μονάδες παραγωγής Βιοαερίου (European Biogas Association, 2017)

Παράλληλα, σημειώθηκε σημαντική αύξηση των μονάδων εξευγενισμού του βιοαερίου προς παραγωγή «καθαρού» βιομεθανίου. Σε αρμονία με την εξέλιξη του αριθμού των εγκαταστάσεων βιομεθανίου, η παραγωγή βιομεθανίου αυξήθηκε σημαντικά από το 2011. Η παραγωγή αυξήθηκε από 752 GWh το 2011 σε 17.264 GWh το 2016 (+16.512 GW). Μόνο το 2016, η παραγωγή βιομεθανίου στην Ευρώπη αυξήθηκε κατά 4.971 GWh (+ 40%). Η σημερινή ανάπτυξη στον τομέα είναι ταχύτατη. Οι χώρες που εμφάνισαν τη σημαντικότερη εξέλιξη στην παραγωγή βιομεθανίου το 2016 ήταν η Γερμανία (+900 GWh), η Γαλλία (+133 GWh) και η Σουηδία (+78 GWh). Τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται και στο *διάγραμμα 4*. (European Biogas Association, 2018)



Διάγραμμα 4. Η εξέλιξη της παραγωγής Βιοαερίου στην Ευρώπη σε GWh (European Biogas Association, 2017)

Η Ε.Ε. έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στην παραγωγή βιοαερίου σε παγκόσμιο επίπεδο. Η επιτυχία αυτή οφείλεται κατά κύριο ρόλο σε χώρες με ισχυρό αίσθημα της Αειφόρου ανάπτυξης και της Κυκλικής Οικονομίας αλλά και στα ευνοϊκά συστήματα στήριξης που εφαρμόζονται σε διάφορα κράτη μέλη της Ε.Ε.. Για λόγους σύγκρισης της προόδου που έχει αποτυπωθεί στην Ε.Ε. τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζεται στο *Διάγραμμα 5* η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από βιομεθάνιο σε παγκόσμιο επίπεδο. (European Biogas Association, 2018)



Διάγραμμα 5. Η χρονική εξέλιξη της συνολικής εγκαταστημένης ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από βιομεθάνιο ανά τον κόσμο (International Renewable Energy Agency, , 2017)

2.6 Η θέση της Ελλάδας στην παραγωγή Βιοαερίου

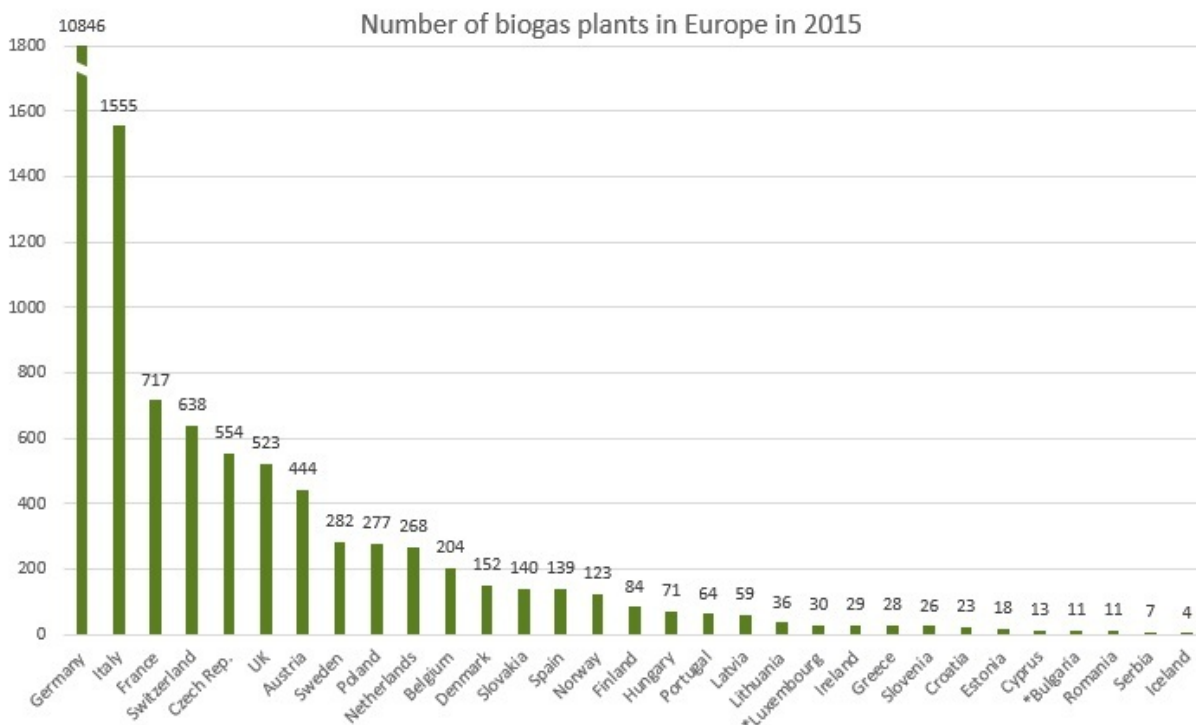
Οι αναφερθείσες πολιτικές αιμοφορικής ανάπτυξης, που έχουν προωθηθεί τα τελευταία χρόνια σε εθνικό και Ευρωπαϊκό επίπεδο, έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος για τη δημιουργία μονάδων παραγωγής βιοαερίου και στη χώρα μας. Έως τις 04 Ιουνίου του 2010, που δημοσιεύτηκε στην Εφημερίδα της Κυβέρνησης, ο Ν.3851/2010, η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων βιομάζας/βιοαερίου στην Ελλάδα ήταν 40,1 MW με ελάχιστες αιτήσεις για χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να υπάρχουν στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) την περίοδο εκείνη για διευθέτηση. Από την ημερομηνία εκείνη μέχρι τον Ιούλιο 2016 έχουν κατατεθεί στον ΔΕΔΔΗΕ, 251 αιτήσεις για σύνδεση σταθμών βιοαερίου αρμοδιότητας ΔΕΔΔΗΕ σύμφωνα με τον Ν. 4152/2013 συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 262,6 MW. Οι αιτήσεις αυτές σήμερα βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα αδειοδοτικής ωριμότητας όσον αφορά την άδεια εγκατάστασης και την άδεια λειτουργίας του κάθε έργου.

Ωστόσο, οι δύο χώρες που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη είναι η Γερμανία, με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 39.950 GWh, και η Ιταλία με 9.290 GWh, ενώ ο αριθμός των εργαζομένων έφθασε ήδη στις 68.500 θέσεις εργασίας στον τομέα του βιοαερίου. Η μεγαλύτερη αγορά έχει δημιουργηθεί στη Γερμανία, με κύκλο εργασιών που ανέρχεται στα 6,9 δισεκατομμύρια ευρώ, και ακολουθεί η Αυστρία με 3 δισεκατομμύρια ευρώ με 20.000 θέσεις εργασίας στον χώρο της βιοενέργειας. (European Biogas Association, 2018)

Συνεπώς είναι εύλογο να επισημάνει κανείς πως αν και η κατεύθυνση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι εμφανής ακόμα και στην Ελλάδα, δυστυχώς υπάρχει ακόμα μεγάλη

απόσταση να διανύσει, ώστε να προσεγγίσει άλλες χώρες της Ε.Ε. που διαθέτουν υψηλό δυναμικό.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή των μονάδων βιοαερίου ανά χώρα για το έτος του 2015.



Διάγραμμα 6. Αριθμός μονάδων παραγωγής βιοαερίου για κάθε χώρα της Ε.Ε. (European Biogas Association, 2016)

Σύμφωνα με στοιχεία της European Biogas Association, μόλις 28 μονάδες βιοαερίου είχαν εγκατασταθεί στην Ελλάδα έως το έτος 2015, οδηγώντας την Ελλάδα στην απογοητευτική θέση της 23^{ης} θέσης σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

2.7 Το πρόγραμμα Waste4Think στα πλαίσια της Κυκλικής Οικονομίας

Η βασική ιδέα του προγράμματος HORIZON 2020 Waste4Think είναι να εισαγάγει και να προωθήσει 20 οικολογικά καινοτόμες λύσεις που καλύπτουν ολόκληρη την αλυσίδα αξίας αποβλήτων. Οι λύσεις αυτές θα εφαρμοστούν και θα αξιολογηθούν 4 ευρωπαϊκές πόλεις:

1. Zamudio (Χώρα των Βάσκων, Ισπανία).

2. Χαλάνδρι (Ελλάδα)
3. Seveso (Ιταλία) και
4. Cascais (Πορτογαλία) (Waste4Think, 2015).

Αυτές οι οικολογικές καινοτόμες αλλαγές θα παρέχουν οικονομικά μέσα, ηλεκτρονικές εφαρμογές για τους πολίτες όπως applications για smartphones εξοικείωσης των παιδιών με την ανακύκλωση, εκπαιδευτικό υλικό, αλλαγές που βασίζονται σε οικονομικά μέσα και κοινωνικές δράσεις για την αξιοποίηση και επαναχρησιμοποίηση των υπολειμμάτων για την ανάκτηση υλικών υψηλής ποιότητας. (Waste4Think, 2018)

Ειδικότερα το πρόγραμμα WASTE4THINK χρηματοδοτούμενο εξ' ολοκλήρου από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του Horizon 2020 στοχεύει στη δημιουργία ενός πρωτοποριακού πλαισίου διαλογής, διαχείρισης και επεξεργασίας των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων του δήμου Χαλανδρίου. Το πρόγραμμα συνδυάζει τη διαλογή στην πηγή, με την ξήρανση και την βιολογική επεξεργασία των ζυμώσιμων απορριμμάτων.

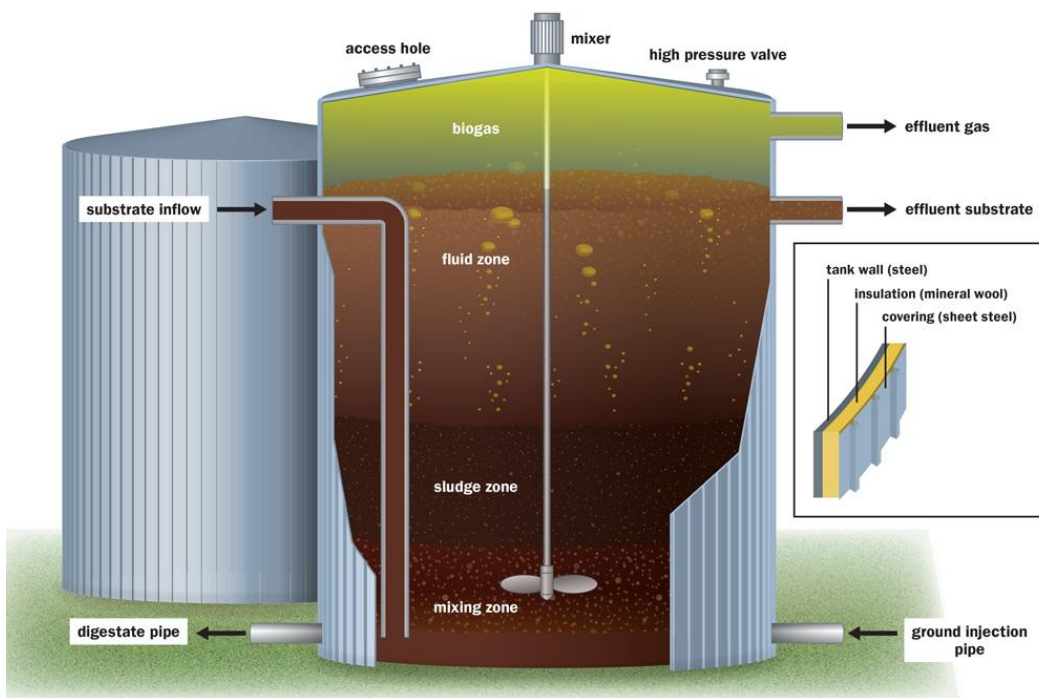
Σκοπός του προγράμματος είναι να μελετηθούν και να υλοποιηθούν πιλοτικά λύσεις που θα βελτιστοποιήσουν τη διαχείριση των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων με στόχο τη μείωση του τελικού όγκου τους που παράγει η πόλη. Μέσα από την ενεργό συμμετοχή των πολιτών και σε συνεργασία με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τα οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα που θα συλλεγούν θα ακολουθήσουν μια διαδικασία προ επεξεργασίας (ξήρανσης και τεμαχισμού), ώστε το τελικό προϊόν να συμβάλει στην ανάπτυξη νέων Καινοτόμων Τεχνολογιών επεξεργασίας και αξιοποίησης, όπως η παραγωγή βιοαερίου, η αναβάθμιση του και συμπίεση του προς παραγωγή ενός βελτιωμένου προϊόντος καθαρότητας περίπου 99% σε μεθάνιο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο κίνησης των απορριμματοφόρων του δήμου Χαλανδρίου, μελέτη στην οποία επικεντρώνεται και η παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο πρόγραμμα συμμετέχουν εθελοντικά 240 οικογένειες (1.000 κάτοικοι). Οι εθελοντές συλλέγουν τα οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα σε έναν ειδικό οικιακό κάδο χρησιμοποιώντας βιοδιασπώμενες σακούλες φτιαγμένες από άμυλο. Στη συνέχεια τα αποθέτουν σε ειδικούς καφέ κάδους που αντιστοιχούν σε δύο ή τρεις οικογένειες και στους οποίους έχουν αποκλειστική πρόσβαση οι εθελοντές με τη χρήση ειδικού κλειδιού. Τα οικιακά απορρίμματα συλλέγονται κάθε δύο ή τρεις ημέρες με ειδικό απορριμματοφόρο και κατευθύνονται στη μονάδα ξήρανσης και τεμαχισμού του Δήμου Χαλανδρίου. Ο ξηραντήρας- τεμαχιστής που χρησιμοποιείται είναι ο GAIA GC 300. Μέσω της διαδικασίας της ξήρανσης παράγεται ένα ξηρό προϊόν βιομάζας, το FORBI (FOod Residue Biomass product) και παράλληλα ένα υγρό συμπύκνωμα. Η ξήρανση μειώνει την υγρασία του αρχικού υλικού κατά περίπου 75- 80% με αποτέλεσμα το FORBI να έχει υγρασία περίπου 5%. Η υγρασία απομακρύνεται με τη μορφή υδρατμών, οι οποίοι συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή (condenser) του ξηραντήρα-τεμαχιστή και στη συνέχεια απομακρύνονται.

Κεφάλαιο 3 – Θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Η Αναερόβια Χώνευση (Anaerobic Digestion-AD)

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί και στη φύση, καθορίζεται ως η βιολογική διεργασία κατά την οποία οργανικό υλικό (υπόστρωμα), απουσία Οξυγόνου (O_2) (αναερόβιες συνθήκες), μετατρέπεται σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) υπό τη δράση μεικτού μικροβιακού πληθυσμού. Το μεθάνιο ή αλλιώς το βιοαέριο που παράγεται έχει σύσταση η οποία μπορεί να ποικίλει ανάλογα τους παράγοντες και τις παραμέτρους της διεργασίας. Παράλληλα προκύπτει και ένα χωνεμένο υπόλειμμα. (Α. Βλυσίδης, 2018)



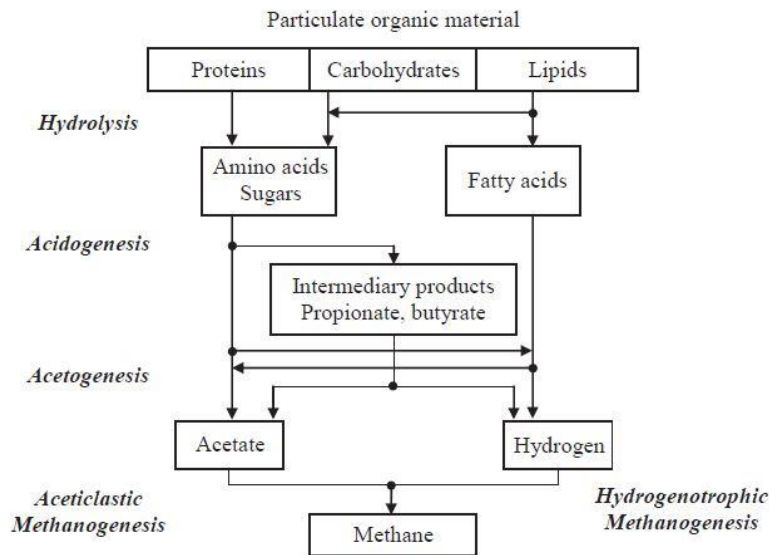
Εικόνα 6. Αναερόβιος χωνευτήρας

Στις μέρες μας, η αναερόβια επεξεργασία με ταυτόχρονη παραγωγή μεθανίου είναι μία μέθοδος ευρείας αποδοχής για τη σταθεροποίηση της παραγόμενης ιλύος στις μονάδες βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων και υγρών βιομηχανικών αποβλήτων, καθώς και για την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των αστικών στερεών αποβλήτων, των αστικών λυμάτων και υγρών και στερεών βιομηχανικών αποβλήτων. Για παράδειγμα, οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων δημιουργούν μια μεγάλη ποσότητα λάσπης, η οποία είναι δαπανηρή για την

αποτέφρωση. Ωστόσο, η αναερόβια χώνευση μειώνει σημαντικά το κόστος της επεξεργασίας της ιλύος ενώ παράλληλα μειώνει ουσιαστικά τον όγκο της και ανακτά την ανανεώσιμη ενέργεια με τη μορφή βιοαερίου. (Ε. Uçkun Kiran, 2016). Συμπερασματικά η αναερόβια χώνευση είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διεργασία, καθώς τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για την παραγωγή ενέργειας.

Τις τελευταίες δεκαετίες βασίζεται σε νέες τεχνικές, ανακαλύψεις και εφευρέσεις που υπάρχουν και θα υπάρξουν στους τομείς της βιοχημείας, της μικροβιολογίας, της χημείας και της περιβαλλοντικής μηχανικής. Χαρακτηριστικό σημείο που βοήθησε στην βελτιστοποίηση και διάδοση της τεχνικής της αναερόβιας χώνευσης ήταν η δημιουργία του μοντέλου Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM 1) το οποίο, εν αντιθέσει με τα έως τότε μαθηματικά μοντέλα, κατάφερε να συνδυάσει αρκετές από τις διαφορετικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ΑΧ. (Ι. Angelidaki, 2002)

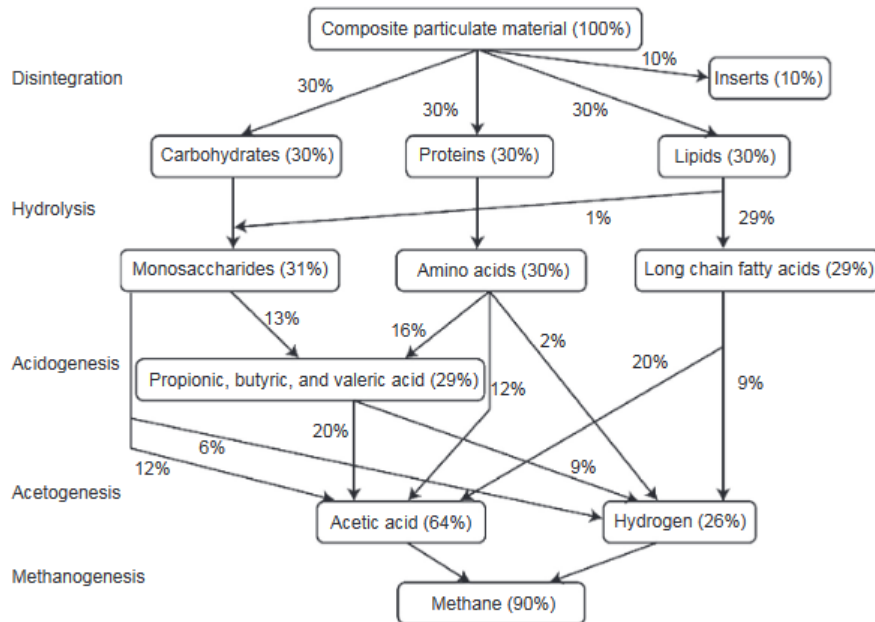
Τα βασικά βιοχημικά στάδια της διεργασίας είναι η υδρόλυση, η οξεογένεση, η οξικογένεση και η μεθανογένεση οι οποίες παρουσιάζονται εν συντομία στο παρακάτω *Διάγραμμα 7*.



Διάγραμμα 7. Σχηματική παρουσίαση των σταδίων της αναερόβιας χώνευσης της οργανικής ύλης (D.J. Batstone, 2002)

3.1.1 Τα βασικά στάδια της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μια περίπλοκη βιοχημική διαδικασία που αποτελείται από διαδοχικές και αμφίρροπες αντιδράσεις που διεξάγονται από διάφορους τύπους αναερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι έχουν διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης και ευαισθησία στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το pH, η μερική πίεση υδρογόνου και άλλους, οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης αποτελείται από τα εξής στάδια, τα οποία αναπαριστώνται και στο διάγραμμα ροής του *Διαγράμματος 8*.



Διάγραμμα 8. Ροή COD κατά τη διαδικασία της Αναερόβιας Χώνευσης, για σωματιδιακή βιομάζα που αποτελείται από 10% αδρανή και 30% από καθένα από τα κύρια οργανικά πολυμερή (Angelidaki, 2002)

Αποικοδόμηση:

Σε αυτό το στάδιο η σύνθετη βιομάζα αποικοδομείται σε οργανικά πολυμερή, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια. (D.J. Batstone, 2002).

Υδρόλυση:

Τα οργανικά πολυμερή (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη) υδρολύονται στα αντίστοιχα μονομερή τους (σάκχαρα, αμινοξέα, λιπίδια) από τα εξωκυτταρικά υδρολυτικά ένζυμα, που παράγονται και εκκρίνονται από ορισμένα βακτήρια, για τη διευκόλυνση της μεταφοράς θρεπτικών συστατικών μέσω της κυτταρικής μεμβράνης. Προκειμένου να βελτιωθεί η υδρόλυση της βιομάζας, η βιομάζα δύναται να υποστεί προ-επεξεργασία. Οι διάφορες μέθοδοι προ-

επεξεργασίας τροποποιούν το σύνθετο υπόστρωμα και το κάνουν περισσότερο επιδεκτικό στους μικροοργανισμούς και τις ενζυματικές αντιδράσεις. (E. Uçkun Kiran, 2016) Τα συστατικά των λασπών από αστικά λύματα τα οποία δεν μπορούν να αποικοδομηθούν ονομάζονται μη αποικοδομήσιμα, αποτελώντας σημαντικό τμήμα των λασπών το οποίο κυμαίνεται από 35% έως και 80% τους οργανικού φορτίου. (A. Βλυσίδης, 2018)

Οξεογένεση:

Τα διαφορετικά είδη μικροοργανισμών είναι σε θέση να υδρολύουν απλά μονομερή και ολιγομερή σε δικαρβοξυλικά οξέα, λιπαρά οξέα βραχείας αλυσίδας, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και άλλες απλούστερες οργανικές ενώσεις. Σε αυτό το στάδιο παράγονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Εάν η περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες του υποστρώματος είναι υψηλή, η παραγωγή υδρογόνου θα είναι υψηλή και μπορεί να αποδοθεί άμεσα για να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο. Τα βακτήρια αυτά έχουν υψηλό ρυθμό ανάπτυξης και μπορούν να ανεχθούν χαμηλά pH (5-6). Ως αποτέλεσμα της ταχείας ανάπτυξής τους, η όλη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να ανασταλεί λόγω της μείωσης του pH εάν τα όξινα προϊόντα δεν μετατραπούν τελικά από τα οξικογόνα και τα μεθανογόνα βακτήρια. (Angelidaki, 2002)

Οξικογένεση:

Τα λιπαρά οξέα και άλλα οργανικά μόρια μεταβολίζονται σε οξικό, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο από οξικογόνους μικροοργανισμούς κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης. Η αναστολή της μεθανογένεσης μπορεί να συμβεί εάν τα μόρια υδρογόνου δεν μεταβολιστούν μεταγενέστερα. Η οξικογένεση διαρκεί πολύ καιρό καθώς η ανάπτυξη των οξικογόνων βακτηρίων είναι αργή και υποτονική, γενικά έχουν μεγάλους χρόνους διπλασιασμού, όπως ημέρες ή εβδομάδες. (Angelidaki, 2002)

Μεθανογένεση:

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μικροβιακές ομάδες που παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από διαφορετικά υποστρώματα. Η πρώτη ομάδα είναι οι ακετοκλαστικοί μεθανογόνοι που καταναλώνουν το οξικό οξύ προς παραγωγή μεθανίου. Οι ακετοκλαστικοί μεθανογόνοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται με αργό ρυθμό (ο χρόνος διπλασιασμού είναι της τάξης των ημερών) και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε διάφορες παραμέτρους όπως χαμηλό pH, απώλεια θρεπτικών συστατικών και ιχνοστοιχείων και άλλοι οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω. Η δεύτερη ομάδα είναι οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα για την παραγωγή μεθανίου. Η περιεκτικότητα σε μεθάνιο του

παραγόμενου βιοαερίου εξαρτάται από τη σύνθεση του υποστρώματος, ιδιαίτερα από την κατάσταση οξείδωσης του οργανικού άνθρακα που βρίσκεται στο υπόστρωμα. (Angelidaki, 2002)

3.1.2 Παράμετροι της αναερόβιας χώνευσης

Η μικροβιακή βιομάζα σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα απαρτίζεται από πολλές διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών που αναπτύσσονται συναγωνιστικά ή ανταγωνιστικά, προκαλώντας συγκεκριμένες αντιδράσεις στις εκάστοτε περιβαλλοντικές αλλαγές. Επομένως, όταν η δραστηριότητα μιας από τις ομάδες των μικροοργανισμών αυτών καταστέλλεται, η ανάπτυξη άλλων ομάδων μικροοργανισμών επηρεάζεται, η σύσταση του μικροβιακού πληθυσμού αλλάζει, πράγμα που μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ή ακόμη και να προκαλέσει αποτυχία της διεργασίας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (Anaerobic Digestion) αξιολογούνται παρακάτω.

3.1.2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι μία από τις βασικές παραμέτρους που καθορίζουν την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, διότι επηρεάζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, τις δραστηριότητες των ενζύμων, τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και συνεπώς την απόδοση του παραγόμενου μεθανίου. Παρόλο που η συμβατική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης διεξάγεται σε μεσόφιλες θερμοκρασίες 35-37°C (Forster-Carneiro, 2008), η θερμοφιλή αναερόβια χώνευση έχει τα πλεονεκτήματα του υψηλότερου ρυθμού ανάπτυξης, του ταχύτερου μεταβολισμού, της μεγαλύτερης φέρουσας ικανότητας και συνεπώς καταλήγει σε υψηλότερη απόδοση μεθανίου (Kim, 2011). Ακόμα, πρέπει να επισημανθεί πως η αστάθεια της θερμοκρασίας έχει αρνητική επίδραση στην αναερόβια χώνευση. Σε σύγκριση με την μεσόφιλη αναερόβια χώνευση η θερμοφιλή είναι πιο ευαίσθητη στην αλλαγή της θερμοκρασίας και απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα εγκλιματισμού σε διαφορετική θερμοκρασία, καθώς η θερμοφιλική αναερόβια βιομάζα εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερη ποικιλομορφία ως προς τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς που περιέχει. Η θερμοφιλή αναερόβια χώνευση έχει εμφανίζει υψηλότερους ρυθμούς αποικοδόμησης. Οι υψηλότεροι αυτοί ρυθμοί αποικοδόμησης δύναται να οδηγήσουν σε συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων με συνεπακόλουθη πτώση του pH και παρεμπόδιση της μεθανογένεσης.

3.1.2.2 pH, Αμμωνία και Πτητικά Λιπαρά Οξέα (Volatile Fatty acids-VFAs)

Η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα στην κλίμακα pH μεταξύ 6 και 8,5 με μια βέλτιστη τιμή κοντά στο pH=7,0 και pH=8,0. Αναστέλλεται δραματικά όταν το pH μειώνεται κάτω από 6,0 ή αυξάνει πάνω από 8,5. Η αστάθεια στο pH δημιουργείται ειδικά κατά τη διάρκεια της βιοσυσσώρευσης αμμωνίας και VFAs. Αυτό έπειτα επηρεάζει τις λειτουργίες των εξωκυττάρων

ενζύμων και την ταχύτητα της υδρόλυσης. Υποστρώματα πλούσια σε εύκολα αποικοδομήσιμα θρεπτικά συστατικά μπορούν εύκολα να αποικοδομηθούν οδηγώντας σε συσσώρευση VFAs Η συσσώρευση των VFAs, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω οδηγεί σε μείωση του pH η οποία λειτουργεί ιδιαίτερα παρεμποδιστικά για την αναερόβια χώνευση και ιδιαίτερα για τους ακετοκλάστες μεθανόγους. Από την άλλη πλευρά, η περίσσεια ελεύθερης αμμωνίας οδηγεί σε υπερβολική αύξηση του pH. Επιπλέον, μπορεί να δημιουργήσει ανισορροπίες πρωτονίων και έλλειψη καλίου, προκαλώντας λύση των κυττάρων. Η αμμωνία μπορεί να λειτουργήσει παρεμποδιστικά για την μεθανογένεση ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με την Mata-Alvarez (2003), η παρεμπόδιση λαμβάνει χώρα όταν η συγκέντρωση ολικής αμμωνίας είναι 1200 mg / L, ενώ οι Hartmann και Ahning (2005) έχουν δείξει ότι η αμμωνία μπορεί να δράσει παρεμποδιστικά ακόμα και σε συγκεντρώσεις της τάξεως των 650 mg/L. Οι Angelidaki et al. (2005) ανέφεραν ότι η αποτελεσματικότητα της μεθανογένεσης σε μεγάλης κλίμακας μονάδες αναερόβιας χώνευσης που επεξεργάζονται κοπριά και οργανικά απόβλητα μειώθηκε όταν η συγκέντρωση της αμμωνίας ανήλθε πάνω από 4000 mg/L. Παρόλο που φαίνεται να αποδεικνύεται ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας έχουν ως αποτέλεσμα λειτουργικές δυσκολίες στους χωνευτές, αναφέρεται επίσης ότι οι μικροοργανισμοί μπορούν να προσαρμόζονται στην υψηλότερη συγκέντρωση ελεύθερης αμμωνίας με το χρόνο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ακριβής συγκέντρωση αμμωνίας στην οποία μπορεί να σημειωθεί αποτυχία της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης ή αστάθεια αυτής [(Banks et al., 2011a), (Forster-Carneiro, 2008)].

Για να απομακρυνθεί η περίσσεια αμμωνίας, πολλές διαφορετικές στρατηγικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως το stripping της αμμωνίας, διεργασίες βιολογικής μείωσης της αμμωνίας και η ηλεκτροχημική μετατροπή της (Ahn, 2006, Park et al., 2010, Walker et al., 2011). Παρόλο που η υψηλής περιεκτικότητα σε αμμωνία είναι ένας πιθανός ανασταλτικός παράγοντας, μπορεί να είναι επιθυμητή σε ορισμένες περιπτώσεις. Έχει αναφερθεί ότι η χώνευση με υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας μπορεί να παράσχει σταθερή παραγωγή βιοαερίου εξισορροπώντας τις χαμηλές τιμές pH που προκαλούνται από τη συσσώρευση των VFA's σε συνεχή συστήματα.(Banks et al., 2011a)

3.1.2.3 Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί μπορούν να μεταβολίσουν διαφορετικές οργανικές ενώσεις όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια, και άλλες. Η περιεκτικότητα σε μεθάνιο του μίγματος του βιοαερίου εξαρτάται από τη βιομάζα, και ιδιαίτερα από την οξειδωτική κατάσταση του άνθρακα που βρίσκεται στις πρώτες ύλες. Όσο περισσότερο μειώνεται ο άνθρακας, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο (Gujer and Zehnder, 1983). Ο λόγος άνθρακα προς Άζωτο (C/N) της πρώτης ύλης πρέπει να είναι ισορροπημένος. Έχει παρατηρηθεί ότι ο λόγος C/N της τάξεως 20 με 30 είναι ιδανικός για την αναερόβια χώνευση (Gomez et al., 2005). Δυστυχώς, στις περισσότερες περιπτώσεις ο λόγος C/N της πρώτης ύλης είναι εκτός της περιοχής. Σε μια τέτοια περίπτωση, συχνά εφαρμόζεται η ανάμειξη επιλεγμένων πρώτων υλών προκειμένου να προσαρμοστεί ο λόγος C/N και να σταθεροποιηθεί η παραγωγή

βιοαερίου. Η περιεκτικότητα λιπιδίων της βιομάζας επηρεάζει επίσης την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης. Υψηλή περιεκτικότητα λιπιδίων μπορεί επίσης να δημιουργήσει προβλήματα κατά την χώνευση. Αν και το δυνητικό ποσοστό παραγωγής βιομεθανίου των λιπιδίων (1014 L / kg VS) είναι πολύ υψηλότερο από τους υδατάνθρακες (370 L / kg VS), τα λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LCFA) είναι ανασταλτικά στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και προκαλούν αστοχίες του συστήματος σε υψηλές συγκεντρώσεις. Τα LCFA απορροφώνται στην κυτταρική επιφάνεια και καταστρέφουν τον μηχανισμό μεταφοράς για μέσω της πλασματικής μεμβράνης των κυττάρων.

Τέλος τα μικροθρεπτικά συστατικά, όπως ο φώσφορος, το κάλιο, το μαγνήσιο και το θείο, ασκούν καθοριστικό ρόλο στην ενεργοποίηση και λειτουργία των αναερόβιων μικροοργανισμών. Εκτός από τα μικροστοιχεία, άλλα ιχνοστοιχεία είναι επίσης σημαντικά για την κυτταρική ανάπτυξη και τις ενζυματικές δράσεις. Για παράδειγμα, το νικέλιο είναι ζωτικής σημασίας για τη σύνθεση του συνένζυμου F430, ο σίδηρος είναι ένα βασικό συστατικό φορέων ηλεκτρονίων, το ασβέστιο σταθεροποιεί το κυτταρικό τοίχωμα και απαιτείται για τη θερμική σταθερότητα των ενδοσπορίων, το κοβάλτιο είναι το συστατικό της βιταμίνης B12 και ο ψευδάργυρος απαιτείται για τη σύνθεση μερικών ενζύμων κλπ. Παρόλα αυτά σε υψηλές συγκεντρώσεις πολλά από τα παραπάνω συστατικά είναι τοξικά οπότε και αποφεύγονται (Chen et al., 2008). (Ε. Uçkun Kiran, 2016)

3.2 Βιοαέριο και σύσταση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μέσω της αναερόβιας χώνευσης, η οργανική ύλη με τη βοήθεια των μικροοργανισμών μετατρέπεται σε βιοαέριο. Κύρια υποστρώματα της αναερόβιας χώνευσης αποτελούν τα γεωργικά απόβλητα, τα απόβλητα τροφίμων και η ιλύς που προέρχεται από την αερόβια επεξεργασία στις Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων (ΜΕΛ). Αν και η σύστασή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα και από τους παράγοντες που αναλύθηκαν πριν, κατά κύριο λόγο, αποτελείται από περίπου 60% μεθάνιο, κάτι το οποίο το κάνει μία πολλά υποσχόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για αντικατάσταση του παραδοσιακού φυσικού αερίου. (Angelidaki I, 2018)

Μία τυπική σύσταση βιοαερίου παρουσιάζεται αναλυτικότερα στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2. Τυπική σύσταση βιοαερίου παραγόμενο μέσω της Αναερόβιας Χώνευσης

Συστατικό	Χημικός τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH ₄	55-70

Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	30-45
Άζωτο	N ₂	0-5
Οξυγόνο	O ₂	<1
Υδρογονάνθρακες	C _n H _{2n+2}	<1
Υδρόθειο	H ₂ S	0-0,5
Αμμωνία	NH ₃	0-0,05
Υδρατμοί	H ₂ O	1-5

3.3 Τεχνικές αναβάθμισης βιοαερίου

Το μεθάνιο που εμπεριέχεται στο βιοαέριο έχει υψηλό ενεργειακό φορτίο (περίπου 55 MJ / kg) καθιστώντας το κατάλληλη πηγή θερμότητας και/ή ισχύος. Ενώ η καύση του βιοαερίου μπορεί να πραγματοποιηθεί στην τοποθεσία παραγωγής με σκοπό την παραγωγή θερμότητας ή/και ισχύος τοπικά, μπορεί επίσης να αναβαθμιστεί σε βιομεθάνιο, το οποίο τυπικά έχει περιεκτικότητα σε μεθάνιο περίπου 96% κατ' όγκο (Rychebosch E, 2011), ενώ σε μερικές περιπτώσεις μπορεί φθάσει και το 99%, με απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του CO₂ και των προσμίξεων. Σαν αποτέλεσμα αυτού καθίσταται εφικτή η χρήση του αναβαθμισμένου πλέον βιοαερίου ως φυσικού αερίου κίνησης ή/και η εισαγωγή του στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου.

Δεδομένου ότι το βιοαέριο προέρχεται από βιολογική ύλη που έχει απορροφήσει το CO₂ από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του, η χρήση του ως εναλλακτική πηγή ενέργειας αντί για τα ορυκτά καύσιμα θα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα.

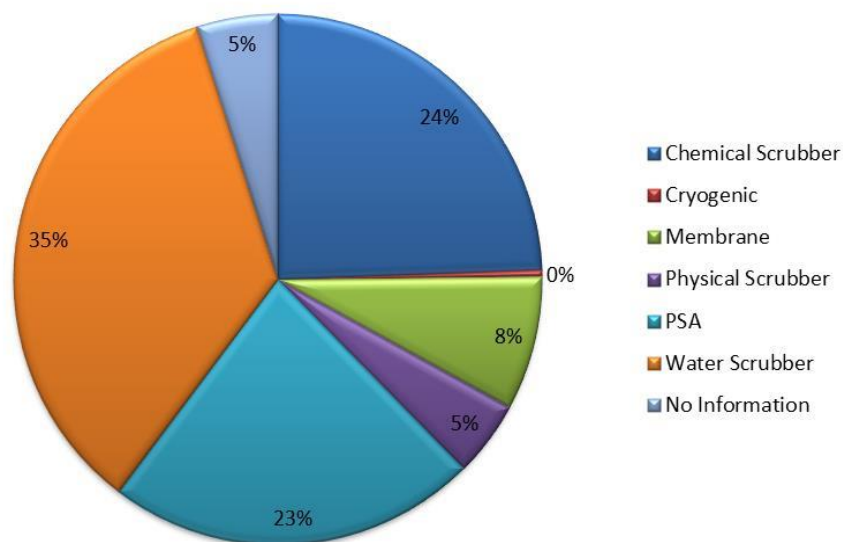
Παρόλα αυτά, για την επίτευξη όλων των παραπάνω είναι αναγκαία η απομάκρυνση του CO₂, του H₂S και των υπόλοιπων προσμίξεων που υπάρχουν στο βιοαέριο για την χρησιμοποίηση του ως καύσιμο κίνησης ή την έγχυση του στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου. (Petrakoroulou F,

2015). Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές μελέτες εύρεσης μίας βέλτιστης τεχνικής αναβάθμισης βιοαερίου από άποψη αποδοτικότητας, καθαρότητας και κόστους.

Οι κυριότερες απ' αυτές τις μεθόδους είναι οι εξής:

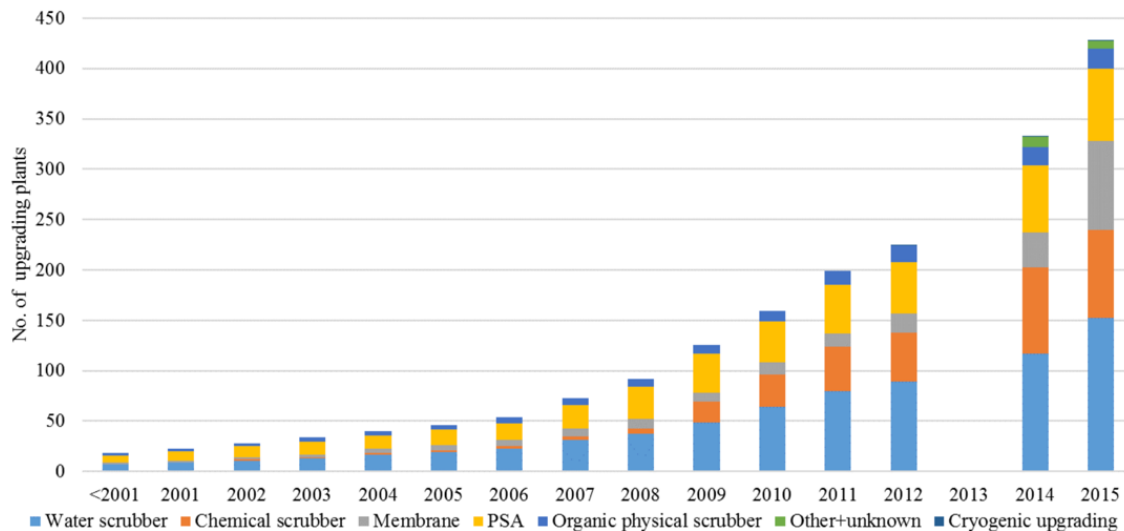
- Water scrubbing - απορρόφηση του CO₂ σε νερό υπό πίεση και απελευθέρωση του με μείωση της πίεσης.
- Απορρόφηση με φυσικούς διαλύτες (με τη μέθοδο της φυσικής απορρόφησης) και χημικών διαλυτών (με χημική αντίδραση). Το CO₂ απελευθερώνεται με θέρμανση του υγρού.
- Pressure swing adsorption (PSA) – απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα σε στερεά σωματίδια και απελευθέρωση με μείωση της πίεσης.
- Διαχωρισμός με μεμβράνες - παγιδεύοντας το CO₂ σε λεπτές μεμβράνες υπό πίεση και απελευθερώνοντάς το με μείωση της πίεσης
- Κρυογενικός διαχωρισμός - διαχωρισμός των αερίων με συμπύκνωση μιας ή περισσότερων φάσεων (Petersson and Wellinger, 2009)

Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή των διαφορετικών τεχνικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου στις 37 χώρες-μέλη της IEA.



Εικόνα 7. Ποσοστιαία πίτα διαφορετικών τεχνικών μονάδων αναβάθμισης βιοαερίου σε 37 χώρες μέλη της IEA (IEA, 2013)

Οι τεχνικές αναβάθμισης βιοαερίου που φαίνεται να έχουν την μεγαλύτερη αποδοχή είναι το water scrubbing, η χημική απορρόφηση και η μέθοδος PSA. Η χημική απορρόφηση και η προσρόφηση με τη μέθοδο PSA χρησιμοποιούνται συχνά, ειδικά όταν απαιτείται υψηλή καθαρότητα μεθανίου, όπως για εισαγωγή στο δίκτυο αερίων ή για χρήση ως καύσιμο οχημάτων.



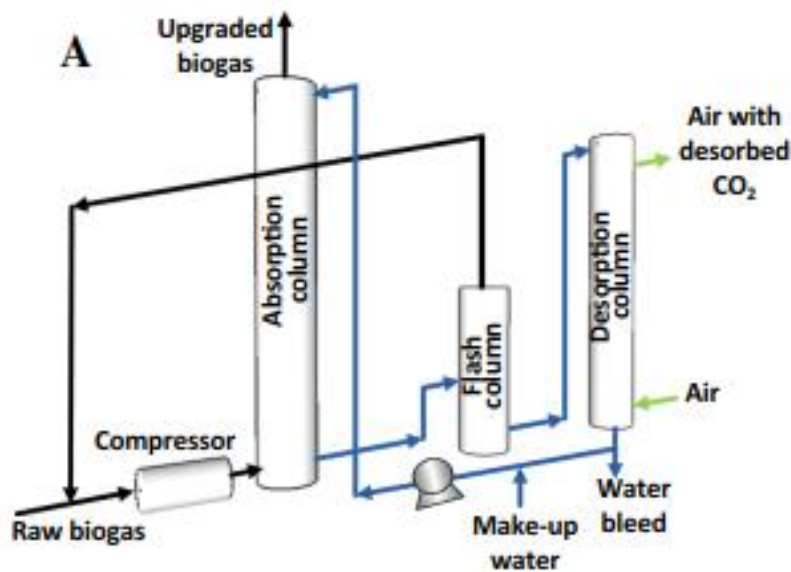
Διάγραμμα 9. Εξέλιξη αριθμού μονάδων αναβάθμισης βιοαερίου ανά έτος

Από το *διάγραμμα 9* συμπεράνουμε πως η κρυογενική μέθοδος αν και βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, υιοθετείται από ολοένα και περισσότερες μονάδες αναβάθμισης βιοαερίου παρά το υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

3.3.2 Φυσική απορρόφηση με νερό (Water Scrubbing)

Το Water scrubbing είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την αναβάθμιση του βιοαερίου (Thran et al., 2014). Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον διαχωρισμό του CO₂ και του H₂S από το βιοαέριο λόγω της αυξημένης διαλυτότητάς τους στο νερό σε σύγκριση με το CH₄ (συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον νόμο του Henry, η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό στους 25°C είναι περίπου 26 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή του μεθανίου). Αρχικά, το βιοαέριο είναι πεπιεσμένο (6-10 bar στους 40°C) και εγχέεται στη στήλη απορρόφησης μέσω του πυθμένα της (Bauer et al., 2013b). Το νερό, αντίθετα, παρέχεται από την άνω πλευρά της στήλης και ρέει προς τα κάτω, δηλαδή με φορά αντίθετη από αυτή της κίνησης του βιοαερίου (αντιρροή). Η στήλη απορρόφησης συνήθως επιλέγεται να εφοδιάζεται με τυχαίο πληρωτικό υλικό για την αύξηση της επιφάνειας επαφής του αερίου με το υγρό (Ryckebosch et al., 2011).

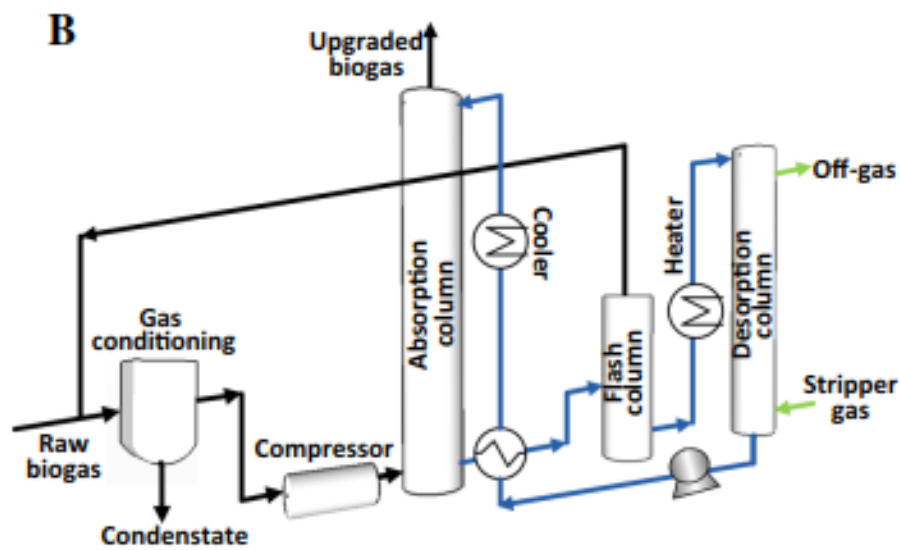
Το βιομεθάνιο απελευθερώνεται από την κορυφή της στήλης, απαλλαγμένο σε σημαντικό βαθμό από τις προσμίξεις του CO₂ και του H₂S, ενώ η υδατική φάση που περιέχει τις απομακρυσμένες προσμίξεις καθοδηγείται σε μία στήλη όπου η πίεση μειώνεται (2,5 – 3,5 bar) και μερικά ίχνη του CH₄ που διαλύθηκαν στο νερό ανακτώνται. Ανάλογα με την επαναχρησιμοποίηση ή μη του νερού, δύο μέθοδοι είναι εμπορικά διαθέσιμοι. Η *Single pass scrubbing* μέθοδος, η οποία προτιμάται σε περιπτώσεις όπου το νερό προέρχεται από υγρά απόβλητα και η *regenerated absorption*. Στη δεύτερη, το νερό αναγεννάται σε μία στήλη εκρόφησης με αποσυμπίεση σε ατμοσφαιρική πίεση, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του CO₂ και του H₂S. Το νερό αποσυμπιέζεται συνήθως μέσω Air stripping. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το βιοαέριο περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις H₂S, χρησιμοποιείται ατμός ή αδρανές αέριο στην διαδικασία αποβολής για να αποφευχθεί ο σχηματισμός στοιχειακού θείου από την αντίδραση με τον αέρα, όπου με την σειρά του θα οδηγήσει σε λειτουργικά προβλήματα (Ryckebosch et al., 2011). Το στάδιο της αναγέννησης είναι απαραίτητο λόγω των μεγάλων ποσοτήτων νερού που απαιτούνται σε αυτή την μέθοδο αναβάθμισης. Μία τυπική ροή νερού που απαιτείται για να αναβαθμίσει 1000 Nm³/h «ακατέργαστου» βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 180 και 200 m³/h, ανάλογα με την πίεση και την θερμοκρασία του νερού (Bauer et al., 2013a). Τελικά, μετά από συγκεκριμένες μεθόδους ξήρανσης για την απομάκρυνση της υγρασίας από το αναβαθμισμένο βιοαέριο, το περιεχόμενο CH₄ μπορεί να φθάσει σε καθαρότητα μέχρι και 99% (Sun et al., 2015). (Irin Angelidakia, 2018)



Εικόνα 8. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου φυσικής απορρόφησης (Water Scrubbing)

3.3.2 Πλυντρίδα με Οργανικούς διαλύτες (Organic Solvent Scrubbing)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ίδια αρχή με το water scrubbing που αναλύθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, ωστόσο, η απορρόφηση του CO₂ και του H₂S επιτυγχάνεται με τη χρήση οργανικού διαλύτη αντί για νερό (Πίνακας 3). Συνήθως, οι οργανικοί διαλύτες είναι μίγματα μεθανόλης και δι-μεθυλ-αιθέρες της πολύ-αιθυλενο-γλυκόλης (dimethyl ethers of polyethylene glycol). Τα διαθέσιμα εμπορικά χημικά προϊόντα που διατίθενται στο εμπόριο είναι το Selexol και το Genosorb. Το κύριο πλεονέκτημα των διαλυτών σε σύγκριση με το νερό βασίζεται στην σημαντικά μεγαλύτερη διαλυτότητα του CO₂ που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τους. Ειδικότερα, το Selexol είναι ικανό να απορροφά τρεις φορές παραπάνω CO₂ συγκριτικά με το νερό, κάτι το οποίο ουσιαστικά σημαίνει μικρότερη ροή εισόδου στο σύστημα, δηλαδή μικρότερες διαστάσεις των σωληνώσεων και της στήλης. Παρ' όλα αυτά, οι οργανικοί διαλύτες είναι δύσκολο να επαναχρησιμοποιηθούν λόγω της υψηλής διαλυτότητας του CO₂, κάτι το οποίο στέκεται εμπόδιο στην όλη διεργασία (Persson, 2003). Επιπλέον, η διαλυτότητα του H₂S στο Selexol είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του CO₂, οπότε η απομάκρυνσή του κατά την αναγέννηση του διαλύτη απαιτεί ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του H₂S στο βιοαέριο που επεξεργάζεται, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η θερμοκρασία που απαιτείται να εφαρμοστεί στην διαδικασία της αναγέννησης του διαλύτη αργότερα. Έτσι, προς αποφυγή της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας στο στάδιο της αναγέννησης, συνιστάται η αφαίρεση του H₂S πριν το αέριο τροφοδοτηθεί στον διαλύτη (Persson, 2003). Αρχικά, το ακατέργαστο βιοαέριο συμπιέζεται (7-8 bars) και ψύχεται στους 20°C πριν από την είσοδο του στη στήλη της απορρόφησης. Ομοίως, ο οργανικός διαλύτης ψύχεται πριν την είσοδο του στο σύστημα καθώς η θερμοκρασία επηρεάζει τη σταθερά του Henry (Bauer et al., 2013a). Στη συνέχεια, ο οργανικός διαλύτης αναγεννάται με θέρμανση στους 80°C και προστίθεται στη στήλη εκρόφησης στην οποία η πίεση μειώνεται σε 1 bar (Bauer et al., 2013b, Sun et al., 2015). Το τελικό περιεχόμενο του CH₄ στο αναβαθμισμένο βιοαέριο μέσω αυτής της τεχνολογίας μπορεί να φθάσει μέχρι και 98% (Bauer, 2013), (Irimi Angelidakia, 2018).

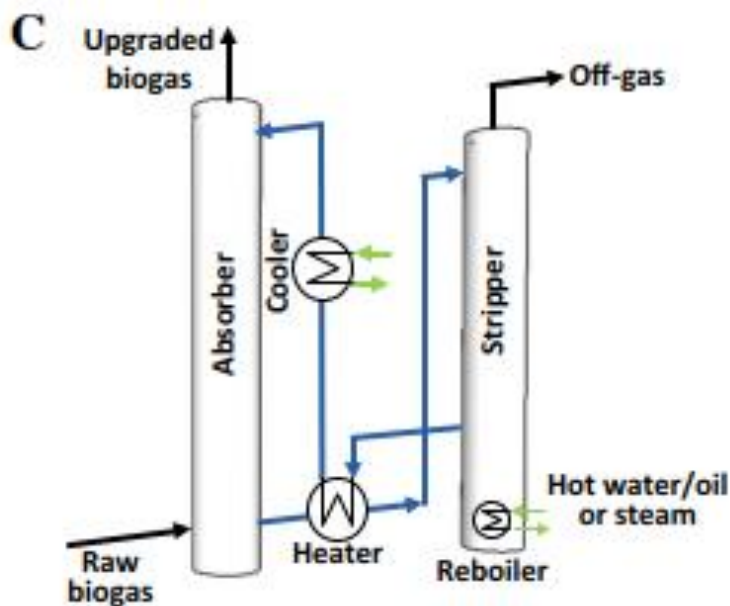


Εικόνα 9. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου φυσικής προσρόφησης με Οργανικό διαλύτη (π.χ διμεθυλαιθέρων πολυαιθυλενικής γλυκόλης - Selexol)

3.3.3 Μέθοδος χημικής απορρόφησης με τη χρήση Αμίνης

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται διαλύματα αμίνης (όπως Μονο-, Δι- ή Τρι-αιθανολαμίνη) για τη δέσμευση των μορίων του CO₂ που περιέχονται στο βιοαέριο. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι το H₂S μπορεί επίσης να απορροφηθεί πλήρως στην στήλη απορρόφησης. Τέτοια συστήματα αποτελούνται κυρίως από μία στήλη απορρόφησης (Absorber) και μία μονάδα αναγέννησης (Stripper). Στη στήλη απορρόφησης το βιοαέριο (σε πίεση 1-2 bars) εισάγεται από το κάτω μέρος της στήλης, ενώ το διάλυμα αμίνης εισάγεται με αντιστροφή (για μέγιστη διάρκεια επαφής με το βιοαέριο) από το πάνω μέρος της στήλης όπως και στην περίπτωση του Water scrubbing που αναλύθηκε προηγουμένως. Το CO₂ δεσμεύεται εντός του διαλύτη με μία εξώθερμη αντίδραση. Στη συνέχεια το προκύπτον διάλυμα αμίνης, πλούσιο σε CO₂ και H₂S, κατευθύνεται στη μονάδα αναγέννησης (Stripper). Η στήλη αναγέννησης έχει πίεση 1,5- 3 bars και είναι εξοπλισμένη με έναν λέβητα (boiler) ο οποίος παρέχει θερμότητα που επιτυγχάνει θερμοκρασίες 120-160 °C. Η θερμότητα διαταράσσει τους χημικούς δεσμούς που σχηματίζονται στη φάση της απορρόφησης ενώ παράλληλα δημιουργείται ένα ρεύμα ατμού που διευκολύνει την όλη διεργασία. Τελικά, ο ατμός που περιέχει το CO₂ ψύχεται σε έναν συμπυκνωτή που επιτρέπει την επανακυκλοφορία του συμπυκνωμένου ρεύματος ενώ το παγιδευμένο CO₂ απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Εκτός από τα διαλύματα αμίνης, άλλα υδατικά αλκαλικά άλατα, όπως αυτά του NaOH, KOH και Ca(OH)₂ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν καθώς αντιδρούν με το CO₂ (Kougiaris et al., 2010, Zhao et al., 2010). Για παράδειγμα, το υδροξείδιο του νατρίου NaOH έχει μεγαλύτερη

δυνατότητα απορρόφησης CO₂ σε σύγκριση με διαλύτες που έχουν ως βάση αμίνη όπως η Μονο-αιθανολαμίνη (MEA). Συγκεκριμένα, για την απορρόφηση 1 ton CO₂, η θεωρητική ποσότητα Μονο-αιθανολαμίνης (MEA) που χρειάζεται είναι περίπου 1,39 tons, ενώ για το αντίστοιχο ποσό CO₂ απαιτείται θεωρητικά περίπου 0.9 tons NaOH (Yoo et al., 2013). Κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η τοξικότητα των διαλυτών στον άνθρωπο και το περιβάλλον, οι σημαντικές ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται να καταναλωθούν για την διαδικασία αναγέννησης των διαλυτών, το αρχικό κόστος αγοράς τους και οι απώλειες τους κατά την εξάτμιση. Ως εκ τούτου, υδατικά αλκαλικά άλατα προτιμώνται σε σύγκριση με τις αμίνες λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς τους και λόγω αφθονίας στην αγορά (Yoo et al., 2013). Τέλος με την εφαρμογή αυτή της μεθόδου επιτυγχάνεται αναβαθμισμένο βιοαέριο με καθαρότητα έως και 99% λόγω της υψηλής επιλεκτικότητας της χημικής αντίδρασης και του μικρού ποσοστού σε απώλειες, χαμηλότερο από 0,1% (Πίνακας 3). (Diaz, 2015)

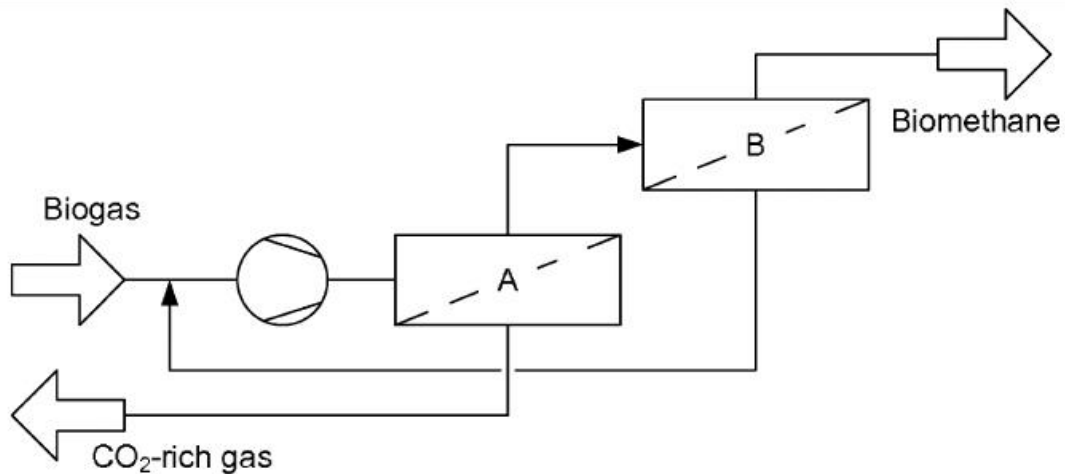


Εικόνα 10. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου χημικής απορρόφησης

3.3.4 Διαχωρισμός μέσω Μεμβρανών

Ο διαχωρισμός του βιοαερίου με τη χρήση μεμβρανών βασίζεται στη διαφορετική διαπερατότητα των διαφόρων αερίων σε πολυμερή υλικά, όπως τα πολυϊμίδια και οι πολυσουλφόνες. Ο διαχωρισμός των μεμβρανών αερίου μπορεί να λειτουργήσει σε σχετικά υψηλές πιέσεις στην περιοχή 20-40 bar, ενώ χαμηλότερες πιέσεις 8-10 bar είναι κατάλληλες για καθαρότητα μεθανίου 92-97% (Bauer, 2013). Τυπικά, η εκλεκτικότητα CO₂ / CH₄ (λόγος διαπερατότητας ή παράγοντας διαχωρισμού) κυμαίνεται από 20-50. Οι μεμβράνες για την

αναβάθμιση του βιοαερίου είναι κυρίως κοίλες ίνες (εξωτερικής διαμέτρου 50-3000 μm) με υψηλή αποτελεσματική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου (Persson, 2003)



Εικόνα 11. Καταρράκτης δύο σταδίων με σχεδιασμό διαχωριστή μεμβράνης ανακύκλωσης (Makaruk et. al., 2010).

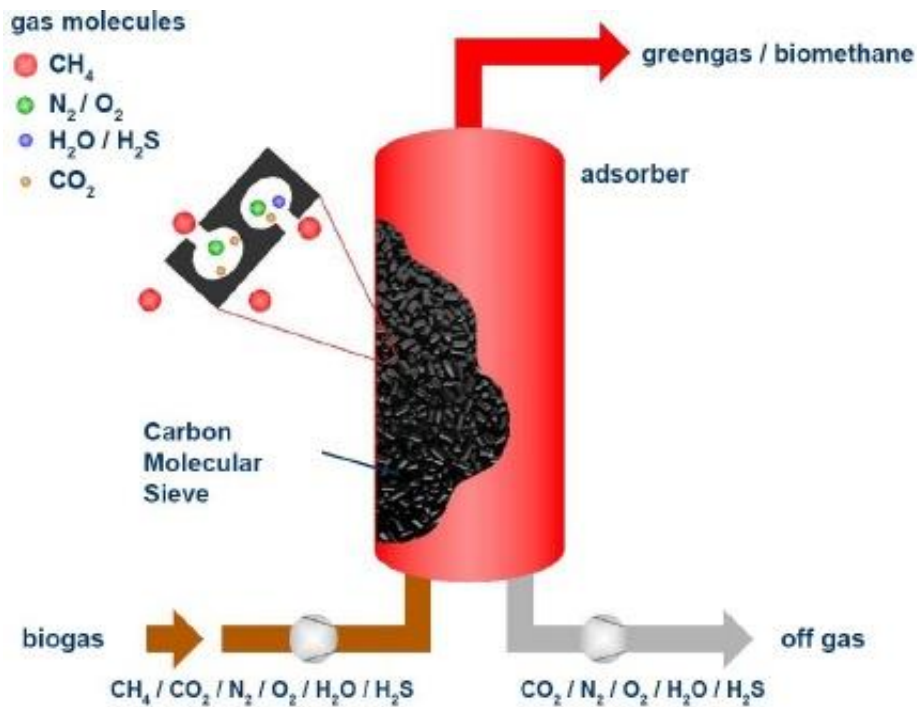
Η ανάκτηση του μεθανίου εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια της μεμβράνης, τον αριθμό των σταδίων και τη διαμόρφωση της μεμβράνης μέσα στον αντιδραστήρα. Συνήθως, ο απλούστερος σχεδιασμός ενός σταδίου μπορεί να επιτύχει καθαρότητα περίπου 90%, ενώ τα συστήματα πολλαπλών σταδίων μπορούν να παράγουν περισσότερο από 99% μεθάνιο. Ο καταρράκτης δύο σταδίων σημαίνει ότι το βιοαέριο διαχωρίζεται σε μια αρχική στήλη. Οι προσμίξεις απομακρύνονται. Στη συνέχεια, το πλούσιο σε μεθάνιο αέριο προϊόν - το οποίο εξακολουθεί να περιέχει CO₂ - διοχετεύεται σε μια δεύτερη στήλη στην οποία απομακρύνεται περαιτέρω το CO₂. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες συγκεντρώσεις CH₄ στο αέριο προϊόν.

Οι μεμβράνες παρέχουν σχετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση (<0,4 kWe / Nm³ βιομεθάνιο) και είναι εύκολα κλιμακούμενες για παροχές που κυμαίνονται από 10 Nm³/h έως πάνω από 1000 Nm³/h.

Η διαδικασία εξευγενισμού του βιοαερίου με τη χρήση μεμβρανών έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία 10 χρόνια. Τα αρχικά προβλήματα, όπως η απώλεια υψηλής πίεσης με υπερβολική ζήτηση ισχύος, η υψηλή απώλεια μεθανίου ή η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μεμβρανών, έχουν επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό. Προκειμένου να προστατευθούν οι μεμβράνες, πραγματοποιείται λεπτή αποθείωση και ξήρανση πριν το αέριο εισέλθει στην κοίλη ίνα. (J. de Hullu, 2008)

3.3.5 Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (Pressure swing absorption-PSA)

Η μέθοδος PSA χρησιμοποιεί μια σειρά από στήλες με στερεά υλικά που προσροφούν επιλεκτικά το CO₂ με κυκλική μεταβολή της πίεσης όπως φαίνεται στο σχήμα. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα προσροφητικά υλικά είναι οι ζεόλιθοι (αλουμινο-πυριτικά άλατα), ο τροποποιημένος ενεργός άνθρακας, ο ενεργός άνθρακας, το σίλικα τζελ και συνθετικές ρητίνες για τον καθαρισμό του βιοαερίου (Bauer, 2013). Η κινητική προσρόφησης και η κυκλική χωρητικότητα, δηλαδή η διαφορά στη φόρτιση μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής πίεσης του κύκλου PSA, εξαρτώνται από φυσικές παραμέτρους όπως το πορώδες, η ειδική επιφάνεια και η κατανομή του μεγέθους πόρων παρά η χημική σύσταση (Ryckebosch et al., 2011).



Εικόνα 12. Αναβάθμιση βιοαερίου με τη μέθοδο PSA

Ο διαχωρισμός αερίων πραγματοποιείται στα ακόλουθα στάδια:

1. Το προ-καθαρισμένο βιοαέριο συμπιέζεται σε 2-7 bar. Η συμπίεση αυξάνει τη θερμοκρασία του αερίου. Για να βελτιωθεί η προσρόφηση, ψύχεται στους περίπου 70 °C και διοχετεύεται στη στήλη προσρόφησης. Τα μόρια του CO₂, τα οποία είναι μικρότερα από τα μόρια του μεθανίου, συσσωρεύονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στις επιφάνειες ή στους πόρους από το CH₄, ενώ τα τελευταία παραμένουν κυρίως στην αέρια φάση.
2. Ανοίγει μια βαλβίδα στην κεφαλή της στήλης και το βιομεθάνιο διαφεύγει από τη στήλη (αέριο πλούσιο σε μεθάνιο).

3. Μετά το κλείσιμο της βαλβίδας, η πίεση μέσα στη στήλη απελευθερώνεται. Το CO₂ διαλύεται από τις επιφάνειες, επιστρέφει στην αέρια φάση και μπορεί να διοχετευτεί (πλούσιο σε CO₂ καυσαέριο).
4. Η στήλη μπορεί να γεμίσει ξανά με βιοαέριο.

Ένας πλήρης κύκλος ολοκληρώνεται περίπου σε 3-5 λεπτά. Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας PSA είναι τα υψηλά επίπεδα CH₄ με καθαρότητα άνω του 97%, η χαμηλή απαίτηση ενέργειας για θερμότητα καθώς δεν απαιτείται αναγέννηση, το χαμηλό επίπεδο εκπομπών και η απουσία διαλύτη. Ωστόσο, η απώλεια μεθανίου κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2,5% ενώ η απομάκρυνση H₂S είναι δύσκολη. (J. de Hullu, 2008), (German Biogas Association, 2017)

3.3.6 Κρυογενική μέθοδος (Cryogenic)

Η κρυογενική μέθοδος για την αναβάθμιση του βιοαερίου βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης και σκοπεύει να διαχωρίσει τα αέρια που περιέχονται στο βιοαέριο σύμφωνα με τη θερμοκρασία βρασμού τους, με τη σταδιακή ψύξη του αερίου. Λόγω των συνθηκών λειτουργίας που απαιτούνται σε αυτή τη τεχνική, το κόστος επένδυσης και τα λειτουργικά έξοδα παραμένουν υψηλά (Sun, 2015.)

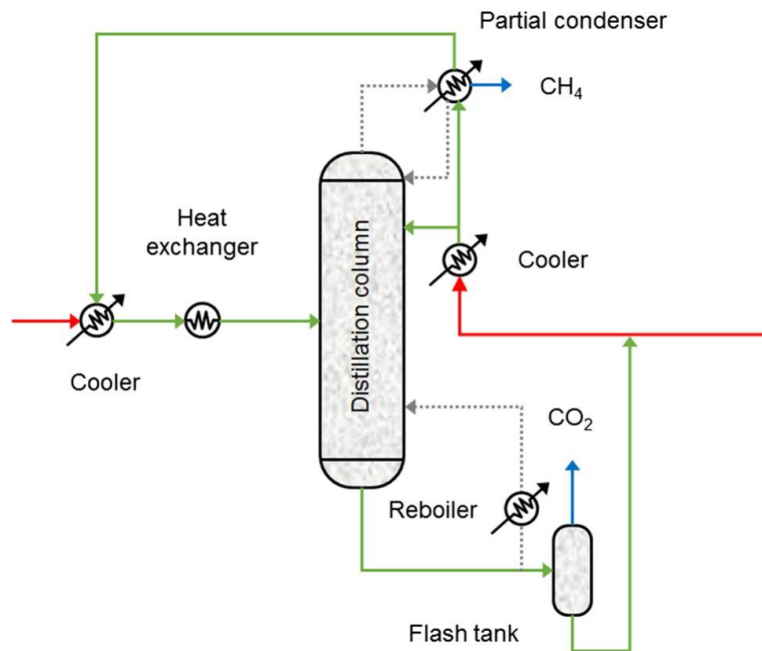
Αναλυτικότερα κύριο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι οι διαφορετικές θερμοκρασίες βρασμού για τα συστατικά του βιοαερίου. (Yousef et al., 2018) Μία βαθμιαία μείωση της θερμοκρασίας του αερίου επιτρέπει τον επιλεκτικό διαχωρισμό του μεθανίου (CH₄) από τα υπόλοιπα συστατικά. (Tan et al. 2017b). Έτσι, προκύπτει ένα προκύπτον βιομεθάνιο υψηλής καθαρότητας, το οποίο συλλέγεται και πλέον είναι συμμορφωμένο με τα πρότυπα που έχει ορίσει κάθε χώρα ώστε να εγχυθεί στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου είτε να χρησιμοποιηθεί ως Bio-CNG για καύσιμο κίνησης. Αυτό το προϊόν είναι συναντάται και με την ονομασία στην αγγλική βιβλιογραφία ως liquefied natural gas. Ο ευκολότερος τρόπος για την απομάκρυνση των προσμίξεων που περιέχονται στο βιοαέριο μέσω κρυογενικών μεθόδων είναι η εφαρμογή μιας σταθερής πίεσης της τάξεως των 10 bar (Song et al., 2019). Η υγροποίηση επιτυγχάνεται μειώνοντας τη θερμοκρασία διαδοχικά για να αφαιρεθεί κάθε πρόσμιξη (ή μερικές από αυτές) σε διαφορετικά στάδια. Συνήθως το πρώτο στάδιο ορίζεται ως οι -25°C, όπου κυρίως το νερό, το υδρόθειο και οι σιλοξάνες δεσμεύονται. Έπειτα, ένα δεύτερο σημείο κοντά στους -55°C ορίζεται ως το δεύτερο στάδιο στο οποίο το υγροποιημένο μερικώς CO₂, συνεχίζει με μία σταδιακή μείωση έως τους -85°C μέχρι να απομακρυνθεί πλήρως και να στερεοποιηθεί (Riva et al., 2014). Το υγροποιημένο CO₂ συλλέγεται στο στάδιο της τελικής θερμοκρασίας και μπορεί να διατεθεί στην αγορά ως υψηλής ποιότητας παραπροϊόν βελτιώνοντας την συνολική οικονομική επίδοση της διεργασίας.

Ακόμα μία τεχνική η οποία έχει δοκιμαστεί όσο αναφορά την κρυογενική μέθοδο, και η οποία αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της προαναφερθείσας μεθόδου, είναι η κρυογένεση με προεπεξεργασία ξήρανσης του βιοαερίου. Το βήμα αυτό ακολουθείται από μία πολυβάθμια

συμπύεση στα 80 bar. Αυτό επιτρέπει μία υψηλότερη λειτουργική θερμοκρασία μεταξύ -45 και -55 °C, με κύριο όμως μειονέκτημα μία αναγκαία ενδιάμεση διεπαφή στο στάδιο της ψύξης με τον πολυβάθμιο συμπιεστή. (Awe et al., 2017).

Συνολικά, εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς πως η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από τις υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια, κάτι το οποίο την κάνει οικονομικά ασύμφορη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους αναβάθμισης βιοαερίου.

Παρά το γεγονός ότι η τεχνική που περιγράφεται στο διάγραμμα 13 δεν έχει δοκιμαστεί για τον εξευγενισμό του βιοαερίου κάτω από πραγματικές συνθήκες, η αξιοπιστία του για τον διαχωρισμό του CO₂ στο φυσικό αέριο έχει διατυπωθεί από αρκετούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια. (Maqsood et al., 2014 a,b,c). Επομένως αυτή είναι μία καινοτόμα λύση για αυτούς που ενδιαφέρονται να ασχοληθούν με την αναβάθμιση του βιοαερίου μέσω της κρυογενικής μεθόδου.



Διάγραμμα 10. Βελτιστοποιημένο διάγραμμα ροής της Κρυογενικής και ενεργειακή ολοκλήρωση για παραγωγή βιοαερίου υψηλής καθαρότητας (Song et al.,2019)

Σε αυτό το σύστημα, το ακατέργαστο αέριο ψύχεται σε δύο διαδοχικά βήματα πριν εισέλθει στην στήλη, όπου τα τελικά δύο προϊόντα διαχωρίζονται. Το προϊόν από την κορυφή της στήλης περιέχει το μεθάνιο με καθαρότητα σε πολύ υψηλό ποσοστό, το οποίο απομακρύνεται και διαπερνά έναν μερικό συμπυκνωτή. Στο σύστημα φυσικού αερίου το ρεύμα αυτό είναι υψηλής καθαρότητας σε μεθάνιο. Παρ' όλα αυτά στην αναβάθμιση του βιοαερίου, θα πρέπει να γίνει η απαραίτητη ανάλυση για να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν άλλες ενώσεις στο ρεύμα. Από την άλλη πλευρά, το προϊόν που διαφεύγει από τον πυθμένα είναι υψηλής καθαρότητας CO₂ το οποίο μπορεί να πουληθεί ώστε να βελτιώσει το κόστος της διεργασίας. Το CO₂ του πυθμένα εν

μέρει ανακυκλοφορείται στη στήλη ώστε να διατηρηθεί μία κατάλληλη θερμότητα εξάτμισης, ενώ το υπόλοιπο συλλέγεται.

Συνοπτικά για τη σύγκριση των μεθόδων αναβάθμισης του βιοαερίου και πιο συγκεκριμένα για την καθαρότητα του προϊόντος αερίου αλλά και των εκάστοτε απωλειών χρήσιμος καθίσταται ο ακόλουθος πίνακας 3.

	Cryogenic	Sabatier process	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm ³)	0.76	nf	0.23–0.30	0.25–0.3	0.2–0.3	0.05–0.15	0.18–0.20
Consumption for clean biogas (kWh/Nm ³)	nf	nf	0.29–1.00	0.3–0.9	0.4	0.05–0.25	0.14–0.26
Heat consumption (kWh/Nm ³)	nf	nf	None	None	< 0.2	0.5–0.75	None
Heat demand (°C)	– 196	270			55–80	100–180	
Cost	High	Medium	Medium	Medium	Medium	High	High
CH ₄ losses (%)	2	nf	< 4	< 2	2–4	< 0.1	< 0.6
CH ₄ recovery (%)	97–98	97–99	96–98	96–98	96–98	96–99	96–98
Pre-purification	Yes	Recommended	Yes	Recommended	Recommended	Yes	Recommended
H ₂ S co-removal	Yes	No	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N ₂ and O ₂ co-removal	Yes	No	Possible	No	No	No	Partial
Operation pressure (bar)	80	8–10	3–10	4–10	4–8	Atmospheric	5–8
Pressure at outlet (bar)	8–10		4–5	7–10	1.3–7.5	4–5	4–6

Πίνακας 3. Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου

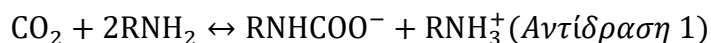
Εφόσον η παρούσα μελέτη εστιάζει στην αναβάθμιση του βιοαερίου με την μέθοδο της Χημικής Απορρόφησης, η επιλογή διαλύτη για την απομάκρυνση του CO₂ αποτελεί μία κομβική παράμετρο. (Francisco M. Baena-Moreno¹, 2019)

3.4 Επιλογή διαλύτη

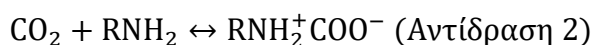
Αναλυτικότερα οι αλκανολαμίνες όπως η Μονοαιθανολαμίνη (MEA), η Διαιθανολαμίνη (DEA), η Δι-2-προπανολαμίνη (DIPA) και η Μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA) χρησιμοποιούνται συνήθως για την απομάκρυνση του CO₂. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά πειράματα που συγκρίνουν τις διαφορετικές αμίνες. Αν και έχουν αναπτυχθεί νέα μίγματα αλκανολαμινών και αλκανολαμινών, το MEA εξακολουθεί να είναι το προτιμώμενο απορροφητικό για την απορρόφηση του περιεχόμενου στο βιοαέριο CO₂. Αυτό συμβαίνει επειδή το MEA έχει υψηλή αντιδραστικότητα, χαμηλό κόστος διαλύτη, χαμηλό μοριακό βάρος (δίνοντας υψηλή ικανότητα απορρόφησης σε βάση βάρους) και ικανοποιητική θερμική σταθερότητα. Επιπλέον, το MEA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη απορρόφηση CO₂ και H₂S από το βιοαέριο. Οι Biernacki et al. απέδειξαν ότι υδατικό διάλυμα 30% MEA αποτελεί την καλύτερη εναλλακτική μεταξύ των διαφορετικών αλκανολαμινών που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση του βιοαερίου, λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές, κοινωνικές και οικολογικές πτυχές, εύρημα που θα επιβεβαιωθεί και από τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

3.5 Αντίδραση MEA με CO₂ και H₂S

Ο μηχανισμός της απορρόφησης του CO₂ από πρωτοταγείς αμίνες δεν είναι απολύτως σαφής. Εν τούτοις, η συνολική αντίδραση του CO₂ με μία πρωτοταγή αμίνη (RNH₂), όπως το MEA, μπορεί να αναπαρίσταται σύμφωνα με την αντίδραση (1)¹⁰

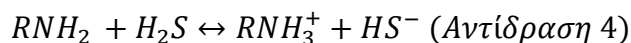


Αυτός ο μηχανισμός περιλαμβάνει δύο στάδια, συγκεκριμένα, τον σχηματισμό των ιόντων CO₂-αμίνης όπως αναπαρίσταται στην Αντίδραση (2), ακολουθούμενη από την καταλυτική αποπρωτονίωση, όπως φαίνεται στην Αντίδραση (3):



όπου το B είναι μια βάση η οποία μπορεί να είναι αμίνη, OH⁻ ή H₂O.

Η αντίδραση των H₂S και MEA είναι αντιστρεπτή και στιγμιαία. Το H₂S αντιδρά με το MEA με μεταφορά πρωτονίων. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην Αντίδραση (4).



3.6 Τεχνολογίες απομάκρυνσης για τις Σιλοξάνες (Siloxanes), Πτητικά στερεά (VOCs) και Halocarbons

Οι Σιλοξάνες- Siloxanes είναι ενώσεις που περιέχουν δεσμό πυριτίου- οξυγόνου (Si-O) και χρησιμοποιούνται σε πολλαπλά προϊόντα καθαρισμού και καλλυντικά. Τα προϊόντα αυτά αποτελούν την πηγή των Σιλοξάνων στο βιοαέριο από χώρους υγειονομικής ταφής και σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για βλάβες στους κινητήρες των αυτοκινήτων, στις βαλβίδες, κυλινδροκεφαλές κλπ. (Ryckebosch et al., 2011, Soreanu et al., 2011).

Η πιο σημαντική τεχνολογία απομάκρυνσης σιλοξανών είναι η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, η οποία εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό στο βιοαέριο και συχνά συνδυάζεται με μια προεπεξεργασία για την απομάκρυνση του νερού. Η αποδοτικότητα απομάκρυνσης αυτής της διεργασίας μπορεί να φθάσει μέχρι και το 95% (Ryckebosch et al.).

Η τεχνολογία αυτή έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω της ανάγκης της διεργασίας σε συνθήκες λειτουργίας υψηλής πίεσης και χαμηλής υγρασίας και από τις τεχνικές δυσκολίες που συνδέονται με την αναγέννηση του ενεργού άνθρακα. Η απορρόφηση σιλοξανίου μπορεί επίσης να γίνει με τη χρήση Silica gel, η οποία είναι μια κοκκώδης μορφή διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂) που παρασκευάζεται από πυριτικό νάτριο (Na₂O₃Si) και χρησιμοποιείται συνήθως ως ξηραντικό. Το πυριτικό πήγμα παρουσιάζει μια πολική φύση που επιτρέπει την προσρόφηση των μορίων σιλοξανών μέχρι την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του 95% (Ryckebosch et al., 2011). Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η ανάγκη για λειτουργία με υψηλή πίεση, η οποία αυξάνει τόσο το επενδυτικό όσο και το λειτουργικό κόστος (βλέπε Κρυογενική μέθοδος - Cryogenic Separation). Ο Κρυογενικός διαχωρισμός ουσιαστικά των σιλοξανών, μπορεί να υποστηρίξει αποδοτικότητα απομάκρυνσης 99,3% όταν η θερμοκρασία του βιομεθανίου μειωθεί στους -70 ° C και μόλις 25,9% όταν η θερμοκρασία του βιομεθανίου μειωθεί μόνο στους -25 ° C (Hagmann et al., 2001). Η μελέτη της μεθόδου αυτή είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο λόγω των υψηλών επενδυτικών και λειτουργικών κοστών.

Οι αλογονομένες ενώσεις και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) τυπικά απομακρύνονται με χρήση του ενεργού άνθρακα σε στήλες χημικής προσρόφησης (Ryckebosch et al., 2011, Muñoz et al., 2015). Η αναγέννηση του ενεργού άνθρακα εκτελείται στους 200 °C (Wellinger et al., 2005). (María del Rosario Rodero, 2018) (Patterson T, 2011)

3.6 Τεχνολογίες απομάκρυνσης για το O₂ και το N₂

Το O₂ και N₂ που υπάρχουν στο βιοαέριο δεν παράγονται βιολογικά κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης. Αυτά τα αέρια συνήθως οφείλονται σε υψηλές συγκεντρώσεις στα αέρια που εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής όταν το βιοαέριο συλλέγεται με δημιουργία κενού ως αποτέλεσμα της διήθησης του αέρα. Η παρουσία τους επίσης δικαιολογείται από την εισροή τους στο σύστημα κατά την τροφοδοσία του αντιδραστήρα.

Παρότι επίπεδα O₂ μικρότερα της τάξεως του 0,5% στο βιομεθάνιο θεωρούνται αποδεκτά, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις O₂ καθιστούν την αποθήκευση του βιοαερίου επικίνδυνη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πώς ανάλογα με την περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο αυτό μπορεί γίνει εκρηκτικό σε περιβάλλον που περιέχει οξυγόνο σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 6-12% (Petersson και Wellinger 2009, Bailón and Hinge 2012).

Από την άλλη το N₂ είναι ένα αδρανές αέριο που είναι δύσκολο να αφαιρεθεί κατά την αναβάθμιση, με περιορισμένες επιπτώσεις στις εκάστοτε εφαρμογές του βιοαερίου. Παρόλα αυτά λόγω της συμμετοχής του στη σύσταση του τελικού προϊόντος του βιοαερίου επιφέρει μείωση στη θερμογόνο δύναμη του βιομεθανίου. (Wellinger και Lindberg 2005).

Σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση των συστατικών αυτών έχει η μέθοδος PSA η οποία αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα αλλά και η τεχνική του διαχωρισμού μέσω μεμβρανών η οποία βασίζεται στην επιλεκτική διαπερατότητα του O₂ και του N₂ σε όλη την έκταση της μεμβράνης υπό την αλληλεπίδραση αερίου με αέριο σε συνθήκες υψηλής πίεσης.

Τέλος, η κρυογενική τεχνική χρησιμοποιεί τη διαφορά θερμοκρασίας για να διαχωρίσει τα O₂ και N₂ από τα υπόλοιπα συστατικά του βιοαερίου. Συνολικά, είναι φανερό πως οι τεχνολογίες για την απομάκρυνση των O₂ και N₂ απαιτούν υψηλά επενδυτικά και λειτουργικά κόστη, υψηλές απαιτήσεις ενέργειας και αποτελούν πολύπλοκη διαδικασία. (Persson et al, 2007, Muñoz et al., 2015, Awe et al, 2017).

Κεφάλαιο 4 – Ο σχεδιασμός της διεργασίας

4.1 Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας και απαιτήσεις τελικού προϊόντος

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας αναερόβιας χώνευσης στον αντιδραστήρα όγκου 4m³, χρησιμοποιώντας το FORBI ως πρώτη ύλη, προσεγγιστικά παράγονται 1.000 λίτρα βιοαέριο ανά ημέρα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοαερίου απεικονίζονται στον Πίνακα 1. Το βιοαέριο αυτό αποτελεί το ακατέργαστο βιοαέριο που θα χρησιμοποιηθεί ως τροφοδοσία στο σύστημα αναβάθμισης του βιοαερίου.

Πίνακας 4. Κύρια χαρακτηριστικά του βιοαερίου που παράγεται από την αναερόβια χώνευση του FORBI.

Παράμετρος	Τιμή
Θερμοκρασία	35±5 °C
Περιεκτικότητα σε CH ₄	61±6.5 % v/v
Περιεκτικότητα σε CO ₂	35±5 v/v
Περιεκτικότητα σε H ₂	N.D.
Περιεκτικότητα σε H ₂ S	>100 ppm

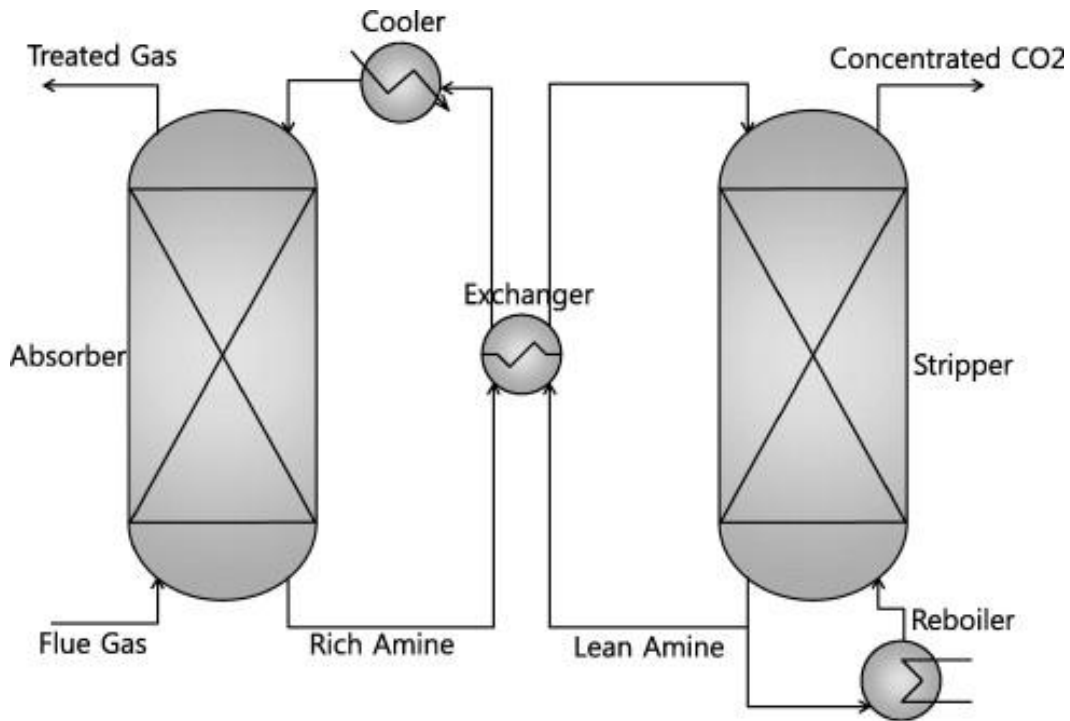
Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του προκύπτοντος αναβαθμισμένου βιοαερίου που περαιτέρω θα συμπιεστεί προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως bio-CNG με σκοπό την παραγωγή αερίου κίνησης οχήματος, απεικονίζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 5. Επιθυμητά χαρακτηριστικά του αναβαθμισμένου βιοαερίου προς παραγωγή αερίου κίνησης

Περιεκτικότητα	Τιμή
CH ₄	97±1% v/v
CO ₂	0.5±2 v/v
H ₂ S	<4 ppm

4.2 Σχεδιαστικοί Υπολογισμοί και Διαστασιολόγηση

Ένα απλοποιημένο σχήμα της διεργασίας απορρόφησης-εκρόφησης φαίνεται στο *Διάγραμμα 11*. Στο *Διάγραμμα 11* απεικονίζεται μία στήλη απορρόφησης (scrubber) με λειτουργία κατ' αντιρροή. Σε μία στήλη απορρόφησης με λειτουργία κατ' αντιρροή το βιοαέριο εισέρχεται από τον πυθμένα της στήλης και ρέει προς την κορυφή (προς τα πάνω), ενώ το διάλυμα απορρόφησης ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση (προς τα κάτω). Μέσα στην πλυντρίδα, το CO₂ μεταφέρεται από το βιοαέριο στο διάλυμα και το πλούσιο σε CO₂ (κορεσμένο) διάλυμα ρέει προς τη στήλη αναγέννησης. Στη στήλη απορρόφησης, το βιοαέριο με ελάχιστο ή καθόλου διοξείδιο του άνθρακα εξέρχεται από την κορυφή της στήλης ως αναβαθμισμένο βιοαέριο, στο εξής αποκαλούμενο βιομεθάνιο. Στη στήλη αναγέννησης το κορεσμένο διάλυμα θερμαίνεται από τον αναθερμαντήρα, απελευθερώνοντας έτσι CO₂, το οποίο εξέρχεται ως αέριο από την κορυφή της στήλης αναγέννησης. Το διάλυμα πλέον, σχεδόν απαλλαγμένο από CO₂ ρέει πίσω στη στήλη απορρόφησης. Καθώς η απορρόφηση του CO₂ διευκολύνεται από χαμηλότερες θερμοκρασίες και η εκρόφηση του CO₂ από υψηλότερες θερμοκρασίες, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης θερμότητας για να μεταφέρει τη θερμότητα από το αναγεννημένο διάλυμα στο κορεσμένο που οδεύει προς την στήλη αναγέννησης.

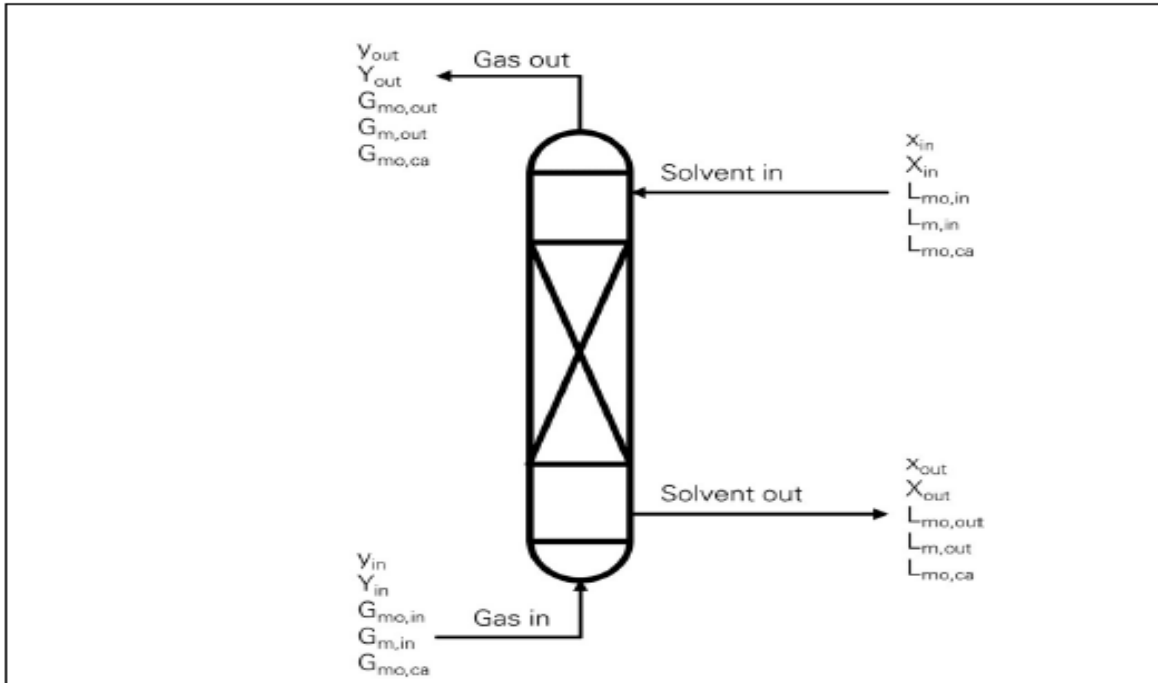


Διάγραμμα 11. Απλοποιημένο διάγραμμα διεργασίας απορρόφησης/εκρόφησης (H.M.Park)

Στις διεργασίες βιομηχανικής κλίμακας, στήλες προσρόφησης/απορρόφησης με πληρωτικό υλικό λειτουργούν κατά αντιστροφή προκειμένου να αποφευχθεί ο φραγμός της στήλης. Η διαδικασία σχεδιασμού μιας παρόμοιας διάταξης απαιτεί τον καθορισμό του τελικού ρυθμού ροής υγρού, της διαμέτρου της στήλης και του απαιτούμενου ύψους για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου διαχωρισμού, έχοντας επιλέξει τον διαλύτη και τον τύπο πληρωτικού υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

4.2.1 Υπολογισμός του τελικού ρυθμού ροής

Οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή ισοζυγίου μάζας και συστατικού σε μια στήλη απορρόφησης φαίνονται στην *Εικόνα 14*. Αυτές οι παράμετροι είναι εκτενέστερα καθορισμένες στον πίνακα 3.



Εικόνα 14. Παράμετροι προς προσδιορισμό για τα ισοζύγια μάζας και συστατικών

Πίνακας 6. Παράμετροι στήλης απορρόφησης για ρεύμα αερίου CO₂ και CH₄ και ρεύμα υδατικού διαλύματος 30% MEA.

Σύμβολο	Ορισμός	Μονάδες
y	Μολαρικό κλάσμα του συστατικού στην αέρια φάση	$\text{mol CO}_2 \cdot (\text{mol CO}_2 + \text{CH}_4)^{-1}$
Y	Μολαρικό κλάσμα του συστατικού στην αέρια φάση ανά mole φέροντος αερίου	$\text{mol CO}_2 \cdot (\text{mol CH}_4)^{-1}$
G_{mo}	Μαζικός ρυθμός ροής αερίου	$(\text{mol CO}_2 + \text{CH}_4) \cdot \text{h}^{-1}$
G_m	Μαζικός ρυθμός ροής αερίου	$(\text{kg CO}_2 + \text{CH}_4) \cdot \text{h}^{-1}$
G_v	Συνολική παροχή αερίου	$(\text{Nm}^3 \text{CO}_2 + \text{CH}_4) \cdot \text{h}^{-1}$
$G_{mo,ca}$	Μολαρική ροή φέροντος αερίου	$\text{mol CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$
$G_{m,ca}$	Ρυθμός ροής μάζας φέροντος αερίου	$\text{kg CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$
$G_{v,ca}$	Παροχή φέροντος αερίου	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$

x	Μολαρικό κλάσμα του συστατικού στην υγρή φάση	$\text{mol CO}_2 \cdot (\text{mol CO}_2 + \text{MEA} + \text{H}_2\text{O})^{-1}$
X	Μολαρικό κλάσμα του συστατικού στην υγρή φάση ανά mole φέροντος αερίου	$\text{mol CO}_2 \cdot (\text{mol MEA} + \text{H}_2\text{O})^{-1}$
L_{mo}	Συνολικός μολαρικός ρυθμός διαλύτη	$(\text{mol CO}_2 + \text{MEA} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \text{h}^{-1}$
L_m	Συνολικός ρυθμός μάζας διαλύτη	$(\text{kg CO}_2 + \text{MEA} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \text{h}^{-1}$
L_v	Συνολική παροχή διαλύτη	$(\text{Nm}^3 \text{CO}_2 + \text{MEA} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \text{h}^{-1}$
L_{mo,ca}	Μολαρικός ρυθμός φέροντος διαλύτη	$(\text{mol MEA} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \text{h}^{-1}$
L_{m,ca}	Ρυθμός ροής μάζας φέροντος διαλύτη	$(\text{kg MEA} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \text{h}^{-1}$
L_{v,ca}	Παροχή φέροντος διαλύτη	$(\text{Nm}^3 \text{MEA} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \text{h}^{-1}$
dcol	Διάμετρος στήλης	cm

Το ισοζύγιο μάζας σε όλη τη στήλη δίνεται από την Εξίσωση (1) και του συστατικού από την Εξίσωση (2).

$$L_{m,in} + G_{m,in} = L_{m,out} + G_{m,out} \text{ (Εξ. 1)}$$

$$x_{in}L_{mo,in} + y_{in}G_{mo,in} = x_{out}L_{mo,out} + y_{out}G_{mo,out} \text{ (Εξ. 2)}$$

Η παρουσίαση της περιεκτικότητας σε CO₂ ως γραμμομόρια CO₂ ανά γραμμομόριο υγρού φορέα (X ή Y) προσφέρει ένα μαθηματικό πλεονέκτημα: καθώς ο διαλύτης και το αέριο ρέουν διαμέσου της στήλης αλλάζουν μόνο ο αριθμητής στα X ή Y. Ο παρονομαστής παραμένει σταθερός. Η σχέση μεταξύ κεφαλαίου X και μικρού x και κεφαλαίου Y και μικρού y φαίνεται στις εξισώσεις (4) και (5).

$$X = \frac{x}{1-x} \text{ (Εξ. 4)}$$

$$Y = \frac{y}{1-y} \text{ (Εξ. 5)}$$

Το ισοζύγιο των στοιχείων σε κάθε διατομή της στήλης θα έχει την ίδια μορφή με την Εξίσωση (3). Έτσι, τα X και Y σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στη στήλη συνδέονται όπως φαίνεται στην Εξίσωση (6). Το Y είναι μια γραμμική συνάρτηση του X και το τμήμα μεταξύ των συντεταγμένων (X_{in}, Y_{out}) και (X_{out}, Y_{in}) ονομάζεται γραμμή λειτουργίας.

$$Y = \left(\frac{Y_{in} - Y_{out}}{X_{out} - X_{in}} \right) X + \left(\frac{Y_{out}X_{out} - Y_{in}X_{in}}{X_{out} - X_{in}} \right) \quad (\text{Εξ. } 6\alpha)$$

$$Y = \left(\frac{L_{mo,ca}}{G_{mo,ca}} \right) X + \left(\frac{Y_{out}G_{mo,ca} - X_{in}L_{mo,ca}}{G_{mo,ca}} \right) \quad (\text{Εξ. } 6\beta)$$

Η γραμμή λειτουργίας (Εξίσωση (6)) μπορεί επίσης να διαμορφωθεί με όρους x και y , αλλά τότε, η $y = f(x)$ δεν θα είναι μια γραμμική συνάρτηση, αλλά μια καμπύλη με τα κοίλα προς τα κάτω. Εάν η συγκέντρωση του συστατικού που πρόκειται να διαχωριστεί είναι μικρή ($y \leq 0,1$) («αραιό αέριο») θεωρείται ότι $y \approx Y$ και $x \approx X$. Επιπλέον, ο ρυθμός ροής διαλύτη και αερίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερός σε όλο το μήκος της στήλης: $G_{m,in} = G_{m,out}$ και $L_{m,in} = L_{m,out}$. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση της γραμμής λειτουργίας μετατρέπεται στην Εξίσωση (6γ). Σε αντίθετη περίπτωση, όπου η συγκέντρωση ενός αερίου συστατικού που πρόκειται να διαχωριστεί είναι μεγάλη, οι προαναφερθείσες παραδοχές δεν ισχύουν και η χρήση της Εξίσωσης (6γ) είναι εσφαλμένη.

$$y = \left(\frac{L_{mo}}{G_{mo}} \right) x + y_{out} - \left(\frac{L_{mo}}{G_{mo}} \right) x_{in} \quad (\text{Εξ. } 6\gamma)$$

Η περιεκτικότητα σε CO_2 στην ισορροπία στην αέρια και στην υγρή φάση σχετίζεται μαθηματικά με την καμπύλη ισορροπίας $Y^* = f(X)$ ή $y^* = f(x)$ όπου η κλίση της καμπύλης ισορροπίας υποδηλώνεται ως sl . Η συνάρτηση $y^* = f(x)$ είναι μια γραμμή στην περιοχή όπου το x προσεγγίζει το 0: εδώ το sl είναι σταθερό και το σύμβολο y, x , είναι ίση με τη σταθερά του Henry. Η μορφή της συνάρτησης $y^* = f(x)$ δεν μπορεί να καθοριστεί γενικά για το σύνολο της περιοχής x , δηλαδή μεταξύ 0 και 1. Παρόλα αυτά, το $y^* = f(x)$ μπορεί να προσεγγιστεί με μια γραμμή ή μια εκθετική συνάρτηση για μικρότερη περιοχή x . Ομοίως, $Y^* = f(X)$ μπορεί επίσης να προσεγγιστεί.

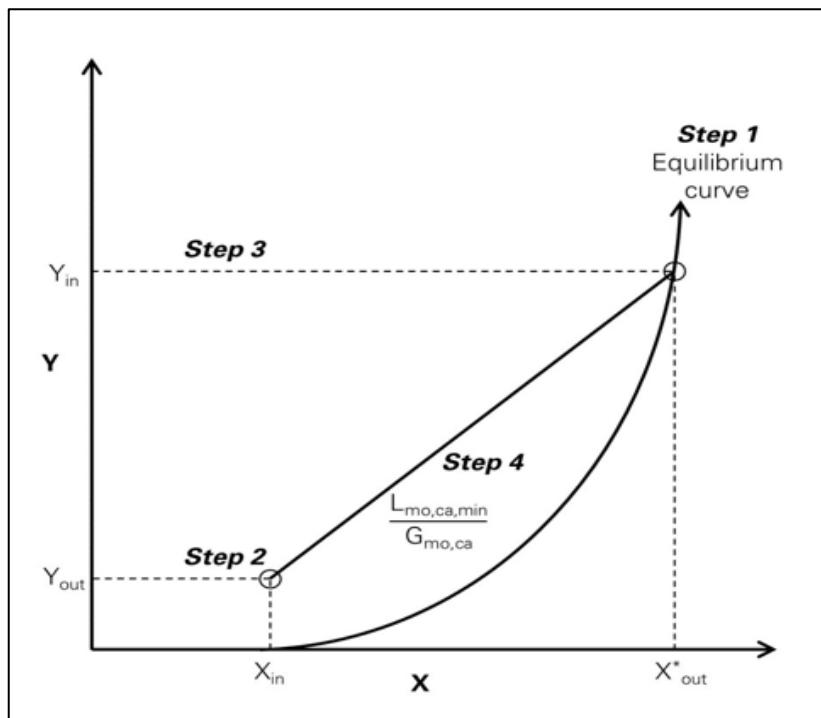
Κατά το σχεδιασμό μιας διεργασίας απορρόφησης, αρχικά σχεδιάζεται η στήλη απορρόφησης ακολουθούμενη από τη στήλη αναγέννησης. Προσδιορίζεται η ποσότητα και η σύνθεση του αερίου τροφοδοσίας και προσδιορίζεται η σύνθεση του επεξεργασμένου αερίου. Έτσι δίδονται οι παράμετροι $G_{mo,ca}$, Y_{in} και Y_{out} για τον προσροφητή. Ακολούθως, επιλέγεται ο διαλύτης και επιβεβαιώνονται τα δεδομένα ισορροπίας ατμού-υγρού για το σύστημα διαλυμένης ουσίας-διαλύτη στις θερμοκρασίες απορρόφησης και εκρόφησης. Επομένως το γράφημα $Y^* = f(X)$ προσδιορίζεται για την στήλη απορρόφησης και τη στήλη αναγέννησης.

Η γραφική μέθοδος για τον προσδιορισμό του ελάχιστου μολαρικού ρυθμού ροής διαλύτη $L_{mo,ca,min}$ απεικονίζεται με τη βοήθεια του Σχήματος 3. Με τα X και Y ως άξονες, η καμπύλη

ισορροπίας $Y^* = f(X)$ για τη στήλη σε συγκεκριμένη θερμοκρασία αποτελεί την 1^η γραφική παράσταση (Βήμα 1). Στη συνέχεια, το σημείο (X_{in}, Y_{out}) προσδιορίζεται (Βήμα 2), και αποτελεί ένα άκρο της γραμμής λειτουργίας. Το Y_{in} βρίσκεται στον άξονα Y και μια οριζόντια γραμμή σήμανσης χαράσσεται μέχρι την καμπύλη ισορροπίας (Βήμα 3). Μια γραμμή χαράσσεται ξεκινώντας από το σημείο (X_{in}, Y_{out}) μέχρι το σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας και της καμπύλης ισορροπίας (Βήμα 4). Οι συντεταγμένες αυτού του σημείου διασταύρωσης είναι (X^*_{out}, Y_{in}) . Η κλίση αυτής της γραμμής είναι $L_{mo,ca,min} / G_{mo,ca}$ όπου $L_{mo,ca,min}$ είναι ο ελάχιστος ρυθμός ροής διαλύτη που απαιτείται για την επεξεργασία του αερίου τροφοδοσίας (Εξίσωση 7).

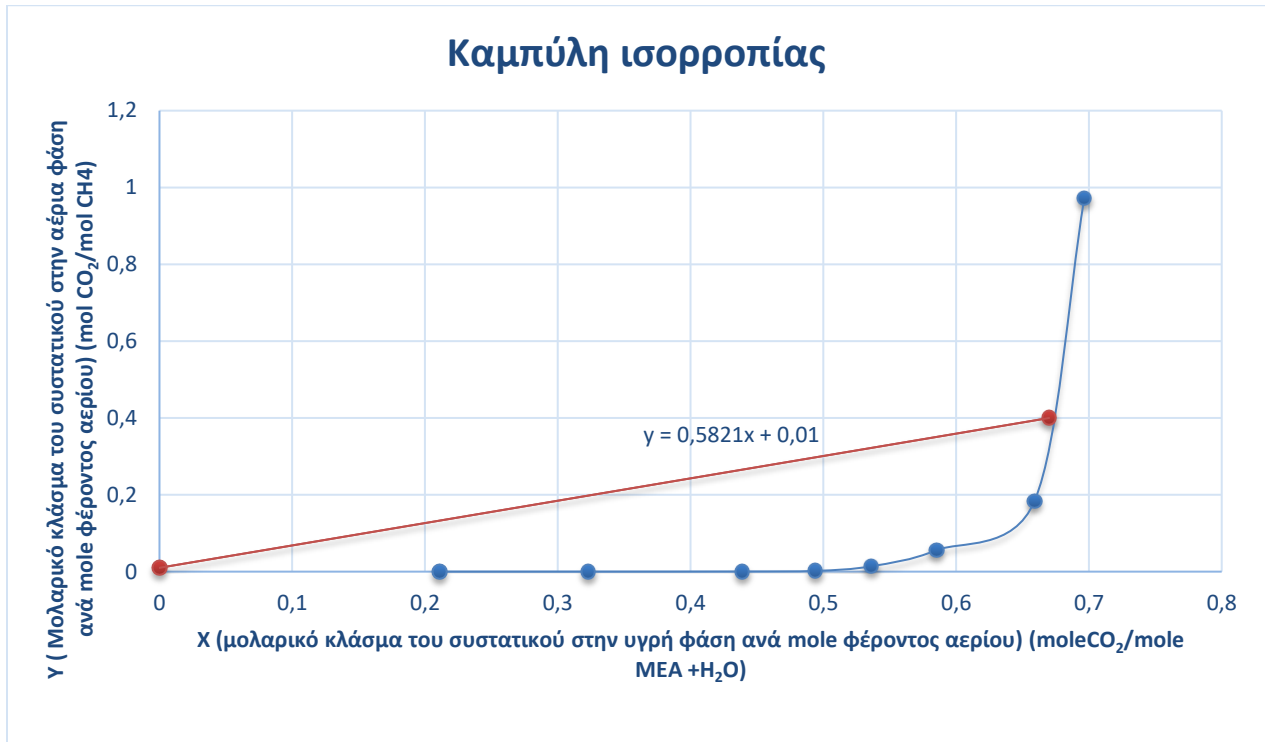
$$L_{mo,ca,min} = G_{mo,ca} \left(\frac{Y_{in} - Y_{out}}{X^*_{out} - X_{in}} \right) \quad (\text{Εξ. 7})$$

Ο τελικός ρυθμός ροής διαλύτη $L_{mo,ca}$ είναι τυπικά 1,1 έως 3,5 φορές ο ελάχιστος ρυθμός ροής διαλύτη $L_{mo,ca,min}$.



Διάγραμμα 12. Γραφικός προσδιορισμός ελάχιστης παροχής διαλύτη

Για την περίπτωση επιλογής διαλύματος 30% MEA ως διαλύτη, η καμπύλη ισορροπίας $Y^* = f(X)$ για τη διαλυτότητα του CO_2 σε αυτό το διάλυμα στη στήλη σε θερμοκρασία ίση με $35^\circ C$ απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα



Διάγραμμα 13. Καμπύλη ισορροπίας για τη διαλυτότητα του CO_2 σε υδατικό διάλυμα 30% MEA στους $35^\circ C$.

Σύμφωνα με το Γράφημα 4, η κλίση της γραμμής λειτουργίας είναι ίση με 0,58. Επομένως:

$$\frac{L_{mo,ca,min}}{G_{mo,ca}} = 0.58 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{mol of gas}} \quad (\text{Εξ. 8})$$

Σύμφωνα με την παραγωγικότητα του αναερόβιου χωνευτήρα, η συνολική ογκομετρική ροή του βιοαερίου $G_v = 1 \text{ m}^3/\text{ημέρα} = 0,042 \text{ [m}^3/\text{h]}$. Υποθέτοντας ότι το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (λόγω της ανακυκλοφορίας μεταξύ της πλυντρίδας και του αεριοφυλακίου) είναι εφικτός ο υπολογισμός της γραμμομοριακής ροής του φέροντος αερίου του διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή του μεθανίου G_{mo} , μέσω του παρακάτω υπολογισμού:

$$G_{mo,ca} = \frac{\frac{1\text{m}^3}{24\text{h}}}{0.0224 \frac{\text{m}^3}{\text{mol of gas}} \times \frac{308\text{K}}{273\text{K}}} = 1.65 \frac{\text{mol of gas}}{\text{h}} \quad (\text{Εξ. 9})$$

Χρησιμοποιώντας εξισώσεις (8) και (9) μπορούμε να υπολογίσουμε το $L_{mo,ca,min}$

$$L_{mo,ca,min} = 0.58 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{mol of gas}} \times 1.65 \frac{\text{mol of gas}}{\text{h}} = 0.957 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{h}}$$

$$\cong 0.96 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{h}} \quad (\text{Εξ. 10})$$

Η τελική παροχή του διαλύτη $L_{mo,ca}$ ισούται με $1.44 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{h}}$, ενώ ο ογκομετρικός ρυθμός ροής προσδιορίζεται ως εξής:

$$L_v = \frac{L_{mo,ca,min} \times MW_{30\%MEA}}{\rho_{30\%MEA}} = \frac{1.44 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{h}} \times 30.934 \frac{\text{g}}{\text{mol of 30\% MEA}}}{1168 \frac{\text{g}}{\text{L}}}$$

$$= 0.038 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

4.2.2 Διάμετρος της στήλης

Η διάμετρος της στήλης εξαρτάται από το πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιείται, το διαλύτη και την παροχή του αερίου. Το d_{col} υπολογίζεται έτσι ώστε ο διαλύτης και το αέριο να έρχονται σε επαρκή επαφή μεταξύ τους παρουσία του πληρωτικού υλικού. Η ειδική πτώση πίεσης $\Delta P / l$ στη στήλη με πληρωτικό υλικό είναι ένας δείκτης του βαθμού επαφής μεταξύ του διαλύτη και του αερίου.

Ο ρυθμός ροής του αερίου συμβολίζεται με τον δείκτη F-Factor F_{gas} , ο οποίος υποδεικνύει τη δύναμη που ασκεί το αέριο κατά τη κατεύθυνση ροής του, δηλαδή προς τα πάνω, v_{gas} η επιφανειακή ταχύτητα του αερίου και ρ_{gas} η πυκνότητα του.

$$F_{gas} = v_{gas} \sqrt{\rho_{gas}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Ο συντελεστής απόδοσης C εκφράζει την ισορροπία μεταξύ προς τα πάνω και προς τα κάτω, οποίες δρουν σε μία σταγόνα διαλύτη (εξ. 12) όπου το ρ_{solv} είναι η πυκνότητα του διαλύτη.

$$C = v_{gas} \sqrt{\frac{\rho_{gas}}{\rho_{solv} - \rho_{gas}}} \quad (\text{Eq. 12})$$

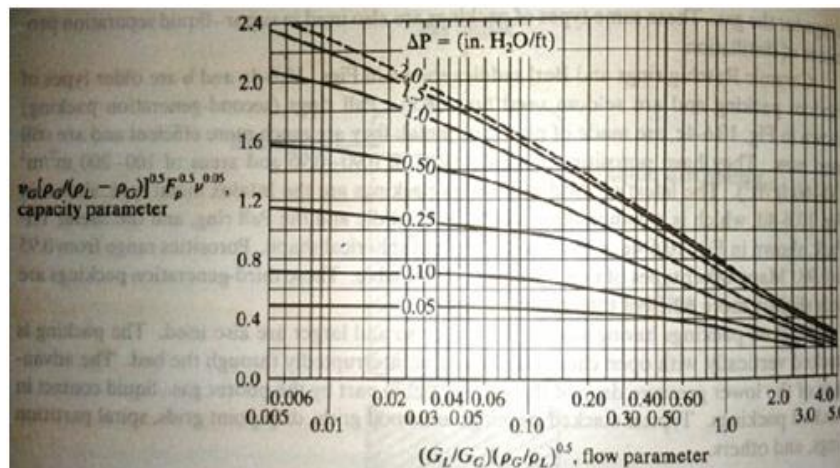
Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τον συντελεστή $\Delta P / l$ είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πληρωτικού υλικού, τα οποία χαρακτηρίζονται από τον συντελεστή PF του πληρωτικού υλικού. Η ειδική πτώση πίεσης στο σημείο πλημμυρισμού $\Delta P_{fl} / l$ μπορεί να υπολογιστεί υπολογίζοντας τον συντελεστή PF σύμφωνα με την εξίσωση (13), η οποία είναι μία εμπειρική συσχέτιση μεταξύ των δύο συντελεστών. Ενώ χρησιμοποιούμε την Εξίσωση (13), το PF πρέπει να έχει μονάδες σε $[ft^{-1}]$ και το $\Delta P_{fl} / l$ να έχει μονάδες $[in H_2O/ft_{packing}]$.

$$\frac{\Delta P_{fl}}{l} = 0.12PF^{0.7} \text{ (Eq. 13)}$$

Εν συνεχεία οι συντελεστές C και PF ενοποιούνται χρησιμοποιώντας την παράμετρο χωρητικότητας CP όπως φαίνεται και στην εξ. 14 όπου ο μ_{solv} είναι το δυναμικό ιξώδες του διαλύτη και το ρ_{solv} η πυκνότητα του διαλύτη αντίστοιχα.

$$CP = C \times PF^{0.5} \left(\frac{\mu_{solv}}{\rho_{solv}} \right)^{0.05} \text{ (Eq. 14)}$$

Για δεδομένο ρυθμό ροής διαλύτη και αερίου, υψηλότερο CP υποδεικνύει υψηλότερο $\Delta P_{fl} / l$. Ακόμα το CP και η παράμετρος ροής FP συσχετίζονται χρησιμοποιώντας σταθερές καμπύλες $\Delta P / l$ από διάγραμμα βάσει βιβλιογραφίας και ονομάζεται γενικευμένο διάγραμμα συσχέτισης πτώσης πίεσης (GPDC) (Σχήμα 5). Όταν η FP διατηρείται σταθερή, η ειδική πτώση πίεσης αυξάνεται με την αύξηση του CP .



Εικόνα 15. GPDC chart

Η διάμετρος της στήλης d_{col} πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει επαρκή επαφή μεταξύ του διαλύτη και του αερίου, αλλά να αποφεύγει τον πλημμυρισμό της στήλης. Συνεπώς, στο σημείο σχεδιασμού ή στο σημείο λειτουργίας της στήλης, η επιφανειακή ταχύτητα αερίου $v_{gas,op}$ επιλέγεται να είναι στο 80% της επιφανειακής ταχύτητας του αερίου που θα είχε στο σημείο πλημμυρισμού ($v_{gas,fl}$). Για τον υπολογισμό της διαμέτρου της στήλης d_{col} απαραίτητο κρίνεται να υπολογιστούν τα κάτωθι:

1. Η παράμετρος ροής FP της στήλης υπολογίζεται ως ο λόγος της τετραγωνικής ρίζας της κινητικής ενέργειας του διαλύτη και του αερίου, σύμφωνα με την εξίσωση (15) όπου L_m και G_m είναι οι ρυθμοί ροής μάζας διαλύτη και αερίου αντιστοίχως και ρ_{solv} και ρ_{gas} είναι οι πυκνότητες διαλύτη και αερίου, αντίστοιχα.

$$FP = \frac{L_m}{G_m} \sqrt{\frac{\rho_{gas}}{\rho_{solv}}} \quad (\text{Eq. 15})$$

2. Ο συντελεστής συσσώρευσης PF του πληρωτικού υλικού είναι χαρακτηριστικός του πληρωτικού υλικού που χρησιμοποιείται.
3. Η πτώση πίεσης στο σημείο πλημμυρισμού $\Delta P_{fl} / l$ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την *Εξίσωση (13)* με τις μονάδες που υποδείχθηκαν παραπάνω.
4. Στο διάγραμμα γενικευμένης συσχέτισης της πτώσης πίεσης (GPDC), υπάρχει ένα μοναδικό σημείο που είναι γνωστό με $\Delta P_{fl} / l$ και FP (τετμημένη). Στη συνέχεια, μέσω του διαγράμματος υπολογίζεται η παράμετρος χωρητικότητας CP (τεταγμένη) στο αντίστοιχο σημείο.
5. Χρησιμοποιώντας το CP, ο συντελεστής απόδοσης C προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την *εξίσωση (14)* όπου η τιμή του συντελεστή PF έχει μονάδες σε ft^{-1} , το δυναμικό ιξώδες του διαλύτη μ_{solv} μονάδες σε Centipoise και το ρ_{solv} μονάδες σε $kg \cdot m^{-3}$ (και όχι lb / ft^3).
6. Χρησιμοποιώντας την τιμή C που υπολογίστηκε, η επιφανειακή ταχύτητα αερίου στο σημείο πλημμυρισμού $v_{gas,fl}$ προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την *εξίσωση (12)*. Ο διαλύτης και η πυκνότητα του αερίου πρέπει να έχουν μονάδες σε $lb \cdot ft^{-3}$, και το v_{gas} σε ft/s .
7. Η επιφανειακή ταχύτητα αερίου στο σημείο λειτουργίας $v_{gas,op}$ είναι σταθερή στο 80% του $v_{gas,fl}$. Η μονάδα $v_{gas,op}$ πρέπει να μετατραπεί σε μονάδες στο SI, δηλαδή σε m/s .
8. Η διάμετρος της στήλης d_{col} στη συνέχεια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την *εξίσωση (16)*. Εάν το v_{gas} και η ογκομετρική παροχή της τροφοδοσίας του αερίου G_v έχουν μονάδες στο SI (δηλαδή σε m/s και m^3/h αντίστοιχα), τότε και η d_{col} πρέπει να έχει μονάδες στο SI, δηλαδή σε m . Έτσι προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$\frac{G_v}{3600} \frac{1}{v_{\text{gas}}} = \frac{\pi d_{\text{col}}^2}{4} \quad (\text{Εξ. 16})$$

- Για τον υπολογισμό της συνολικής ροής μάζας αερίου, του διαλύτη G_m και του L_m αντίστοιχα χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$G_m = G_v * \rho_{\text{gas}} = 0.048 \frac{\text{kg gas}}{\text{h}} \quad (\text{Εξ. 17})$$

και

$$L_m = L_v * \rho_{\text{solvent}} = 0.045 \frac{\text{kg solvent}}{\text{h}} \quad (\text{Εξ. 18})$$

Με βάσει την *εξίσωση (15)* μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή FP, ο οποίος είναι ίσος με το 0,029.

Χρησιμοποιώντας δακτυλίους Pall από πολυπροπυλένιο (PP) με διάμετρο 50 mm ως πληρωτικό υλικό, το PF είναι ίσο με:

$$PF = 26,8 \text{ ft}^1$$

Σύμφωνα με την *Εξίσωση (13)* η πτώση πίεσης με τις υπολογιζόμενες τιμές των FP και PF είναι ίση με:

$$\frac{\Delta P_{fl}}{l} = 1,199 \frac{\text{inch } H_2O}{\text{ft packing}}$$

Χρησιμοποιώντας το γενικευμένο διάγραμμα συσχέτισης πτώσης πίεσης (GPDC) του *Σχήματος 5*, η παράμετρος χωρητικότητας CP (τεταγμένη) είναι ίση με 1,7.

Χρησιμοποιώντας την *εξίσωση (14)* ο συντελεστής απόδοσης C είναι ίσος με 0,446 και σύμφωνα με την *εξίσωση (12)* $V_{\text{gas,fl}}$ ισούται με 14,22 [ft/s]. Ως εκ τούτου, το $V_{\text{gas,op}} = 0.8V_{\text{gas,fl}} = 11.37$ [ft/s].

Τέλος, χρησιμοποιώντας την *Εξίσωση (16)*, μπορεί να υπολογιστεί τελικά η διάμετρος της στήλης, η οποία είναι ίση με 0,43 cm, δηλαδή:

$$d_{\text{col}} = 0,43 \text{ cm}$$

Το παραπάνω αποτέλεσμα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τεχνικά δεν είναι εφικτό να κατασκευαστεί μια τέτοια στήλη καθώς η διάμετρος κάθε δακτυλίου του πληρωτικού υλικού είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της στήλης. Ως αποτέλεσμα, η πειραματική διαδικασία που θα ακολουθηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων, σχετικά με το καταλληλότερο προσροφητικό

μέσο, τον χρόνο κορεσμού της στήλης και την καθαρότητα του τελικού βιοαερίου, θα γίνει με τη χρήση στήλης-φουσαλίδων και το παραπάνω πληρωτικό υλικό και όχι με αντirroή. (Dixit., 2015)

Κεφάλαιο 5 – Υλικά και Μέθοδοι Πειραματικής διαδικασίας

5.1 Αντιδραστήρας αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση πραγματοποιήθηκε σε αναερόβιο χωνευτήρα 4 m³ (Εικόνα 16) που έχει εγκατασταθεί στον ημιβιομηχανικό χώρο της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Ο αναερόβιος χωνευτήρας λειτούργησε υπό μεσόφιλες συνθήκες και με υδραυλικό χρόνο παραμονής ίσο με 20 ημέρες. Το παραγόμενο από τον αναερόβιο χωνευτήρα βιοαέριο χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της κινητικής του κορεσμού των διαφορετικών διαλυμάτων αμίνης που χρησιμοποιήθηκαν. Η σύσταση του βιοαερίου προσδιορίζεται σε καθημερινή βάση και το ποσοστό του μεθανίου είναι ίσο με $61 \pm 6.5\%$.



Εικόνα 16. Αναερόβιος χωνευτήρας 4m³ για την αναερόβια χώνευση του FORBI

5.1.1 Υπόστρωμα αναερόβιας χώνευσης - FORBI

Ως υπόστρωμα στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιήθηκε το FORBI. Για την παραγωγή του FORBI, τα συλλεγόμενα οργανικά απόβλητα από τον Δήμο Χαλανδρίου υφίστανται προεπεξεργασία μέσω ταυτόχρονης ξήρανσης και τεμαχισμού. Η ξήρανση λαμβάνει

χώρα σε θερμοκρασία 98°C. Από την διεργασία αυτή προκύπτει ένα σταθεροποιημένο προϊόν βιομάζας, το FORBI (Food Residue Biomass Product).

Με την παραπάνω επεξεργασία των απορριμμάτων των τροφών επιτυγχάνεται:

- μείωση του τελικού όγκου και βάρους του υλικού 4-5 φορές, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση σε κόστος μεταφοράς
- Είναι υγιεινοποιημένο, καθώς οι παθογόνοι μικροοργανισμοί έχουν καταστραφεί κατά την ξήρανση, με ξεκάθαρα πλεονεκτήματα στη διαχείριση του και στις συνθήκες υγιεινής των εργαζομένων
- παράταση του δυνατού χρόνου αποθήκευσης για αξιοποίηση χωρίς τον κίνδυνο αποσύνθεσης
- δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης βιομάζας για ενέργεια, βιοκαύσιμα και προϊόντα προστιθέμενης αξίας
- Μείωση της υγρασίας. Τελική υγρασία 8-15%



Εικόνα 17. Διαδικασία παραγωγής FORBI από προδιαλεγμένα οργανικά υπολείμματα τροφής

5.2 Στήλη απορρόφησης εργαστηριακής κλίμακας και διάταξη αναγέννησης

Για την μελέτη της κινητικής του κορεσμού των διαφορετικών διαλυμάτων αμίνης που χρησιμοποιήθηκαν κατασκευάστηκε στήλη απορρόφησης εργαστηριακής κλίμακας (Εικόνα 17).

Η στήλη απορρόφησης ήταν κατασκευασμένη από borosilicate glass και ήταν κυλινδρικού σχήματος με ύψος 100 cm και διάμετρο 3,5 cm. Το πληρωτικό υλικό είχε σχήμα άδειου κυλίνδρου ύψους 1cm και διαμέτρου 50 mm κατασκευασμένο επίσης από borosilicate glass. Το ύψος του πληρωτικού υλικού ανερχόταν στα 80 cm. Η παροχή του αερίου πραγματοποιούνταν από τον πυθμένα της στήλης με την χρήση περισταλτικής αντλίας η οποία παρέχει σταθερή ροή ίση με 4,64 (L/h)r. Η περισταλτική αντλία αντλεί το βιοαέριο από ενδιάμεσο δοχείο που λειτουργεί ως αεριοφυλάκιο. Το αναβαθμισμένο βιοαέριο εξέρχεται από την κορυφή της στήλης. Η στήλη απορρόφησης σε κάθε περίπτωση λειτουργήσε ως στήλη φυσαλίδων με την προσθήκη 250 ml διαλύματος αμίνης. Ο καταιονισμός της στήλης πραγματοποιήθηκε με 5 L νερού ανάμεσα σε κάθε κύκλο (όπου αυτό αναφέρεται).



Εικόνα 18. Στήλη απορρόφησης εργαστηριακής κλίμακας για την αναβάθμιση του βιοαερίου (Absorber)

5.3 Διάταξη αναγέννησης των κορεσμένων διαλυμάτων αμίνης σε ατμοσφαιρική πίεση

Η διάταξη αναγέννησης (*Stripper*) των κορεσμένων διαλυμάτων αμίνης (Εικόνα 18) σε ατμοσφαιρική πίεση αποτελείται από έναν βραστήρα στον οποίο τοποθετείται τριλάιμη σφαιρική φιάλη. Στη φιάλη αυτή προστίθεντο τα κορεσμένα διαλύματα αμίνης. Η σφαιρική φιάλη συνδέεται με ψυκτήρα-εναλλάκτη όπου στην κορυφή του απελευθερώνεται το CO_2 και το H_2S ενώ η ποσότητα του υδατικού διαλύματος η οποία δεν επανα-υγροποιείται στον πρώτο ψυκτήρα οδηγείται σε δεύτερο ψυκτήρα στον οποίο ψύχεται και γυρνάει μέσω της ανακυκλοφορίας πίσω στην σφαιρική φιάλη στην οποία έχουν αναπτυχθεί υψηλές θερμοκρασίες έως και 110°C . Έπειτα απενεργοποιείται ο βραστήρας και το αναγεννημένο διάλυμα αμίνης παραμένει στην σφαιρική φιάλη μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου οπότε και συλλέγεται και τοποθετείται πάλι στην στήλη (*Absorber*) και η διαδικασία κορεσμού επαναλαμβάνεται.



Εικόνα 19. Διάταξη αναγέννησης κορεσμένου MEA

5.4 Διάταξη αναγέννησης κορεσμένου διαλύματος ΜΕΑ υπό κενό

Για την μελέτη της αναγέννησης του κορεσμένου διαλύματος ΜΕΑ υπό κενό χρησιμοποιήθηκε το rotary evaporator της εικόνας 19. Η αναγέννηση πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία 80°C και κενό -2 bar όπου και επετεύχθη βρασμός του διαλύματος αμίνης.



Εικόνα 20. Διάταξη αναγέννησης κορεσμένου ΜΕΑ υπό κενό/Rotary Evaporator

5.5 Μελέτη της κινητικής του κορεσμού των διαλυμάτων αμίνης σε CO₂

Για την μελέτη της κινητικής του κορεσμού των διαλυμάτων αμίνης σε CO₂ λαμβάνονταν δείγματα από την κορυφή της στήλης απορρόφησης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για τον προσδιορισμό του μεθανίου και του CO₂ στα δείγματα αυτά χρησιμοποιήθηκε αέριος χρωματογράφος της εταιρίας Shimadzu (GC-2014) με ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας (TCD) και φέρον αέριο το Ήλιο. Η στήλη διαχωρισμού (Carboxen 1000) ήταν μήκους 5m και εσωτερικής διαμέτρου 2,1mm. Ο θάλαμος του χρωματογράφου βρισκόταν αρχικά σε θερμοκρασία 40 °C. Για την εύρεση του ποσοστού μεθανίου χρησιμοποιήθηκε θερμοκρασιακό πρόγραμμα στην στήλη (διάρκειας περίπου 25 λεπτών), στο οποίο αρχικά η θερμοκρασία της

στήλης ήταν στους 40 °C, αυξανόταν σταδιακά με ρυθμό 10 °C ανά λεπτό μέχρι τους 185 °C, και στη συνέχεια παρέμενε σταθερή για 5 λεπτά.

5.6 ΜΕΑ και ΜΔΕΑ

- Τα διαλύματα ΜΕΑ (Monoethanolamine) (Εικόνα 19) και ΜΔΕΑ (Methyl diethanolamine) που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που ακολουθούν παρασκευάστηκαν με ανάμειξη των αμινών σε απιονισμένο νερό. Τα χημικά αντιδραστήρια ήταν υψηλής καθαρότητας (>99%).



Εικόνα 21. Δοχείο Μονοαιθανολαμίνης (MonoEthanolAmin- ΜΕΑ)

Κεφάλαιο 6 - Πειραματική Διαδικασία

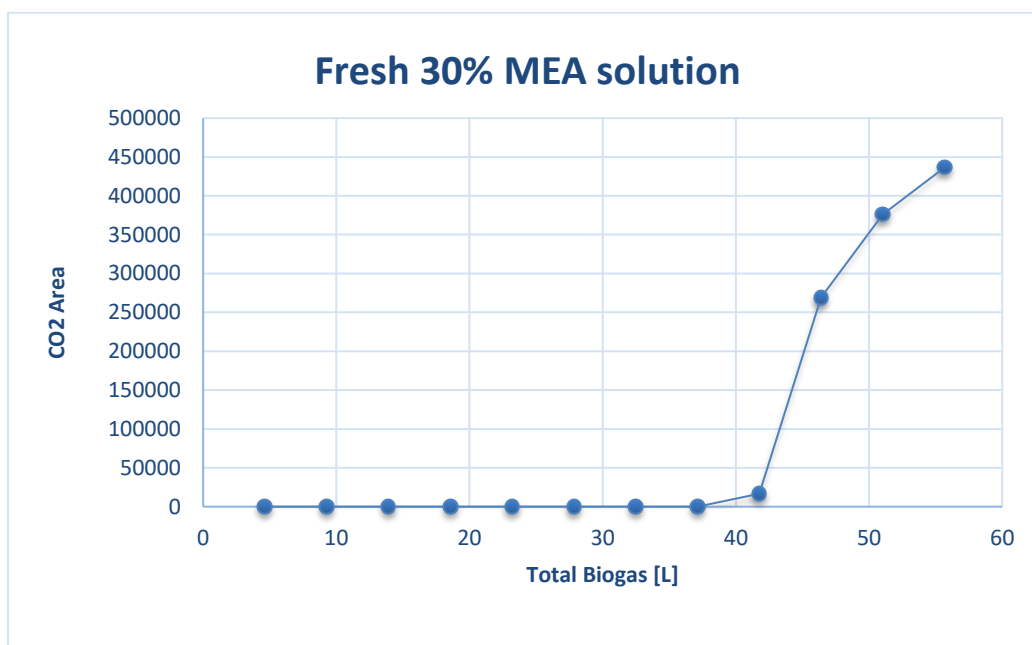
6.1 Μελέτη απορρόφησης CO₂ από 30% διάλυμα MEA

Με σκοπό τη διερεύνηση της ικανότητας απορρόφησης CO₂ του διαλύματος 30% MEA, προσδιορίστηκε η σύσταση του αναβαθμισμένου βιοαερίου μέχρι τον κορεσμό του διαλύματος αμίνης. Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές για το αναβαθμισμένο βιοαέριο, το διάλυμα MEA θεωρήθηκε κορεσμένο, όταν το ποσοστό CO₂ στο αναβαθμισμένο βιοαέριο ήταν υψηλότερο από το 2%. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα που χρησιμοποιούσαν τόσο “φρέσκα” όσο και αναγεννημένα διαλύματα MEA 30%.

6.1.1 Κινητική μελέτη του κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) σε CO₂ για διαφορετικούς χρόνους αναγέννησης

Για το φρέσκο διάλυμα MEA (30% MEA-70% H₂O)

Παρακάτω παρουσιάζεται μέσω διαγράμματος η κινητική κορεσμού για το φρέσκο διάλυμα 30% MEA.:



Διάγραμμα 14. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο 30% MEA

Σε χρονικό διάστημα μικρότερο της μίας ώρας παρατηρείται χρωματική αλλαγή στο διάλυμα της αμίνης (Εικόνα 20**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**) κι αυτό ο φείλεται στον σταδιακό κορεσμό του MEA από το CO₂ και το H₂S .



Εικόνα 22. Κορεσμένο διάλυμα MEA (MonoEthanolAmine)

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα:

Η συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι να επέλθει κορεσμός είναι ίση με 37,12 L.

Για περιεκτικότητα βιοαερίου πριν την είσοδο της στήλης ίση με 42% CO₂

Η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 37,12 = 15,59 \text{ L CO}_2$,

Η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα CO₂ που μπορεί να διέλθει μέσω της στήλης έως ότου να επέλθει ο κορεσμός στο διάλυμα των 0,25 L_{MEA} περιεκτικότητας 30%MEA-70%H₂O.

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει $63,36 \text{ L}_{(\text{CO}_2)} / \text{L}_{(30\% \text{MEA})}$

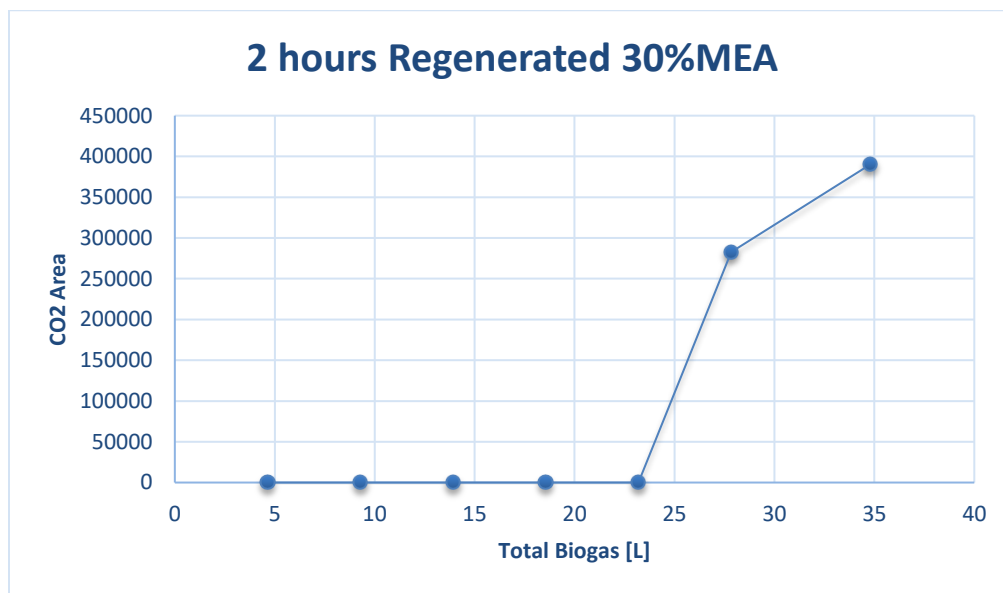
Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με $148,48 \text{ L}_{(\text{biogas})} / \text{L}_{(30\% \text{MEA})}$

Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν το φρέσκο διάλυμα 30%MEA με 70% H₂O.

Έπειτα το κορεσμένο διάλυμα αναγεννάται στην διάταξη αναγέννησης για συνολική διάρκεια 2 ωρών και εισάγεται ξανά στη στήλη. Προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα και οι υπολογισμοί.

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως συμπεραίνουμε πως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂ στη στήλη. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



Διάγραμμα 15. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 30% MEA που έχει αναγεννηθεί μέσω βρασμού για χρονικό διάστημα 2 ωρών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα:

Η συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι να επέλθει κορεσμός είναι ίση με 27,84 (L).

Για περιεκτικότητα βιοαερίου πριν την είσοδο της στήλης ίση με 42% CO₂

Η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη είναι ίση με $0,42 * 27,84 = 11,69 \text{ L CO}_2$,

Η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα CO₂ που μπορεί να διέλθει μέσω της στήλης έως ότου να επέλθει ο κορεσμός στο διάλυμα των 0,25 L_{MEA} περιεκτικότητας 30%MEA-70%H₂O.

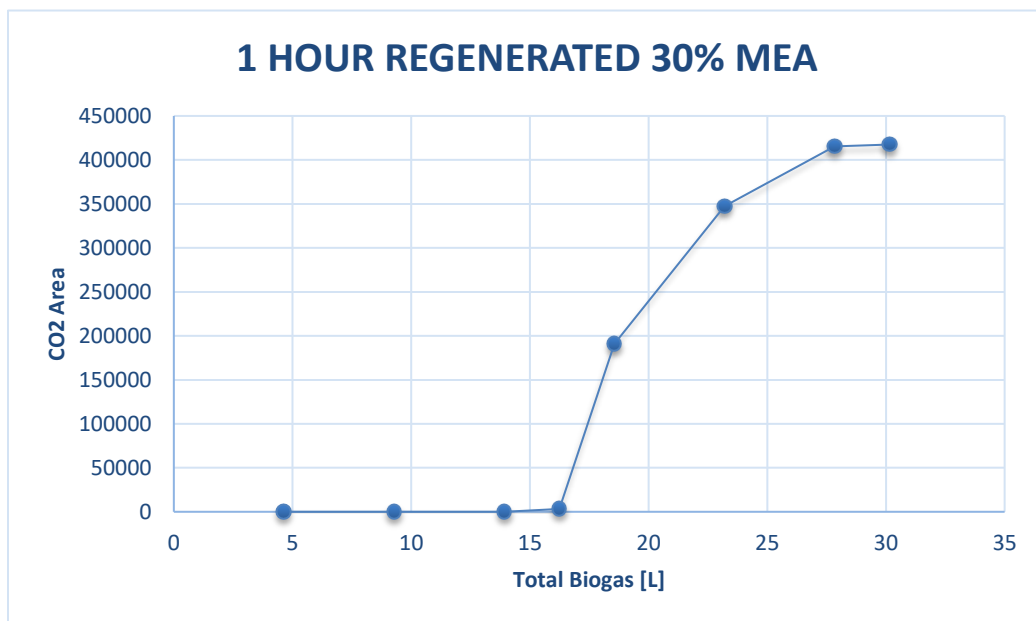
Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει $46,77 \text{ L}_{(\text{CO}_2)} / \text{L}_{(30\% \text{MEA})}$

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με $111,36 \text{ L}_{(\text{biogas})} / \text{L}_{(30\% \text{MEA})}$

Προκειμένου να προσδιοριστεί ο μέγιστος χρόνος βρασμού για την αναγέννηση του κορεσμένου διαλύματος 30% MEA, πραγματοποιήθηκαν πειράματα αναγέννησης με βρασμό για διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα 30% MEA που είχαν κορεστεί μόνο μία φορά.

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε μέσω βρασμού για χρονικό διάστημα 1 ώρας

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε μέσω βρασμού για χρονικό διάστημα 1 ώρας, παρατηρήθηκε ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO_2 στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO_2 . Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 16. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός

Η συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι να επέλθει κορεσμός είναι ίση με 13,92 L.

Για περιεκτικότητα βιοαερίου πριν την είσοδο της στήλης ίση με 42% CO₂

Η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 13,92 = 5,84 \text{ L CO}_2$,

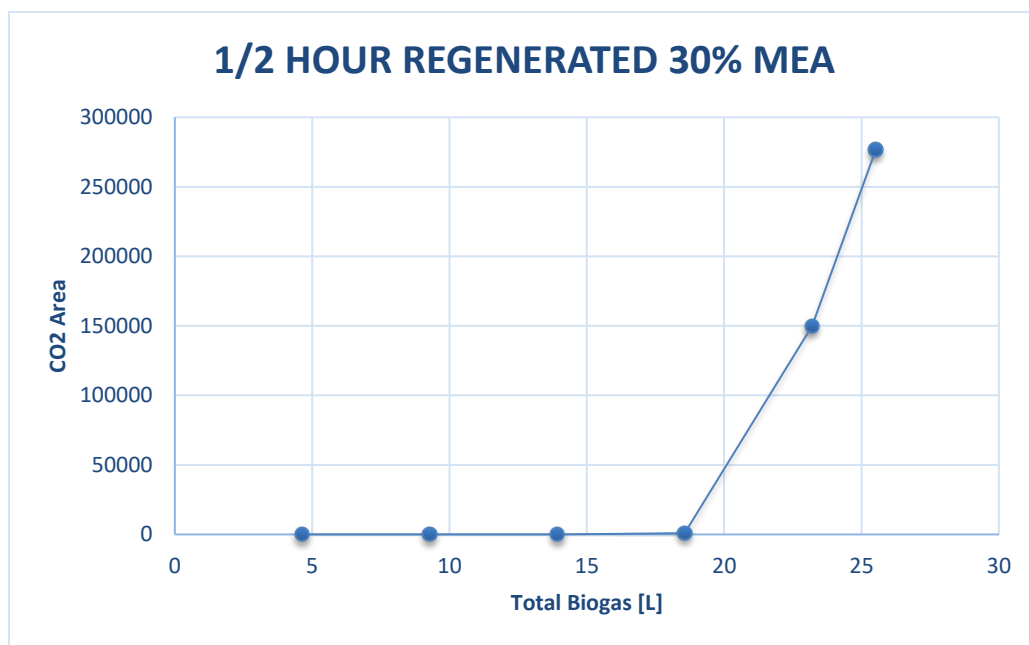
Η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα CO₂ που μπορεί να διέλθει μέσω της στήλης έως ότου να επέλθει ο κορεσμός στο διάλυμα των 0,25 L_{MEA} περιεκτικότητας 30%MEA-70%H₂O.

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει 23,38 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 55,68 L(biogas)/L(30%MEA)

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε μέσω βρασμού για χρονικό διάστημα 0,5 ωρών

Έπειτα μελετήθηκε η αποδοτικότητα διαλύματος 30%MEA το οποίο αναγεννήθηκε για συνολική διάρκεια μισής ώρας. Παρατηρήθηκε ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 17. Συνολική ποσότητα αβιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 13,92 L.

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 13,92 = 5,84 \text{ L CO}_2$,

Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA.

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν 23,38 L(CO₂)/ L(30%MEA).

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 55,68 L(biogas)/L(30%MEA)

Σε κάθε ένα από τα ανωτέρω διαγράμματα έως τον κορεσμό του διαλύματος 30% MEA η περιεκτικότητα του εξευγενισμένου αερίου σε μεθάνιο είναι >99%, δηλαδή εντός των προδιαγραφών για τη χρήση του ως αερίου κίνησης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για φρέσκα και αναγεννημένα διαλύματα 30%MEA με διάρκεια αναγέννησης τα 30 λεπτά, τη 1 ώρα και τις 2 ώρες απεικονίζονται συνοπτικά στον συγκεντρωτικό πίνακα. Είναι εμφανές πως η χρονική διάρκεια των 2 ωρών για την αναγέννηση του κορεσμένου διαλύματος αμίνης είναι προτιμότερη από άποψη αποτελεσματικότητας λόγω του αυξημένου όγκου βιοαερίου που αφήνει να αναβαθμιστεί μέχρι να επέλθει ο κορεσμός του διαλύματος του.

Πίνακας 7. Πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρόνου αναγέννησης

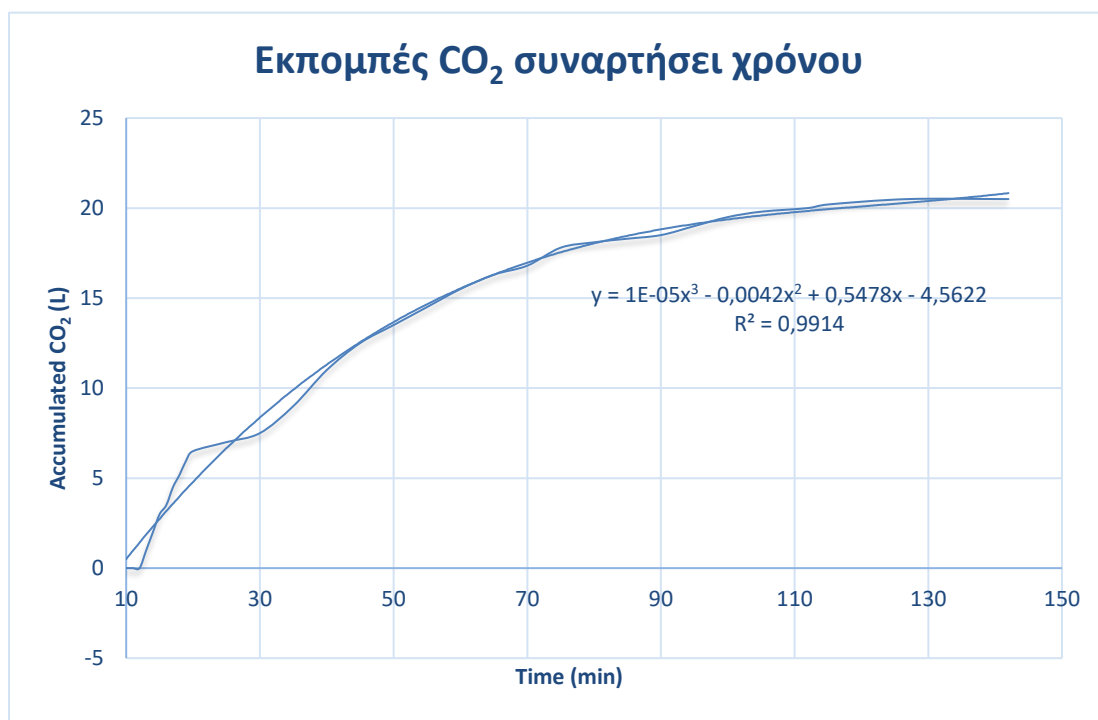
	Όγκος υδατικού διαλύματος 30%MEA (L)	Χρόνος αναγέννησης (h)	Όγκος βιοαερίου μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη (L)	Όγκος επεξεργασμένου βιοαερίου/όγκο διαλύτη (L _{biogas} /L _{30%MEA})
Διάλυμα 30% MEA	0.25	0 (φρέσκο)	37,12	148,48
		0,5	13,92	55,68
		1	13,92	55,68
		2	27,84	111,36

6.1.2 Μέτρηση εκπομπών CO₂ κατά την αναγέννηση του κορεσμένου υδατικού διαλύματος 30% MEA

Για τον προσδιορισμό των αέριων εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και τη μελέτη της κινητικής της αναγέννησης χρησιμοποιήθηκε μετρητής αερίου.

Με βάση πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον παραπάνω μετρητή που προσαρμόστηκε στη διάταξη της αναγέννησης, αποδείχθηκε ότι για ποσότητα κορεσμένου διαλύματος MEA 250 mL το διάστημα 2 ωρών είναι ο βέλτιστος χρόνος αναγέννησης προκειμένου να απομακρυνθεί η ποσότητα CO₂ που έχει δεσμευθεί. Μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αναγέννησης δεν προσδίδει επιπλέον όφελος καθώς η ποσότητα αερίου που απομακρύνεται τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή 21,5 L σε θερμοκρασία 110°C ή αλλιώς 15,32 L σε STP. Αντιθέτως, μια τέτοια αύξηση οδηγεί σε μεγαλύτερη δαπάνη ενέργειας καθώς και σε μεγαλύτερες απώλειες διαλύματος. Το διάγραμμα εκπομπών CO₂ συναρτήσεως του χρόνου παρουσιάζεται παρακάτω.

Τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται στο παρακάτω *Διάγραμμα 18*.



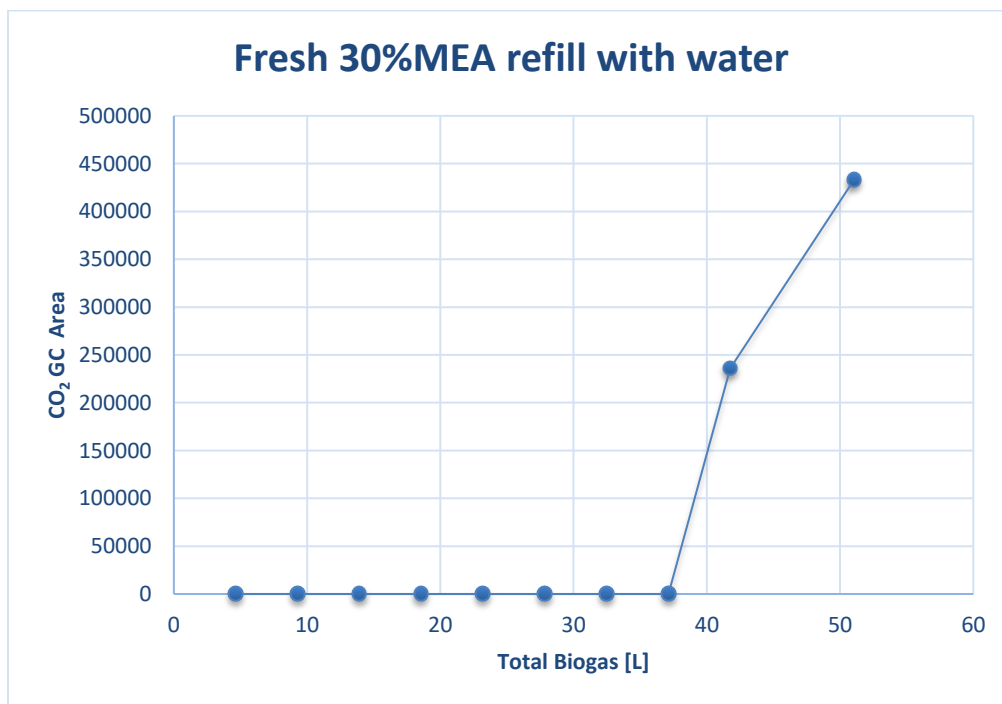
Διάγραμμα 18. Εκπομπές CO₂ συναρτήσεως του χρόνου για διάρκεια αναγέννησης 2 ωρών.

6.1.3 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MEA με ταυτόχρονη συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση νερού

Στη προσπάθεια βελτιστοποίησης της διεργασίας αναβάθμισης του βιοαερίου εξετάστηκε η συμπλήρωση των συνολικών απωλειών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της αναβάθμισης αλλά και αναγέννησης με προσθήκη νερού. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν σε μορφή διαγραμμάτων τα οποία περιγράφουν την κινητική κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) καθώς και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί αποδεκτής ποσότητας βιοαερίου ανά λίτρο υδατικού διαλύματος αμίνης σε βάθος 5 κύκλων αναγέννησης.

Για το φρέσκο διάλυμα MEA (30% MEA-70% H₂O)

Όπως ήταν αναμενόμενο (λόγω του ίδιου αποτελέσματος για το φρέσκο διάλυμα αμίνης σε πείραμα που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο) παρατηρήθηκε ότι στις 8 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 19. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει ο κορεσμός στο φρέσκο 30%MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 37,12 L.

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 37,12 = 15,59 \text{ L CO}_2$.

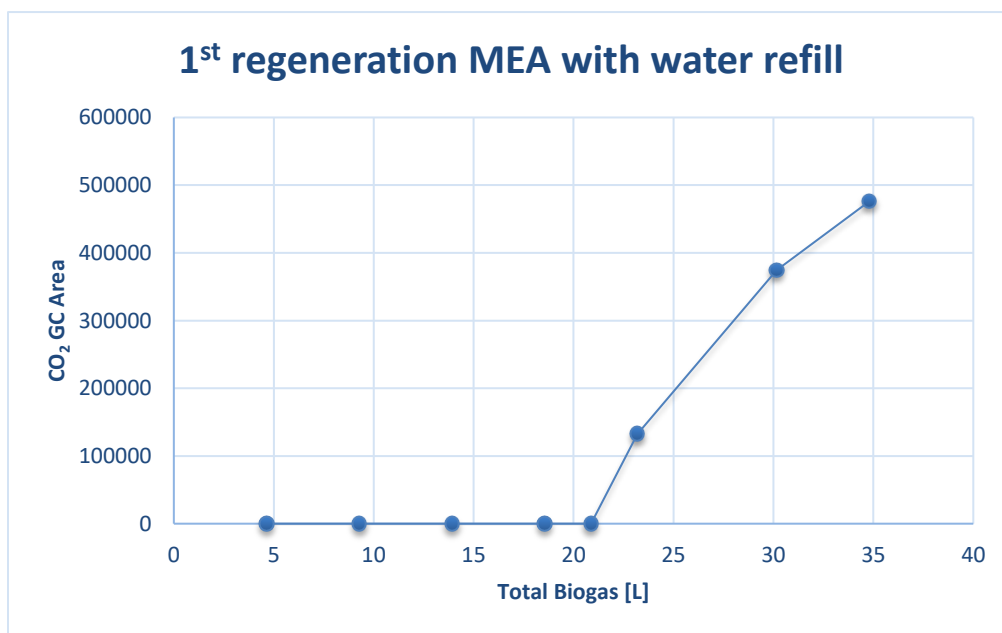
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν 63,36 L(CO₂)/ L(30%MEA).

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 148,48 L(biogas)/L(30%MEA).

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 1^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 4,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 20. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 1η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 20,88 L.

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 20,88 = 8,79 \text{ L CO}_2$,

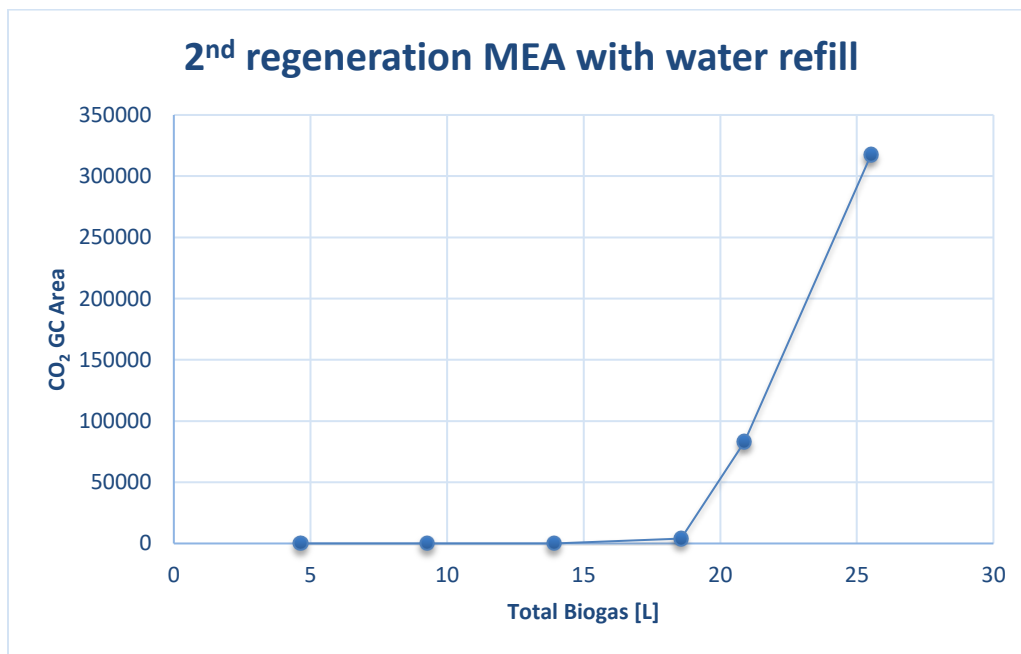
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν 35,07 L(CO₂)/ L(30%MEA).

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 83,52 L(biogas)/L(30%MEA).

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 2^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 21. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 2η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 18,56 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 18,56 = 7,79 \text{ L CO}_2$,

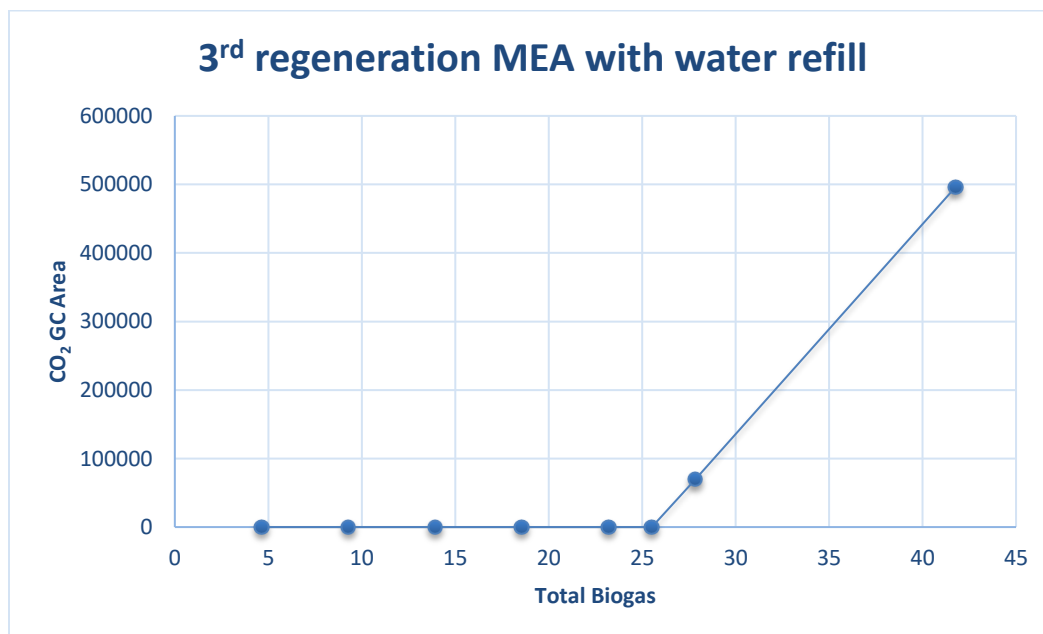
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA.

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει 31,18 L(CO₂)/ L(30%MEA).

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 74,24 L(biogas)/L(30%MEA).

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 3^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 22. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 3^η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 23,12 L.

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 23,12 = 9,74 \text{ L CO}_2$,

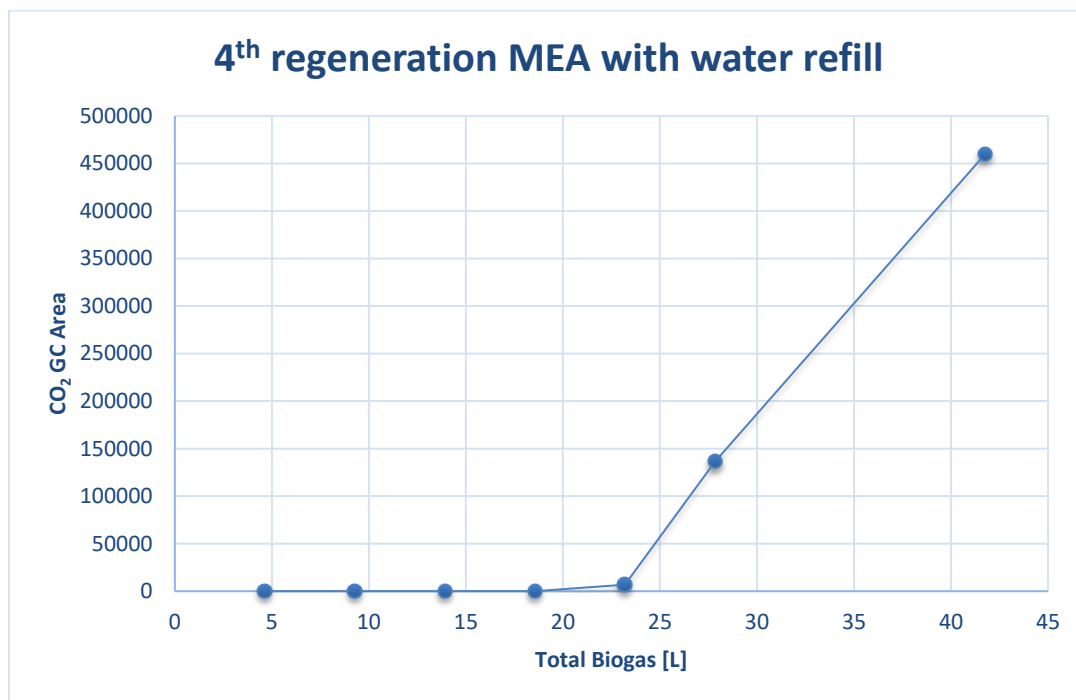
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA.

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν 38,97 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 92,8 L(biogas)/L(30%MEA)

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 4^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 23. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 4^η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 18,56 L.

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 18,56 = 7,79 \text{ L CO}_2$,

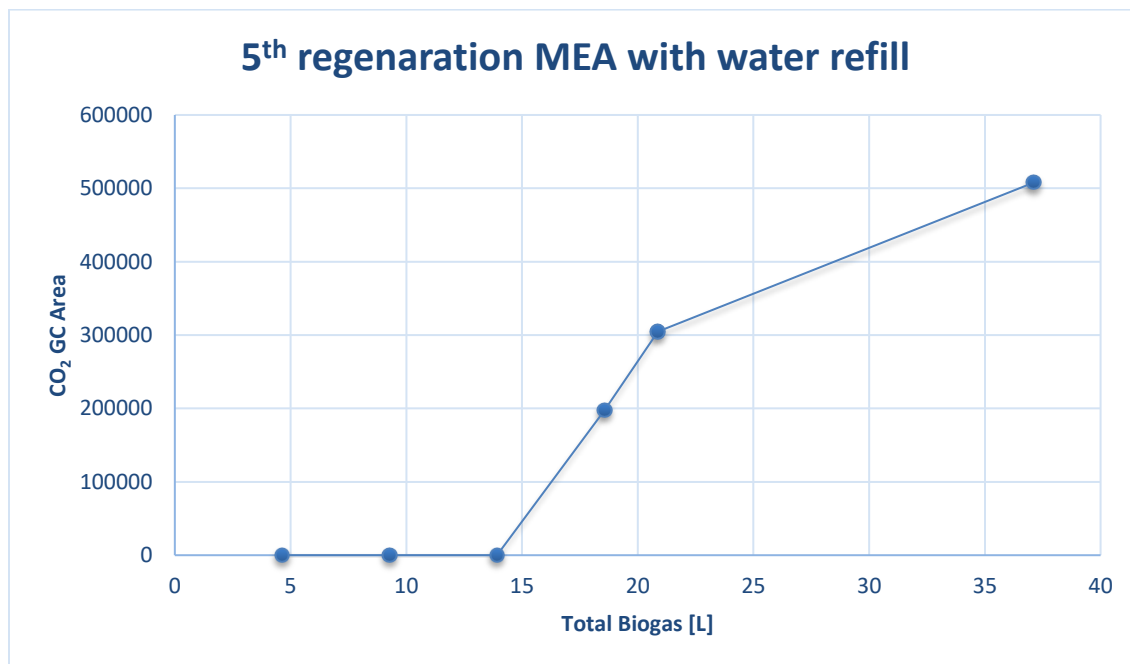
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA.

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει 31,18 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 74,24 L(biogas)/L(30%MEA)

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 5^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 3,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 24. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 5^η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 13,92 L.

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 13,92 = 5,84 \text{ L CO}_2$,

Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν 23,38 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 55,68 L(biogas)/L(30%MEA)

Επομένως ο 6^{ος} κύκλος αναγέννησης του διαλύματος 30% MEA καθίσταται μη λειτουργικός.

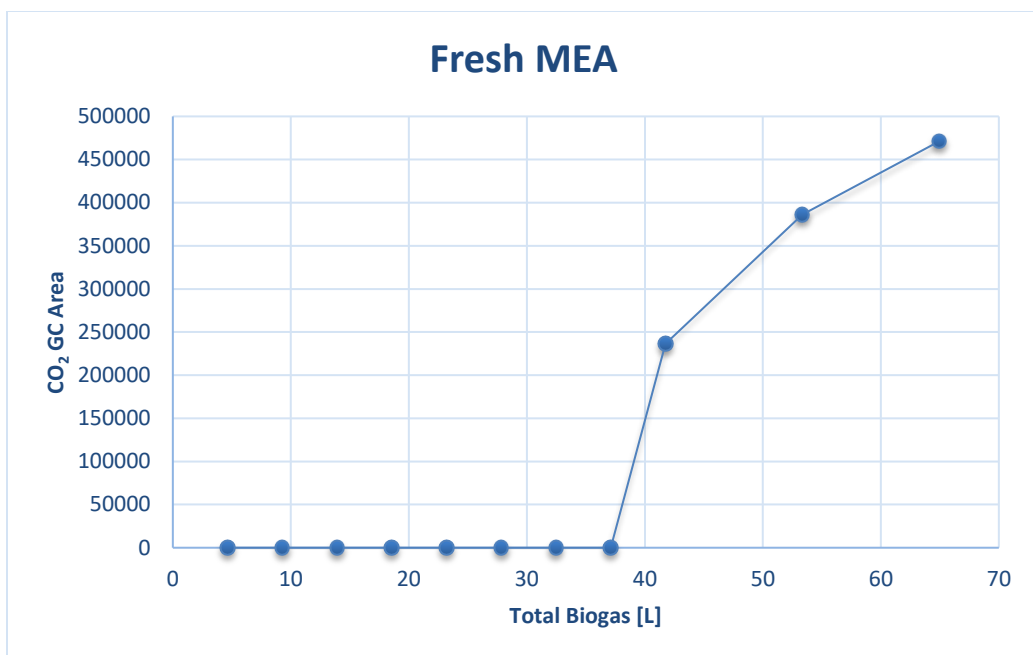
Σημειώνεται ότι κατά μέσο όρο συμπληρώθηκαν απώλειες της τάξης των 8,4 mL (3,36%) με τη χρήση νερού.

6.1.4 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MEA με ταυτόχρονη συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση MEA και καταιονισμό της στήλης

Παρατίθενται τα διαγράμματα που περιγράφουν την κινητική κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MEA με συμπλήρωση των συνολικών απωλειών που λαμβάνουν χώρα στη στήλη απορρόφησης και τη διάταξη αναγέννησης με τη χρήση του υδατικού διαλύματος 30% MEA καθώς και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί αποδεκτής ποσότητας βιοαερίου ανά λίτρο υδατικού διαλύματος αμίνης σε βάθος 5 κύκλων αναγέννησης.

Για το φρέσκο διάλυμα MEA (30% MEA-70% H₂O)

Παρατηρείται ότι στις 8 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 25. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 37,12 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 37,12 = 15,59 \text{ L CO}_2$.

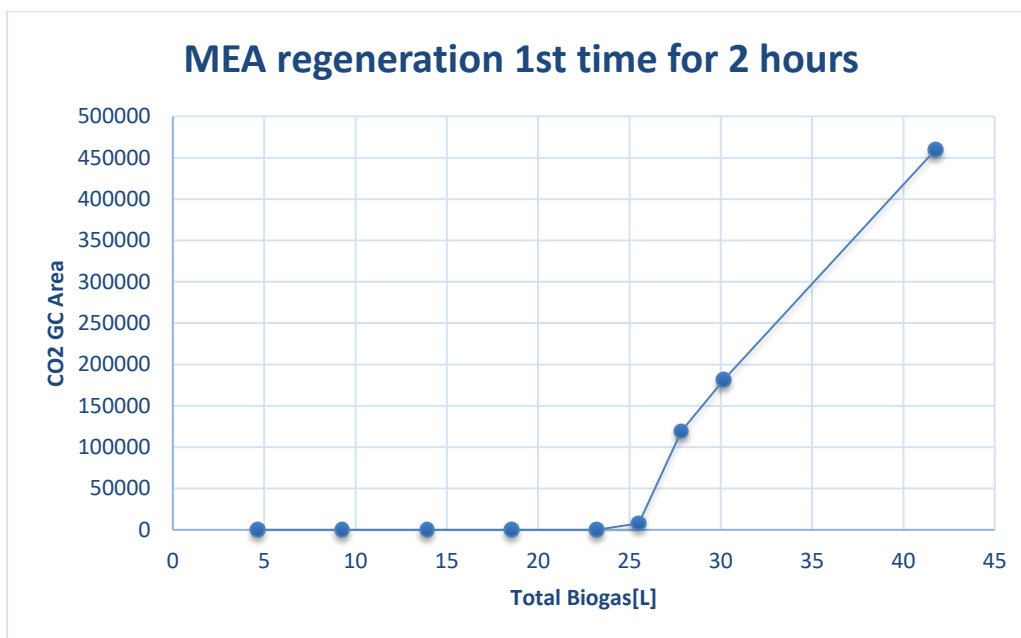
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν $62,36 \text{ L(CO}_2\text{)/ L(30\%MEA)}$

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με $148,48 \text{ L(biogas)/L(30\%MEA)}$

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 1^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 26. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως όπου επέλθει κορεσμός στο 1η φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 23,2 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂:

Η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 23,2 = 9,74 \text{ L CO}_2$,

Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

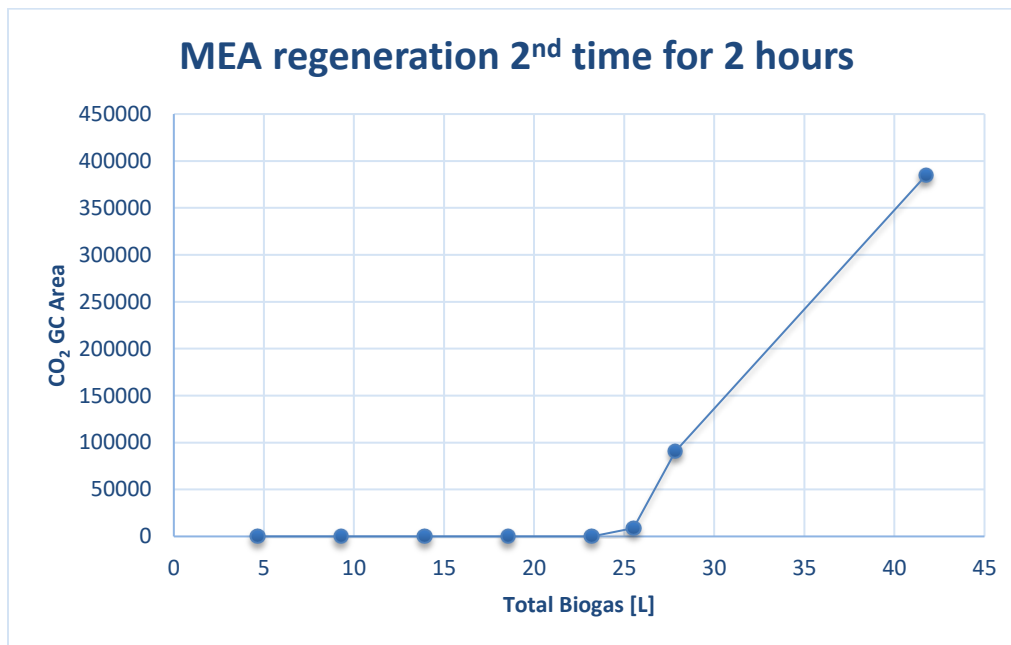
Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτουν 38,97 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 92,8 L(biogas)/L(30%MEA)

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 2^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του

διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 27. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 2η φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 23,2 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂:

Η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 23,2 = 9,74 \text{ L CO}_2$,

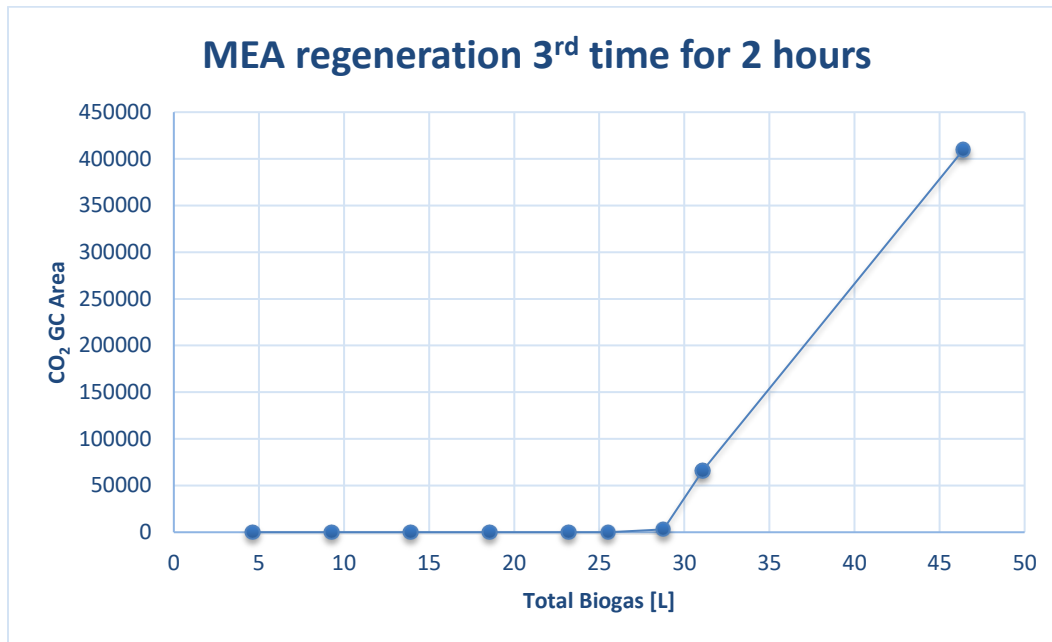
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει 38,97 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 92,8 L(biogas)/L(30%MEA)

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 3^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 6 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 28. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 3η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 25,52 L

Για βιοαέριο με 31% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,31 * 25,52 = 7,92 \text{ L CO}_2$,

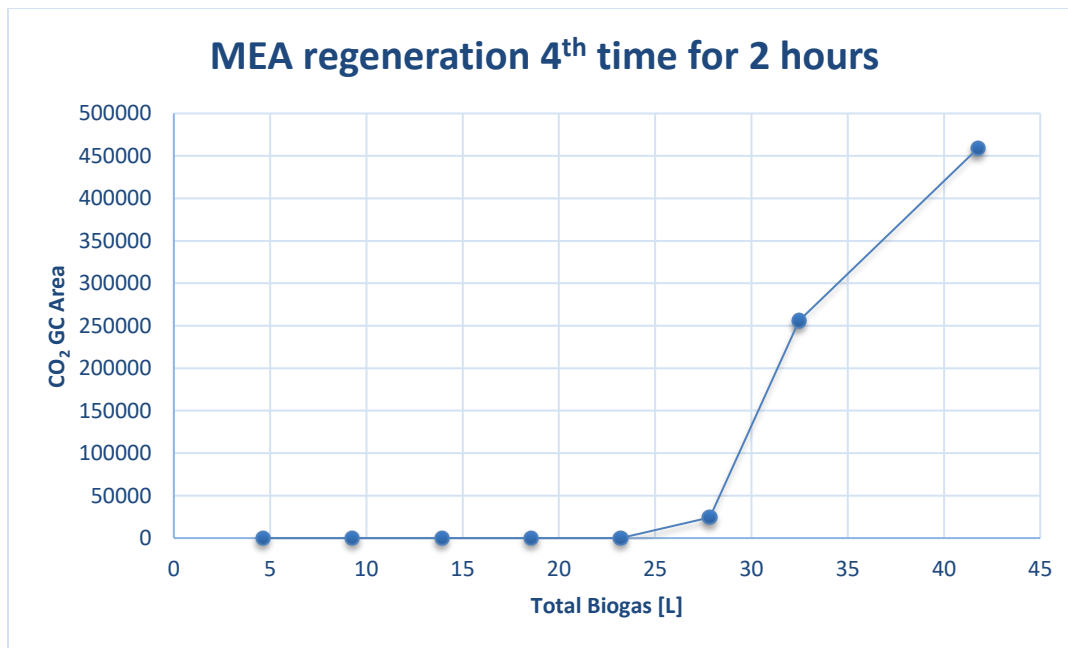
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει $31,64 \text{ L(CO}_2\text{)/ L(30\%MEA)}$

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με $102,8 \text{ L(biogas)/L(30\%MEA)}$

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 4^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 29. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 4η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 23,2 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 23,2 = 9,74 \text{ L CO}_2$,

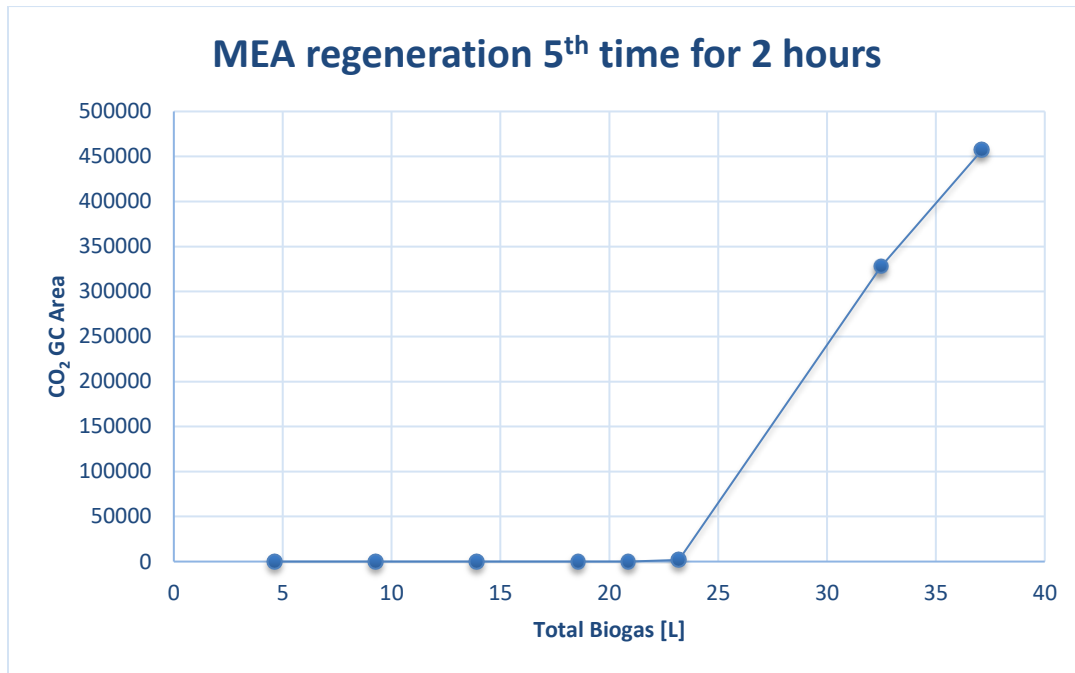
Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει 38,97 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 92,8 L(biogas)/L(30%MEA).

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 5η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρήθηκε ότι στις 4,5 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO₂. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 30. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 5η φορά αναγεννημένο 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 20,88 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 20,88 = 8,76 \text{ L CO}_2$,

Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει 35,07 L(CO₂)/ L(30%MEA)

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με 83,52 L(biogas)/L(30%MEA)

Συγκεντρωτικά προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 8. Πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό του μέγιστου αριθμού κύκλων αναγέννησεων.

	Όγκος υδατικού διαλύματος 30% MEA (L)	Χρόνος αναγέννησης (h)	Κύκλος αναγέννησης	Όγκος επεξεργασμένου βιαερίου/όγκο διαλύματος MEA ($L_{\text{επ. biogas}}/L_{\text{MEA}}$) με συμπλήρωση απωλειών με χρήση φρέσκου διαλύματος 30% MEA	Όγκος επεξεργασμένου βιαερίου/όγκο διαλύματος MEA ($L_{\text{biogas}}/L_{\text{MEA}}$) με συμπλήρωση απωλειών με χρήση νερού
Διάλυμα 30% MEA	0.25	0h (φρέσκο)	0	148,48	148,48
		2h	1	110,05	83,52
			2	92,8	74,24
			3	92,8	92,8*
			4	102,08	74,24
			5	92,8	55,68

Σημειώνεται ότι κατά μέσο όρο συμπληρώθηκαν απώλειες της τάξης των 14 mL [5,60%] με τη χρήση υδατικού διαλύματος 30% ΜονοEthanolamine (MEA). Με άμεση σύγκριση του 5^{ου} κύκλου αναγέννησης των δύο μεθόδων προκύπτει πως στην πρώτη περίπτωση είναι αποδεκτή κατά 27,84 L μεγαλύτερη ποσότητα βιοαερίου ανά λίτρο διαλύματος αμίνης.

**Παρατήρηση:* Η διαφορά της 1,5 ώρας που προέκυψε σε σύγκριση με τον προηγούμενο κύκλο αναγέννησης οφείλεται στον καταιονισμό της στήλης απορρόφησης με 10 L νερό που

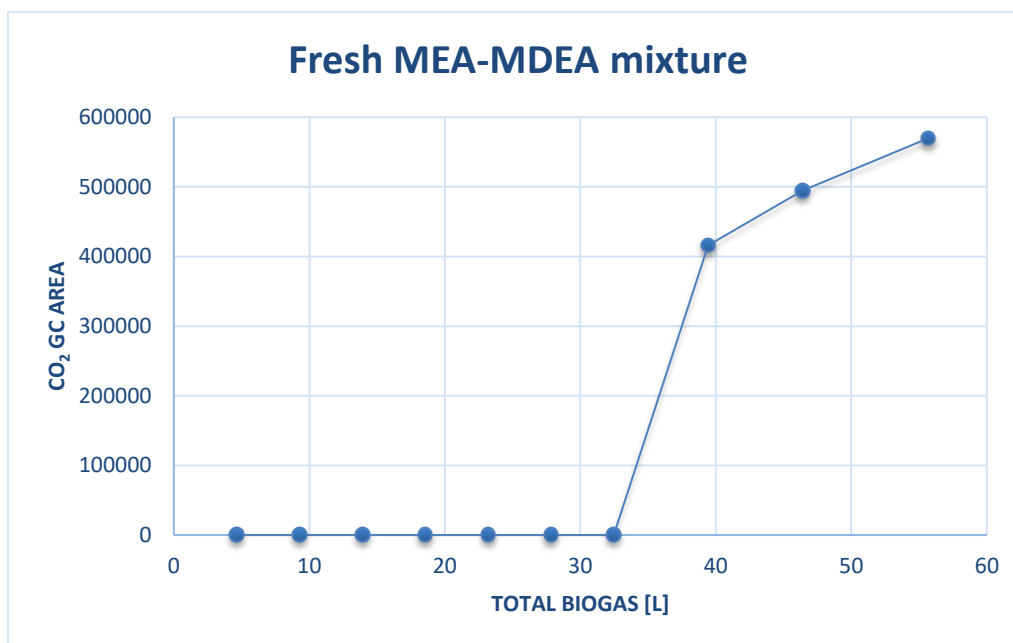
πραγματοποιήθηκε για απομάκρυνση των επικαθίσεων που παρατηρήθηκαν στην στήλη. Η συγκεκριμένη παρατήρηση οδήγησε στην ένταξη της παραπάνω διαδικασίας στην πραγματοποίηση των πειραμάτων πριν από κάθε νέο κύκλο κορεσμού.

6.2 Συγκριτική ανάλυση αναβάθμισης του βιοαερίου με τη χρήση μίγματος 15% MEA-15% MDEA και 30% MDEA

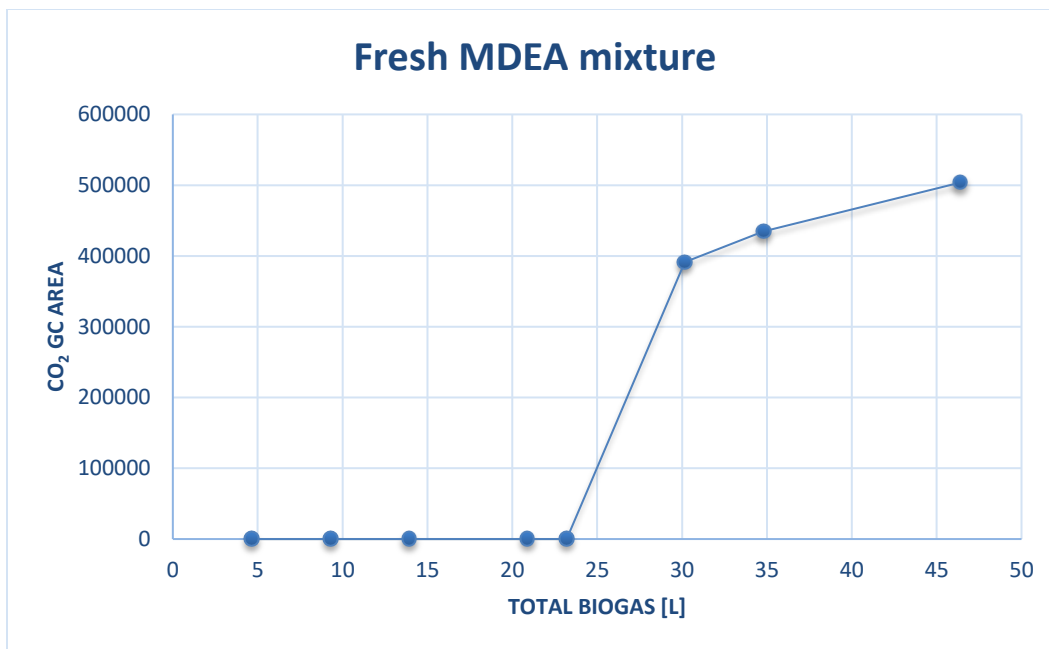
Από τη κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 15% MEA-15% MDEA καθώς και του 30% MDEA προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Για το φρέσκο διάλυμα 15%MEA -15%MDEA και το φρέσκο διάλυμα 30% MDEA

Για το φρέσκα διαλύματα προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα κορεσμού μέσω της χρωματογραφικής στήλης: Επέρχεται κορεσμός μετά το πέρας των 6 ωρών οπότε και έχουν διέλθει συνολικά 27,84 L βιοαερίου και στις 4,5 ώρες οπότε και έχουν διέλθει συνολικά 23,2 L βιοαερίου αντίστοιχα. Στα ακόλουθα διαγράμματα περιγράφεται η κινητική του κορεσμού.



Διάγραμμα 31. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο διάλυμα MEA-MDEA



Διάγραμμα 32. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο διάλυμα MDEA

Πίνακας 9. Πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό του καλύτερου μίγματος διαλύτη.

Διαλύματα Αμινών	Όγκος βιοαερίου/όγκο διαλύματος Αμίνης ($L_{\text{biogas}}/L_{\text{αμίνης}}$)
1. 30%MEA	148,48
2. 15% MEA-15% MDEA	111,36
3. 30% MDEA	92,8

Για το διάλυμα 15% MEA-15% MDEA καθώς και το 30% MDEA το οποίο αναγεννήθηκε για χρονική διάρκεια 2 ωρών για 1^η φορά

Επιπρόσθετα από τη σύγκριση των μεθόδων με τους διαφορετικούς διαλύτες οι οποίοι κορέστηκαν σε CO₂ και αναγεννήθηκαν στους 110°C για 1^η φορά προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 10. Πίνακας αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων για τον προσδιορισμό του καλύτερου μίγματος διαλύτη ύστερα από τη 1^η αναγέννηση.

Διαλύματα αμινών που αναγεννήθηκαν μία φορά	Όγκος βιαερίου/όγκο διαλύματος Αμίνης (L_{biogas}/L_{Αμινής})
1. 30% MEA	92,8
2. 15% MEA-15% MDEA	72,24
3. 30% MDEA	46,4

Από τις παραπάνω συγκρίσεις τόσο για φρέσκο όσο και για αναγεννημένο διάλυμα καθίσταται σαφές ότι η επιλογή μίγματος 30% MEA είναι προτιμότερη για την αναβάθμιση του βιοαερίου.

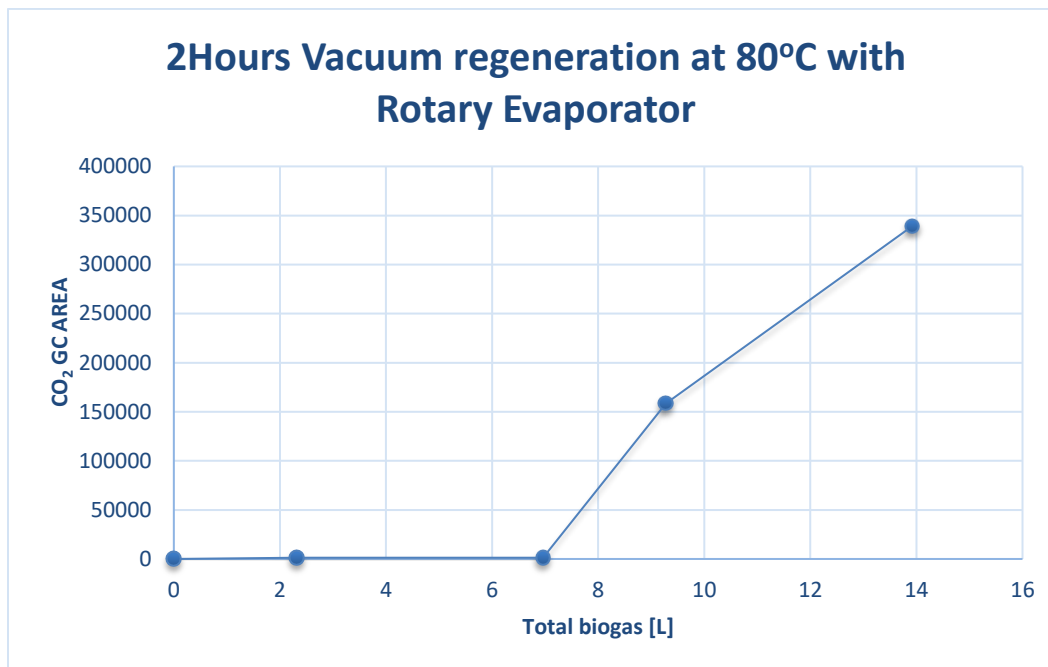
6.3 Προοπτικές αναγέννησης κορεσμένου διαλύματος MEA υπό κενό

Οι προοπτικές αναγέννησης του κορεσμένου διαλύματος MEA υπό κενό διερευνήθηκαν με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διαδικασία του βρασμού. Για τη σύγκριση των 2 μεθόδων επιλέγεται το ίδιο χρονικό διάστημα αναγέννησης (2 ώρες).

Από τη κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) για χρονικό διάστημα 2 ωρών υπό κενό εξήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 1^η φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 2 ώρες εντοπίζεται CO₂ στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 33. Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 1η φορά αναγεννημένο υπό κενό 30% MEA.

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό = 9,28 L

Για βιοαέριο με 42% CO₂ η ποσότητα CO₂ που πέρασε από τη στήλη ήταν $0,42 * 9,28 = 3,89 \text{ L CO}_2$.

Η οποία είναι η αποδεκτή ποσότητα CO₂ μέχρι να επέλθει ο κορεσμός σε 0,25 L MEA

Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει $15,59 \text{ L}_{(\text{CO}_2)} / \text{L}_{(30\% \text{MEA})}$

Τελικά προκύπτει αναλογία όγκου ποσότητας βιοαερίου/ποσότητα διαλύτη ίση με $37,12 \text{ L}_{(\text{biogas})} / \text{L}_{(30\% \text{MEA})}$.

Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων προκύπτει υπερδιπλάσια ποσότητα βιοαερίου που αναβαθμίζεται ανά λίτρο αμίνης. Επιπρόσθετα οι απώλειες της συγκεκριμένης μεθόδου ανέρχονται σε μη αποδεκτό ποσοστό (14%).

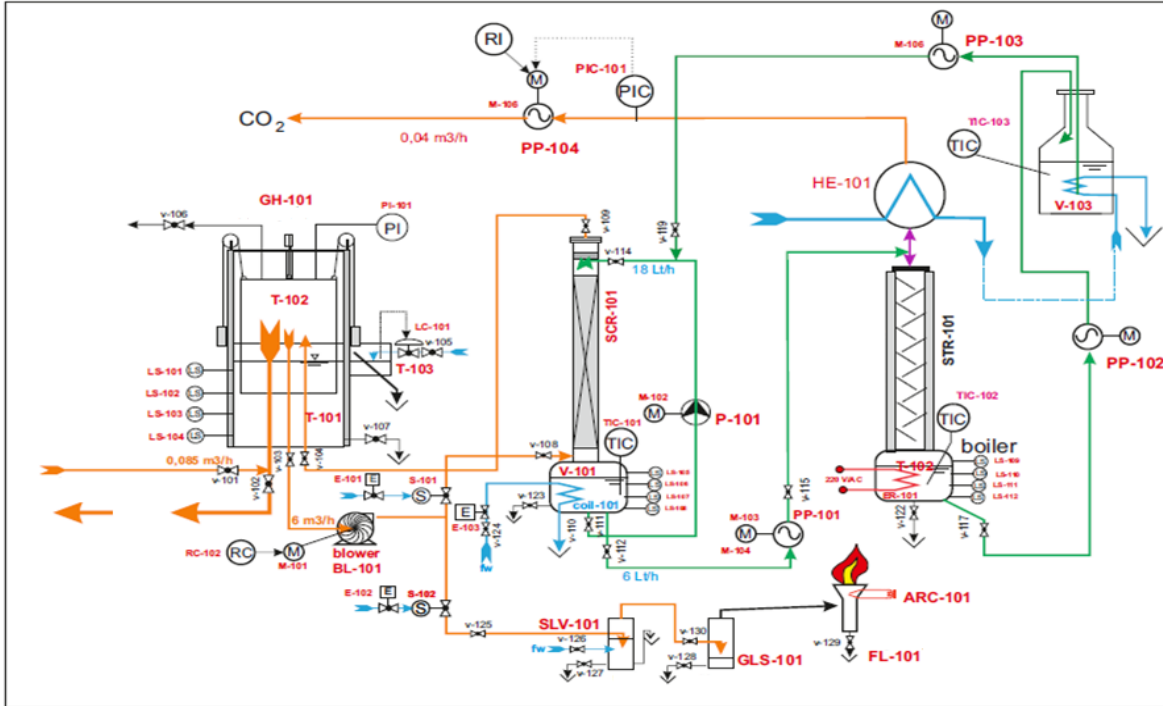
6.4. Συνολικό Διάγραμμα Ροής της Διεργασίας πιλοτικής κλίμακας (PID)

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα, δημιουργήθηκε διάγραμμα ροής της διεργασίας. Σύμφωνα με το PID, το βιοαέριο που παράγεται μέσω της αναερόβιας χώνευσης του FORBI θα συλλεχθεί σε ένα πλωτό αεριοφυλάκιο 2 m³. Το βιοαέριο θα οδηγηθεί από εκεί στην πλυντρίδα μέσω ενός φυσητήρα. Το βιοαέριο θα εισέλθει από τον πυθμένα της πλυντρίδας και θα ρεύσει στην κορυφή. Καθώς το αέριο ρέει διαμέσου της πλυντρίδας, λαμβάνει χώρα η αντίδραση απορρόφησης. Η θερμοκρασία της στήλης θα παραμείνει σταθερή και θα είναι ίση με 30°C. Μια φυγόκεντρη αντλία, εγκατεστημένη στην πλυντρίδα, θα επανακυκλοφορήσει το περιεχόμενο διάλυμα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, για αποφυγή φραγμού εντός της στήλης.

Μόλις κορεσθεί, ο κορεσμένος διαλύτης θα μεταφερθεί χρησιμοποιώντας μια περισταλτική αντλία στον προσροφητή και ο καθαρός διαλύτης θα χρησιμοποιηθεί για να γεμίσει την πλυντρίδα. Στη στήλη αναγέννησης, η θερμοκρασία του διαλύτη θα αυξηθεί μέχρι τους 110°C με τη χρήση θερμότητας που παράγεται από την εγκατεστημένη στη διάταξη αντίσταση. Η αυξημένη θερμοκρασία θα οδηγήσει στην απελευθέρωση του CO₂ και την αναγέννηση του διαλύματος. Ένας συμπιεστής εγκατεστημένος στη στήλη αναγέννησης θα χρησιμοποιηθεί για τη συμπύκνωση του νερού και των ατμών αμίνης που παράγονται ελαχιστοποιώντας την απώλεια της αμίνης. Τέλος, με τη χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας, η θερμοκρασία του διαλύματος 30% MEA θα μειωθεί και θα αποθηκευτεί προσωρινά μέχρι να χρησιμοποιηθεί στην πλυντρίδα.

Με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας από το αναβαθμισμένο βιοαέριο, θα χρησιμοποιηθεί μια στήλη (Υψος: 2m και διάμετρος: 0,12m) που περιέχει silica gel. Αυτή η στήλη θα εγκατασταθεί μεταξύ του αεροφυλακίου και του συμπιεστή βιομεθανίου. Αυτός ο συμπιεστής θα συμπιέσει βιομεθάνιο στα 207 bars.

Η περίσσεια βιοαερίου που δεν θα συμπιεστεί θα καεί σε καυστήρα βιοαερίου παράγοντας θερμότητα.



Εικόνα 23. Διάγραμμα διεργασίας PID.

6.5 Υπολογισμοί σχεδιασμού βάσει πειραματικών δεδομένων για το Scale-up της εγκατάστασης

6.5.1 Διαστασιολόγηση εγκατάστασης πιλοτικής κλίμακας

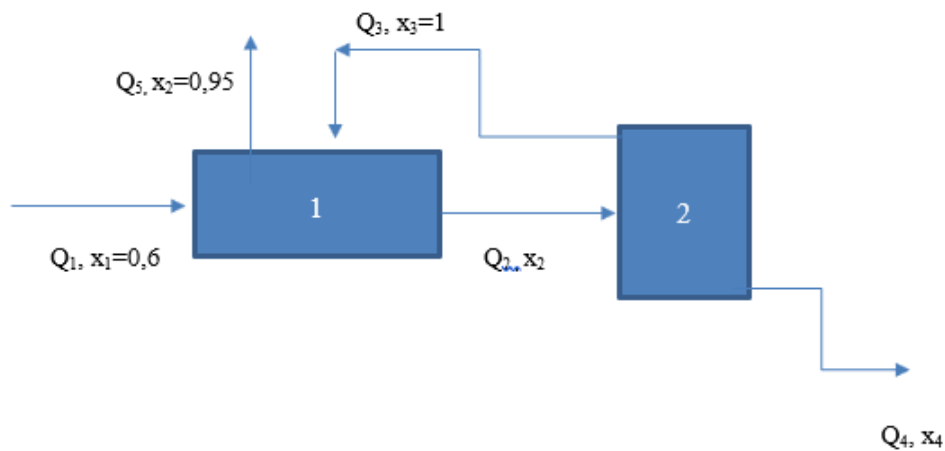
Για το σχεδιασμό της μονάδας πιλοτικής κλίμακας, θα ληφθεί υπόψη η χρήση του αναγεννημένου διαλύματος αμίνης σε συνδυασμό με την υψηλότερη παραγωγικότητα βιοαερίου που είναι ίση με 1 m³/ημέρα. Σύμφωνα με την Εξίσωση (19) 11,1 L αναγεννημένου διαλύματος MEA 30% είναι η αναγκαία ποσότητα για την επεξεργασία του βιοαερίου που παράγεται σε ημερήσια βάση.

$$V_{30\%MEA} = \frac{1000L \text{ biogas}}{90 \frac{L \text{ biogas}}{L_{30\%MEA}}} = 11.1 L_{30\%MEA} \text{ (Εξ. 19)}$$

Για την αναβάθμιση του βιοαερίου θα χρησιμοποιηθεί μια στήλη απορρόφησης με συνολικό ύψος 3m και διάμετρο 12 cm. Το ύψος του πληρωτικού υλικού θα είναι 2,7m. Μια στήλη αναγέννησης με τις ίδιες διαστάσεις είναι απαραίτητη για την αναγέννηση της κορεσμένης αμίνης.

Η μέση ημερήσια παροχή του βιοαερίου από τον πιλοτικής κλίμακας αναερόβιο χωνευτήρα είναι ίση με 1.000L και η μέση περιεκτικότητα σε μεθάνιο ισούται με 60%. Η μέγιστη ημερήσια παροχή του βιοαερίου είναι 1.400 L. Επομένως απαιτούνται σε ημερήσια βάση 10 L φρέσκου διαλύματος MEA ή περίπου 13L αναγεννημένου MEA για τον καθαρισμό του βιοαερίου.

6.5.2 Προσδιορισμός της παροχής του φυσητήρα για την ανακυκλοφορία του βιοαερίου δια μέσω της στήλης απορρόφησης.



Διάγραμμα 34. Απλουστευμένο διάγραμμα ροής για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης παροχής της αντλίας

Έστω Q_1 η παροχή του βιοαερίου στην είσοδο του αεροφυλακίου από τον αναερόβιο χωνευτήρα με συγκέντρωση μεθανίου $x_1 = 0,6$, Q_2 η παροχή εξόδου από το αεροφυλάκιο και ταυτόχρονα παροχή εισόδου στην στήλη εξουγενισμού του βιοαερίου. Τότε είναι Q_4 η θεωρητική «έξοδος» από τη στήλη εξουγενισμού με συγκέντρωση μεθανίου $x_4=0$, καθώς περιέχει αποκλειστικά CO_2 το οποίο πρακτικά παρακρατάται εντός της στήλης, και Q_3 το εξουγενισμένο ρεύμα που επιστρέφει στον αντιδραστήρα, με συγκέντρωση μεθανίου $x_3=1$.

Τέλος θεωρείται Q_5 το ρεύμα που θα οδηγηθεί προς συμπίεση με επιθυμητή συγκέντρωση μεθανίου $x_2 = 0,95$ η οποία είναι και η συγκέντρωση στο εσωτερικό του αεροφυλακίου.

Ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις (ισοζύγια):

1. $Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_5$
2. $Q_2 = Q_3 + Q_4$
3. $0,6Q_1 + Q_3 = (Q_2 + Q_5)0,95$
4. $0,95Q_2 = Q_3$

Είναι $Q_1 = 1 \text{ m}^3/\text{d}$

Από την (1) λόγω της (4) είναι:

$$Q_1 + 0,95Q_2 = Q_2 + Q_5 \rightarrow Q_1 = 0,05Q_2 + Q_5 \quad (5)$$

από (2) λόγω της (4) είναι :

$$Q_2 = 0,95Q_2 + Q_4 \rightarrow 0,05Q_2 = Q_4 \quad (6)$$

και η (3) λόγω της (4) γίνεται :

$$0,6Q_1 + 0,95Q_2 = (Q_2 + Q_5)0,95 \rightarrow 0,6Q_1 = 0,95Q_5 \quad (7)$$

Επομένως από (7) : $Q_5 = 0,631Q_1$ και με αντικατάσταση στην (5) :

$$Q_1 = 0,05Q_2 + 0,631Q_1 \rightarrow 0,369Q_1 = 0,05Q_2$$

οπότε

$$Q_2 = (0,369/0,05)Q_1 \text{ ή } Q_2 = 7,38Q_1$$

Άρα η (4) δίνει: $Q_3 = 0,95Q_2 = 0,95 \cdot 7,38Q_1 = 7,011Q_1$

Τελικά για $Q_1 = 1 \text{ m}^3/\text{d}$:

$$Q_2 = 7,38 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_3 = 7,01 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_4 = Q_2 - Q_3 = 0,37 \text{ m}^3/\text{d CO}_2$$

$$Q_5 = 0,631 \text{ m}^3/\text{d}$$

Επομένως απαιτείται αντλία αερίου τύπου ATEX με παροχή ίση με $7,38 \text{ m}^3/\text{d}$ ή $307,5 \text{ L/hr}$.

6.6 Διάταξη της πιλοτικής κλίμακας

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η διάταξη πιλοτικής κλίμακας αναβάθμισης του παραγόμενου βιοαερίου το οποίο προέρχεται από τον αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης όγκου 4 m^3 . Στην εικόνα 23. παρουσιάζεται η στήλη αναβάθμισης ύψους 3 m και διαμέτρου 14cm με πληρωτικό υλικό συνολικού ύψους 2,7m και το αεριοφυλάκιο. Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται ο συμπιεστής (κάτω αριστερά) το buffer και η στήλη (στο κέντρο) και η απομάκρυνση της υγρασίας με Silica Gel (δεξιά).



Εικόνα 23. Αεριοφυλάκιο και στήλη χημικής απορρόφησης πιλοτικής εγκατάστασης αναβάθμισης βιοαερίου .



Εικόνα 24. Σύστημα Συμπιεστή- Buffer- και απομάκρυνσης υγρασίας

Κεφάλαιο 7 - Οικονομοτεχνική Ανάλυση Επενδυτικού έργου Αναβάθμισης βιοαερίου -Life Cycle Costing

7.1 Μεθοδολογία

Η μελέτη αφορά διαφορετικές τεχνικές αναβάθμισης βιοαερίου. Σε πρώτη φάση, τα χαρακτηριστικότερα οικονομικά μεγέθη του εξεταζόμενου επενδυτικού έργου αναβάθμισης βιοαερίου, είναι αυτά του κόστους επένδυσης (investment cost) και του κόστους λειτουργίας (operating cost). Συνεπώς απαραίτητη κρίνεται η όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη προσέγγιση βάση της δυναμικότητας της υπάρχουσας εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου.

Σε δεύτερη φάση, από το άθροισμα του ετήσιου επενδυτικού και λειτουργικού κόστους της μονάδας αφαιρούνται όλα εκείνα τα έσοδα που προέρχονται από τη πώληση του παραγόμενου αναβαθμισμένου βιοαερίου για χρήση ως καύσιμο κίνησης. Επιπλέον τυχόν χρήση του παραγόμενου βιοαερίου ως καύσιμο για τη λειτουργία της εγκατάστασης αφαιρείται κι αυτή.

Τελικά, το αποτέλεσμα είναι ένα ποσό που αντικατοπτρίζει το ετήσιο κόστος που θα χαρακτηρίζει την μονάδα παραγωγής αναβαθμισμένου βιοαερίου στο σύνολο της για διάρκεια ζωής 20 ετών.

7.2 Παραδοχές

Στους επιμέρους υπολογισμούς για κάθε τεχνική αναβάθμισης έχει χρησιμοποιηθεί επιτόκιο αναγωγής ίσο με 4,5% για συνολική διάρκεια ζωής της μονάδας/επένδυσης τα 20 χρόνια (depreciation period). Το σενάριο που εξετάζεται αφορά το Δήμο Χαλανδρίου και συγκεκριμένα την υπόθεση ότι όλα τα απόβλητα κουζίνας 33.000 νοικοκυριών και 7.600 επιχειρήσεων, δηλαδή μία ποσότητα 7.300 τόνων οργανικών αποβλήτων, ύστερα από κατάλληλη προεργασία οδηγούνται σε αναερόβια χώνευση προς παραγωγή βιοαερίου. Έτσι προκύπτει δυναμικότητα της μονάδας αναβάθμισης του βιοαερίου που παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 11. Απαιτούμενες παραδοχές για τον υπολογισμό του LCC.

Επιτόκιο αναγωγής (Interest rate)	4,5%
---	------

Διάρκεια ζωής	20 έτη
Δυναμικότητα μονάδας	134,761 m ³ /h

7.3 Εκτίμηση για τα κόστη επένδυσης για κάθε τεχνική

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης για κάθε τεχνική βασίζεται σε συγκεκριμένο εξοπλισμό κάθε φορά ο οποίος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη παραγωγικότητα και σε καθορισμένο έτος αναφοράς. Εφόσον τα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία αναφέρονται σε διαφορετικό έτος από αυτό που έχει επιλεγεί για το έτος κατασκευής της εγκατάστασης που μελετάται, και συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό για τα δεδομένα έτη, το νέο κόστος του εξοπλισμού υπολογίζεται από τον τύπο I

$$C_{p,c} = C_{p,p} \left(\frac{I_c}{I_p} \right) \quad (\text{Εξ. I})$$

Όπου:

- $C_{p,c}$: το κόστος συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό για το νέο έτος
- $C_{p,p}$: το κόστος του προηγούμενου έτους αναφοράς
- I_c : ο δείκτης κόστους για το νέο έτος
- I_p : ο δείκτης κόστους για το προηγούμενο έτος

Στην παρούσα εργασία το έτος επένδυσης της εγκατάστασης είναι το 2018. Αντίστοιχα το έτος στο οποίο αναφέρεται η βιβλιογραφία για το κόστος του εξοπλισμού είναι αυτό του 2008. Οι δείκτες κόστους εξοπλισμού χημικής μηχανικής για το έτος 2008 και 2018 είναι 575,4 και 603,1 αντίστοιχα.

Επιπλέον, αν η κλίμακα αναφοράς της εγκατάστασης δεν είναι η ίδια με αυτή που έχει επιλεγεί, απαιτείται η μετατροπή του κόστους με βάση τη κλίμακα. Ο τύπος που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι η εξίσωση II.

$$New\ cost = Original\ cost \left(\frac{new\ size}{original\ size} \right)^n \quad (\text{Εξ. II})$$

Όπου n είναι δείκτης κλίμακας της παραγωγικότητας. (Vo TT, 2017) (Truc T.Q. Voa, 2017)

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, παρουσιάζεται συνοπτικά ο εξοπλισμός και το κόστος (κόστος εξοπλισμού, CAPEX) σε κάθε περίπτωση τροποποιημένος για το νέο έτος και για τη συγκεκριμένη δυναμικότητα

Chemical Absorption

Πίνακας 12. Σταθερό Κόστος εξοπλισμού για την τεχνική αναβάθμισης Chemical Absorption

Εξοπλισμός μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου	Κόστος εξοπλισμού, CAPEX		
	Euros € (2008)	Euros € (2018)	Euros € (2018) και νέα δυναμικότητα
Absorber Column	125.000,00	131.017,55 €	86.599,96 €
Additional Costs	100.000,00	104.814,04 €	69.279,97 €
Pump	5.000,00	5.240,70 €	3.464,00 €
Heat exchanger	15.000,00	15.722,11 €	10.392,00 €
Cooler	18.000,00	18.866,53 €	12.470,39 €
Regeneration column	90.000,00	94.332,64 €	62.351,97 €
Sum			244.558,30

Water Scrubbing

Πίνακας 13. Σταθερό Κόστος εξοπλισμού για την τεχνική αναβάθμισης Water Scrubbing.

Εξοπλισμός μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου	Κόστος εξοπλισμού, CAPEX		
	Euros € (2008)	Euros € (2018)	Euros € (2018) και νέα δυναμικότητα
Compressor	110.000,00	115.295,45	76.207,97
Columns	140.000,00	146.739,66	96.991,96
Heat exchanger	5.000,00	5.240,70	3.464,00
Pumps and Blowers	10.000,00	10.481,40	6.928,00
Sum			183.591,92

Πίνακας 14. Σταθερό Κόστος εξοπλισμού για την τεχνική αναβάθμισης PSA.

Εξοπλισμός μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου	Κόστος εξοπλισμού, CAPEX		
	Euros € (2008)	Euros € (2018)	Euros € (2018) και νέα δυναμικότητα
CO ₂ Absorber column	500.000,00	524.070,21 €	346.399,85
Additional costs	70.000,00	73.369,83 €	48.495,96
Pumps (2)	10.000,00	10.481,40 €	6.928,00
Compressors (2)	100.000,00	104.814,04 €	69.279,97
Sum			471.103,80

Cryogenic Separation

Πίνακας 15. Σταθερό Κόστος εξοπλισμού για την τεχνική αναβάθμισης Cryogenic Separation.

Εξοπλισμός μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου	Κόστος εξοπλισμού, CAPEX		
	Euros € (2008)	Euros € (2018)	Euros € (2018) και νέα δυναμικότητα
Heat exchanger 1	10.300,00	10.795,85	7.135,84
Heat exchanger 1	26.500,00	27.775,72	18.359,19
Heat exchanger 1	21.700,00	22.744,65	15.033,75
Compressors 1	200.000,00	209.628,08	138.559,94
Compressors 2	250.000,00	262.035,11	173.199,96
Separation train	400.000,00	419.256,17	277.119,88
Sum			629.408,53

Membrane separation

Πίνακας 16. Σταθερό Κόστος εξοπλισμού για την τεχνική αναβάθμισης Membrane Separation.

Εξοπλισμός μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου	Κόστος εξοπλισμού, CAPEX		
	Euros € (2008)	Euros € (2018)	Euros € (2018) και νέα δυναμικότητα
Additional costs	100.000,00	104.814,04	69.279,97
Pumps (2)	10.000,00	10.481,40	6.928,00
Compressor	100.000,00	104.814,04	69.279,97
Membrane	23.000,00	24.107,23	15.934,39
Sum			161.422,33

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι η πιο οικονομική μέθοδος βάσει του σταθερού κόστους εξοπλισμού (Capex) είναι αυτή του διαχωρισμού με Μεμβράνες (Membrane separation), ενώ αντίθετα η πιο δαπανηρή είναι αυτή της Κρυογενική τεχνολογίας (Cryogenic separation).

7.4 Κόστη λειτουργίας (operating costs, OPEX) για κάθε τεχνική

Σχετικά με τα κόστη λειτουργίας (running ή operating costs), παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με δεδομένα που έχουν αντληθεί από τη βιβλιογραφία και με τις αντίστοιχες προσαρμογές, χρονικές και δυναμικότητας, που αναφέρθηκαν προηγουμένως για κάθε τεχνική αναβάθμισης του βιοαερίου.

Πίνακας 17. Λειτουργικά κόστη συναρτήση των τεχνικών αναβάθμισης βιοαερίου.

Τεχνική αναβάθμισης βιοαερίου	Λειτουργικά κόστη (Operating costs)					
	Μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [kWh/m ³]	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [€/yr]	Επιπρόσθετα κόστη όπως απαιτήσεις θέρμανσης ή επεξεργασίας αερίου [€/yr]	Κόστος εργασίας [€/yr]	Κόστος συντήρησης [€/yr]	Εκτίμηση συνολικού κόστους λειτουργίας (OPEX) [€/yr]
Chemical absorption	0.13	12.277,27	27.137,32	9.585,91	11.192,58	60.193,07
Water scrubbing	0.22	20.776,91	3.209,54	10.784,62	13.846,36	48.617,43
PSA	0.31	29.276,56	4.483,36	9.585,91	7.777,47	51.123,30
Cryogenic Separation	0.76	71.774,79	-	10.185,27	94.099,03	176.059,09

Membrane Separation	0.25	23.610,13	-	10.185,27	16.788,86	50.584,26
---------------------	------	-----------	---	-----------	-----------	-----------

Από τα δεδομένα της 1ης στήλης προκύπτει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζεται στη 2η στήλη του πίνακα σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned} & \text{Συνολικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας} \left[\frac{\text{€}}{\text{yr}} \right] \\ &= (\text{μέση κατανάλωση}) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] * (\text{κόστος κιλοβατώρας}) \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \\ & * (\text{Δυναμικότητα μονάδας}) [\text{m}^3/\text{h}] \times 24 [\text{h}/\text{day}] \times 365 [\text{days}/\text{yr}] \end{aligned}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι η πιο οικονομική μέθοδος βάσει του κόστους λειτουργίας (Opex) είναι αυτή του Φυσικής απορρόφησης με χρήση απορροφητικού μέσου το νερό (Water Scrubbing), ενώ αντίθετα η πιο δαπανηρή είναι αυτή της Κρυογενικής τεχνολογίας (Cryogenic separation).

Παραδοχές:

- Ός κόστος της 1 κιλοβατώρας έχει ληφθεί το ποσό των 0.08 € σύμφωνα με τον τιμοκατάλογο ιδιωτικής εταιρίας ηλεκτρικής ενέργειας για επαγγελματική χρήση μικρής βιομηχανικής μονάδας.
- Η μονάδα λειτουργεί καθημερινά 24 ώρες επί 7 ημέρες την εβδομάδα, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
- Απαιτούμενο προσωπικό : Ένας εργαζόμενος
- Η αρχική δυναμικότητα της μονάδας είναι: $122,51 * 1,1 = 134,761 \text{ m}^3/\text{h}$ (Υπολογισμένος ένας συντελεστής ασφαλείας 10%).
- Organic Waste per year = 7300 tn

Για να υπολογιστεί ο καταμερισμός του σταθερού κόστους εξοπλισμού (CAPEX) σε ετήσια βάση (annuities) για τα παραπάνω δεδομένα (επιτόκιο, χρόνος ζωής/απόσβεσης) χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$PV = A_0 \times \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (\text{εξ. III})$$

Όπου:

- A_0 : Annuity
- PV: Παρούσα αξία
- r: Επιτόκιο
- n: έτη (Truc T.Q. Voa, 2017)

Διαιρώντας τα annuities με το συνολική μάζα των οργανικών αποβλήτων από οικιακά απόβλητα (kitchen waste) προκύπτει το LCC σε Euros/tn.

7.5 Life Cycle Costing (LCC) για κάθε τεχνική

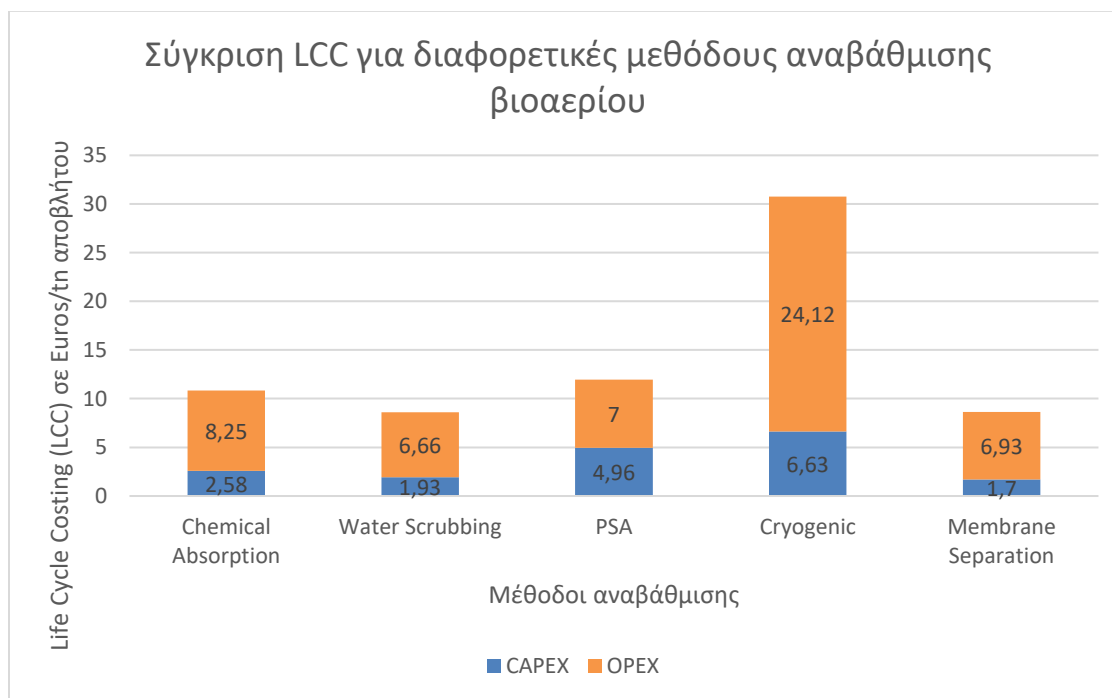
Συγκεντρωτικά προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για την οικονομική ανάλυση των διαφορετικών μεθόδων:

Πίνακας 18. Life Cycle Cost Analysis συναρτήση με τις διάφορες τεχνικές αναβάθμισης βιοαερίου.

Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Life Cycle Costing (LCC)		
	Total CAPEX [euros/tn]	Total OPEX [euros/tn]	LCC [euros/tn _{αποβλήτου}]
Chemical Absorption	2,58	8,25	10,82
Water Scrubbing	1,93	6,66	8,59
PSA	4,96	7,00	11,96
Cryogenic	6,63	24,12	30,75

Membrane Separation	1,7	6,93	8,63
---------------------	-----	------	------

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 35. Σύγκριση αποτελεσμάτων LCC διαφορετικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου

Από το συγκερασμό των παραπάνω οικονομικών αποτελεσμάτων με τις απαιτήσεις καθαρότητας τελικού προϊόντος (97-99%) αλλά και τις απαιτήσεις για ελάχιστες απώλειες μεθανίου (<0.1), προκύπτει ότι η χημική απορρόφηση είναι η πλέον αποδοτική μέθοδος αναβάθμισης βιοαερίου για παραγωγή καυσίμου κίνησης οχημάτων.

7.6 Ανάλυση ευαισθησίας

Ο τύπος που ποσοτικοποιεί την εξάρτηση της τιμής από τη συγκεκριμένη παράμετρο ελέγχου είναι ο ακόλουθος:

$$\text{Συντελεστής ευαισθησίας (SR)} = \frac{\frac{\text{Μεταβολή Τιμής}}{\text{Αρχική τιμή}}}{\frac{\text{Μεταβολή Παραμέτρου ελέγχου}}{\text{Αρχική τιμή Παραμέτρου ελέγχου}}} \quad (\text{εξ. IV})$$

I. Επιτόκιο αναγωγής (Interest rate)

Πίνακας 19. Ανάλυση ευαισθησίας LCC με παράμετρο ελέγχου το επιτόκιο αναγωγής (Interest rate).

Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Ανάλυση ευαισθησίας LCC ως προς το Επιτόκιο Αναγωγής (Interest rate)				
	LCC for 4,5%	6%	Δείκτης Ευαισθησίας (SR)	3%	Δείκτης Ευαισθησίας (SR)
Chemical Absorption	10,82	11,17	0,011	10,50	0,0098
Water Scrubbing	8,59	8,85	0,0098	8,35	0,0093
PSA	11,96	12,63	0,018	11,34	0,0172
Cryogenic	30,75	31,63	0,0095	29,91	0,0089
Membrane Separation	8,63	8,86	0,0088	8,42	0,0080

II. Χρόνος ζωής (Depreciation period in Years)

Πίνακας 20. Ανάλυση ευαισθησίας LCC με παράμετρο ελέγχου τη διάρκεια ζωής της μονάδας (Depreciation period in years).

Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Ανάλυση ευαισθησίας LCC ως προς τη διάρκεια ζωής (Years)				
	20	25	SR	15	SR
Chemical Absorption	10,82	10,50	-0,12	11,37	-0,2
Water Scrubbing	8,59	8,36	-0,11	9,00	-0,19
PSA	11,96	11,36	-0,20	13,01	-0,35
Cryogenic	30,75	29,93	-0,10	32,15	-0,18
Membrane Separation	8,63	8,42	-0,097	8,99	-0,17

III. Δυναμικότητα

Πίνακας 21. Ανάλυση ευαισθησίας LCC με παράμετρο ελέγχου το μέγεθος της δυναμικότητας.

Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Ανάλυση ευαισθησίας LCC ως προς τη δυναμικότητα (i)				
	134,761 m ³ /h	121,285 m ³ /h	SR	148,237 m ³ /h	SR
Chemical Absorption	10,82	10,12	0,65	11,51	0,64
Water Scrubbing	8,59	8,02	1,03	9,16	1,04
PSA	11,96	11,11	1,07	12,80	1,06
Cryogenic	30,75	28,43	1,06	33,02	1,05
Membrane Separation	8,63	8,03	0,92	9,22	0,92

Προκύπτει ότι μεγαλύτερη επιρροή στην τιμή της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής έχει η κλίμακα παραγωγής (Δυναμικότητα) ενώ, έπειτα ακολουθεί η διάρκεια ζωής και τελευταίο το επιτόκιο αναγωγής.

Το αρνητικό πρόσημο του δείκτη Ευαισθησίας στην περίπτωση μεταβολής του χρόνου ζωής αναδεικνύει την αντιστρόφως ανάλογη σχέση της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής με την διάρκεια ζωής της επένδυσης.

Αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι η ευαισθησία της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής της μεθόδου PSA στις εκάστοτε μεταβολές των παραμέτρων.

Για τιμές δυναμικότητας εγκαταστάσεων αναβάθμισης βιοαερίου που συναντώνται συχνά στη βιομηχανία προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 22. Ανάλυση ευαισθησίας LCC με παράμετρο ελέγχου τη δυναμικότητα (επιλέχθηκαν τιμές από τη βιβλιογραφία).

Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Ανάλυση ευαισθησίας LCC ως προς τη δυναμικότητα (ii)			
	134,761 m ³ /h	75 m ³ /h	250 m ³ /h	500 m ³ /h
Chemical Absorption	10,82	7,53	16,27	26,39
Water Scrubbing	8,59	5,94	13,22	22,32
PSA	11,96	8,03	18,80	32,18
Cryogenic	30,75	20,05	49,16	84,16
Membrane Separation	8,63	5,90	13,45	23,02

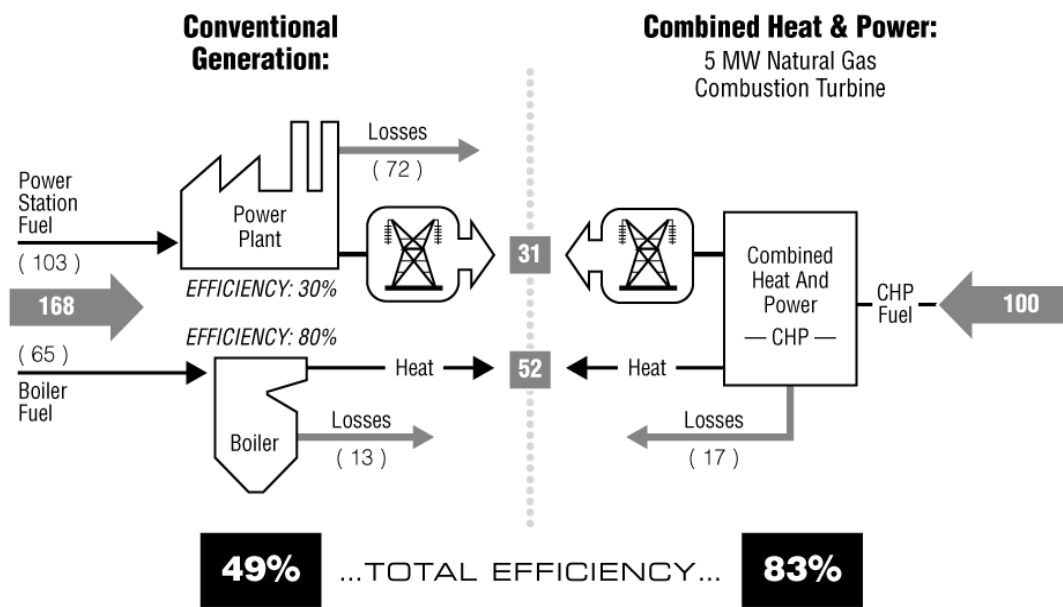
Κεφάλαιο 8 - Συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας- Combined Heat and Power (CHP)

8.1 Εισαγωγή στη μέθοδο Combined Heat and Power (CHP)

Για την κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων οι καταναλωτές αγοράζουν ηλεκτρισμό από το εθνικό δίκτυο και προμηθεύονται καύσιμα τα οποία καίνε σε κάποιο λέβητα ή κλίβανο για την παραγωγή θερμότητας. Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45% επιβαρύνοντας ταυτόχρονα σημαντικά το περιβάλλον με τις μεγάλες ποσότητες ρύπων που εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τον σταθμό στον καταναλωτή οι απώλειες αγγίζουν έως και το 10%. Λύση στο χαμηλό βαθμό απόδοσης, στις σημαντικές ποσότητες ρύπων που διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα αλλά και στις απώλειες κατά την μεταφορά έρχεται να δώσει ένα σύστημα συνδυασμένης παραγωγής (συμπαραγωγής) θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστό και ως CHP.

Ως συμπαραγωγή αναφέρεται η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.

Τα Συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP), γνωστά και ως συμπαραγωγή (cogeneration), παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και χρήσιμη θερμική ενέργεια σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο σύστημα. Η CHP δεν είναι τεχνολογία, αλλά προσέγγιση για την εφαρμογή τεχνολογιών. Η θερμότητα που φυσιολογικά χάνεται στη συμβατική παραγωγή ενέργειας ανακτάται ως χρήσιμη ενέργεια, η οποία αποφεύγει τις απώλειες που διαφορετικά θα προκύπταν από τη χωριστή παραγωγή θερμότητας και ισχύος. (Χ. Φραγκόπουλος, 1994)



Εικόνα 24. Σύγκριση συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας σε σχέση με την συνδυασμένη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα (WBDG).

Μια συνδυασμένη διαδικασία παραγωγής θερμότητας και ενέργειας παράγει τόσο θερμική ενέργεια όσο και ηλεκτρική ενέργεια από το ίδιο καύσιμο. Μαζί, λειτουργεί με υψηλότερη απόδοση από τη δημιουργία των δύο ξεχωριστά. Ένα σύγχρονο σύστημα CHP μπορεί να λειτουργήσει σε θερμική απόδοση από 60 έως 80 τοις εκατό (ή περισσότερο) σε σχέση με τη χωριστή παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας η οποία λειτουργεί κυρίως με απόδοση γενικά κάτω από 50 τοις εκατό. Μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση επιφέρει εξοικονόμηση στο καύσιμο ενώ, παράλληλα δεν επιβαρύνει το περιβάλλον μειώνοντας τόσο τις επιβλαβείς εκπομπές όσο και το λειτουργικό κόστος. Η εξοικονόμηση αυτή επιτυγχάνεται από την ανάκτηση και αξιοποίηση θερμότητας, που διαφορετικά θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον κατά τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Επιπροσθέτως, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια μονάδα συμπαραγωγής συνήθως καλύπτει τις τοπικές ανάγκες για ηλεκτρισμό, με συνέπεια οι απώλειες μεταφοράς και διανομής να είναι αμελητέες.

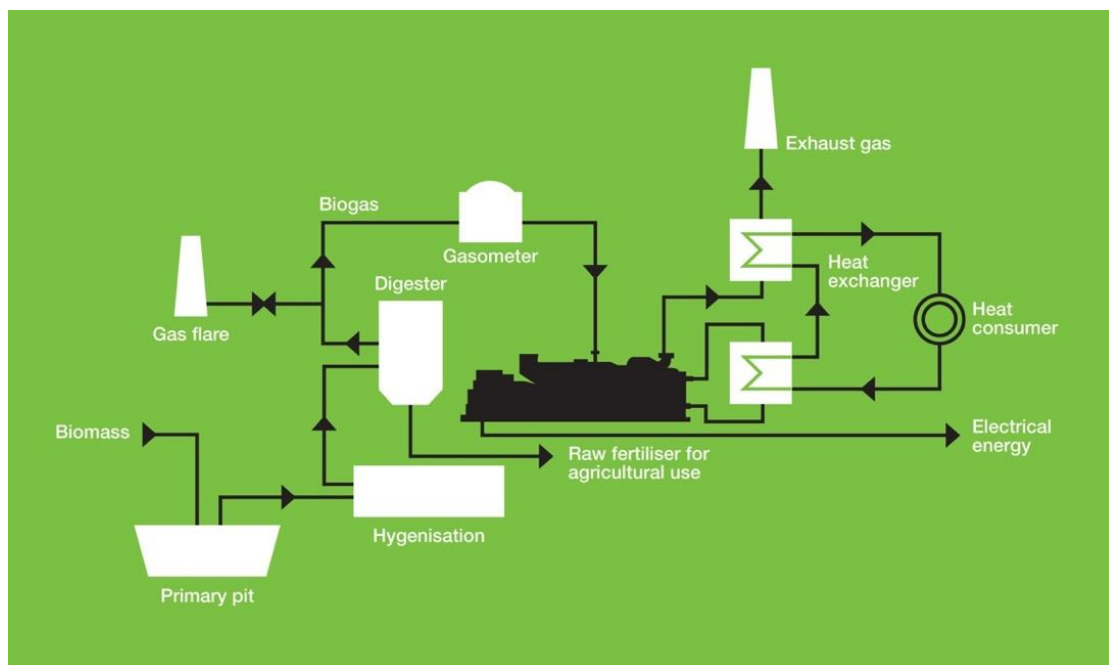
Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι ευκολότερη και φθηνότερη από τη μεταφορά θερμικής, έτσι οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής βρίσκονται συνήθως όσο πιο κοντά γίνεται στον χώρο όπου θα καταναλωθεί η θερμική ενέργεια και διαστασιοποιούνται έτσι ώστε να καλύπτουν το θετικό φορτίο. Πολλές φορές παράγεται πλεονάζουσα ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να διατεθεί στο εθνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με το αντίστοιχο οικονομικό όφελος από τον πάροχο.

Τέλος οι συμπαραγωγικοί σταθμοί μπορούν να καλύψουν θερμικές (ή ψυκτικές) ανάγκες πόλεων και οικισμών. Ο όρος που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο αυτή είναι αυτός της

τηλεθέρμανσης (ή τηλεψύξης). Η διανομή γίνεται συνήθως με τη μορφή ζεστού (ή ψυχρού) νερού.

Ως ενεργειακή πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο, ωστόσο καύσιμα φιλικότερα στο περιβάλλον όπως η βιομάζα και το φυσικό αέριο κρίνεται αποδοτικότερη.

Υπάρχουν πολλές πιθανές διαμορφώσεις CHP, αν και ο συνηθέστερος τύπος παράγει ηλεκτρισμό μέσω τουρμπίνας ή παλινδρομούμενου κινητήρα και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ατμός ή θερμότητα που ανακτάται για την παροχή θερμικών φορτίων ("κύκλος κορυφής"). Εντούτοις, ένα σύστημα CHP μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει θερμότητα από μια βιομηχανική διεργασία για να μετατρέψει στη συνέχεια έναν στρόβιλο για ηλεκτρική ενέργεια ("κύκλος πυθμένα"). Άλλες διαμορφώσεις μπορούν να λειτουργούν από κυψέλες καυσίμου, συστήματα ηλιακής θερμικής ενέργειας και άλλες πηγές ενέργειας που περιλαμβάνουν την παραγωγή θερμότητας. Οι μονάδες CHP μπορούν επίσης να ενσωματώνουν συστήματα ψύξης ή μηχανικές διαμορφώσεις ενέργειας. (Χ. Φραγκόπουλος, 1994)



Εικόνα 25. Διάγραμμα ροής CHP (Clarke Energy Co).

8.2 Τεχνοοικονομική ανάλυση CHP

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σύγκριση των ενεργειακών φορτίων διαφορετικών καυσίμων κίνησης οχημάτων.

Vehicle fuel	Energy content [kWh]
1 Nm ³ upgraded biogas (97 % methane)	9.67
1 Nm ³ natural gas	11.0
1 litre petrol	9.06
1 litre diesel	9.8
1 litre E85 (vehicle fuel with 85% ethanol and 15% gasoline)	6.37 (summer, 85% ethanol) 6.59 (winter, 79.5% ethanol)

Πίνακας 23. Παραδοχές. (Energinet)

Από βιβλιογραφική αναζήτηση προκύπτουν οι ακόλουθες εκτιμήσεις κόστους επένδυσής και λειτουργίας για μονάδα CHP:

Πίνακας 24. Εκτιμήσεις κόστους επένδυσης και λειτουργίας της μονάδας CHP από τη βιβλιογραφία.

Κόστη CHP	[€/MWh]
Κόστος Επένδυσης (IC)	45
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας (O&M)	1,7

Συνυπολογίζοντας τις απαραίτητες προσαρμογές βάσει της ίδιας υπόθεσης εργασίας όπως και στην περίπτωση της τεχνοοικονομικής ανάλυσης (LCC) για την ανάπτυξη εγκατάστασης αναβάθμισης βιοαερίου διαφορετικών τεχνικών αναβάθμισης του βιοαερίου, οι οποίες παρουσιάζονται ξανά στον πίνακα 25.

Πίνακας 25. Παραδοχές μονάδας λειτουργίας.

Επιτόκιο αναγωγής (Interest rate)	4,5%
Διάρκεια ζωής	20 έτη
Δυναμικότητα μονάδας	134,761 m ³ /h

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω στοιχεία και τη χρήση του προγράμματος MS Office προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με το Life Cycle Cost της μονάδας συμπαγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 26. . Τελικός πίνακας LCC για τη μέθοδο CHP.

Κόστη CHP	[€]	[€/yr]	LCC [€/tn]
OPEX		22.075,47	3,02
CAPEX	259.711,40	19.965,61	2,74
TOTAL LCC			5,76

Η δυναμικότητα $134,761 \text{ m}^3/\text{h}$ αντιστοιχεί σε: $13,761 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/d} \times 365 \text{ d/yr} = 1.180.506,36 \text{ m}^3/\text{yr}$ με ενεργειακό φορτίο 0.011 MWh/m^3 βιοαερίου (από βιβλιογραφία)

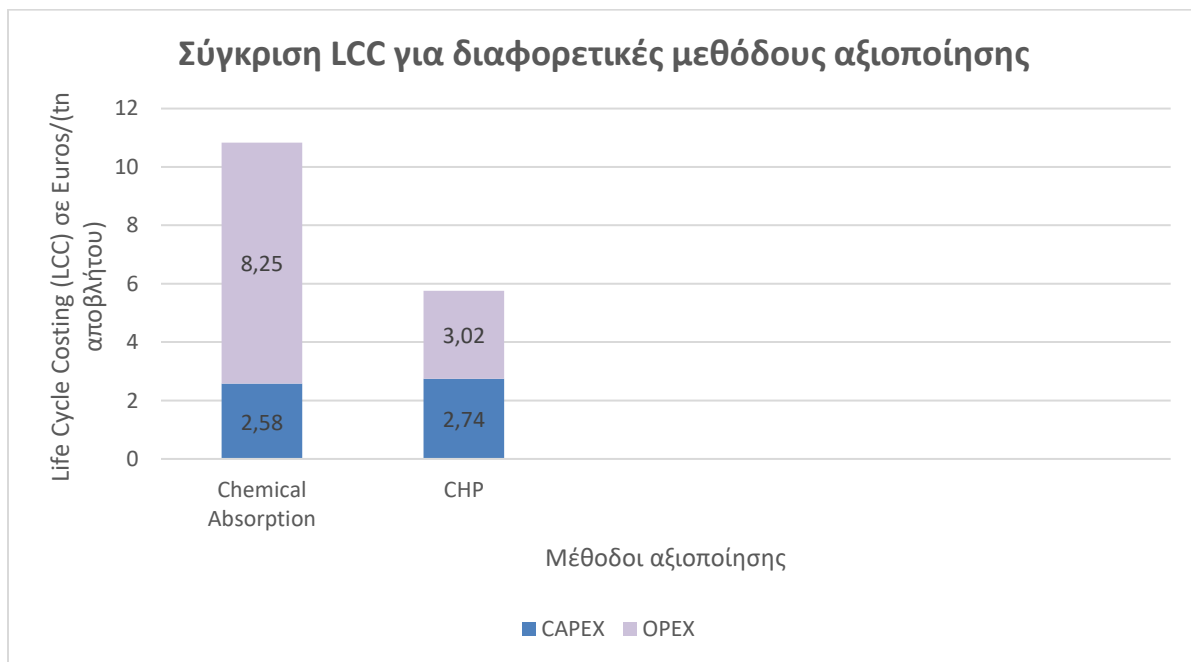
Επομένως προκύπτει συνολικό ποσό ενέργειας $12.985,57 \text{ MWh}$ σε 1 έτος.

Άρα τα κόστη επένδυσης σε ορίζοντα 20ετίας αλλά και τα ετήσια λειτουργικά κόστη υπολογίζονται σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα του Πίνακα 11.

Τέλος υπολογίζεται το LCC με βάση την ίδια υπόθεση παραγωγής οργανικών αποβλήτων ύψους 7300 [tn/yr]

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος κάθε μεθόδου που προκύπτει μας ενδιαφέρει να είναι υπολογισμένο ανά τόνο αποβλήτου καθώς αυτή είναι η πρώτη μας ύλη.

Συμπερασματικά, προκύπτει πως η μέθοδος συμπαραγωγής είναι οικονομικότερη κατά $5,07 \text{ [€/tn]}$ σε σχέση με την αναβάθμιση βιοαερίου με τη μέθοδο χημικής απορρόφησης. Ωστόσο για ολοκληρωμένη σύγκριση κρίνεται αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν και τα ενδεχόμενα έσοδα που επιτρέπει η κάθε μέθοδος. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 36. Συγκριτικό ραβδόγραμμα LCC συναρτήση της μεθόδου Chemical Absorption και του CHP.

Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική έρευνα που έγινε, ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα της σύγχρονης εποχής είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων και ο τρόπος διαχείρισής τους. Παρόλα αυτά, ολόκληρος ο κόσμος, με πρωτοπόρο την Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει εστιάσει ιδιαίτερα την προσοχή του στη μείωση των αποβλήτων και στην εύρεση ενός ορθού συστήματος διαχείρισης και αξιοποίησης τους στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας. Η καλύτερη διαχείριση των αστικών αποβλήτων θα μειώσει την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που ευθύνονται κατά κύριο λόγο για την υπερθέρμανση του πλανήτη, ένα παγκόσμιο ζήτημα όπου για την αντιμετώπισή του απαιτείται η δραστική μείωση στο επίπεδο των εκπομπών GHG, έτσι ώστε μέχρι το 2050 να έχει περιοριστεί στο 50% του αντιστοίχου επιπέδου της προβιομηχανικής εποχής του 1990. Συγχρόνως η παραγωγή και η χρήση του βιοαερίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος των αστικών απορριμμάτων θα επιφέρει ένα πολυδιάστατο όφελος για την κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον.

Μέσω της δημιουργίας μονάδων παραγωγής βιοαερίου δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας βελτιώνοντας το βιοτικό επίπεδο στην τοπική κοινωνία. Ακόμα μέσω της χρήσης του βιοαερίου σε μία πληθώρα εφαρμογών όπως στη χρήση του ως καύσιμο κίνησης, την έγχυση του στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου ή της συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, μειώνεται το ποσοστό συμμετοχής των ορυκτών καυσίμων οδηγώντας σε επιπρόσθετη μείωση των συνολικών αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Έτσι, η συγκέντρωση ρύπων όπως αυτοί που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (GHG) αλλά και άλλων τοξικών ρύπων που βρίσκονται σε ppm μειώνονται στην ατμόσφαιρα, ειδικά στα αστικά κέντρα και τις μεγαλουπόλεις, βελτιώνοντας το βιοτικό επίπεδο και την υγεία των κατοίκων.

Ακόμη ένα σημαντικό στοιχείο που αξίζει να επισημανθεί είναι η ανάδειξη της Ευρώπης ως του μεγαλύτερου παραγωγού βιομεθανίου παγκοσμίως για χρήση ως καύσιμο οχημάτων ή για έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου, με 459 εγκαταστάσεις το 2015 που παράγουν 1,2 δισεκατομμύρια m^3 και 340 μονάδες που τροφοδοτούν το δίκτυο φυσικού αερίου με χωρητικότητα 1,5 εκατομμυρίων m^3 . Περίπου 697 σταθμοί ανεφοδιασμού bio-CNG διασφάλισαν τη χρήση 160 εκατομμυρίων m^3 βιομεθανίου ως καύσιμο μεταφοράς το 2015. Η τεράστια πρόοδος της Ευρώπης στο θέμα της ανάπτυξης μονάδων βιοαερίου αποτυπώνεται και στο διάγραμμα 2 όπου διακρίνεται η σημαντική αύξηση του αριθμού εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου από 6,2% το 2009 σε ποσοστό περίπου 18% το 2016.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, σε συνεργασία με τον Δήμο Χαλανδρίου και το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Waste4Think στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, μελετήθηκε η δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου από ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα με την διαλογή τους να γίνεται απευθείας στην πηγή. Τελικός σκοπός ήταν η αναβάθμιση και συμπίεση του βιοαερίου (bio-

CNG) με τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης το οποίο παράγεται από CSTR αντιδραστήρα στον οποίο πραγματοποιείται η αναερόβια χώνευση καθώς και η τεχνικό-οικονομική αξιολόγηση της περίπτωσης εγκατάστασης μονάδας παραγωγής και αναβάθμισης βιοαερίου αλλά και η σύγκριση με την αξιοποίηση του προς συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική μελέτη που διεξήχθη ένα πρώτο συμπέρασμα που αφορά τα χαρακτηριστικά της ροής στην είσοδο της στήλης είναι ο καθοριστικός παράγοντας που ασκεί η ποιότητα του οργανικού κλάσματος στην είσοδο του αναερόβιου χωνευτήρα. Το οργανικό φορτίο έχει καθοριστικό ρόλο για την ποιότητα του παραγόμενου μεθανίου επομένως καθίσταται απαραίτητος ο διαχωρισμός της πρώτης ύλης πριν την είσοδό του στον αναερόβιο χωνευτήρα ώστε τελικά να προκύψει βιοαέριο μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε μεθάνιο. Για τον καλύτερο διαχωρισμό κρίνεται σκόπιμη η διαλογή των απορριμμάτων στην πηγή.

Το αέριο προϊόν στην έξοδο του αντιδραστήρα CSTR 4m³ αποτελεί την τροφοδοσία εισόδου για τη στήλη αναβάθμισης. Σε πρώτο στάδιο μελετήθηκε η αναβάθμιση του βιοαερίου σε εργαστηριακή κλίμακα με τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης. Η στήλη αναβάθμισης ήταν μία κυλινδρική στήλη ύψους 100 cm και διαμέτρου 3,5 cm στην οποία προστέθηκε πληρωτικό υλικό για αύξηση της διεπιφάνειας μεταξύ υγρού και αερίου το οποίο διέρχεται από τη στήλη. Ακολούθησε μία σειρά πειραμάτων για την εύρεση της βέλτιστης περιεκτικότητας MEA (ΜonoEthanolAmine) σε υδατικό διάλυμα, το βέλτιστο χρόνο αναγέννησης και τέλος τη σύγκριση με μία διαφορετική αμίνη, την MDEA (MethylDiEthanolAmine) η οποία προτείνεται ως εναλλακτική λύση του MEA και στην βιβλιογραφία. Μέσω των αποτελεσμάτων απεδείχθη ότι η βέλτιστη περιεκτικότητα MEA σε υδατικό διάλυμα είναι 30% MEA-70%H₂O με κριτήριο επιλογής την μέγιστη ποσότητα βιοαερίου που μπορεί να αναβαθμίσει σε συνάρτηση με το χρόνο. Με βάσει το ίδιο κριτήριο ο βέλτιστος χρόνος αναγέννησης απεδείχθη ότι ήταν η 2h σε θερμοκρασία 110°C και ατμοσφαιρική πίεση προκειμένου να απομακρυνθεί η ποσότητα CO₂ που έχει δεσμευθεί ενώ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αναγέννησης δεν προσδίδει επιπλέον όφελος αλλά αντίθετα αυξάνει σημαντικά το κόστος της διεργασίας και τις απώλειες της αμίνης. Ως προς τη σύγκριση με διαφορετικά διαλύματα MDEA (30%MDEA-70%H₂O και 15%MEA-15%MDEA-70%H₂O) απεδείχθη πάλι ότι το διάλυμα περιεκτικότητας 30% MEA-70%H₂O ήταν το αποδοτικότερο και πιο αποτελεσματικό.

Στη συνέχεια έχοντας καταλήξει στον βέλτιστο χρόνο αναγέννησης (2h) της αμίνης (MEA) ακολούθησαν πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του μέγιστου αριθμού κύκλων αναγέννησης για τον οποίο η διεργασία της αναβάθμισης θα είναι ακόμα αποδοτική. Παρατηρήθηκε ότι ο βέλτιστος αριθμός κύκλων αναγέννησης είναι ίσος με 5.

Έπειτα, με την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων σε εργαστηριακό επίπεδο, ακολουθήθηκε η μελέτη σχεδιασμού της εγκατάστασης και το scale up σε πιλοτική κλίμακα. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι με βάσει τη συγκεκριμένη παροχή του αντιδραστήρα ($1 \text{ m}^3/\text{day}$) η αναβάθμιση του βιοαερίου με τη μέθοδο της χημικής απορρόφησης κατά αντιρροή-η οποία προτείνεται μέσω της βιβλιογραφίας- για αύξηση του χρόνου αλληλεπίδρασης του αερίου με το υγρό, δεν είναι εφικτή για τη συγκεκριμένη ροή. Βάσει του σχεδιασμού για την πιλοτική στήλη στην οποία χρησιμοποιήθηκε χρήση στήλης φυσαλίδων ύψους 3m και διαμέτρου 12cm στην οποία θα υπάρχει συγκεκριμένη ποσότητα 30%MEA-70% H_2O με πληρωτικό υλικό τύπου pall rings συνολικού ύψους 2,7m.

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε ένα θεωρητικό σενάριο εγκατάστασης μίας μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου που θα ανταποκρίνεται στα πλαίσια του προγράμματος Waste4Think για τον Δήμο Χαλανδρίου και τα ετήσια οργανικά απόβλητα που παράγονται από αυτόν (74.000 tn/y). Βάσει αυτών των στοιχείων και συγκεκριμένων παραδοχών όπως Επιτόκιο αναγωγής 4,5%, διάρκεια ζωής της μονάδας τα 20 έτη και δυναμικότητα της μονάδας παραγωγής βιοαερίου ίση με $134,761 \text{ m}^3/\text{h}$ εκτιμήθηκε το κόστος επένδυσης για προσθήκη μονάδας αναβάθμισης για κάθε τεχνική. Σύμφωνα με τα λειτουργικά κόστη (OPEX) και τα Σταθερά κόστη (CAPEX) προέκυψε μέσω του Life Cycle Cost (LCC) ότι η πιο συμφέρουσα λύση με οικονομικούς όρους είναι αυτή της προσθήκης μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου με Water Scrubbing καθώς προέκυψε δείκτης LCC ίσος με 8,59 euros/tn_{αποβλήτου} σε σχέση με τη δεύτερη οικονομικά συμφέρουσα λύση η οποία είναι αυτή του Chemical Absorption με δείκτη LCC ίσο με 10,82 euros/tn_{αποβλήτου}. Βέβαια ως προς την πιο συμφέρουσα λύση με κριτήριο την αποδοτικότητα και την καθαρότητα του τελικού προϊόντος, καλύτερη λύση είναι αυτή του Chemical Absorption (βλ. Πίνακα 3). Το χειρότερο οικονομικά σενάριο αποδείχθηκε ότι ήταν αυτό του Cryogenic με δείκτη LCC ίσο με 30,75 euros/tn_{αποβλήτου}, κάτι το οποίο αναμενόταν και σύμφωνα με την βιβλιογραφία.

Από το συγκερασμό των παραπάνω οικονομικών αποτελεσμάτων με τις απαιτήσεις καθαρότητας τελικού προϊόντος (97-99%) αλλά και τις απαιτήσεις για ελάχιστες απώλειες μεθανίου (<0.1), προκύπτει ότι η χημική απορρόφησης είναι η πλέον αποδοτική μέθοδος αναβάθμισης βιοαερίου για παραγωγή καυσίμου κίνησης οχημάτων.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας της κάθε μεθόδου με παράμετρο ελέγχου το επιτόκιο αναγωγής, το χρόνο ζωής της μονάδας και τη δυναμικότητα. Το αρνητικό πρόσημο του δείκτη Ευαισθησίας στην περίπτωση μεταβολής του χρόνου ζωής αναδεικνύει την αντιστρόφως ανάλογη σχέση της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής με την διάρκεια ζωής της επένδυσης. Επίσης αξιοσημείωτη παρατήρηση που προκύπτει είναι η ευαισθησία της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής της μεθόδου PSA στις εκάστοτε μεταβολές των παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται και με την δυνητική εγκατάσταση μίας μονάδας CHP (Combined Heat and Power) για την οποία γίνεται επίσης μία τεχνοοικονομική ανάλυση LCC. Με τη χρήση συγκεκριμένων παραδοχών οι οποίες αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία και για τις

ίδιες παραδοχές που έγιναν και για τις διαφορετικές μεθόδους αναβάθμισης του βιοαερίου προέκυψε πως η μέθοδος συμπαραγωγής είναι οικονομικότερη κατά 5,07 [€/tn] σε σχέση με την αναβάθμιση βιοαερίου με τη μέθοδο χημικής απορρόφησης. Ωστόσο για ολοκληρωμένη σύγκριση κρίνεται αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν και τα ενδεχόμενα έσοδα που επιτρέπει η κάθε μέθοδος.

Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Όπως αναφέρθηκε η μελέτη αρκετών τεχνικών αναβάθμισης βιοαερίου βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Πολλά υποσχόμενες τεχνικές, όπως αυτή της Κρυσταλλικής η οποία μπορεί να προσδώσει καθαρότητα μεθανίου στο τελικό βιοαερίου πάνω από 99% απομακρύνοντας ταυτόχρονα και λοιπές προσμίξεις και συστατικά όπως O_2 , N_2 κ.α., απαιτείται να μελετηθούν περαιτέρω με σκοπό τη μείωση στα επενδυτικά και λειτουργικά κόστη. Η ενεργειακή ολοκλήρωση, η ανακυκλοφορία ρευμάτων και άλλες τέτοιες προτάσεις πρέπει να εξετασθούν με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Ακόμα η ανάπτυξη και χρήση νέων υλικών-βιολογικών στη μέθοδο των μεμβρανών αλλά και σε άλλες ως πληρωτικό υλικά θα μπορούσε να επιφέρει μείωση στο συνολικό κόστος της διεργασίας. Μία άλλη πιθανή έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στη χρήση νέων μεμβρανών όπου θα είχαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε αυτές τις ακραίες συνθήκες.

Ένα ακόμα πρόβλημα της διεργασίας το οποίο θα μπορούσε να μελετηθεί είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απομάκρυνση του H_2S αλλά και άλλων συστατικών, που αν και συμμετέχουν συνήθως σε αρκετά μικρό ποσοστό, δημιουργούν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης στις μηχανές των αυτοκινήτων και μείωση της θερμογόνου δύναμης του βιοκαυσίμου. Ελπιδοφόρα επίσης θεωρείται η χρήση μικροοργανισμών για την απομάκρυνση του H_2S .

Ως προς το πειραματικό κομμάτι κρίνεται σκόπιμη η μελέτη αναβάθμισης του παραγόμενου βιοαερίου στην πιλοτική κλίμακα. Η συγκεκριμένη μελέτη θα βοηθήσει στη περαιτέρω κατανόηση της αναβάθμισης του βιοαερίου σε μεγαλύτερης κλίμακα εγκατάσταση. Ακόμα, σκόπιμη θεωρείται και η μελέτη των εκπομπών του οχήματος που χρησιμοποιεί ως καύσιμο κίνησης το βιοαέριο.

Τέλος, η συμμετοχή μίας μονάδας συλλογής και επεξεργασίας του απορριπτόμενου CO_2 από τη διεργασία της αναγέννησης όπως για παράδειγμα αυτή της μεθανοποίησης του CO_2 θα μπορούσε να κλείσει τον κύκλο της διεργασίας λύνοντας το πρόβλημα της διαχείρισης του αποβλήτου του CO_2 ως απόβλητο από το σύνολο της διεργασίας. Επίσης, το CO_2 που παράγεται και κανονικά πρέπει να απορριφθεί στο περιβάλλον θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή άνθρακα για μία φωτοτροφική καλλιέργεια από μικροφύκη.

Βιβλιογραφία

- Biogas Action, European Union. (2017). *Circular Economy – a healthy transition driven also by Biogas*.
- Angelidaki I, T. L. (2018). *Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives* (Τόμ. BiotechnolAdv 36).
- Angelidaki, I. K. (2002). *Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes*.
- Bank Of Greece. (2019). *Οι Περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα 2018*. Αθήνα.
- Bauer, H. P. (2013). *Biogas upgrading-review of commercial technologies*.
- Chandrappa, R. (2012). *Solid Waste Management*.
- D.J. Batstone, J. K. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*.
- Diaz, R. M. (2015). *A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading*.
- Dixit., O. (2015). *Upgrading Biogas to Biomethane Using Absorption*. Dresden.
- E. Uçkun Kiran, K. S. (2016). *Production of biogas via anaerobic digestion*. Athens, Greece: National Technical University of Athens.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Urban Biocycles*.
- European Biogas Association. (2018). *EBA Statistical Report 2017*.
- European Commission. (2014). *Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*. Brussels.
- European Commission. (2016). *Circular economy package*.
- European Commission. (2017). *Θεματολογικά δελτία για την Ευρωπαϊκή Ένωση*.
- European Commission. (2018). *A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*. Brussels.
- European Commission. (2018). *The early warning report for Greece*. Brussels.
- European Commission. (2019). *Το κλείσιμο του κύκλου – Ένα σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία*. Βρυξέλλες.

- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2019). *Περιβαλλοντική πολιτική: γενικές αρχές και βασικό πλαίσιο*. Brussels.
- Forster-Carneiro, T. P. (2008). *Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste*. *Bioresource Technology*.
- Francisco M. Baena-Moreno¹, M. R.-G. (2019). *Biogas upgrading by cryogenic techniques*. German Biogas Association. (2017). *Biogas to Biomethane*.
- I. Angelidaki, S. K. (2002). *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*.
- International Renewable Energy Agency, . (2017). *Renewable Capacity Statistics 2016*.
- Irini Angelidakia, L. T. (2018). *Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives*.
- J. de Hullu, J. M. (2008). *Comparing different biogas upgrading techniques*. (E. U. Technology, Επιμ.) Eindhoven.
- Kim, D. O. (2011). *Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solidwastes under mesophilic conditions* (Τόμ. Waste Management 31).
- María del Rosario Rodero, R. Á. (2018). *Biogas Purification and Upgrading Technologies* . Spain: part of Springer Nature .
- Mata-Alvarez, J. (2003). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London: IWA publishing.
- Ngai Weng Chan, H. I. (2016). *Sustainable Urban Development Textbook*. Water Watch Penang & Yokohama City University.
- Patterson T, E. S. (2011). *An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK*.
- Persson, M. (2003). *Evaluation of Upgrading Techniques for Biogas*.
- Petrakopoulou F, I. D. (2015). *Life-cycle performance of natural gas power plants with pre-combustion CO₂ capture*. *Greenh Gases Sci Technol* 5 (Τόμ. Greenh Gases Sci Technol 5).
- Project, F. G. (2017). *Biogas to Biomethane - Review of Biogas Upgrading*.
- Rychebosch E, D. M. (2011). *Techniques for transformation of biogas to biomethane* (Τόμ. Biomass Bioenerg 36).
- Sachs, J. (2015). *The age of Sustainable Development*. Columbia University Press.

- Sun, Q. L. (2015.). *Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation* (Τόμ. Energy Rev. 51).
- Truc T.Q. Voa, b. D. (2017). *Techno-economic analysis of biogas upgrading via amine scrubber, carbonapture and ex-situ methanation*.
- Urban, W. G. (2009). *.Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008. 123 s. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik. German*.
- Vo TT, X. A. (2017). *Sustainability assessment of large-scale storage technologies for surplus electricity using group multi-criteria decisionanalysis*. (Τόμ. Clean Technol Environ Policy 1–15).
- W. Gujer, A. J. (1983). *Conversion Processes in Anaerobic Digestion* .
- Waste4Think. (2018). *Moving towards Life Cycle Thinking by integrating Advanced Waste Management*.
- World Energy Council, P. S. (2013). *World Rnergy Scenarios: Composing energy futures to 2050*. Switzerland.
- A. Βλυσίδης, Ε. Γ. (2018). *Περιβαλλοντική Μηχανική*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Γεράσιμος Λυμπεράτος, Δ. Β. (2012). *Διαχείριση υγρών αποβλήτων*. Αθήνα: Τζιόλα.
- Ελληνική Κυβέρνηση. (2015). *Εθνικό Σχέδιο για την Διαχείριση Αποβλήτων*.
- Ελληνική Κυβέρνηση, Υ. Π. (2008). *Νόμος-Πλαίσιο για τα απόβλητα*. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2015). *Προς μια κυκλική οικονομία*.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2016). *Η Κυκλική Οικονομία*.
- Ευρωπαϊκή επιτροπή. (2017). *Η κυκλική Οικονομία – Συνδέοντας, δημιουργώντας και διατηρώντας την αξία*.
- Νιάκας, Σ. (2019). *Τεχνοοικονομική και Επενδυτική Αξιολόγηση Λύσεων Αξιοποίησης Οργανικών Απορριμάτων στον Δήμο Χαλανδρίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σιούλας, Κ. (2008). *Εγχειρίδιο Βιοαερίου. Biogas for Eastern Europe*.
- Χ. Φραγκόπουλος, Η. Κ. (1994). *Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας*. Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας.