



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Αναβάθμιση βιοαερίου με χρήση χημικής απορρόφησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Χρήστου Ι. Βλόντζου**

**Επιβλέπων:** Γεράσιμος Λυμπεράτος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Αναβάθμιση βιοαερίου με χρήση χημικής απορρόφησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Χρήστου Ι. Βλόντζου**

**Επιβλέπων:** Γεράσιμος Λυμπεράτος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

.....  
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π  
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....  
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π  
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....  
Χρήστος Ι. Βλόντζος  
Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Copyright © Χρήστος Ι. Βλόντζος, 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

Με την περάτωση της παρούσας εργασίας θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο για την ευκαιρία που έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη του ιδίου και της ερευνητικής του ομάδας. Θέλω να τον ευχαριστήσω τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου ένα ενδιαφέρον, καινοτόμο και πολλά υποσχόμενο θέμα όσο και για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση του.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Γιώργο Λύτρα για τη καθημερινή ενασχόληση, παρακολούθηση της εργασίας, η οποία είναι αποτέλεσμα της άρτιας συνεργασίας μου με εκείνον και τον ευχαριστώ ιδιαίτερα, καθώς χωρίς τη συμβολή του η παρούσα εργασία δε θα λάμβανε «σάρκα και οστά».

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, μέλος ΕΔΠ του εργαστηρίου, τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Μαθιουδάκη για την πολύτιμη βοήθεια τους καθώς και το συμφοιτητή μου, συνεργάτη και φίλο μου Χαράλαμπο Συμεωνίδη για την κοινή μας πορεία τους τελευταίους μήνες.

Τέλος, περισσότερο από κάθε άνθρωπο θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου, ο οποίος δε βρίσκεται πλέον ανάμεσά μας εδώ και λίγες ημέρες, για την στήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στη σχολή και ευελπιστώ να είναι περήφανος.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>5</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>8</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>9</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>10</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>11</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>11</b>
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>13</b>
1.1 ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΟΡΙΣΜΟΣ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ .....	13
1.2 ΑΣΤΙΚΑ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (ΑΣΑ) .....	14
1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	15
1.3.1 Πυρόλυση .....	15
1.3.2 Αεριοποίηση .....	16
1.3.3 Αποτέφρωση .....	17
1.4 Η ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΕΚΕΙΝΗ ΣΤΗΝ Ε.Ε .....	17
1.5 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ .....	18
1.6 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ WASTE4THINK .....	19
1.6.1 Περιγραφή .....	19
1.6.2 Στόχοι .....	20
1.6.3 Προσδοκώμενα αποτελέσματα .....	21
1.6.4 Το WASTE4think στο Δήμο Χαλανδρίου .....	21
1.7 ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ .....	22
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b> .....	<b>23</b>
2.1 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ .....	23
2.1.1 Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης .....	24
2.1.2 Βασικές παράμετροι λειτουργίας της Αναερόβιας Χώνευσης .....	25
2.2 ΒΙΟΑΕΡΙΟ : ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	27
2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ .....	29
2.3.1 Water Scrubbing .....	31
2.3.2 Μέθοδος χημικής απορρόφησης με τη χρήση αμίνης .....	33
2.3.3 Διαχωρισμός μέσω Μembranών .....	34
2.3.4 Προσρόφηση με εναλλαγή της πίεσης- Pressure swing adsorption (PSA) .....	35
2.3.5 Κρυογενική μέθοδος .....	36
2.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΛΥΤΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ .....	38
2.5 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΜΕΑ ΜΕ CO <sub>2</sub> ΚΑΙ H <sub>2</sub> S .....	38
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	<b>40</b>
3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ .....	40
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ .....	41
3.2.1 Υπολογισμός του τελικού ρυθμού ροής .....	41
3.2.2 Διάμετρος στήλης (d <sub>col</sub> ) .....	46
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b> .....	<b>50</b>
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	50
4.1.1 Υπόστρωμα Α.Χ - FORBI .....	50
4.1.2 Υλικά και μέθοδοι .....	50
4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ CO <sub>2</sub> ΑΠΟ 30% ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΕΑ .....	55
4.2.1 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (ΜΕΑ) για διαφορετικούς χρόνους αναγέννησης .....	55
4.2.2 Μέτρηση εκπομπών CO <sub>2</sub> κατά την αναγέννηση του κορεσμένου υδατικού διαλύματος αμίνης .....	59

4.2.3 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (ΜΕΑ) με συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση νερού .....	60
4.2.4 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (ΜΕΑ) με συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (ΜΕΑ) και καταιονισμό της στήλης απορρόφησης.....	65
4.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ 15% ΜΕΑ-15% ΜΔΕΑ ΚΑΙ 30% ΜΕΤΗΥΛΔΙΕΤΗΑΝΟΛΑΜΙΝΕ (ΜΔΕΑ).....	72
4.4 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΜΕΑ ΥΠΟ ΚΕΝΟ .....	74
4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΑΣΕΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΟ SCALE-UP ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	76
4.5.1 Διαστάσεις εγκατάστασης πιλοτικής κλίμακας .....	76
4.5.2 Προσδιορισμός της παροχής αντλίας ανακυκλοφορίας.....	77
4.6 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ (PID).....	78
4.7 ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	79
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 5. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ -LIFE CYCLE COSTING .....</b>	<b>81</b>
5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	81
5.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ-ΣΕΝΑΡΙΟ .....	81
5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΣΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΕΧΝΙΚΗ .....	82
5.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΚΟΣΤΗ (ΟΡΕΧ) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΕΧΝΙΚΗ .....	85
5.5 LCC ΓΙΑ ΣΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΕΥΓΕΝΙΣΜΟΥ .....	86
5.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	88
5.6.1 Επιτόκιο αναγωγής ( Interest rate) .....	88
5.6.2 Χρόνος ζωής (Depreciation period in Years).....	88
5.6.3 Δυναμικότητα.....	89
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ 6. ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-COMBINED HEAT AND POWER (CHP) .....</b>	<b>90</b>
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ CHP .....	90
6.2 ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ CHP.....	92
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>95</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>96</b>

## Κατάλογος εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΕΠΙΛΟΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	13
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΜΕΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΣΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ [1].....	15
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ ΑΣΑ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	17
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΑ ΜΕΤΑΞΥ ΧΩΡΩΝ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ ΤΟ 2013 .....	18
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ.....	19
ΕΙΚΟΝΑ 6 ΛΟΓΟΤΥΠΟ WASTE4THINK .....	20
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΣΤΟ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟ .....	22
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΤΥΠΙΚΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΣ ΧΩΝΕΥΤΗΡΑΣ .....	23
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΑΔΙΩΝ Α.Χ [10] .....	24
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	25
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΤΥΠΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΠΛΗΘΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΝΑ ΧΩΡΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2015 [42] .....	29
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΝΑ ΕΤΟΣ.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 14 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ 37 ΧΩΡΕΣ ΜΕΛΗ ΤΟΥ ΙΕΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΕΣ ΑΝΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ (ΙΕΑ, 2013).....	31
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (WATER SCRUBBING) [36] .....	32
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΟ ΔΙΑΛΥΤΗ (Π.Χ SELEXOL).....	33
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ .....	34
ΕΙΚΟΝΑ 18 ΚΑΤΑΡΡΑΚΤΗΣ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ ΜΕ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ (ΜΑΚΑΡΟΥΚ ΕΤ. ΑΛ., 2010).....	34
ΕΙΚΟΝΑ 19 ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PSA .....	36
ΕΙΚΟΝΑ 20 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 21 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ/ΕΚΡΟΦΗΣΗΣ .....	41
ΕΙΚΟΝΑ 22 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΤΩΝ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ ΜΑΖΑΣ .....	42
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ GPDC.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 23 ΣΤΗΛΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ (ABSORBER) .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 24 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 25 ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΕΑ (ΜΟΝΟΕΤΗΑΝΟΛΑΜΙΝΕ) .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 26 ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΜΕΑ.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΠΕΡΙΕΚΤΗΣ ΜΕΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΑΕΡΙΟΥ .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 30 ΡΙD ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	79
ΕΙΚΟΝΑ 31 ΑΕΡΙΟΦΥΛΑΚΙΟ ΚΑΙ ΣΤΗΛΗ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ....	80
ΕΙΚΟΝΑ 32 ΣΤΗΛΗ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	80
ΕΙΚΟΝΑ 33 ΣΥΓΚΡΙΣΗ CHP ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 34 ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ CHP.....	92



## Κατάλογος Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΔΙΑΛΥΤΗ.....	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ CO <sub>2</sub> ΣΕ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ 30% ΜΕΑ ΣΤΟΥΣ 35οC.....	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ 30% ΜΕΑ.....	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 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 .....	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 . ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ.....	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ .....	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7 . ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub> ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ 2 ΩΡΩΝ.....	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ 30% ΜΕΑ.....	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 2Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 3Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 4Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 5Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ 30% ΜΕΑ.....	66
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 2Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 3Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 4Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	70
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 5Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ 30% ΜΕΑ.....	71
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20 . ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΔΙΗΛΘΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΕΑ-ΜΔΕΑ.....	73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21 . ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΔΙΗΛΘΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ ΦΡΕΣΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΜΔΕΑ.....	73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΑΣΕ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΗΛΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΕΠΕΛΘΕΙ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΤΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΟ ΥΠΟ ΚΕΝΟ 30% ΜΕΑ .....	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ LCC ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ .....	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24 ΣΥΓΚΡΙΣΗ LCC ΜΕΤΑΞΥ CHP ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ .....	94

## Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ (ΑΕΒΙΟΜ, 2010) .....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 . ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΤΟΥ FORBI .....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΙΝΗΣΗΣ .....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 . ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΡΕΥΜΑ ΑΕΡΙΟΥ CO <sub>2</sub> ΚΑΙ CH <sub>4</sub> ΚΑΙ ΡΕΥΜΑ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ 30% ΜΕΑ.....	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΧΡΟΝΩΝ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΜΕΑ .....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΣΕ 5 ΚΥΚΛΟΥΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ .....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΛΥΤΩΝ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 9 ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ 1Η ΦΟΡΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΜΕΝΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΟΓΜΑΤΑ ΑΜΙΝΩΝ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 10 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ LCC.....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 11 CAPEX ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ .....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 12 CAPEX WATER SCRUBBING .....	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 13 CAPEX PSA .....	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 14 CAPEX ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 15 CAPEX ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΜΕΒΡΑΝΕΣ .....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 16 OPEX ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 17 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ LCC ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ .....	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 18 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΑΝΑΓΩΓΗΣ.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 19 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΣΤΙΣ ΧΡΟΝΟ ΖΩΗΣ ΕΡΓΟΥ.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 20 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΣΤΙΣ ΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ .....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 21 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΣΤΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΣΥΧΝΑ ΣΥΝΑΝΤΟΜΕΝΕΣ ΡΟΕΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 22 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	92
ΠΙΝΑΚΑΣ 23 ΚΟΣΤΗ CHP .....	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 24 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ LCC ΓΙΑ CHP.....	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 25 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ LCC ΓΙΑ CHP.....	93

## Περίληψη

Οι σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για την αναχαίτιση της περιβαλλοντικής καταστροφής έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας.

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος Waste4think στο οποίο συμμετέχει ο Δήμος Χαλανδρίου σε συνεργασία με το Ε.Μ.Π., ερευνάται η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας, υπό τη μορφή βιοαερίου παραγόμενου από την αναερόβια χώνευση προ-διαλεγμένων στην πηγή ζυμώσιμων αποβλήτων κουζίνας. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναβάθμιση του παραγόμενου βιοαερίου προς παραγωγή αερίου κίνησης, με βάση τα σύγχρονα πρότυπα της κυκλικής οικονομίας.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος (καθαρότητα >97% σε CH<sub>4</sub>), πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της διεργασίας αναβάθμισης του βιοαερίου με χρήση χημικής απορρόφησης. Η διάμετρος της στήλης σε λειτουργία κατά αντιρροή υπολογίστηκε 0,43cm, γεγονός που οδήγησε στην επιλογή της χρήσης στήλης-φουσαλίδων (μέθοδος bubbling), λόγω της μη επαρκούς ροής τροφοδοσίας βιοαερίου παραγόμενου από την αναερόβια χώνευση (1m<sup>3</sup> βιοαερίου/ημέρα).

Εν συνεχεία, σε εργαστηριακή κλίμακα πραγματοποιήθηκαν πειράματα σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου διαλύτη για απομάκρυνση του περιεχόμενου στο βιοαέριο CO<sub>2</sub> και την εύρεση του βέλτιστου χρόνου αναγέννησης του κορεσμένου διαλύματος αμίνης. Προέκυψε ότι i) το υδατικό διάλυμα 30% MEA είναι ο πιο αποτελεσματικός διαλύτης ii) το χρονικό διάστημα 2 ωρών είναι ο βέλτιστος χρόνος αναγέννησης σε θερμοκρασία 110°C iii) με καταιονισμό της στήλης απορρόφησης και συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με χρήση διαλύματος αμίνης καθίστανται λειτουργικοί 5 κύκλοι αναγέννησης με επιτυχή εξευγενισμό από 148,48 έως 92,8 L βιοαερίου ανά L διαλύτη iv) οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την αναγέννηση 250mL υδατικού διαλύματος MEA ανέρχονται σε 15,325 L (STP).

Μετά τον συγκερασμό των ανωτέρω σχετικά με την εγκατάσταση ημιβιομηχανικής κλίμακας προέκυψε ότι 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.

Επιπρόσθετα, με βάση ένα υποθετικό σενάριο επέκτασης του προγράμματος και επομένως για ροή 134,761 m<sup>3</sup> βιοαερίου/h βρέθηκε το Life Cycle Cost για διαφορετικές τεχνικές αναβάθμισης βιοαερίου. Για τη μέθοδο χημικής απορρόφησης υπολογίστηκε κόστος 10,82 €/tn οικιακών αποβλήτων. Από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι μεγαλύτερη επιρροή στην τιμή της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής έχει η κλίμακα παραγωγής (δυναμικότητα).

Τέλος γίνεται αναφορά σε μία εναλλακτική μέθοδο αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου, αυτή της συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP).

## Abstract

The increasing energy demands of the modern society in combination with the growing need to prevent environmental disaster have led to the need for developing alternative forms of energy. In the framework of the European Waste4think program, the

Municipality of Halandri in cooperation with the National Technical University of Athens investigates the possibility of recovering energy in the form of biogas from the fermentable fraction of household food waste. The present diploma thesis targets at the upgrading of the produced biogas in order to convert into transportation fuel.

Considering the requirements of the final product (purity > 97% in CH<sub>4</sub>), the design of the biogas upgrading process was carried out using chemical adsorption. The diameter of the scrubber for operation in counter flow was calculated at 0.43m, which resulted in the choice of the bubbling method.

Laboratory scale experiments were carried out in order to select the appropriate solvent for CO<sub>2</sub> removal, and the optimum time for the regeneration of the saturated amine solution through heating

It was found that i) the 30% aqueous solution of MEA is the most effective solvent; ii) the 2-hour period is the optimum regeneration time at 110 ° C; iii) by sprinkling of fresh water in the adsorption column and by adding a “fresh” amine solution to counterbalance losses due to evaporation, between each successive cycle the whole process was sustainable iv) CO<sub>2</sub> emissions during the regeneration of 250mL of aqueous MEA solution are 15,325 L (STP).

After combining the above, regarding the development of a pilot scale unit, an absorption column with a total height of 3 m and a diameter of 12 cm was used to upgrade the biogas. The height of the packing material was 2.7m. A regeneration column of the same dimensions is necessary for the regeneration of the saturated amine. Additionally, based on a hypothetical scenario with a flow of 134,761 m<sup>3</sup> of biogas/h, the Life Cycle Cost was estimated for different biogas upgrade techniques. For the chemical adsorption method, a cost of 10.82 € / tn of household waste was calculated. The sensitivity analysis shows that the production scale (capacity) has a greater influence on the LCC.

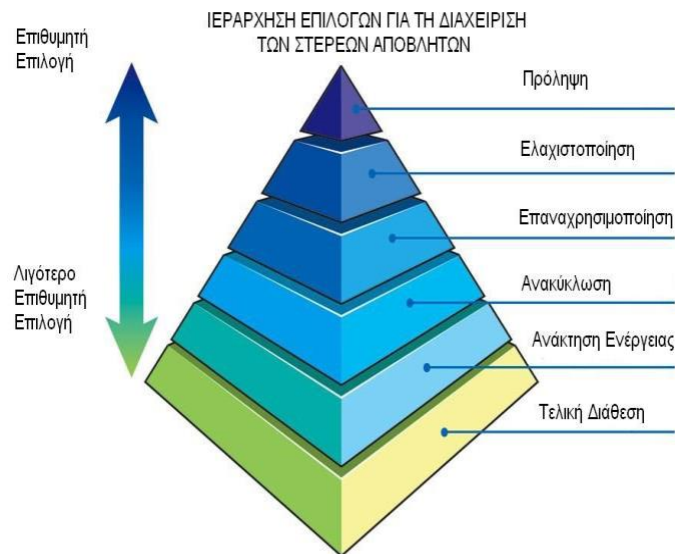
Finally, a reference to an alternative method for the valorization of biogas was made, that of cogeneration of heat and electricity (CHP).

## ΕΝΟΤΗΤΑ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα, η κλιματική αλλαγή έχει βρεθεί στο προσκήνιο της διεθνούς πολιτικής, υποδηλώνοντας την αυξανόμενη σημασία της για την παγκόσμια ευημερία και την οικονομική ανάπτυξη (DTI, 2007). Δικαιολογημένα υπάρχουν φόβοι ότι η βούληση για οικονομική ανάπτυξη έχει οδηγήσει στη θυσία της περιβαλλοντικής συνείδησης. Οι πλημμύρες, η ξηρασία και η απώλεια οικοσυστημάτων αποτελούν μόνο ορισμένες από τις ανεπανόρθωτες ζημιές που προκλήθηκαν από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης (Stern, 2007). Ευθύνη για το γεγονός αυτό φέρει και η υπάρχουσα κατάσταση σε παγκόσμια κλίμακα σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων και συγκεκριμένα εκείνων που προέρχονται από την οικιακή δραστηριότητα.

### 1.1 Απόβλητα: ορισμός, διαχείριση και ευρωπαϊκοί στόχοι

Τα απόβλητα, τα οποία ορίζονται από την οδηγία 2008/98/ΕΚ στο άρθρο 3 παράγραφος 1 ως «κάθε ουσία ή αντικείμενο που ο κάτοχός του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει», αποτελούν δυνητικά τεράστια απώλεια πόρων τόσο με τη μορφή υλικών όσο και με τη μορφή ενέργειας. Επιπλέον, η διαχείριση και η διάθεση αποβλήτων δύναται να έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, οι χώροι υγειονομικής ταφής καταλαμβάνουν εκτάσεις γης και μπορεί να προξενήσουν ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους, ενώ η αποτέφρωση μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπές επικίνδυνων ατμοσφαιρικών ρύπων. [39]



Εικόνα 1. Ιεράρχηση επιλογών για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων

Οι πολιτικές της ΕΕ για τη διαχείριση των αποβλήτων στοχεύουν στο να μειώσουν τις επιπτώσεις των αποβλήτων στο περιβάλλον και την υγεία και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των ευρωπαϊκών πόρων. Ο μακροπρόθεσμος σκοπός είναι να μετατραπεί η Ευρώπη σε κοινωνία της ανακύκλωσης, με αποφυγή της παραγωγής αποβλήτων και χρησιμοποίηση των αναπόφευκτων αποβλήτων ως πόρου όπου είναι δυνατό. Ο στόχος είναι να επιτευχθούν πολύ υψηλότερα επίπεδα ανακύκλωσης και η ελαχιστοποίηση της άντλησης πρόσθετων φυσικών πόρων. Η κατάλληλη διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί βασικό στοιχείο για την εξασφάλιση της αποδοτικής χρήσης των πόρων και της βιώσιμης ανάπτυξης των ευρωπαϊκών οικονομιών.

Ως εκ τούτου, η αναθεωρημένη οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα εισήγαγε μια ιεράρχηση πέντε βαθμίδων, όπου η πρόληψη είναι η βέλτιστη επιλογή, ακολουθούμενη από την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και άλλες μορφές ανάκτησης, με την υγειονομική ταφή ως έσχατη λύση. Σύμφωνα με την εν λόγω ιεράρχηση ορίστηκαν οι ακόλουθοι στόχοι προτεραιότητας για την πολιτική στον τομέα των αποβλήτων στην ΕΕ:

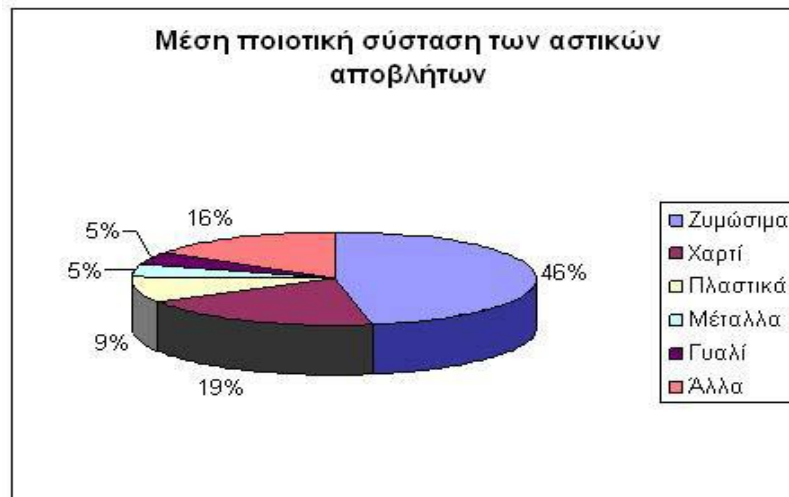
- μείωση της ποσότητας των παραγόμενων αποβλήτων·
- μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης·
- περιορισμό της αποτέφρωσης στα μη ανακυκλώσιμα υλικά·
- σταδιακή κατάργηση της υγειονομικής ταφής στα μη ανακυκλώσιμα και μη ανακτήσιμα απόβλητα·
- διασφάλιση της πλήρους εφαρμογής των στόχων πολιτικής για τα απόβλητα σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ.

## 1.2 Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)

Με τον όρο αστικά στερεά απορρίμματα νοούνται τα απόβλητα προερχόμενα από οικιακή δραστηριότητα, καθώς και απόβλητα τα οποία λόγω σύστασης προσομοιάζουν με τα οικιακά. Πρόκειται για ένα έντονα ετερογενές μίγμα υλικών, των οποίων η σύνθεση, ποιοτική και ποσοτική, διαφοροποιείται αναλόγως το χρόνο και την τοποθεσία που εξετάζεται.

Η πιο καίρια κατηγοριοποίηση των αστικών απορριμμάτων, όπως προκύπτει από σειρά δειγματοληψιών και αναλύσεων, περιλαμβάνει τις εξής ομάδες υλικών:

- ❖ **Ζυμώσιμα:** Περιλαμβάνονται τα υπολείμματα κουζίνας και κήπου.
- ❖ **Χαρτί:** Περιλαμβάνονται τα πάσης φύσεως χαρτιά και χαρτόνια που προέρχονται κυρίως από έντυπο υλικό και συσκευασίες προϊόντων.
- ❖ **Μέταλλα:** Περιλαμβάνεται το σύνολο των μεταλλικών υλικών που απαντώνται στα απορρίμματα. Είναι δόκιμος ένας διαχωρισμός σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα (κυρίως λόγω της μαγνητικής ιδιότητας των πρώτων)
- ❖ **Γυαλί:** Περιλαμβάνεται το σύνολο των γυάλινων υλικών
- ❖ **Πλαστικό:** Περιλαμβάνεται το σύνολο των πολυμερών απορριμμάτων. Χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η έντονη ανομοιογένεια της λόγω των πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PE, PP, PS, PET, ABS, κ.λπ.).
- ❖ **Δέρμα- Ξύλο-Λάστιχο- Ύφασμα**
- ❖ **Αδρανή:** Περιλαμβάνονται υλικά χημικά ανενεργά που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (π.χ. χώματα, πέτρες, κ.λπ.).
- ❖ **Λοιπά:** Εδώ καταλήγουν τα υλικά εκείνα που δε μπορούν να κατανεμηθούν σε καμία από τις άλλες κατηγορίες.
- ❖ Σε ορισμένες αναλύσεις έχουν ξεχωριστή υποκατηγορία και οι **μπαταρίες** λόγω της σχετικά υψηλότερης επικινδυνότητάς τους.



Εικόνα 2. Μέση ποιοτική σύσταση των ΑΣΑ στην Ελλάδα [1]

### 1.3 Τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης Αστικών Στερεών Αποβλήτων

#### 1.3.1 Πυρόλυση

Η πυρόλυση αποτελεί μια μέθοδο επεξεργασίας σε θερμοκρασίες 250 – 1000°C ανάλογα με τα επιθυμητά προϊόντα, που προκαλεί χημική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών μέσω της θέρμανσής τους σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Πρακτικά, δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί περιβάλλον πλήρους απουσίας οξυγόνου. Στην πραγματικότητα τα πυρολυτικά συστήματα λειτουργούν με ποσότητα οξυγόνου μικρότερη από τη στοιχειομετρική και επομένως η οξείδωση είναι αναπόφευκτη. Στην περίπτωση που τα απόβλητα περιέχουν πτητικές ή ημιπτητικές ουσίες θα προκληθεί και εξαερίωση αυτών. Η πυρόλυση μετατρέπει τις οργανικές ουσίες σε αέρια συστατικά, μικρή ποσότητα υγρών και σε ένα στερεό υπόλειμμα άνθρακα και στάχτης. Η πυρόλυση των οργανικών ουσιών παράγει καύσιμα αέρια, όπως CO, υδρογόνο, μεθάνιο και άλλους υδρογονάνθρακες. Ωστόσο, δεν αποτελεί διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, τουλάχιστον στην Ευρώπη, λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητάς της. [4]

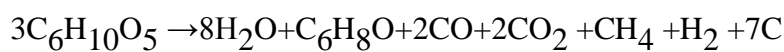
Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, τα απορρίμματα βρίσκονται μέσα σε ασάλινους αγωγούς και δεν έρχονται σε άμεση επαφή με φλόγα, καθιστώντας εφικτή την παραγωγή αερίων, χωρίς την άμεση αποτέφρωσή τους. Οι αρχικές αντιδράσεις της όλης διαδικασίας είναι ενδόθερμες, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι για την πραγματοποίησή τους απαιτείται η παροχή ενέργειας, είτε εξωτερικά, είτε εσωτερικά από την ελεγχόμενη αποτέφρωση των προς επεξεργασία απορριμμάτων. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την πυρόλυση αστικών στερεών αποβλήτων κυμαίνεται από 100 έως 900 °C και οι συνολικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα επηρεάζονται άμεσα από αυτήν. Το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων αερίων κυμαίνεται μεταξύ 12,5 και 46,0 MJ/m<sup>3</sup> (Bilitewski, 2006)

Τα τρία σημαντικότερα κλάσματα που προκύπτουν από την πυρολυτική επεξεργασία των αστικών στερεών απορριμμάτων είναι τα ακόλουθα:



1. αέριο ρεύμα, το οποίο περιέχει κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ.
2. υγρό ρεύμα, αποτελούμενο από πίσσα ή λάδι το οποίο περιέχει οξικό οξύ, ακετόνη, μεθανόλη και περίπλοκους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με επιπλέον επεξεργασία, το υγρό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο λάδι σαν υποκατάστατο του συμβατικού λαδιού Νο 6.
3. στερεό υπόλειμμα (char), αποτελούμενο από σχεδόν καθαρό άνθρακα καθώς και από όλα τα αδρανή υλικά που περιείχαν αρχικά τα ΑΣΑ. [16]

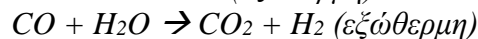
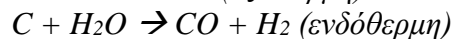
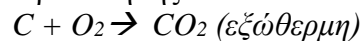
Για την κυτταρίνη, η οποία αποτελεί μεγάλο μέρος του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, η ακόλουθη αντίδραση έχει προταθεί ως αντιπροσωπευτική της πυρολυτικής της διάσπασης:



### 1.3.2 Αεριοποίηση

Αποτελεί μια μέθοδο κυρίως βιομηχανική, κατά την οποία παράγονται προϊόντα περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον, αν και οι χρησιμοποιούμενες δευτερογενείς πρώτες ύλες χαρακτηρίζονται ενίοτε επικίνδυνες. Η διαδικασία της αεριοποίησης (ή εξαερίωσης) περιλαμβάνει την ατελή καύση ανθρακούχων καυσίμων και τη δημιουργία αερίου καυσίμου, πλούσιου σε CO, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες.

Οι θεμελιώδεις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι οι ακόλουθες: [16]



Ενώ τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι:

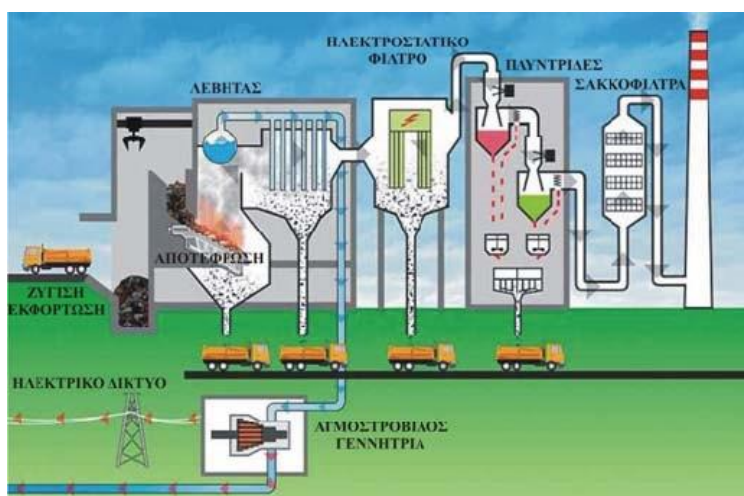
- Αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.
- Στερεό υπόλειμμα που αποτελείται από άνθρακα και αδρανή.
- Συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα που παρουσιάζει σύσταση παρόμοια με αυτή του υγρού κλάσματος που παράγεται κατά την πυρόλυση.

Στο λεγόμενο μικτό σύστημα πυρόλυσης-αεριοποίησης, τα απορρίμματα διοχετεύονται πρώτα σε μια μονάδα πυρόλυσης. Ακολούθως, τόσο τα αέρια και υγρά προϊόντα όσο και το στερεό εξανθράκωμα, μετά από άλεση, διοχετεύονται σε μια μονάδα εξαερίωσης.



### 1.3.3 Αποτέφρωση

Ως αποτέφρωση ορίζεται η ταχεία μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική, με οξείδωση της οργανικής ύλης των αποβλήτων, υπό συνθήκες περίσσειας οξυγόνου. Τα ανόργανα συστατικά των απορριμμάτων παραμένουν στο παραγόμενο στερεό υπόλειμμα. Η δυναμικότητα των μονάδων αποτέφρωσης κυμαίνεται μεταξύ 8 – 25 t/h και οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι μονάδες αποτέφρωσης κινούμενων εσχαρών, περιστρεφόμενου κλιβάνου και ρευστοποιημένης κλίνης. [4]



Εικόνα 3. Τυπική μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Από τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης και ανάλογα με την ποιότητα των ΑΣΑ, παράγονται εκτός από τα τυπικά προϊόντα της αποτέφρωσης (ατμός, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, σωματίδια) και μια σειρά άλλων ενώσεων όπως υδροχλώριο, υδροφθόριο, διοξίνες, φουράνια, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, βαρέα μέταλλα.

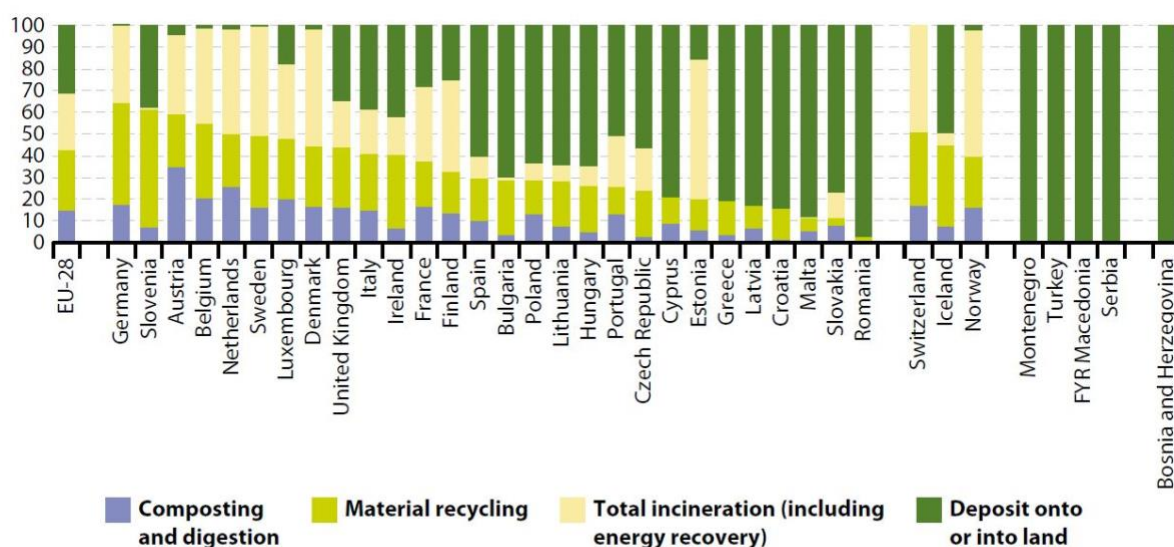
### 1.4 Η Κατάσταση στην Ελλάδα και σύγκριση με εκείνη στην Ε.Ε

Η διαχείριση αποβλήτων έχει αποδειχθεί ένα από τα πιο περίπλοκα περιβαλλοντικά, οικονομικά, νομικά και κοινωνικά προβλήματα της Ελλάδας. Η Ελλάδα έχει καταδικαστεί επανειλημμένα από το Ευρωπαϊκό Δικαστήριο (European Court of Justice) σε πληθώρα περιπτώσεων λόγω μη συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού νόμου διαχείρισης αποβλήτων με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ύπαρξη περισσότερων από χιλίων μη εγκεκριμένων χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων.

Πρόσφατες μελέτες έχουν διαπιστώσει ότι η Ελλάδα έχει ήδη καταβάλει πρόστιμα ύψους 51,2 εκατομμυρίων ευρώ για τέτοιους χώρους υγειονομικής ταφής, με 15,1 εκατομμύρια από αυτά που αφορούν στην Πελοπόννησο, 8,4 εκατομμύρια στο Νότιο

Αιγαίο, 5 εκατομμύρια στην Κεντρική Μακεδονία και 3,6 εκατομμύρια στην Αττική, μεταξύ άλλων περιφερειακών μονάδων .

Η κατάσταση της διαχείρισης των αποβλήτων της χώρας αποτελεί σημαντικό διαρθρωτικό πρόβλημα. Η Ελλάδα απορρίπτει το μεγαλύτερο μέρος των αστικών αποβλήτων (81%, έναντι 31% για το μέσο όρο της ΕΕ-28), ενώ ανακυκλώνεται μόνο το 16% (ΕΕ-28-27%) σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε επισκόπηση περιβαλλοντικής εφαρμογής για την Ελλάδα τον Φεβρουάριο του 2017. Η Ελλάδα πρέπει να καταβάλει σημαντικές προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος διαχείρισης των αποβλήτων με σκοπό την επίτευξη των σημερινών στόχων της ΕΕ για τα απόβλητα και ειδικότερα την αύξηση της χωριστής συλλογής και ανακύκλωσης, την εξάλειψη των παράνομων χώρων υγειονομικής ταφής και την εξασφάλιση της κατάλληλης επεξεργασίας των επικίνδυνων αποβλήτων. [39]



(<sup>1</sup>) Estimated data for several countries for different treatment methods (too numerous to be listed).

Εικόνα 4. Σύγκριση μεθόδων διαχείρισης ΑΣΑ μεταξύ χωρών της Ευρώπης το 2013

## 1.5 Κυκλική Οικονομία

Μέχρι σήμερα η ανάπτυξη βασιζόταν σε ένα οικονομικό μοντέλο εντατικής χρήσης των διαθέσιμων και εισαγόμενων πόρων χωρίς να υπολογίζονται στον βαθμό που έπρεπε οι μακροπρόθεσμες συνέπειες. Η αλλαγή που προτείνεται να γίνει μέσω της προσέγγισης της Κυκλικής Οικονομίας βασίζεται στη μεγιστοποίηση της απόδοσης των υπαρχόντων πόρων και στη μείωση των απωλειών κατά τη χρήση.

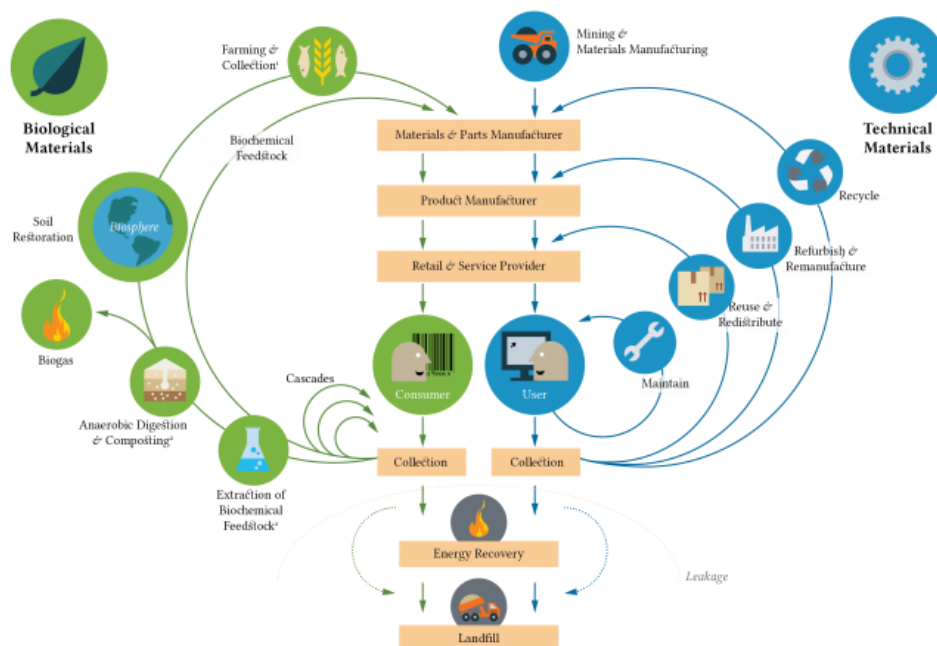
Όπως επιγραμματικά περιγράφεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή η αλλαγή προϋποθέτει τη στροφή από το γραμμικό μοντέλο «προμήθεια, παραγωγή, κατανάλωση και απόρριψη» σε ένα μοντέλο που βασίζεται στο τετράπτυχο «επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανακαίνιση και ανακύκλωση». [24]

Το κυκλικό μοντέλο είναι μια βιομηχανική προσέγγιση που έχει τη φύση ως παράδειγμα και θεωρεί ότι τα συστήματά οφείλουν να λειτουργούν όπως οι οργανισμοί, επεξεργαζόμενα τα συστατικά που μπορούν να επιστρέψουν πίσω στον κύκλο.

Η κυκλική οικονομία αποτελείται από ένα σύνολο οικονομικών δραστηριοτήτων που εστιάζει μακροπρόθεσμα στη μείωση της σπατάλης των πόρων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία, δίνοντας έμφαση στην αξιοποίηση ανανεώσιμων πόρων, φυτικών και ζωικών υποπροϊόντων και βιοαποικοδομήσιμων υλικών, την ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση προϊόντων, αλλά και την παραγωγή ενέργειας από τα απόβλητα παραγωγικών διαδικασιών, τη διατήρηση ενός προϊόντος σε καλή λειτουργική κατάσταση για μακρύ χρονικό διάστημα, την οικονομική αξιοποίηση προϊόντων για την παροχή υπηρεσιών σε πολλαπλούς χρήστες και, τέλος, τη χρήση της υπηρεσίας που προσφέρει ένα προϊόν και όχι την κατοχή αυτού του ίδιου του προϊόντος.

Δείγμα της αυξανόμενης σημασίας της κυκλικής οικονομίας στην πορεία προς μια βιώσιμη ανάπτυξη είναι ότι από το 2015 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκκίνησε μια φιλόδοξη δέσμη μέτρων για την κυκλική οικονομία και ένα σχέδιο δράσης με μέτρα που καλύπτουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων: από τον σχεδιασμό, την προμήθεια πρώτων υλών, την παραγωγή και την κατανάλωση μέχρι τη διαχείριση των αποβλήτων και την αγορά δευτερογενών πρώτων υλών.

Μεταξύ των στόχων ήταν η μείωση της απόρριψης τροφίμων κατά 50% μέχρι το 2030, η εισαγωγή προτύπων ποιότητας για δευτερεύουσες πρώτες ύλες, μέτρα για την ενίσχυση της ανακυκλωσιμότητας των προϊόντων, μέτρα για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων, για τα αγροτικά λιπάσματα κ.α. Επίσης έθεσε στόχο ότι η ανακύκλωση των οικιακών απορριμμάτων θα πρέπει να φτάσει το 50% μέχρι το 2010 και το 65% μέχρι το 2030.



Εικόνα 5. Διάγραμμα ροών μοντέλου κυκλικής οικονομίας

## 1.6 Το πρόγραμμα WASTE4THINK

### 1.6.1 Περιγραφή

Το πρόγραμμα WASTE4think λαμβάνει χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του καινοτόμου ερευνητικού προγράμματος Horizon 2020. Με επικεφαλής το Ινστιτούτο Τεχνολογίας DeustoTech, επιδιώκει να εφαρμόσει λύσεις βασισμένες στη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών, πληροφοριών και επικοινωνιών που θα οδηγήσουν στη βελτίωση των επιμέρους σταδίων διαχείρισης των αποβλήτων, μέσω μιας σφαιρικής προσέγγισης εστιασμένης στην ενεργή συμμετοχή των πολιτών για την οικοδόμηση βιώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον πόλεων.

Στο πρόγραμμα λαμβάνουν μέρος συνολικά δεκαεννιά εταίροι, συμπεριλαμβανομένων δημόσιων οργανισμών και διοικήσεων, ερευνητικών οργανισμών, επιχειρήσεων και Μ.Κ.Ο.. Ο συνολικός προϋπολογισμός του προγράμματος ανέρχεται στα 10,5 εκατ. ευρώ και η συνολική διάρκειά του σε 42 μήνες.

Οι τέσσερις ευρωπαϊκές πόλεις που συμμετέχουν στο πρόγραμμα είναι το Ζαμούδιο (Χώρα των Βάσκων, Ισπανία), το Χαλάνδρι (Αθήνα, Ελλάδα), το Σεβέζο (Ιταλία) και το Κασκάι (Λισαβόνα, Πορτογαλία). [11]



Εικόνα 6 ΛογότυποWaste4Think

### 1.6.2 Στόχοι

Ο πρωτεύων στόχος του WASTE4think είναι να προωθηθούν οι συνήθεις πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων προς ένα σύστημα κυκλικής οικονομίας που λαμβάνει υπόψη την αξία της ενσωμάτωσης και επικύρωσης 20 οικολογικά καινοτόμων λύσεων. [12]

Για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας, έχει τεθεί ένα σύνολο ειδικών στόχων, όπως:

- Να μειωθεί η παραγωγή αποβλήτων μέσω εκστρατειών ενημέρωσης και δραστηριοτήτων συνεργασίας για την προώθηση λύσεων επαναχρησιμοποίησης και οικολογικού σχεδιασμού.
- Να προωθηθούν πιο βιώσιμες καταναλωτικές συνήθειες και να ανέλθει ο ρυθμός διαλογής των αποβλήτων μέσω εκστρατειών ευαισθητοποίησης και νέων εκπαιδευτικών εργαλείων.
- Να βελτιωθούν οι υπηρεσίες διαχείρισης των αποβλήτων, μειώνοντας το κόστος διαχείρισης και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- Να μειωθεί στο ελάχιστο η ποσότητα των πρωτογενών αποβλήτων που κατατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής.

- Να προσδιοριστούν τα απόβλητα με χαμηλό δυναμικό ανακύκλωσης και να προταθούν οικολογικές καινοτόμες λύσεις για την αξιοποίησή τους.
- Να αξιολογηθεί η ικανότητα διάθεσης στην αγορά των προτιμώμενων οικολογικών και καινοτόμων λύσεων.

#### 1.6.3 Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Με άμεση εφαρμογή των ανωτέρω, καθίσταται εφικτό να κατασκευαστεί μια εικονική έξυπνη πόλη στα πρότυπα της κυκλικής οικονομίας, μεγιστοποιώντας τα αναμενόμενα αποτελέσματα ως εξής:

- Μείωση κατά 8% της παραγωγής αποβλήτων.
- Μείωση κατά 10% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG).
- Αύξηση κατά 20% της διαλογής αποβλήτων.
- 10% εξοικονόμηση στο κόστος διαχείρισης.
- Την εμπειρία και τη συνεργασία 19 εταίρων που είχαν την ευκαιρία να προάγουν νέα μοντέλα διακυβέρνησης και επιχειρηματικότητας γύρω από την κυκλική οικονομία.

#### 1.6.4 Το WASTE4think στο Δήμο Χαλανδρίου

Ο Δήμος Χαλανδρίου συμμετέχει στο πρόγραμμα συλλογής οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων σε συνεργασία με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ως οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα ορίζονται τα υπολείμματα τροφών κουζίνας, δηλαδή υπολείμματα μαγειρεμένου φαγητού, φρούτα, λαχανικά και χρησιμοποιημένο χαρτί κουζίνας. [13]

Ειδικότερα, η εφαρμογή του πιλοτικού προγράμματος στο δήμο Χαλανδρίου ξεκίνησε το Δεκέμβριο του 2016. Στο πρόγραμμα αρχικά συμμετέχουν 700 εθελοντές, κάτοικοι του δήμου, οι οποίοι προμηθεύτηκαν καφέ οικιακούς κάδους χωρητικότητας 30 L και βιοαποδομήσιμες σακούλες, φτιαγμένες από άμυλο, που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση των απορριμμάτων. Κοντά στις κατοικίες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα τοποθετήθηκαν από το δήμο καφέ κάδοι αποκομιδής, χωρητικότητας 120 L, με τα διακριτικά του προγράμματος, στους οποίους η πρόσβαση επιτρέπεται με κλειδί ώστε να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από τους ενημερωμένους συμμετέχοντες.

Στόχος είναι η μελέτη και υλοποίηση πιλοτικών λύσεων που θα βελτιστοποιήσουν τη διαχείριση των οικιακών ζυμώσιμων απορριμμάτων με στόχο τη μείωση του τελικού τους όγκου. Τα οικιακά ζυμώσιμα απορρίμματα που συλλέγονται υφίστανται μια διαδικασία προ-επεξεργασίας (ξήρανσης και τεμαχισμού) ώστε το τελικό προϊόν να είναι κατάλληλο για ανάπτυξη νέων καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας και αξιοποίησης, όπως παραγωγή αερίων καυσίμων (μεθάνιο, υδρογόνο, hythane), παραγωγή βιοαιθανόλης, pellets, compost, βιοπροσροφητικού υλικού και ζωικών τροφών, παραγωγή ηλεκτρισμού με χρήση Μικροβιακών Κυψελίδων Καυσίμου, καθώς και χρήση στην τσιμεντοβιομηχανία ως εναλλακτικού καυσίμου.

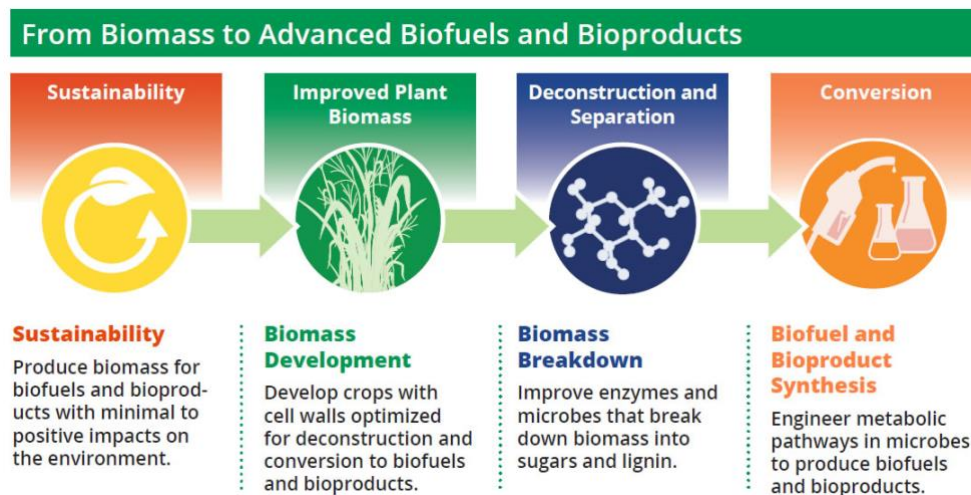


## 1.7 Βιοκαύσιμα

Ως βιοκαύσιμο νοείται το καύσιμο που προέρχεται από βιομάζα. Το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των ζυμώσιμων απορριμμάτων αποτελεί προϊόν κατάλληλο προς παραγωγή ανανεώσιμης μορφής ενέργειας.

Τα βιοκαύσιμα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- *Βιοκαύσιμα 1<sup>ης</sup> γενιάς:* Παράγονται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες.
- *Βιοκαύσιμα 2<sup>ης</sup> γενιάς:* Παράγονται από πρώτες ύλες που δεν χρησιμοποιούνται για τροφές. Πρώτες ύλες όπως γεωργικά παραπροϊόντα, κυτταρινούχα φυτά, φυτικά έλαια και ζωικά λίπη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοαιθανόλης, βιοντίζελ, βιοαερίου κλπ.
- *Βιοκαύσιμα 3<sup>ης</sup> γενιάς:* Παράγονται από μικροφύκη και περιλαμβάνουν βιοντίζελ, πράσινο ντίζελ, βιοαέριο κλπ.
- *Βιοκαύσιμα 4<sup>ης</sup> γενιάς:* Περιλαμβάνουν βιοϋδρογόνο, βιομεθάνιο, συνθετικά βιοκαύσιμα κλπ. και έχουν ως στόχο την ανάπτυξη της βιομάζας με αυξημένη δέσμευση CO<sub>2</sub>.



Εικόνα 7. Από τη βιομάζα στο βιοκαύσιμο

Η καύση των ορυκτών καυσίμων συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στην άνοδο του επιπέδου του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, η οποία συνδέεται με την υπερθέρμανση του πλανήτη. [6] Ως αποτέλεσμα, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παραγωγή και τη χρήση καυσίμων που προέρχονται από φυτικές πηγές ή οργανικά απόβλητα.

Η χρήση των βιοκαυσίμων συμβαδίζει με τις προδιαγραφές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, καθώς όσο CO<sub>2</sub> παράγεται κατά την καύση της (φυτικής) βιομάζας, τόσο απορροφάται και κατά την παραγωγή της.

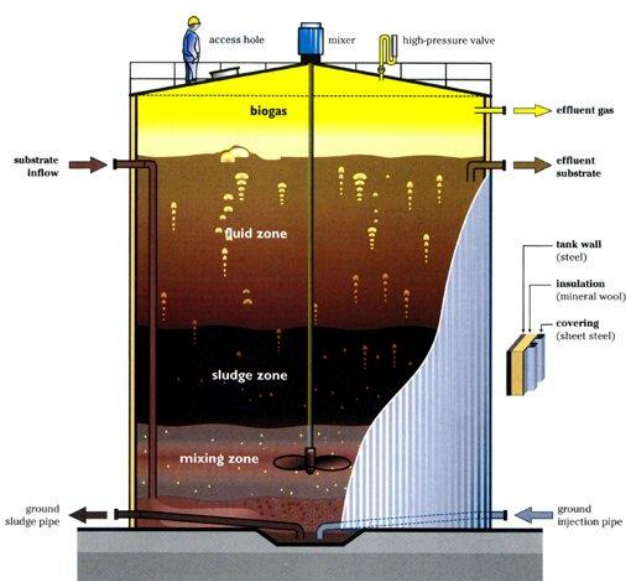
Η παγκόσμια παραγωγή βιοκαυσίμου το 2015 αντιστοιχούσε σε ενέργεια ίση με 60 EJ, ποσό που αντιστοιχεί στο 10% της συνολικής παραγωγής και στο 14% της συνολικής κατανάλωσης. [8]

## ΕΝΟΤΗΤΑ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία βιοχημική διεργασία κατά την οποία τα σύνθετα οργανικά μόρια αποσυντίθενται απουσία οξυγόνου από ένα “σύστημα” μικροοργανισμών. Το αποτέλεσμα της είναι το βιοαέριο (η σύσταση του οποίου ποικίλει ανάλογα τους παράγοντες και τις παραμέτρους της διεργασίας) και το χωνεμένο υπόλειμμα. Όταν το υπόστρωμα των μικροοργανισμών είναι ένα ομοιογενές μείγμα από περισσότερους του ενός τύπους πρώτων υλών τότε η διεργασία καλείται «συγχώνευση» ή «συνδυασμένη χώνευση». [40]

Η αναερόβια χώνευση είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διεργασία, διότι εκτός από τη χρήση της για επεξεργασία ιλύος που προέρχεται από βιολογικό καθαρισμό, τα τελευταία έτη ερευνάται η χρήση της και για παραγωγή ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διεργασία αυτή παράγει μεθάνιο, έχει μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια και παράγει μικρές ποσότητες μικροβιακής μάζας. [25]



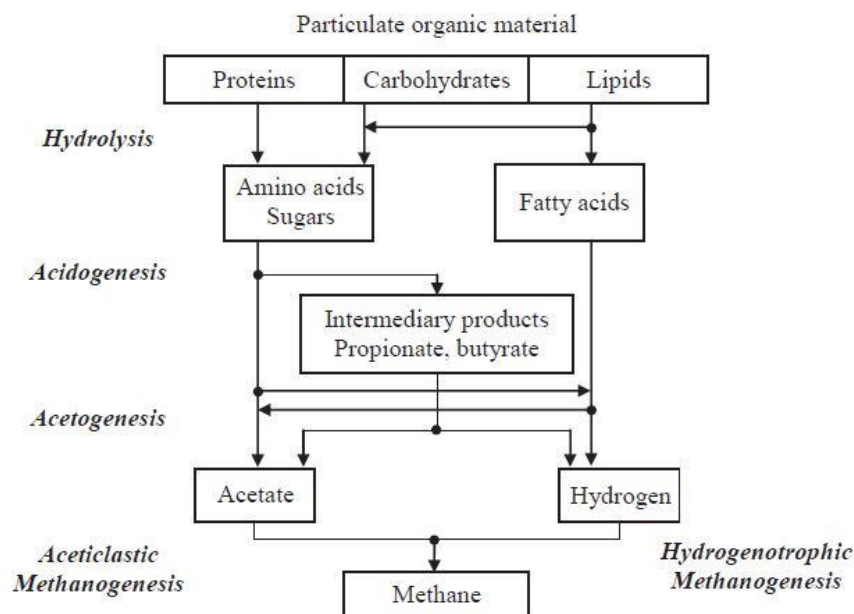
Εικόνα 8. Τυπικός Αναερόβιος χωνευτήρας

Τις τελευταίες δεκαετίες η στοχευμένη εκμετάλλευση της αναερόβιας χώνευσης (AX) από τον άνθρωπο έχει γνωρίσει θεαματικές βελτιώσεις. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της κρίσης στον τομέα της ενέργειας αλλά και της προώθησης ενός διαφορετικού ενεργειακού μοντέλου το οποίο βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές. [7] Η περαιτέρω εξέλιξη της AX βασίζεται στις 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. [5]

### 2.1.1 Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης

Τα βασικά βιοχημικά στάδια της διεργασίας είναι η υδρόλυση, η οξεογένεση, η οξικογένεση και η μεθανογένεση.



Εικόνα 9. Σχηματική απεικόνιση σταδίων Α.Χ [10]

Κατά την υδρόλυση διασπώνται οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και τα λιπίδια σε μονομερείς ενώσεις όπως αμινοξέα, σακχαρίτες και λιπαρά οξέα. [30] Θεωρείται το περιοριστικό στάδιο της διεργασίας και ο ρυθμός της αντίδρασης εξαρτάται από το υπόστρωμα και τη σύστασή του. Οι υδρολυτικοί μικροοργανισμοί προσκολλώνται στην ύλη και παράγουν ένζυμα (καταλύτες) οι οποίοι και επιταχύνουν την διαδικασία. [43]

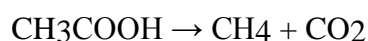
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται το ταχύτερο στάδιο της οξεογένεσης, κατά το οποίο τα παράγωγα της υδρόλυσης δημιουργούν αλυσίδες πτητικών λιπαρών οξέων όπως γαλακτικό, προπιονικό, βουτυρικό και βαλερικό. Ωστόσο εάν δεν επιτευχθεί ο συγχρονισμός του συστήματος των βιοχημικών αντιδράσεων είναι ορατός ο κίνδυνος συσσώρευσης πτητικών λιπαρών οξέων [Volatile Fatty Acids (VFAs)], με συνέπεια την πτώση του pH με επίπτωση στο στάδιο της μεθανογένεσης. Αυτή η φάση δεν επιφέρει σταθεροποίηση στο σύστημα. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της οργανικής ύλης αλλάζει μορφή κι ένα πολύ μικρό μέρος της καταναλώνεται ως πηγή ενέργειας (δηλαδή σταθεροποιείται).



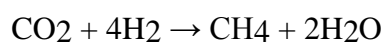
Το επόμενο στάδιο, η οξικογένεση, η οποία θεωρείται ταυτόχρονη με τη μεθανογένεση, περιλαμβάνει τη μετατροπή των VFAs μικρού μοριακού βάρους σε διοξείδιο του άνθρακα, αέριο υδρογόνο και οξικό οξύ.

Στο τελευταίο στάδιο, τη μεθανογένεση, η παραγωγή μεθανίου γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω της μετατροπής του οξικού οξέος, με παραπροϊόν το διοξείδιο του άνθρακα.

Κατά την αναερόβια χώνευση ιλύος ενδεικτικά το 72% του CH<sub>4</sub> που παράγεται, προέρχεται από τη διάσπαση του οξικού οξέος:



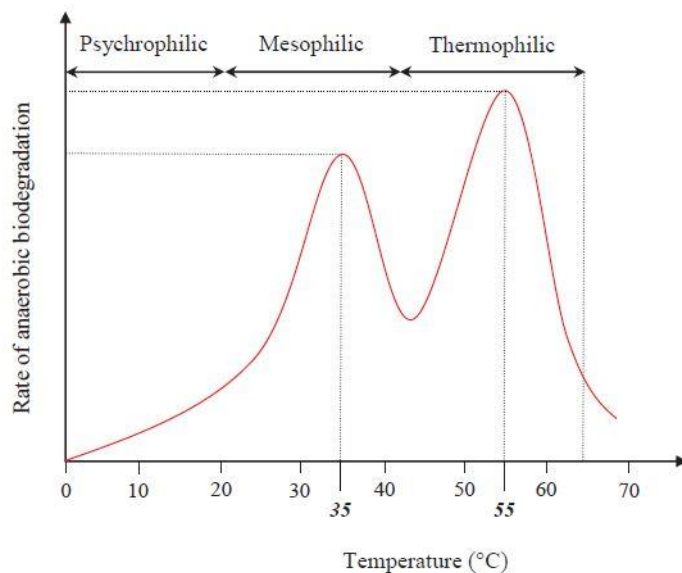
Το υπόλοιπο 28% προκύπτει από την αναγωγή του CO<sub>2</sub> (13% από το προπιονικό οξύ και 15% από άλλα ενδιάμεσα προϊόντα) χρησιμοποιώντας H<sub>2</sub> ως πηγή ενέργειας:



### 2.1.2 Βασικές παράμετροι λειτουργίας της Αναερόβιας Χώνευσης

#### ➤ Η θερμοκρασία

Κατάλληλα κρίνονται 3 διαφορετικά εύρη θερμοκρασίας (ψυχρόφιλο, μεσόφιλο, θερμόφιλο), όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα, με σημαντική επίδραση στο ρυθμό βιοαποικοδόμησης:



Εικόνα 10. Ρυθμός αναερόβιας βιοαποδόμησης συναρτήσει θερμοκρασίας

Η πτώση του ρυθμού (και της παραγωγικότητας) κατά την αύξηση της θερμοκρασίας, με κρίσιμο σημείο τους 42-43°C, οφείλεται στην αδυναμία των μικροοργανισμών να προσαρμοστούν άμεσα στις απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας. [41] Τα περισσότερα συστήματα που επεξεργάζονται αστικά λύματα έχουν σχεδιαστεί για τη μεσόφιλη φάση. Βασικό μειονέκτημα της θερμόφιλης λειτουργίας αποτελεί η υψηλή

κατανάλωση ενέργειας. Παρόλα αυτά η θερμοφιλή φάση έχει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- αυξάνει τον ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας.
- βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της αφυδάτωσης
- αυξάνει τον ρυθμό καταστροφής των παθογόνων οργανισμών.

➤ Το οργανικό φορτίο

δηλαδή η μάζα τροφοδοτούμενου υποστρώματος κατά την AX ανά μονάδα χρόνου. Πρέπει να διατηρείται κατά το δυνατόν σε σταθερά επίπεδα ενώ εξαρτάται από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT). Εξαρτάται από τον τύπο του υποστρώματος, τον τύπο του αντιδραστήρα αλλά και το τύπο της διεργασίας που ακολουθείται ως προς την θερμοκρασία.

➤ Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής

ή αλλιώς το πηλίκο του όγκου του αντιδραστήρα προς τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται. Αποτελεί το μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το ρευστό παραμένει στον αναερόβιο χωνευτήρα και μια καθοριστική σχεδιαστική παράμετρο, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος, τόσο ευκολότερη καθίσταται η ανάπτυξη της μικροβιακής βιομάζας με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου αυξάνοντας ωστόσο τα κόστη επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης, για τα οποία στόχο αποτελεί η ελαχιστοποίηση.

➤ Η ανάμιξη

Η επαρκής ανάμιξη του περιεχομένου του χωνευτήρα είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί αποτελεσματική αξιοποίηση όλου του όγκου του αντιδραστήρα, να παρεμποδιστεί η στρωμάτωση και οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας, να διασπαρθούν τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού και τα τοξικά υλικά που περιέχονται στην τροφοδοσία και να διατηρηθεί άμεση επαφή μεταξύ των βακτηρίων, των βακτηριακών ενζύμων και του υποστρώματος. Η επίδραση της ανεπαρκούς ανάμιξης στην κινητική της διεργασίας εκδηλώνεται με μείωση του δραστικού όγκου του συστήματος, επομένως και μείωση του χρόνου παραμονής των στερεών (SRT) και τελικά μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε αποτυχία. Μελέτες σε αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας έδειξαν ότι η ανεπαρκής ανάμιξη μπορεί να μειώσει το δραστικό όγκο του χωνευτήρα ακόμα και μέχρι 70%. [16]

➤ Το pH

Η ιδανική περιοχή pH για αποτελεσματική χώνευση είναι μεταξύ 6,5-7,6. Παρόλο που η αναερόβια διεργασία αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας σε μεθάνιο είναι πολυσύνθετη και συμπεριλαμβάνει διάφορα είδη βακτηρίων, αυτή που είναι πιο ευαίσθητη στο pH είναι η μεθανογένεση. Κατά τη διάρκεια ενός μη σταθερού συστήματος (λόγω αλλαγής των υδραυλικών χαρακτηριστικών, της θερμοκρασίας ή

των τοξικών) πτητικά οξέα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από οξικογενή βακτήρια. Αν το σύστημα δε δουλεύει κάτω από ικανοποιητικές συνθήκες τότε η τιμή του pH θα κατέβει πολύ χαμηλά με αποτέλεσμα να παρεμποδιστεί η διεργασία της παραγωγής του μεθανίου.

➤ Άλλοι σημαντικοί παράγοντες της αναερόβιας χώνευσης

- Ιχνοστοιχεία και θρεπτικές ουσίες

Για να προκύψει ικανοποιητικό αποτέλεσμα στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης πρέπει να εξασφαλισθεί ικανοποιητική συγκέντρωση θρεπτικών, και κυρίως άζωτο και φώσφορο.

- Παρουσία αμμωνίας

Η πολύ υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας μέσα στο χωνευτή, ειδικότερα στην ελεύθερη (μη ιονισμένη) μορφή της, είναι υπεύθυνη για την παρεμπόδιση της διεργασίας

- Τοξικές ενώσεις

Οι τοξικές ουσίες ενδέχεται να είναι είτε συνεχώς παρούσες στην τροφοδοσία και επομένως συνεχώς να διοχετεύονται στο σύστημα μαζί με το προς χώνευση υλικό ή να περιέχονται κατά διαστήματα στην τροφοδοσία (προσωρινή τοξικότητα). Η παρουσία τοξικών ουσιών μόνιμα ή παροδικά μεταβάλλει την κινητική της χώνευσης.

- Βαρέα μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα (για παράδειγμα  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ) εντοπίζονται σε βιομηχανικά κυρίως απόβλητα. Πολλά από αυτά τα ιχνοστοιχεία είναι απαραίτητα για τη σωστή ενζυμική λειτουργία των μεθανογόνων μικροοργανισμών. Ωστόσο σε συγκεντρώσεις ανώτερες από τις αναγκαίες, δύναται να είναι τοξικά για την αναερόβια χώνευση

- Αρωματικές ενώσεις

Αρωματικές ενώσεις όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο και οι φαινόλες δρουν παρεμποδιστικά για τη μεθανογένεση.

- Αναλογία άνθρακα-αζώτου

Συνίσταται η αναλογία άνθρακα αζώτου να κυμαίνεται σε ένα εύρος μεταξύ του 20:1 με 30:1 με την ιδεατή τιμή να θεωρείται η 25:1

## 2.2 Βιοαέριο : σύσταση και φυσικές ιδιότητες

Το βιοαέριο είναι ένα αέριο που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς (Petersson and Wellinger, 2009). 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, γενικά, αποτελείται από περίπου 60% μεθάνιο, 40% CO<sub>2</sub> και ίχνη προσμειξέων, όπως υδρατμούς και υδρόθειο (Palmeri et al., 2008, Bidart et al. 2011, Privalova et al, 2013α). Η σύσταση του βιοαερίου παρουσιάζεται αναλυτικότερα στον ακόλουθο πίνακα και ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα στην αναερόβια χώνευση: [2]

**Πίνακας 1** Σύθεση βιοαερίου (Aebiom, 2010)

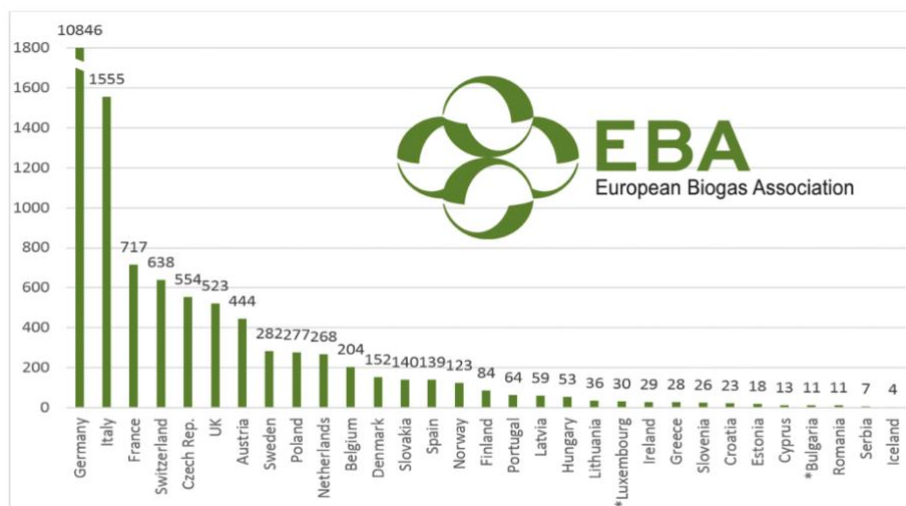
Αέριο	%
<b>Μεθάνιο</b>	50-75
<b>Διοξείδιο του Άνθρακα</b>	25-45
<b>Υδρατμοί</b>	1-2
<b>Άνθρακας</b>	0-0.3
<b>Άζωτο</b>	1-5
<b>Υδρογόνο</b>	0-3
<b>Υδρόθειο</b>	0.1-0.5
<b>Οξυγόνο</b>	ίχνη

Οι βασικές φυσικές παράμετροι του βιοαερίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη συνέχεια της μελέτης και παρουσιάζονται παρακάτω.

Physical properties		Biogas components				Biogas (60% CH <sub>4</sub> ; 40% CO <sub>2</sub> )
		CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	
volume fraction	%	55-70	27-44	1	3	100
calorific value	MJ/m <sup>3</sup>	35,8	-	10,8	22,3	21,5
flash-point	°C	650-750	-	583	-	650-750
critical pressure	Mpa	4,7	7,5	1,3	89	7,5-8,9
critical temperature	°C	-82,5	31	-	100	-82,5
normal density	g/cm <sup>3</sup>	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2
critical density	g/cm <sup>3</sup>	162	468	31	349	320
density ratio of air density	[-]	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83

**Εικόνα 11.** Φυσικές παράμετροι βιοαερίου τυπικής σύστασης

Η παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης βρίσκονται σε σταθερά ανοδική τροχιά στην Ευρώπη για τους λόγους που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.



**17,358 biogas plants in Europe (31/12/2015)  
Total installed capacity of 8,728**

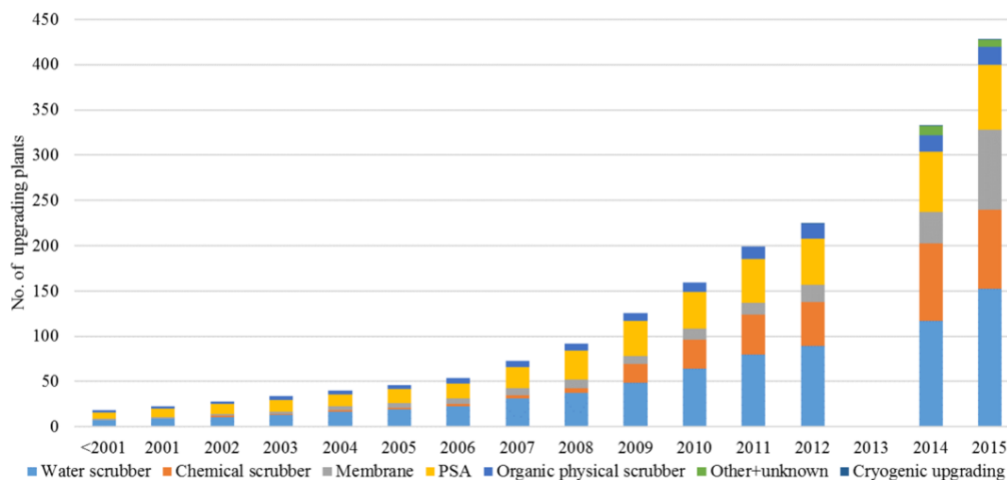
Εικόνα 12. Πλήθος μονάδων παραγωγής βιοαερίου ανά χώρα το έτος 2015 [42]

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διαγράμματα το βιοαέριο ως πηγή ενέργειας κερδίζει σταθερά έδαφος. Μέχρι στιγμής χρησιμοποιείται κυρίως για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, ενώ τα τελευταία χρόνια αξιοποιείται ως καύσιμο κίνησης μετά την αναβάθμισή του, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά στη συνέχεια.

### 2.3 Τεχνικές αναβάθμισης του βιοαερίου

Το μεθάνιο που εμπεριέχεται στο βιοαέριο έχει υψηλό ενεργειακό φορτίο (~ 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 ~ 96% κατ' όγκο (Ryckebosch et al., 2011) με απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του CO<sub>2</sub> και των προσμίξεων. Σαν αποτέλεσμα αυτού καθίσταται εφικτή η χρήση του αναβαθμισμένου πλέον βιοαερίου ως φυσικού αερίου κίνησης, έπειτα από συμπίεση, αλλά και η εισαγωγή του στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου.

Δεδομένου ότι το βιοαέριο προέρχεται από βιολογική ύλη που έχει απορροφήσει το CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

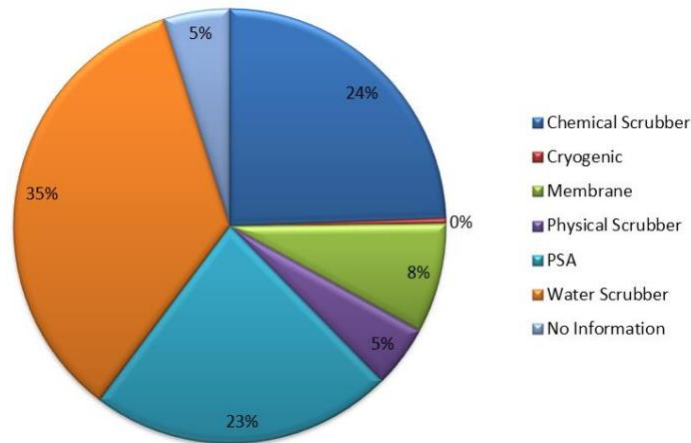


Εικόνα 13 Αριθμός μονάδων διαφορετικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου ανά έτος

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο (Petersson and Wellinger, 2009) (Εικόνες 13 και 14):

- Water scrubbing - απορρόφηση του CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> σε λεπτές μεμβράνες υπό πίεση και απελευθερώνοντάς το με μείωση της πίεσης
- Κρυογενικός διαχωρισμός - διαχωρισμός των αερίων με συμπύκνωση μιας ή περισσοτέρων φάσεων

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. [22]



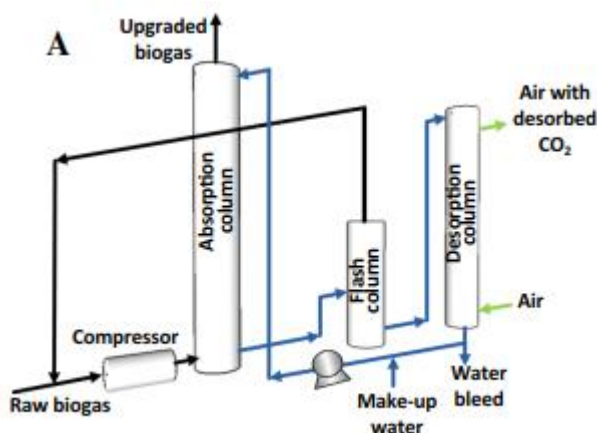
Εικόνα 14 Μονάδες αναβάθμισης βιοαερίου από 37 χώρες μέλη του IEA ταξινομημένες ανά τεχνολογία (IEA, 2013)

### 2.3.1 Water Scrubbing

Το Water scrubbing είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για τον καθαρισμό και την αναβάθμιση του βιοαερίου (Thran et al., 2014). Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>S από το βιοαέριο λόγω της αυξημένης διαλυτότητάς τους στο νερό σε σύγκριση με το CH<sub>4</sub> (συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον νόμο του Henry, η διαλυτότητα του CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>S, 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 CH<sub>4</sub> που διαλύθηκαν στο νερό ανακτώνται. Ανάλογα με την επαναχρησιμοποίηση ή μη του νερού, δύο μέθοδοι είναι εμπορικά διαθέσιμες. Η *Single pass scrubbing*, το οποίο προτιμάται σε περιπτώσεις όπου το νερό προέρχεται από υγρά απόβλητα και την *regenerated absorption*. Στη δεύτερη, το νερό αναγεννάται σε μία στήλη εκρόφησης με αποσυμπίεση σε ατμοσφαιρική πίεση, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>S. Το νερό αποσυμπιέζεται συνήθως μέσω παροχής αέρα (Air stripping). Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το βιοαέριο περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις H<sub>2</sub>S, χρησιμοποιείται ατμός ή αδρανές αέριο στην διαδικασία αποβολής για να αποφευχθεί ο σχηματισμός στοιχειακού θείου μέσω της αντίδρασης με τα συστατικά του 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 Nm<sup>3</sup>/h «ακατέργαστου» βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 180 και 200 m<sup>3</sup>/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  $\text{CH}_4$  μπορεί να φθάσει σε καθαρότητα μέχρι και 99% (Sun et al., 2015).

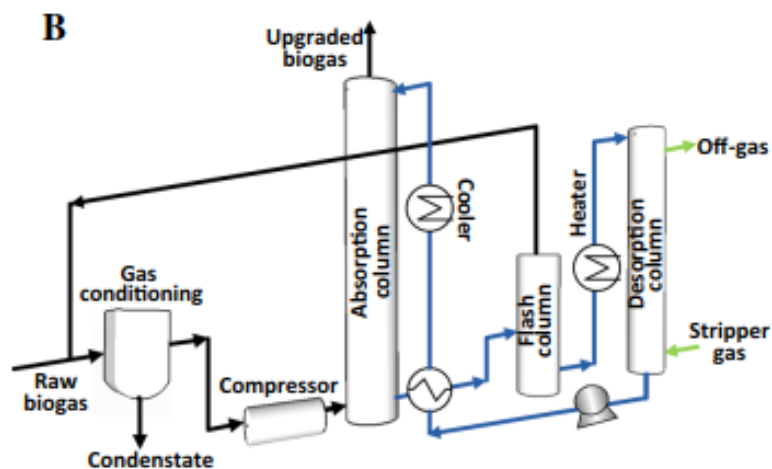


Εικόνα 15 Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου φυσικής απορρόφησης (Water Scrubbing) [36]

#### I. Scrubbing με Οργανικούς διαλύτες

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ίδια αρχή με το water scrubbing που αναλύθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, ωστόσο, η απορρόφηση του  $\text{CO}_2$  και του  $\text{H}_2\text{S}$  επιτυγχάνεται με τη χρήση οργανικού διαλύτη αντί για νερό. Συνήθως, οι οργανικοί διαλύτες είναι μίγματα μεθανόλης και δι-μεθυλ-αιθέρες της πολυ-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  $\text{CO}_2$  που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τους. [9] Ειδικότερα, το Selexol είναι ικανό να απορροφά τρεις φορές περισσότερο  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ , κάτι το οποίο στέκεται εμπόδιο στην όλη διεργασία (Persson, 2003). Επιπλέον, η διαλυτότητα του  $\text{H}_2\text{S}$  στο Selexol είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του  $\text{CO}_2$ , οπότε η απομάκρυνσή του κατά την αναγέννηση του διαλύτη απαιτεί ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του  $\text{H}_2\text{S}$  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  $\text{H}_2\text{S}$  πριν το αέριο τροφοδοτηθεί στον διαλύτη (Persson, 2003). Αρχικά, το ακατέργαστο βιοαέριο συμπιέζεται (7-8 bars) και ψύχεται στους  $20^\circ\text{C}$  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  $80^\circ\text{C}$  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  $\text{CH}_4$  στο αναβαθμισμένο βιοαέριο μέσω αυτής της τεχνολογίας μπορεί να φθάσει μέχρι και 98% (Bauer et al., 2013a). [44]



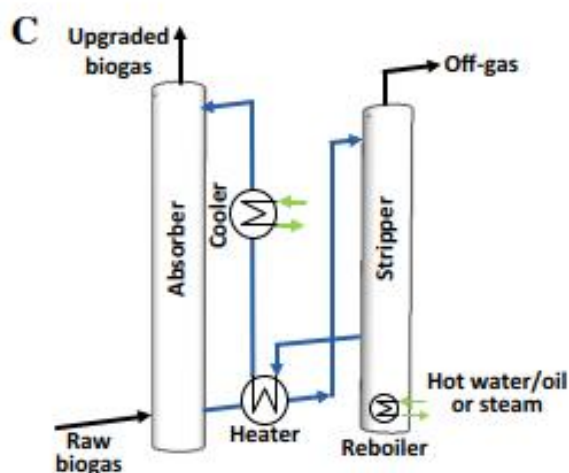


Εικόνα 16. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου φυσικής απορρόφησης με οργανικό διαλύτη (π.χ Selexol)

### 2.3.2 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 CO<sub>2</sub> που περιέχονται στο βιοαέριο. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι το H<sub>2</sub>S μπορεί επίσης να προσροφηθεί 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 αντirroή από το πάνω μέρος της στήλης όπως και στην περίπτωση του Water scrubbing που αναλύθηκε προηγουμένως. Το CO<sub>2</sub> δεσμεύεται εντός του διαλύτη με μία εξώθερμη αντίδραση. Στη συνέχεια το προκύπτον διάλυμα αμίνης, πλούσιο σε CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S, 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 προσρόφησης ενώ παράλληλα δημιουργείται ένα ρεύμα ατμού που διευκολύνει την όλη διεργασία. Τελικά, ο ατμός που περιέχει το CO<sub>2</sub> ψύχεται σε έναν συμπυκνωτή που επιτρέπει την επανακυκλοφορία του συμπυκνωμένου ρεύματος ενώ το παγιδευμένο CO<sub>2</sub> απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Εκτός από τα διαλύματα αμίνης, άλλα υδατικά αλκαλικά άλατα, όπως αυτά του NaOH, KOH και Ca(OH)<sub>2</sub> μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν καθώς αντιδρούν με το CO<sub>2</sub> (Kougiás et al., 2010, Zhao et al., 2010). Για παράδειγμα, το υδροξείδιο του νατρίου NaOH έχει μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με διαλύτες που έχουν ως βάση αμίνη όπως η Μονο-αιθανολαμίνη (MEA). Συγκεκριμένα, για την απορρόφηση 1 ton CO<sub>2</sub>, η θεωρητική ποσότητα Μονο-αιθανολαμίνης (MEA) που χρειάζεται είναι περίπου 1,39 tons, ενώ για το αντίστοιχο ποσό CO<sub>2</sub> 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

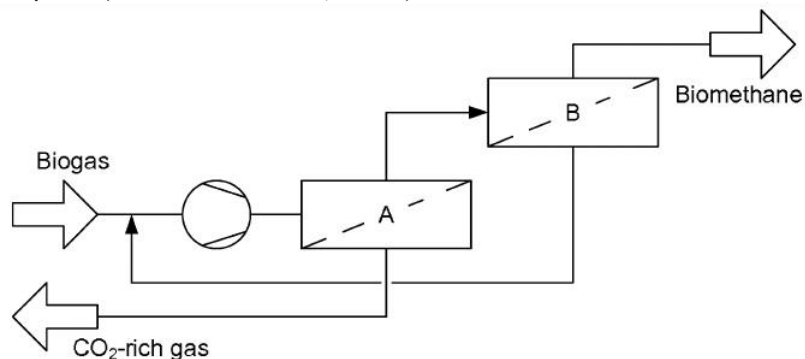
απώλειες τους κατά την εξάτμιση. Ως εκ τούτου, υδατικά αλκαλικά άλατα προτιμώνται σε σύγκριση με τις αμίνες λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς τους και λόγω αφθονίας στην αγορά (Yoo et al., 2013). Τέλος με την εφαρμογή αυτή της μεθόδου επιτυγχάνεται αναβαθμισμένο βιοαέριο με καθαρότητα έως και 99% λόγω της υψηλής επιλεκτικότητας της χημικής αντίδρασης και του μικρού ποσοστού σε απώλειες, χαμηλότερο από 0,1% (Πίνακας 1). [44]



Εικόνα 17. Σύστημα αναβάθμισης βιοαερίου χημικής απορρόφησης

### 2.3.3 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 et al., 2013). Τυπικά, η εκλεκτικότητα  $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$  (λόγος διαπερατότητας ή παράγοντας διαχωρισμού) κυμαίνεται από 20-50. Οι μεμβράνες για την αναβάθμιση του βιοαερίου είναι κυρίως κοίλες ίνες (εξωτερικής διαμέτρου 50-3000  $\mu\text{m}$ ) με υψηλή αποτελεσματική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου (Persson M. et al., 2007).



Εικόνα 18 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.

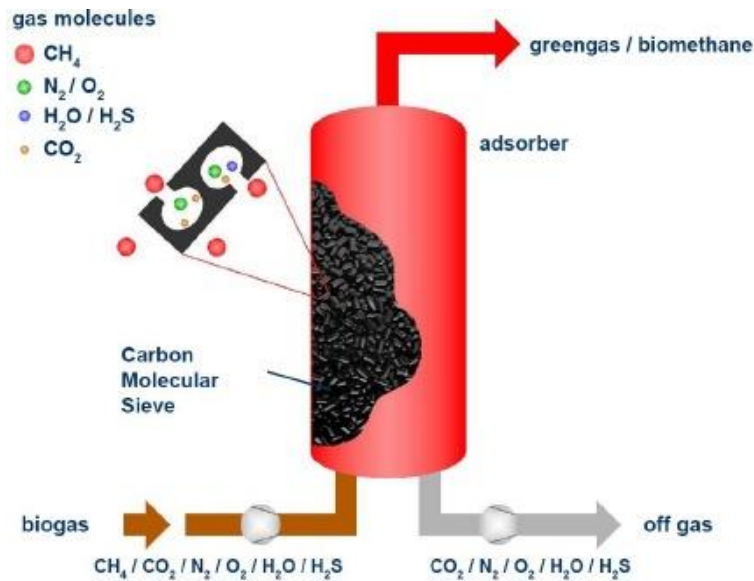
Ο καταρράκτης δύο σταδίων σημαίνει ότι το βιοαέριο διαχωρίζεται σε μια αρχική στήλη. Οι προσμίξεις απομακρύνονται. Στη συνέχεια, το πλούσιο σε μεθάνιο αέριο προϊόν - το οποίο εξακολουθεί να περιέχει CO<sub>2</sub> - διοχετεύεται σε μια δεύτερη στήλη στην οποία απομακρύνεται περαιτέρω το CO<sub>2</sub>. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες συγκεντρώσεις CH<sub>4</sub> στο αέριο προϊόν.

Οι μεμβράνες παρέχουν σχετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση (<0,4 kWe / Nm<sup>3</sup> βιομεθάνιο) και είναι εύκολα κλιμακούμενες για παροχές που κυμαίνονται από 10 Nm<sup>3</sup>/h έως πάνω από 1000 Nm<sup>3</sup>/h. [17]

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.

#### 2.3.4 Προσρόφηση με εναλλαγή της πίεσης- Pressure swing adsorption (PSA)

Η μέθοδος PSA χρησιμοποιεί μια σειρά από στήλες με στερεά υλικά που απορροφούν επιλεκτικά το CO<sub>2</sub> 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 et al., 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). [34], [18]



Εικόνα 19 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 CO<sub>2</sub>, τα οποία είναι μικρότερα από τα μόρια του μεθανίου, συσσωρεύονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στις επιφάνειες ή στους πόρους από το CH<sub>4</sub>, 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 CO<sub>2</sub> διαλύεται από τις επιφάνειες, επιστρέφει στην αέρια φάση και μπορεί να διοχετευτεί (πλούσιο σε CO<sub>2</sub> καυσαέριο).
4. Η στήλη μπορεί να γεμίσει ξανά με βιοαέριο.

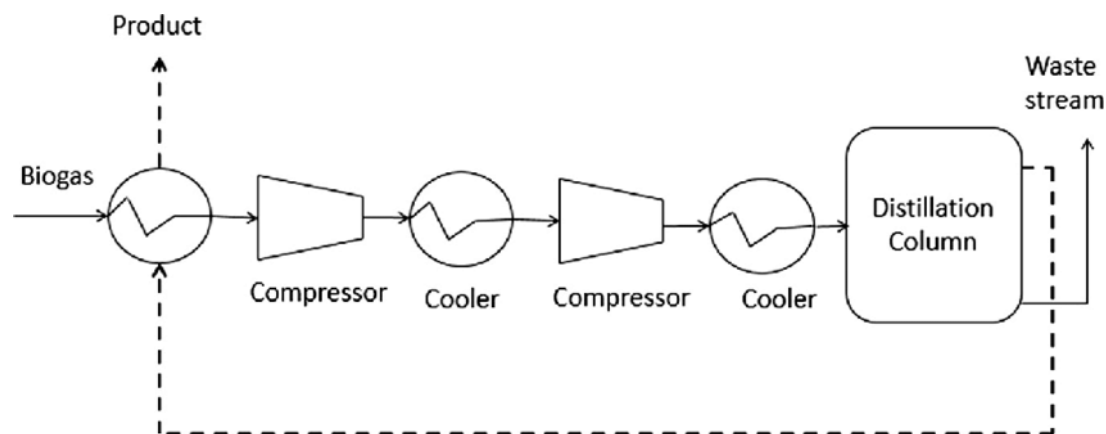
Ένας πλήρης κύκλος ολοκληρώνεται περίπου σε 3-5 λεπτά. Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας PSA είναι τα υψηλά επίπεδα CH<sub>4</sub> με καθαρότητα άνω του 97%, η χαμηλή απαίτηση ενέργειας για θερμότητα καθώς δεν απαιτείται αναγέννηση, το χαμηλό επίπεδο εκπομπών και η απουσία διαλύτη. Ωστόσο, η απώλεια μεθανίου κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2,5% ενώ η απομάκρυνση H<sub>2</sub>S είναι δύσκολη. [31]

### 2.3.5 Κρυογενική μέθοδος

Όπως ήδη αποκαλύπτεται από την ονομασία της συγκεκριμένης μεθόδου, οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα τεχνική είναι ιδιαίτερα χαμηλές και ειδικότερα της τάξεως των -90°C, ενώ η πίεση υψηλή και της τάξεως των 40 bar. Καθώς το CO<sub>2</sub>, το CH<sub>4</sub> και τα υπόλοιπα συστατικά του βιοαερίου υγροποιούνται σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, είναι εφικτό να απομονωθεί το

μεθάνιο από το βιοαέριο μέσω της υγροποίησης και συμπίεσης του CO<sub>2</sub>, το οποίο εν συνεχεία απομακρύνεται εύκολα από το υπόλοιπο αέριο. [17]

Συγκριτικά με άλλες υπάρχουσες τεχνικές, η συγκεκριμένη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και υπό έρευνα. Για τη διερεύνηση του αποτελέσματος της τεχνικής αυτής, τα πρώτα σχεδιαστικά στάδια περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της χαμηλής θερμοκρασίας και της υψηλής πίεσης. Όταν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή καθαρότητα του αναβαθμισμένου αερίου, ο σχεδιασμός μπορεί να προχωρήσει με το ψυκτικό σύστημα και αυτό της συμπίεσης.



Εικόνα 20 Διάγραμμα ροής κρυογενικού διαχωρισμού

Επομένως ο πραγματικός διαχωρισμός πραγματοποιείται μέσω απόσταξης κατά αντirroή. Πολύ καθαρό CH<sub>4</sub> (έως 99,9% κατ' όγκο) μπορεί να αφαιρεθεί από την κορυφή της στήλης, ενώ το CO<sub>2</sub> με καθαρότητα περίπου 98% κατ' όγκο μπορεί να ληφθεί από τον πυθμένα.

Τα πλεονεκτήματα της κρυογενικής επεξεργασίας είναι η υψηλή ακρίβεια διαχωρισμού των συστατικών αερίου, η υψηλή καθαρότητα μεθανίου με χαμηλές απώλειες και το γεγονός ότι το CO<sub>2</sub> - το οποίο μπορεί να ανακτηθεί με τη μορφή ξηρού πάγου - μπορεί να ανακυκλωθεί και να διατεθεί στο εμπόριο. Η κρυογενικής επεξεργασία είναι επίσης πλεονεκτική εάν το βιομεθάνιο πρόκειται να υγροποιηθεί, δεδομένου ότι το βιομεθάνιο πρέπει να είναι πολύ κρύο για το σκοπό αυτό. [31]

Ένα μειονέκτημα της κρυογενικής επεξεργασίας είναι η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη. Η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται στους -78,5 ° C ή -150 ° C χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό εξωτερικής ψύξης και φυσικής ψύξης. Η κατανάλωση ενέργειας για αυτή τη διαδικασία είναι εξαιρετικά υψηλή. Μία περαιτέρω πρόκληση είναι να εξασφαλιστεί ότι το ψυγμένο CO<sub>2</sub> δεν φράσει τον εξοπλισμό στη διαδικασία ψύξης του αερίου.

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.

	Cryogenic	Sabatier process	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	nf	nf	0.29–1.00	0.3–0.9	0.4	0.05–0.25	0.14–0.26
Heat consumption (kWh/Nm <sup>3</sup> )	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 <sub>4</sub> losses (%)	2	nf	< 4	< 2	2–4	< 0.1	< 0.6
CH <sub>4</sub> 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 <sub>2</sub> S co-removal	Yes	No	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N <sub>2</sub> and O <sub>2</sub> 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 2 Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου

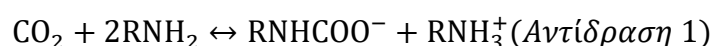
## 2.4 Επιλογή διαλύτη για τη μέθοδο χημικής απορρόφησης

Εφόσον η παρούσα μελέτη θα εστιάσει στην εφαρμογή της μεθόδου χημικής απορρόφησης για την αναβάθμιση του βιοαερίου, η επιλογή διαλύτη για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> αποτελεί μια κομβική παράμετρο.

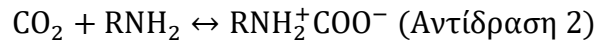
Οι αλκανολαμίνες όπως η Μονοαιθανολαμίνη (MEA), η Διαιθανολαμίνη (DEA), η Δι-2-προπανολαμίνη (DIPA) και η Μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA) χρησιμοποιούνται συνήθως για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub>. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά πειράματα που συγκρίνουν διαφορετικές αμίνες. Αν και έχουν αναπτυχθεί νέα μίγματα αλκανολαμινών και αλκανολαμινών, η MEA εξακολουθεί να είναι το προτιμώμενο προσροφητικό για την απορρόφηση του περιεχόμενου στο βιοαέριο CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S από το βιοαέριο. Οι Biernacki et al. απέδειξαν ότι το 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.

## 2.5 Αντίδραση MEA με CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S

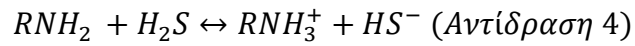
Ο μηχανισμός της απορρόφησης του CO<sub>2</sub> από πρωτοταγείς αμίνες δεν είναι απολύτως σαφής. Εν τούτοις, η συνολική αντίδραση του CO<sub>2</sub> με μία πρωτοταγή αμίνη (RNH<sub>2</sub>), όπως το MEA, μπορεί να αναπαρίσταται όπως στην αντίδραση (1)



Αυτός ο μηχανισμός περιλαμβάνει δύο στάδια, συγκεκριμένα:



όπου το B είναι μια βάση η οποία μπορεί να είναι αμίνη, OH<sup>-</sup> ή H<sub>2</sub>O.  
Η αντίδραση των H<sub>2</sub>S και MEA είναι αντιστρεπτή και στιγμιαία. Το H<sub>2</sub>S αντιδρά με το MEA με μεταφορά πρωτονίων. Η διαδικασία <sup>11</sup> παρουσιάζεται στην Αντίδραση (4).



## ΕΝΟΤΗΤΑ 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

### 3.1 Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας και απαιτήσεις τελικού προϊόντος

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας αναερόβιας χώνευσης στον αντιδραστήρα όγκου 4m<sup>3</sup>, χρησιμοποιώντας το FORBI (η προέλευση του οποίου θα επεξηγηθεί στη συνέχεια) ως πρώτη ύλη, προσεγγιστικά παράγονται 1.000 λίτρα βιοαέριο ανά ημέρα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοαερίου απεικονίζονται στον Πίνακα 3. Το βιοαέριο αυτό αποτελεί το ακατέργαστο βιοαέριο που θα χρησιμοποιηθεί ως τροφοδοσία στο σύστημα αναβάθμισης του βιοαερίου.

Πίνακας 3 . Κύρια χαρακτηριστικά του βιοαερίου που παράγεται από την αναερόβια χώνευση του FORBI

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

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του αναβαθμισμένου βιοαερίου που θα συμπιεστεί περαιτέρω προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) με σκοπό την παραγωγή αερίου κίνησης, απεικονίζονται στον Πίνακα 4.

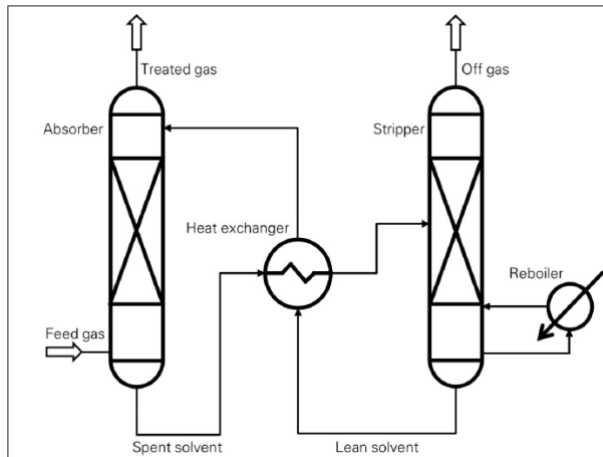
Πίνακας 4 Επιθυμητά χαρακτηριστικά του αναβαθμισμένου βιοαερίου προς παραγωγή αερίου κίνησης

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



### 3.2 Σχεδιαστικοί Υπολογισμοί και Διαστασιολόγηση

Ένα απλοποιημένο σχήμα διαδικασίας απορρόφησης-εκρόφησης φαίνεται στην εικόνα 21, όπου 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 CO<sub>2</sub> μεταφέρεται από το βιοαέριο στο διάλυμα και το πλούσιο σε CO<sub>2</sub> (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 το δεσμευμένο CO<sub>2</sub>, το οποίο εξέρχεται ως αέριο στην κορυφή της στήλης αναγέννησης. Το διάλυμα πλέον, σχεδόν απαλλαγμένο από CO<sub>2</sub> ρέει πίσω στη στήλη απορρόφησης. Καθώς η απορρόφηση του CO<sub>2</sub> διευκολύνεται από χαμηλότερες θερμοκρασίες και η εκρόφηση του CO<sub>2</sub> από υψηλότερες θερμοκρασίες, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης θερμότητας για να μεταφέρει τη θερμότητα από το αναγεννημένο διάλυμα στο κορεσμένο που οδεύει προς την στήλη αναγέννησης. [24]

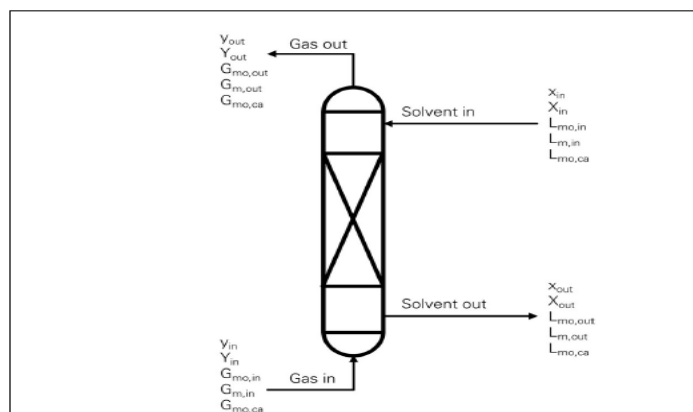


Εικόνα 21 Απλοποιημένο διάγραμμα διεργασίας απορρόφησης/εκρόφησης

Στις διεργασίες βιομηχανικής κλίμακας, στήλες απορρόφησης με πληρωτικό υλικό λειτουργούν κατά αντιρροή 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.

#### 3.2.1 Υπολογισμός του τελικού ρυθμού ροής

Οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή ισοζυγίου μάζας και συστατικού σε μια στήλη απορρόφησης φαίνονται στην εικόνα 22. Αυτές οι παράμετροι είναι εκτενέστερα καθορισμένες στον Πίνακα 5.



Εικόνα 22 Επεξήγηση συμβόλων των ισοζυγίων μάζας

Πίνακας 5 . Παράμετροι στήλης απορρόφησης για ρεύμα αερίου CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> 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).

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

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

Η παρουσίαση της περιεκτικότητας σε CO<sub>2</sub> ως γραμμομόρια CO<sub>2</sub> ανά γραμμομόριο υγρού φορέα (X ή Y) προσφέρει ένα μαθηματικό πλεονέκτημα. 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<sub>in</sub>, Y<sub>out</sub>) και (X<sub>out</sub>, Y<sub>in</sub>) ονομάζεται γραμμή λειτουργίας.

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

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

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.

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

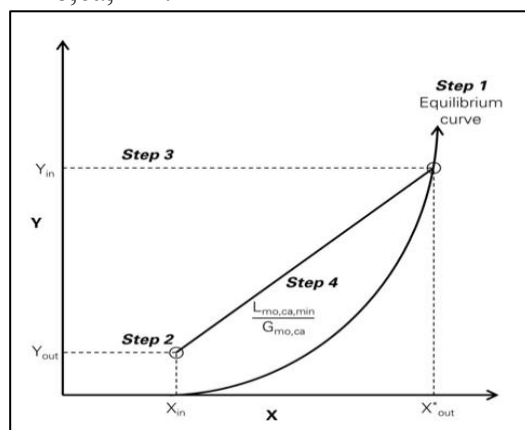
Η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> στην ισορροπία στην αέρια και στην υγρή φάση σχετίζεται μαθηματικά με την καμπύλη ισορροπίας  $Y^* = f(X)$  ή  $y^* = f(x)$  όπου η κλίση της καμπύλης ισορροπίας υποδηλώνεται ως  $sl$ . Η συνάρτηση  $y^* = f(x)$  είναι μια γραμμή στην περιοχή όπου το  $x$  προσεγγίζει 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 απορροφητή. 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 μοριακού 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<sup>η</sup> 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).

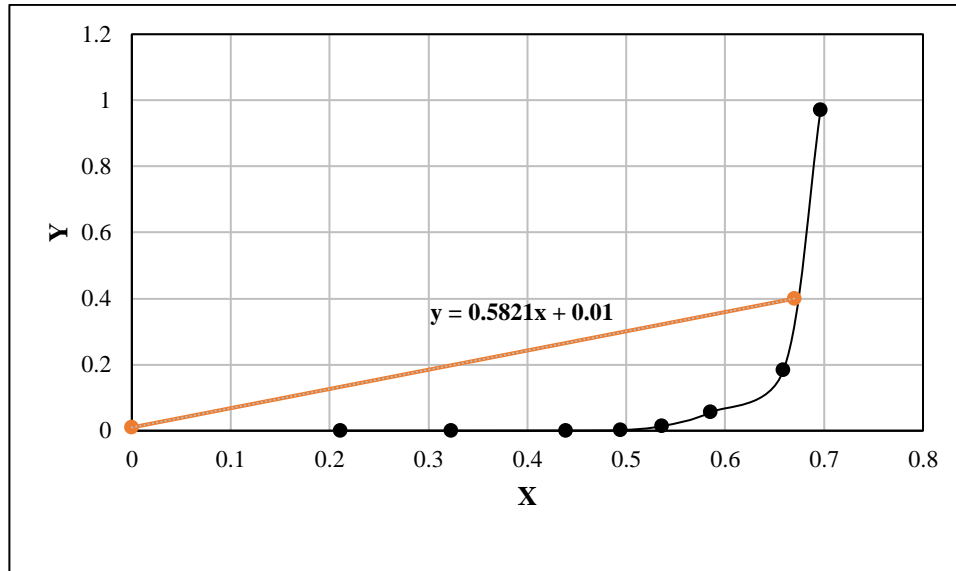
$$L_{mo,ca,min} = G_{mo,ca} \left( \frac{Y_{in} - Y_{out}}{X^*_{out} - X_{in}} \right) \quad (\text{Εξ. 7})$$

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 1 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 2 Καμπύλη ισορροπίας για τη διαλυτότητα του  $CO_2$  σε υδατικό διάλυμα 30% MEA στους  $35^\circ C$ .

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2, 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  $L_{mo,ca,min}$

$$\begin{aligned} L_{mo,ca,min} &= 0.58 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{mol of gas}} \times 1.65 \frac{\text{mol of gas}}{\text{h}} \\ &= 0.957 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{h}} \cong 0.96 \frac{\text{mol of 30\% MEA}}{\text{h}} \quad (\text{Εξ. 10}) \end{aligned}$$

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

$$L_v = \frac{L_{mo,ca,min} \times MW_{30\%MEA}}{\rho_{30\%MEA}} = \frac{1.44 \frac{mol\ of\ 30\% MEA}{h} \times 30.934 \frac{g}{mol\ of\ 30\% MEA}}{1168 \frac{g}{L}} = 0.038 \frac{L}{h}$$

### 3.2.2 Διάμετρος στήλης ( $d_{col}$ )

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  $\rho_{gas}$  η πυκνότητα του.

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

Ο συντελεστής απόδοσης C εκφράζει την ισορροπία μεταξύ  $CO_2$  και MEA προς τα πάνω και προς τα κάτω, οποίες δρουν σε μία σταγόνα διαλύτη (εξ. 12) όπου το  $\rho_{solv}$  είναι η πυκνότητα του διαλύτη.

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

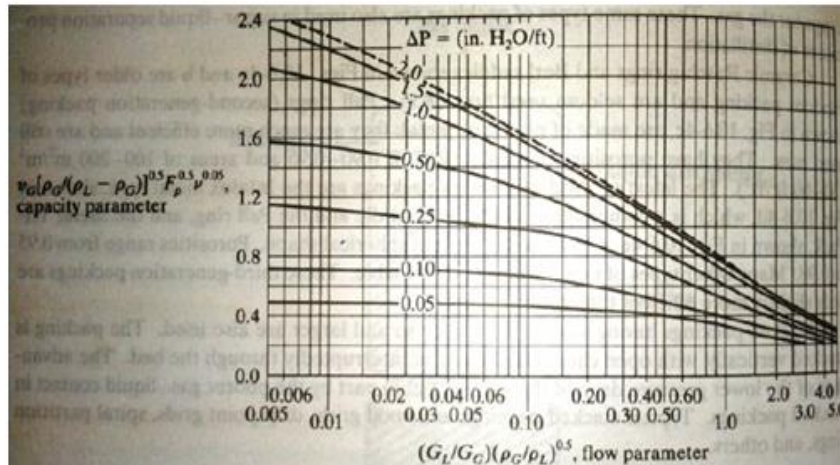
Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τον συντελεστή  $\Delta P / l$  είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πληρωτικού υλικού, τα οποία χαρακτηρίζονται από τον συντελεστή PF. Η ειδική πτώση πίεσης στο σημείο πλημμυρισμού  $\Delta P_{fl} / l$  μπορεί να υπολογιστεί υπολογίζοντας τον συντελεστή PF σύμφωνα 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  $[in\ H_2O/ft_{packing}]$ .

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

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

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

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). Όταν η FP διατηρείται σταθερή, η ειδική πτώση πίεσης αυξάνεται με την αύξηση του CP.



Εικόνα 23. Διάγραμμα GPDC

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 αντίστοιχως και  $\rho_{\text{solv}}$  και  $\rho_{\text{gas}}$  είναι οι πυκνότητες διαλύτη και αερίου, αντίστοιχα.

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

2. Ο συντελεστής συσσώρευσης PF της συσκευασίας είναι χαρακτηριστικός του υλικού συσκευασίας 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  $\mu_{solv}$  μονάδες σε Centipoise και το  $\rho_{solv}$  μονάδες σε  $kg \cdot m^{-3}$  (και όχι  $lb / ft^3$ ).
6. Χρησιμοποιώντας την τιμή  $C$  που υπολογίστηκε, η επιφανειακή ταχύτητα αερίου στο σημείο πλημμύρισμού  $v_{gas, fl}$  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:

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

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

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

και

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

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

Χρησιμοποιώντας δακτυλίου 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:

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



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 απορροφητικό 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 αντιρροή.

## ΕΝΟΤΗΤΑ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.1 Γενικά στοιχεία

#### 4.1.1 Υπόστρωμα Α.Χ - FORBI

Τα συλλεγόμενα οργανικά απόβλητα 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
- αφαίρεση των οσμών
- 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 σε επίπεδα 8-15%

#### 4.1.2 Υλικά και μέθοδοι

##### 4.1.2.1 Πειραματικές διατάξεις εργαστηριακής κλίμακας

Αρχικά κατασκευάστηκε εργαστηριακή διάταξη πλυντρίδας (στήλη απορρόφησης με πληρωτικό υλικό/ Absorber) διαστάσεων 100 cm ύψος και 3,5 cm διάμετρος (Εικόνα 23) για την αναβάθμιση του βιοαερίου που παράγεται από τον αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης οικιακών αποβλήτων όγκου 4 m<sup>3</sup> (Εικόνα 24).



Εικόνα 24 Στήλη αναβάθμισης βιοαερίου (Absorber)



Εικόνα 25 Αντιδραστήρας αναερόβιας χώνευσης οικιακών αποβλήτων

Στην εργαστηριακή στήλη απορρόφησης πραγματοποιείται εισαγωγή υδατικού διαλύματος 30% MEA (MonoEthanolAmine), το οποίο μέσω της διαδικασίας της απορρόφησης αερίου από υγρό συγκρατεί τα μόρια του  $\text{CO}_2$  και του  $\text{H}_2\text{S}$  ενώ το εξευγενισμένο πλέον βιοαέριο (Βιομεθάνιο) συλλέγεται από την κορυφή της στήλης. Η παροχή του βιοαερίου στη στήλη λάμβανε χώρα με την χρήση περισταλτικής αντλίας σταθερής παροχής με 4,64 L/hr. Η περισταλτική αντλία αντλούσε το βιοαέριο από ενδιάμεσο δοχείο που λειτουργούσε ως αεριοφυλάκιο. Η σύσταση του βιοαερίου προσδιοριζόταν σε καθημερινή βάση και το ποσοστό του μεθανίου ήταν ίσο με  $61 \pm 6,5\%$ .

Σε χρονικό διάστημα μικρότερο της μίας ώρας παρατηρείτο χρωματική αλλαγή του διαλύματος κι αυτό οφείλεται στον σταδιακό κορεσμό του από το περιεχόμενο στο βιοαέριο  $\text{CO}_2$  και το  $\text{H}_2\text{S}$ . Κατά τη διάρκεια του κορεσμού του διαλύματος πραγματοποιούνται μετρήσεις της σύστασης του εξερχόμενου από τη στήλη εξευγενισμένου αερίου με τη χρήση χρωματογράφου GC με TCD ανιχνευτή.



Εικόνα 26 Κορεσμένο διάλυμα MEA (MonoEthanolAmine)

Μετά τον πλήρη κορεσμό του διαλύματος MEA επιχειρείται η αναγέννηση του διαλύματος. Για την αναγέννηση κατασκευάστηκε στο εργαστήριο διάταξη stripper στην οποία πραγματοποιείται αναγέννηση του MEA μέσω θέρμανσης στους 110°C.



Εικόνα 27 Διάταξη αναγέννησης κορεσμένου MEA

Η παραπάνω διάταξη (*Stripper*) αποτελείται από έναν βραστήρα στον οποίο τοποθετείται τριλάιμη σφαιρική φιάλη. Στη φιάλη αυτή προστίθεται το κορεσμένο διάλυμα MEA. Η σφαιρική φιάλη συνδέεται με ψυκτήρα-εναλλάκτη όπου στην κορυφή του απελευθερώνεται το CO<sub>2</sub> και το H<sub>2</sub>S 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 MEA παραμένει στην σφαιρική φιάλη μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου οπότε και συλλέγεται και τοποθετείται πάλι στην στήλη (*Absorber*) και η διαδικασία κορεσμού επαναλαμβάνεται.

#### 4.1.2.2 Διαλύτης

Με σκοπό τη διερεύνηση της ικανότητας απορρόφησης CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> στο αναβαθμισμένο βιοαέριο ήταν υψηλότερο από το 2%. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα που χρησιμοποιούσαν τόσο “φρέσκα” όσο και αναγεννημένα διαλύματα MEA 30%.



Εικόνα 28. Περιέκτης MEA που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία

#### 4.1.2.3 Αέρια χρωματογραφία

Η εξαγωγή αποτελεσμάτων της μελέτης κορεσμού πραγματοποιούνται με τη χρήση αέριου χρωματογράφου.

Η χρωματογραφία αποτελεί μέθοδο διαχωρισμού χημικών ουσιών, η οποία στηρίζεται στην διαφορετική κατανομή των συστατικών ενός μίγματος μεταξύ μιας κινούμενης και μια στατικής φάσης. Αναλόγως τη φύση της κινούμενης και της στατικής φάσης, η χρωματογραφία χαρακτηρίζεται ως αέρια ή υγρή.

Στην αέρια χρωματογραφία χρησιμοποιείται ως κινητή φάση ένα αέριο (φέρον αέριο), το οποίο συνήθως είναι άζωτο, αργό ή υδρογόνο, και ως σταθερή φάση είτε μία στερεή (αέρια-στερεή χρωματογραφία, Gas Solid Chromatography, GSC), είτε μία υγρή ουσία (αέρια-υγρή χρωματογραφία, Gas Liquid Chromatography, GLC). Πιο συχνή εφαρμογή έχει η δεύτερη, δηλαδή η αέρια-υγρή χρωματογραφία. Στην τεχνική της αέριας-υγρής χρωματογραφίας ο διαχωρισμός των συστατικών βασίζεται στην κατανομή τους μεταξύ ενός μη πτητικού υγρού (στατική φάση), καθηλωμένου σε στερεό φορέα ή στα τοιχώματα ανοικτών τριχοειδών στηλών και του φέροντος αερίου (κινητή φάση). Ο διαχωρισμός οφείλεται στις διαφορετικές δυνάμεις συγκράτησης και έκλυσης μεταξύ των συστατικών του μείγματος και του υλικού πλήρωσης της στήλης κατά τη ροή του φέροντος αερίου. [14]

Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι τύποι ανιχνευτών είναι ο ανιχνευτής ιοντισμού φλόγας (FID), ο ανιχνευτής θερμικής αγωγιμότητας (TCD) και ο ανιχνευτής σύλληψης ηλεκτρονίων (ECD).



#### 4.1.2.4 Μετρητής αερίου

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



Εικόνα 29. Μετρητής αερίου

#### 4.1.2.5 Rotary Evaporator

Για την πλήρη μελέτη της αναγέννησης του κορεσμένου διαλύματος αμίνης ερευνήθηκε η προοπτική αναγέννησης υπό κενό και σε χαμηλότερη θερμοκρασία ( $80^{\circ}\text{C}$ ) με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας με τη βοήθεια της ακόλουθης διάταξης .



Εικόνα 29. Διάταξη αναγέννησης κορεσμένου ΜΕΑ υπό κενό/Rotary Evaporator

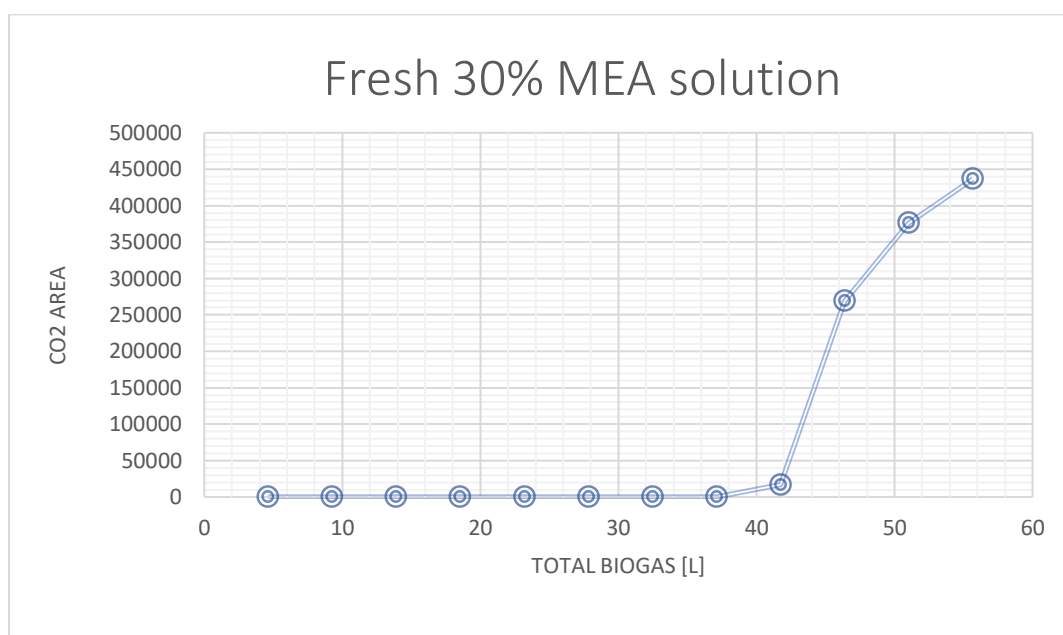
## 4.2 Μελέτη ικανότητας απορρόφησης CO<sub>2</sub> από 30% διάλυμα MEA

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

### 1. Για το φρέσκο διάλυμα MEA (30% MEA-70% H<sub>2</sub>O)

Όσον αφορά την κινητική του κορεσμού για το φρέσκο διάλυμα 30% MEA προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα κορεσμού:

Επέρχεται κορεσμός μετά το πέρας των 8 ωρών οπότε και έχουν διέλθει συνολικά 37,12 L βιοαερίου. Στο ακόλουθο διάγραμμα περιγράφεται η κινητική του κορεσμού.



Διάγραμμα 3 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη	Μονάδες	
37,12	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
$0,42 \times 37,12 =$		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διάλυτη		
15,5904	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
62,3616	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξεγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>148,48</b>	L biogas/L (30% MEA)	

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα:

Η συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι να επέλθει κορεσμός ισούται με 37,12 (L).

Για περιεκτικότητα βιοαερίου πριν την είσοδο της στήλης ίση με 42% CO<sub>2</sub>

Η ποσότητα CO<sub>2</sub> που πέρασε από τη στήλη είναι ίση με  $0,42 * 27,84 = 15,59 \text{ L CO}_2$ , η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα CO<sub>2</sub> που μπορεί να διέλθει μέσω της στήλης έως ότου να επέλθει ο κορεσμός στο διάλυμα των 0,25 L<sub>MEA</sub> περιεκτικότητας 30%MEA-70% H<sub>2</sub>O.

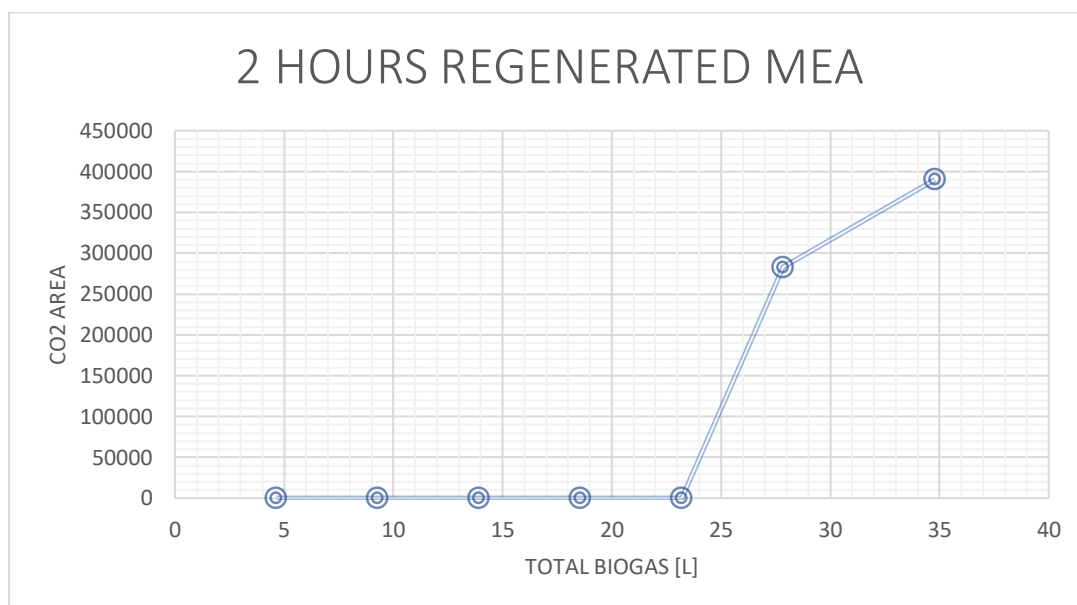
Επομένως με αναγωγή στο 1 L MEA προκύπτει  $62,3616 \text{ L(CO}_2\text{) / L(30\%MEA)}$

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

Οι παραπάνω υπολογισμοί επεξηγούν κάθε σχετικό πίνακα που εμφανίζεται στη συνέχεια.

## 2. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 4 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

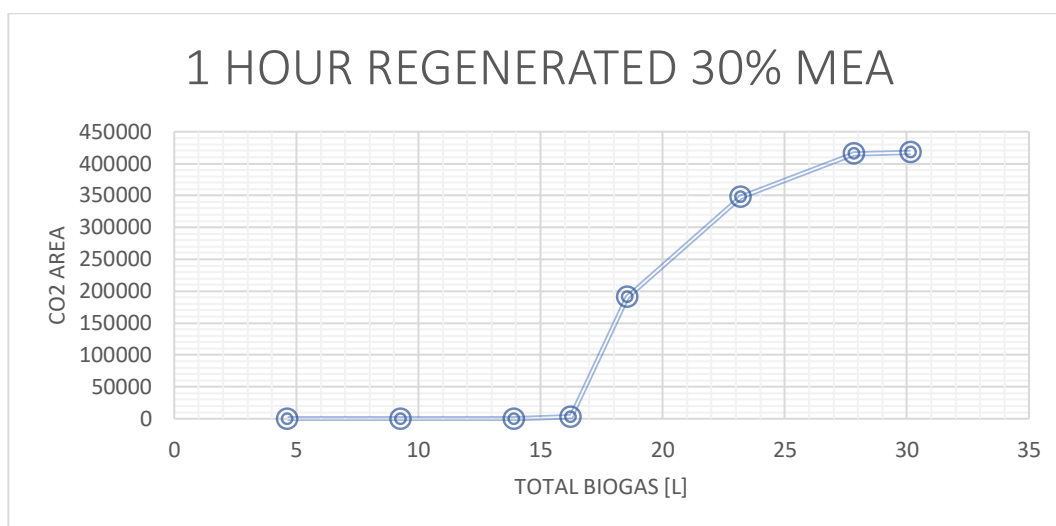
Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
27,84	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
11,69	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	



Με αναγωγή σε 1L διαλύματος ΜΕΑ		
	46,77	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%ΜΕΑ)
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>111,36</b>		L biogas/L (30% ΜΕΑ)

3. **Για το διάλυμα ΜΕΑ το οποίο αναγεννήθηκε μέσω βρασμού για χρονικό διάστημα 1 ώρας**

Παρατηρείται ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% ΜΕΑ σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

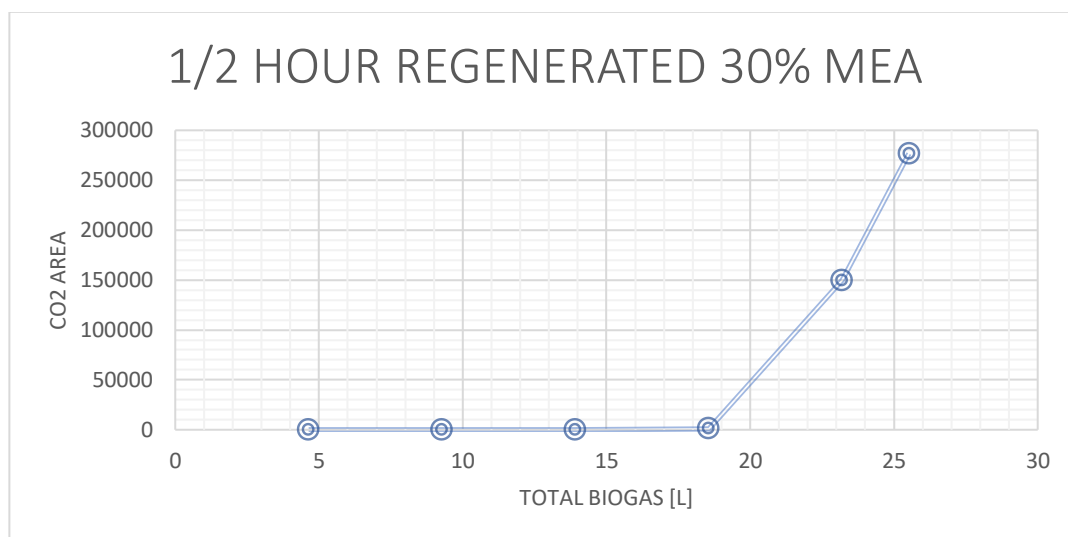


Διάγραμμα 5 . Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
13,92	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
5,8464	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L ΜΕΑ	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος ΜΕΑ		
23,3856	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%ΜΕΑ)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>55,68</b>	L biogas/L (30% ΜΕΑ)	

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

Παρατηρείται επίσης ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 6 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
13,92	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
5,8464	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
23,3856	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>55,68</b>	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.

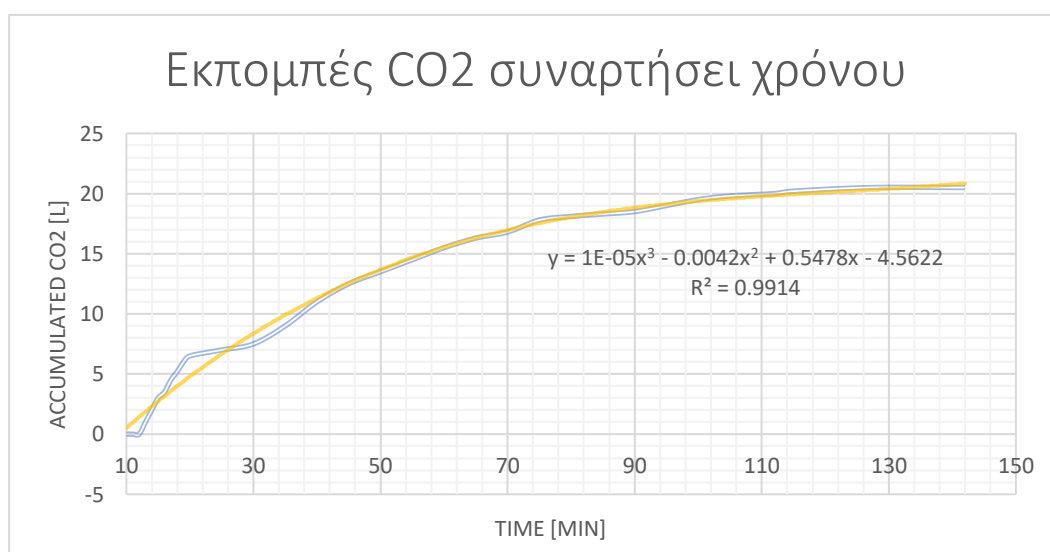
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για φρέσκα και αναγεννημένα για 30 λεπτά, 1 ώρα και 2 ώρες 30% διαλύματα MEA απεικονίζονται συνοπτικά στον συγκεντρωτικό πίνακα 6. Είναι εμφανές πως η χρονική διάρκεια 2 ωρών για την αναγέννηση του κορεσμένου διαλύματος αμίνης είναι η προτιμητέα.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης διαφορετικών χρόνων αναγέννησης κορεσμένου διαλύματος MEA

	Όγκος 30% διαλύματος MEA (L)	Χρόνος αναγέννησης (h)	Όγκος βιοαερίου μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη (L)	Όγκος επεξεργασμένου βιοαερίου/όγκο διαλύτη (L/L)
<b>30%διάλυμα MEA</b>	0.25	0 (φρέσκο)	37.12	148.48
		0.5	13.92	55.68
		1	13.92	55.68
		2	27.84	111.36

#### 4.2.2 Μέτρηση εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά την αναγέννηση του κορεσμένου υδατικού διαλύματος αμίνης

Αποδεικνύεται ότι για ποσότητα κορεσμένου διαλύματος MEA 250 mL το διάστημα 2 ωρών είναι ο βέλτιστος χρόνος αναγέννησης προκειμένου να απομακρυνθεί η ποσότητα CO<sub>2</sub> 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. Αντιθέτως, μια τέτοια αύξηση οδηγεί σε μεγαλύτερη δαπάνη ενέργειας καθώς και σε μεγαλύτερες απώλειες διαλύματος. Το διάγραμμα εκπομπών CO<sub>2</sub> συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζεται παρακάτω. Από το νόμο Γκαί-Λυσάκ (ή νόμος της ισοβαρούς μεταβολής), με παραδοχή ιδανικού αερίου για το CO<sub>2</sub>, προκύπτει ότι σε STP συνθήκες οι εκπομπές αντιστοιχούν σε 15,325 L



Διάγραμμα 7 . Εκπομπές CO<sub>2</sub> συναρτήσει του χρόνου σε αναγέννηση 2 ωρών

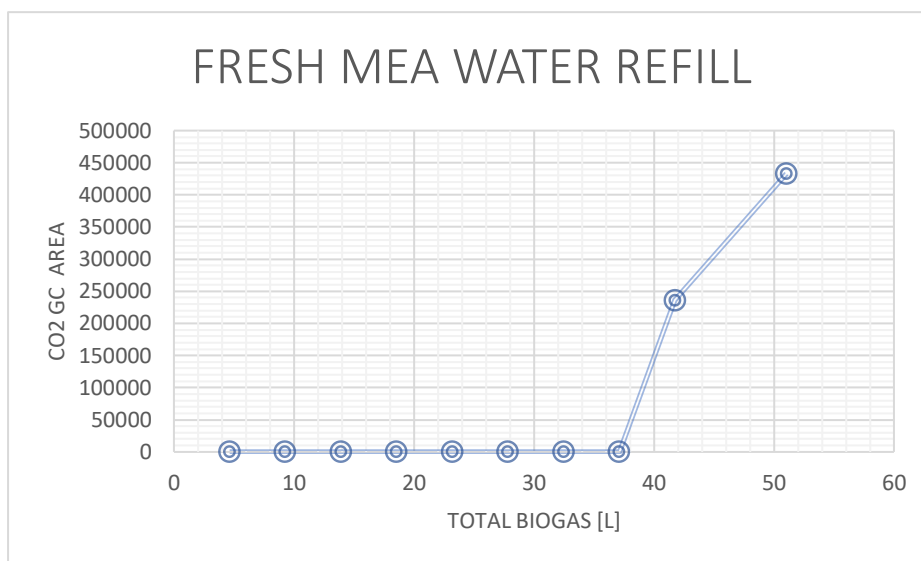
#### 4.2.3 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30%

ΜonoEthanolamine (MEA) με συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση νερού

Παρατίθενται τα διαγράμματα που περιγράφουν την κινητική κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) με συμπλήρωση των συνολικών απωλειών που λαμβάνουν χώρα τόσο στη στήλη απορρόφησης όσο και κατά τη διάρκεια της αναγέννησης με τη χρήση νερού καθώς και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί αποδεκτής ποσότητας βιοαερίου προς αναβάθμιση ανά λίτρο υδατικού διαλύματος αμίνης σε βάθος 5 κύκλων αναγέννησης.

##### 1. Για το φρέσκο διάλυμα MEA (30% MEA-70% H<sub>2</sub>O)

Παρατηρείται επίσης ότι στις 8 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



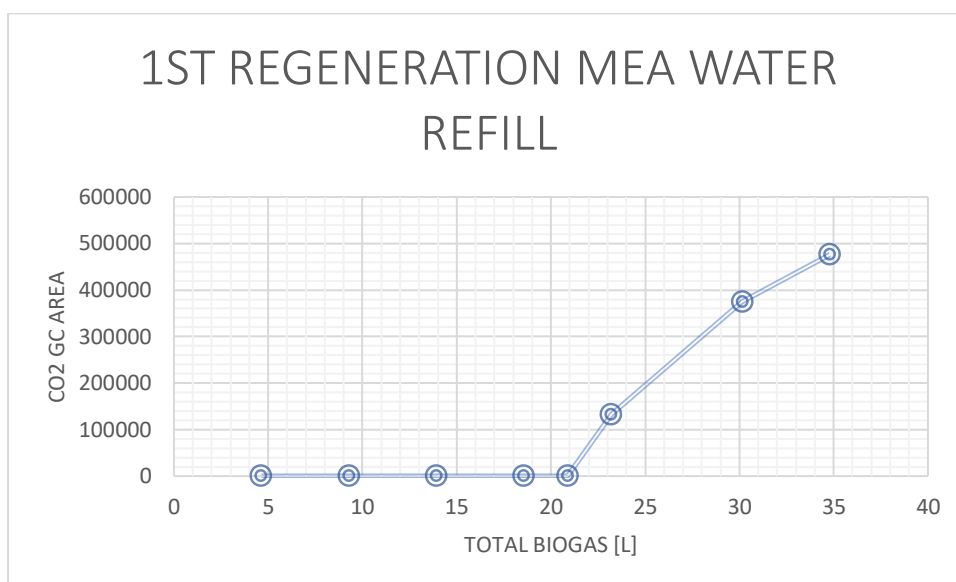
Διάγραμμα 8 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
37,12	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
15,59	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		

	0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA			
	62,36	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι			
<b>148,48</b>		L biogas/L (30% MEA)	

## 2. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 1<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται επίσης ότι στις 4,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



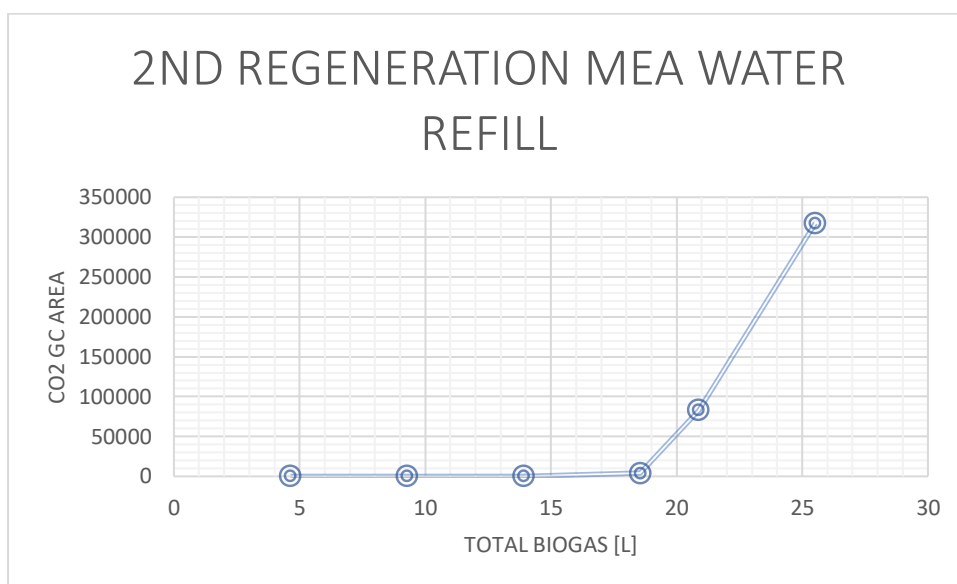
Διάγραμμα 9 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 1η φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
20,88	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
8,77	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
35,08	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>83,52</b>	L biogas/L (30% MEA)	

Παρατηρείται ότι κατά την πρώτη αναγέννηση του διαλύματος της αμίνης πέρασε μικρότερη ποσότητα βιοαερίου έως τον κορεσμό της. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις επικαθίσεις στο περιεχόμενο πληρωτικό υλικό στερεών σωματιδίων τα οποία είτε παρεμπόδιζαν την επαφή υγρού- αερίου είτε λειτουργούσαν παρεμποδιστικά στην διεργασία της απορρόφησης. Προκειμένου να απομακρυνθούν οι επικαθίσεις αυτές πριν την έναρξη του κάθε κύκλου πραγματοποιούνταν καταιονισμός της στήλης με νερό έως την πλήρη απομάκρυνση των ορατών αυτών επικαθίσεων.

### **3. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 2<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών**

Παρατηρείται επίσης ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

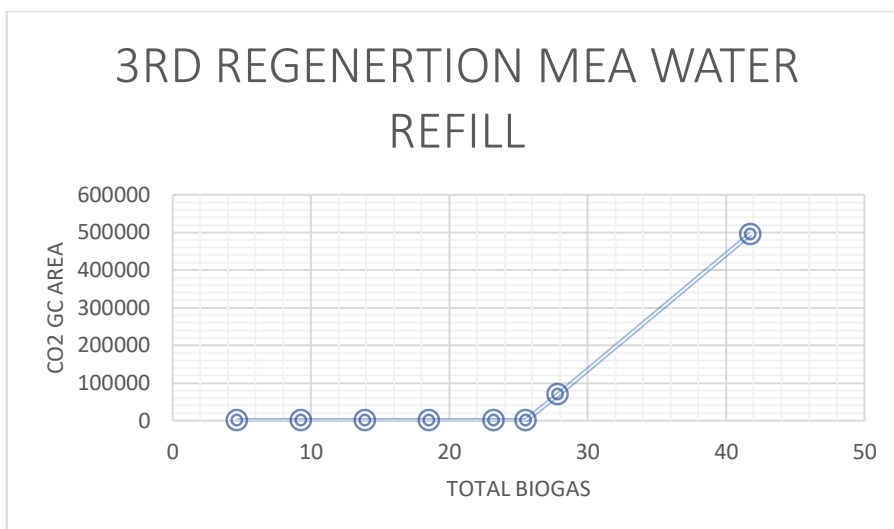


**Διάγραμμα 10** Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 2<sup>η</sup> φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
18,56	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
7,79	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
31,19	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>74,24</b>	L biogas/L (30% MEA)	

#### 4. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 3<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται επίσης ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



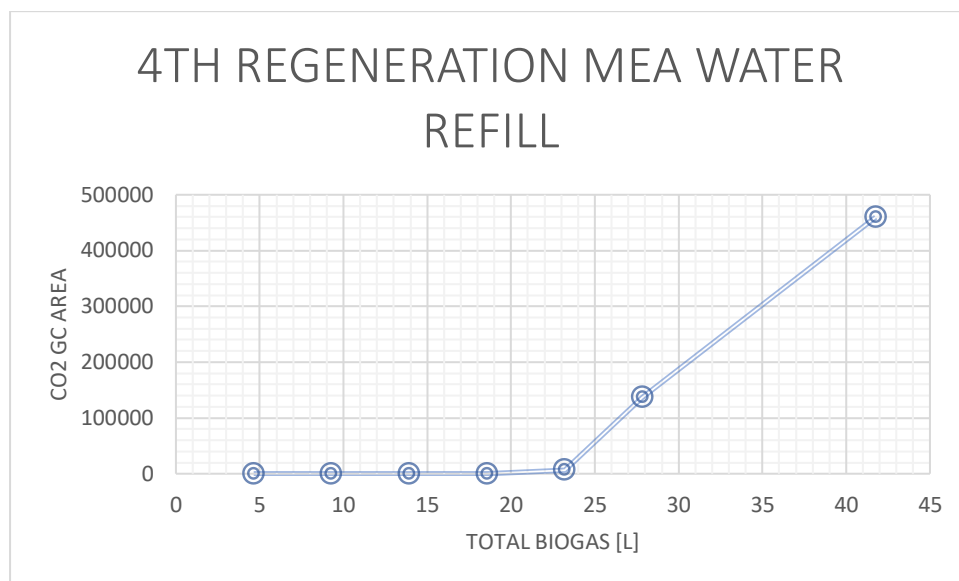
Διάγραμμα 11 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 3<sup>η</sup> φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
23,2	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
9,744	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
38,98	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>92,8</b>	L biogas/L (30% MEA)	

#### 5. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 4<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται επίσης ότι στις 4 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του

διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



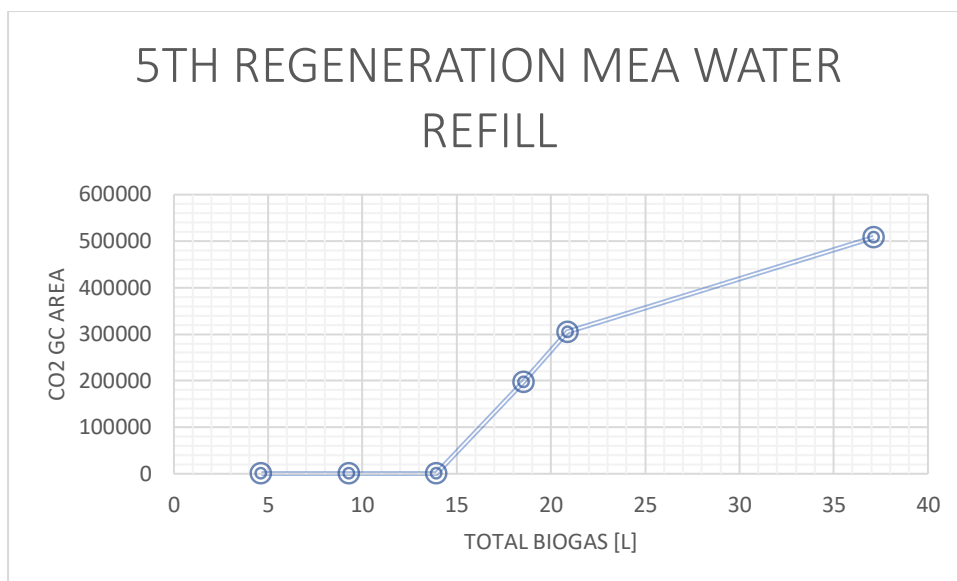
Διάγραμμα 12 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 4η φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
18,56	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
7,79	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
31,18	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξεγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>74,24</b>	L biogas/L (30% MEA)	

#### **6. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 5<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών**

Παρατηρείται επίσης ότι στις 3,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξεγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:





**Διάγραμμα 13 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 5η φορά αναγεννημένο 30% MEA**

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
13,92	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
5,85	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
23,39	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξεγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>55,68</b>	L biogas/L (30% MEA)	

Επομένως ο 6<sup>ος</sup> 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.

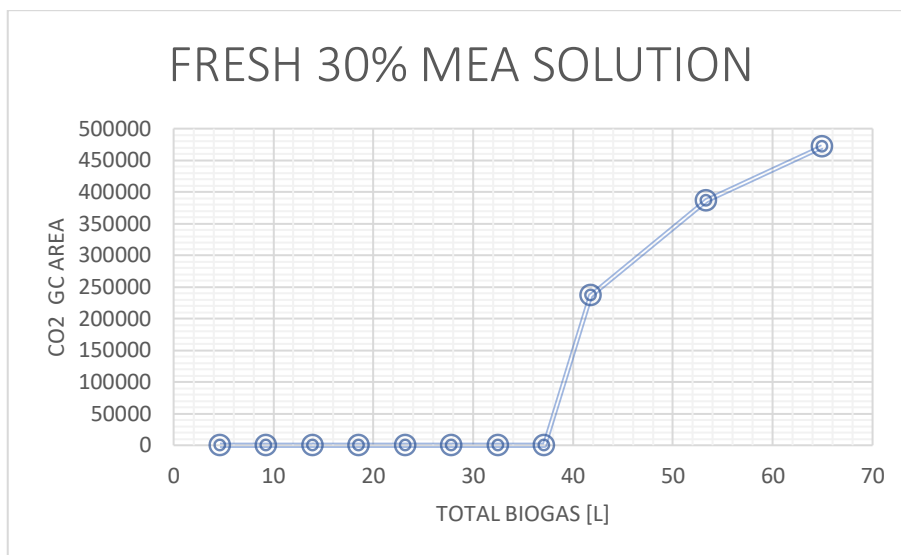
#### 4.2.4 Κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30%

ΜonoEthanolamine (MEA) με συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με τη χρήση υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) και καταιονισμό της στήλης απορρόφησης

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

### 1. Για το φρέσκο διάλυμα MEA (30% MEA-70% H<sub>2</sub>O)

Παρατηρείται ότι στις 8 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

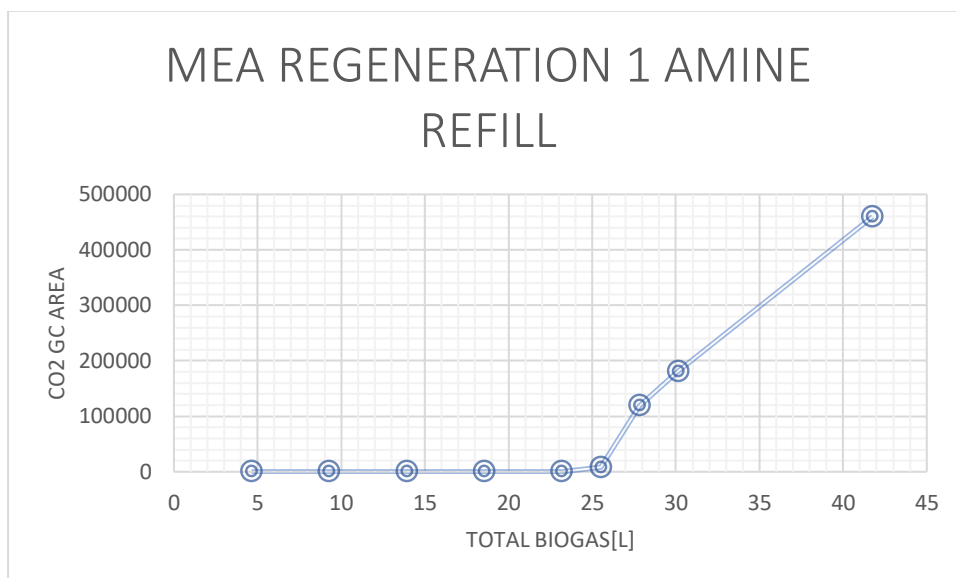


Διάγραμμα 14 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
37,12	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
15,59	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
62,36	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>148,48</b>	L biogas/L (30% MEA)	

### 2. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 1<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

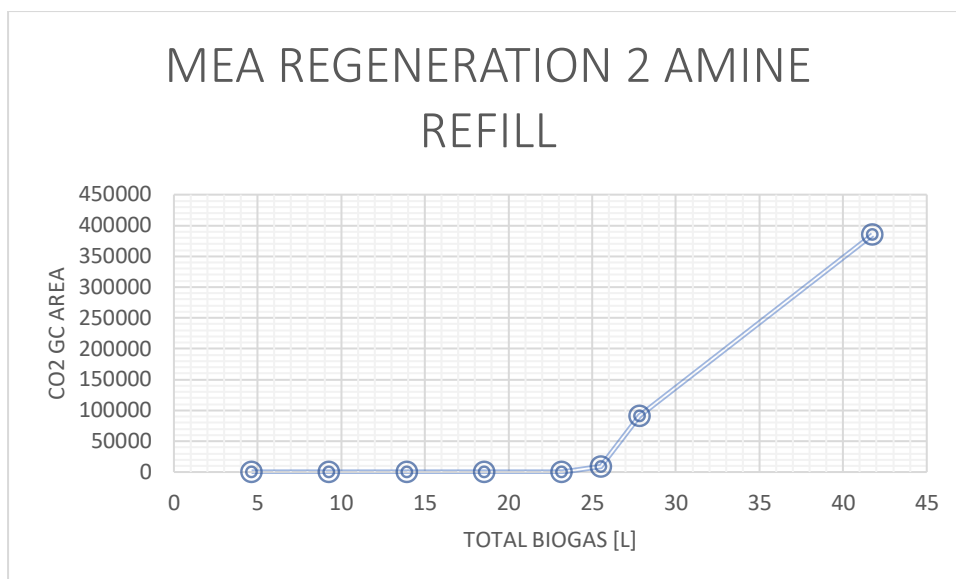


**Διάγραμμα 15 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 1η φορά αναγεννημένο 30% MEA**

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
23,2	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
9,74	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
38,98	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξεγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>92,8</b>	L biogas/L (30% MEA)	

### **3. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 2<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών**

Παρατηρείται ότι στις 5,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξεγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

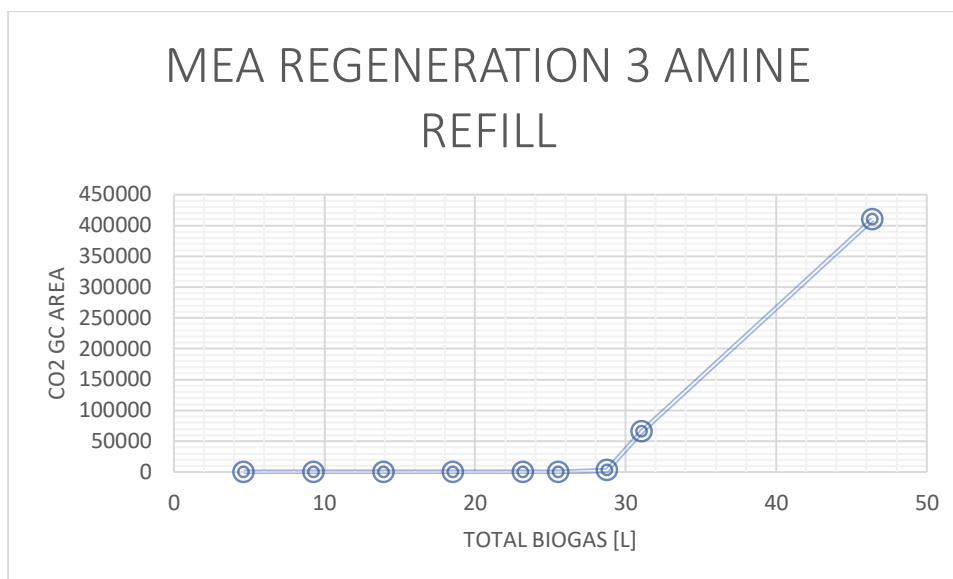


**Διάγραμμα 16 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 2η φορά αναγεννημένο 30% MEA**

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
23,2	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
9,74	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
38,98	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξεγεννήστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>92,8</b>	L biogas/L (30% MEA)	

#### **4. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 3<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών**

Παρατηρείται ότι στις 6 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξεγεννημένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

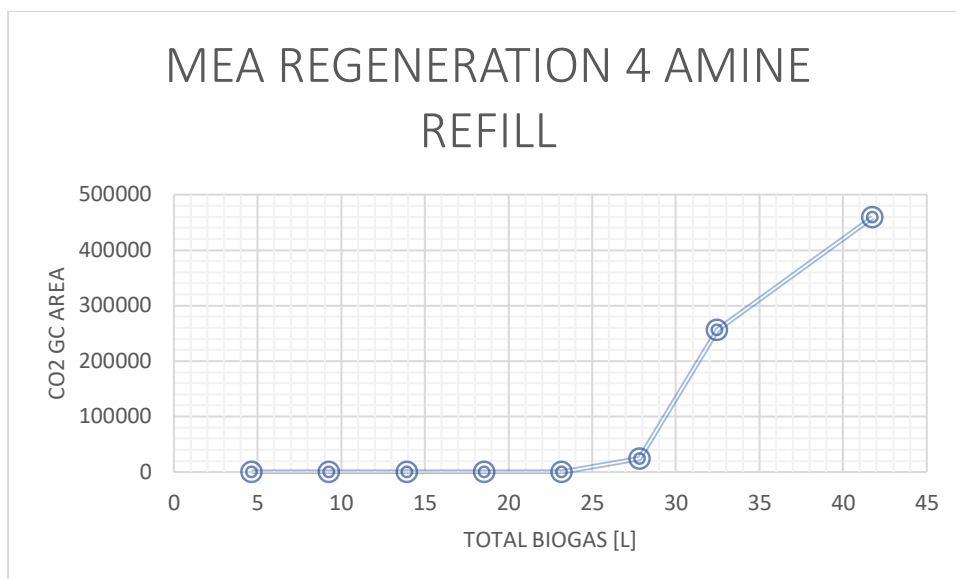


**Διάγραμμα 17** Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 3η φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
25,52	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,31		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
7,91	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
31,65	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>102,08</b>	L biogas/L (30% MEA)	

#### **5. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 4<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών**

Παρατηρείται ότι στις 5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:

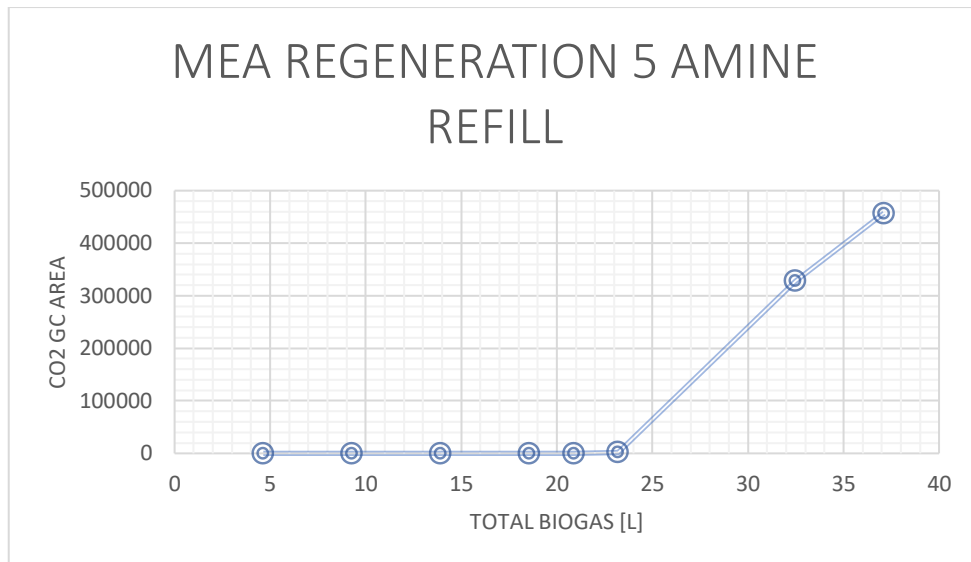


**Διάγραμμα 18** Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 4<sup>η</sup> φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
23,2	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
9,74	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
38,98	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>92,8</b>	L biogas/L (30% MEA)	

**6. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 5<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών**

Παρατηρείται ότι στις 4,5 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, επομένως έχει επέλθει μερικός κορεσμός του διαλύματος 30% MEA σε CO<sub>2</sub>. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



**Διάγραμμα 19** Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 5η φορά αναγεννημένο 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
20,88	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
8,77	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
35,07	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>83,52</b>	L biogas/L (30% MEA)	

Πίνακας 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αποδεκτής ποσότητας βιοαερίου προς αναβάθμιση σε 5 κύκλους αναγέννησης	Όγκος υδατικού διαλύματος 30%MEA (L)	Χρόνος Αναγέννησης (h)	Κύκλος Αναγέννησης	Όγκος επεξεργασμένου βιοαερίου/όγκο διαλύματος MEA (L/L) με συμπλήρωση απωλειών με χρήση φρέσκου διαλύματος 30% MEA	Όγκος επεξεργασμένου βιοαερίου/όγκο διαλύματος MEA (L/L) με συμπλήρωση απωλειών με χρήση νερού
<b>30% διάλυμα MEA</b>	0.25	0 (φρέσκο)	0	148.48	148.48
		2	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% MonoEthanolamine (MEA). Με άμεση σύγκριση του 5<sup>ου</sup> κύκλου αναγέννησης των δύο μεθόδων προκύπτει πως στην πρώτη περίπτωση είναι αποδεκτή κατά 27,84 L μεγαλύτερη ποσότητα βιοαερίου ανά λίτρο διαλύματος αμίνης.

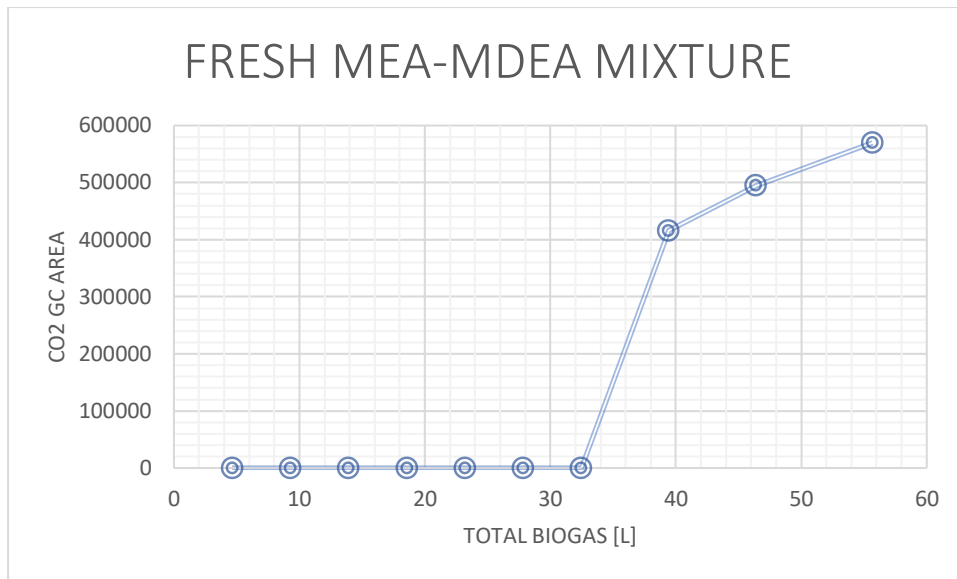
#### 4.3 Συγκριτική ανάλυση αναβάθμισης του βιοαερίου με τη χρήση μίγματος 15% MEA-15% MDEA και 30% Methyldiethanolamine (MDEA)

Από την κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 15% MonoEthanolamine (MEA)-15% Methyldiethanolamine (MDEA) καθώς και του 30% Methyldiethanolamine (MDEA) προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

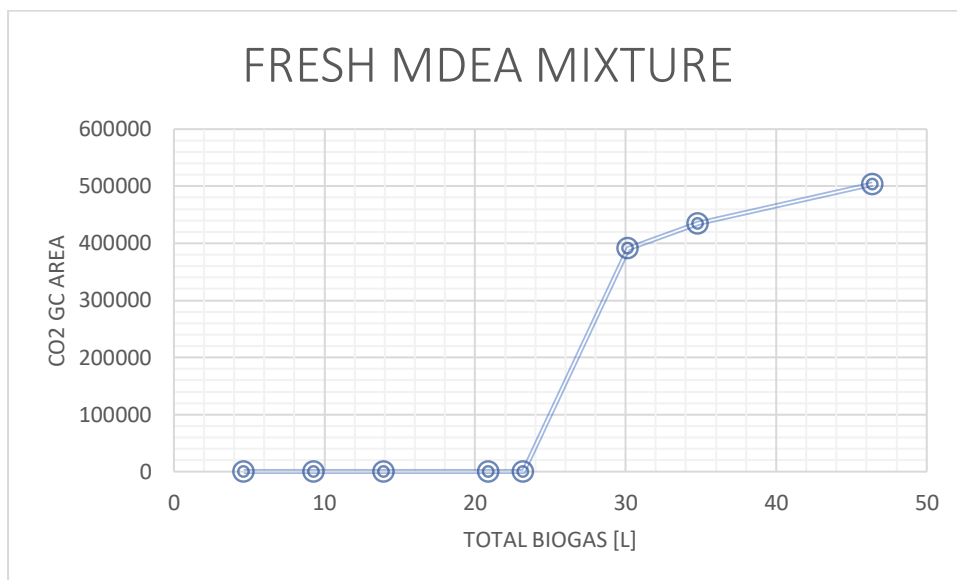
##### 1. Για το φρέσκο διάλυμα 15%MEA -15%MDEA και το φρέσκο διάλυμα 30% MDEA

Για τα φρέσκα διαλύματα προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα κορεσμού: Επέρχεται κορεσμός στο διάλυμα 15% MEA-15% MDEA μετά το πέρας των 6 ωρών οπότε και έχουν διέλθει συνολικά 27,84 L βιοαερίου και στις 4,5 ώρες για το διάλυμα MDEA οπότε και έχουν διέλθει συνολικά 23,2 L βιοαερίου. Στα ακόλουθα διαγράμματα περιγράφεται η κινητική του κορεσμού.





Διάγραμμα 20 . Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο διάλυμα MEA-MDEA



Διάγραμμα 21 . Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο φρέσκο διάλυμα MDEA

Πίνακας 8 Σύγκριση αποδεκτής ποσότητας βιοαερίου για διαφορετικά μίγματα διαλυτών

Αποδεκτή ποσότητα βιοαερίου από το διαλύτη	[ L βιοαερίου/ L διαλύτη]
<b>1. 30%MEA</b>	148,48
<b>2. 15% MEA-15% MDEA</b>	111,36
<b>3. 30% MDEA</b>	92,8

**2. Για το διάλυμα 15% MEA-15% MDEA καθώς και το 30% MDEA το οποίο αναγεννήθηκε για χρονική διάρκεια 2 ωρών για 1<sup>η</sup> φορά**

Επιπρόσθετα από τη σύγκριση των μεθόδων με τους διαφορετικούς διαλύτες οι οποίοι κορέστηκαν σε CO<sub>2</sub> και αναγεννήθηκαν στους 110°C για 1<sup>η</sup> φορά προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 9 Αποδεκτή ποσότητα βιοαερίου από 1η φορά αναγεννημένα διαφορετικά μίγματα αμινών

Αποδεκτή ποσότητα βιοαερίου από το διαλύτη που αναγεννήθηκε για 1 <sup>η</sup> φορά	[ L βιοαερίου/ L διαλύτη]
<b>1. 30%MEA</b>	92,8
<b>2. 15% MEA-15% MDEA</b>	72,24
<b>3. 30% MDEA</b>	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.

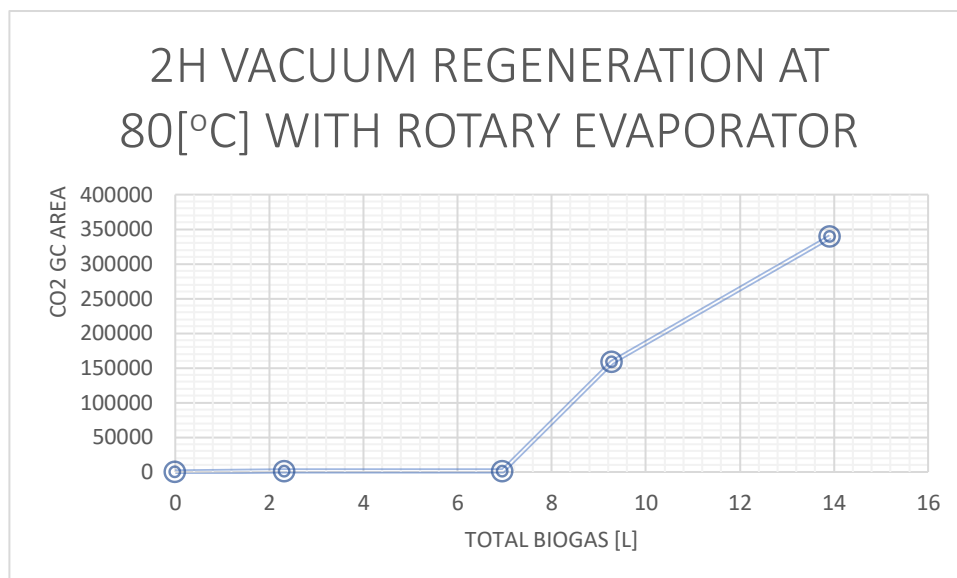
#### 4.4 Προοπτικές αναγέννησης κορεσμένου διαλύματος MEA υπό κενό

Οι προοπτικές αναγέννησης του κορεσμένου διαλύματος MEA διερευνήθηκαν με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διαδικασία της αναγέννησης του κορεσμένου διαλύματος. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η αρχική μέθοδος απαιτεί θερμοκρασία 110°C, η αναγέννηση υπό κενό με τη χρήση Rotary Evaporator επέτυχε βρασμό του κορεσμένου διαλύματος αμίνης σε θερμοκρασία 80°C και πίεση 2 bar. Για τη σύγκριση των 2 μεθόδων επιλέγεται το ίδιο χρονικό διάστημα αναγέννησης (2 ώρες).

Από την κινητική μελέτη κορεσμού του υδατικού διαλύματος 30% MonoEthanolamine (MEA) για χρονικό διάστημα 2 ωρών υπό κενό προέκυψαν τα ακόλουθα:

### 1. Για το διάλυμα MEA το οποίο αναγεννήθηκε 1<sup>η</sup> φορά για διάρκεια 2 ωρών

Παρατηρείται ότι στις 2 ώρες εντοπίζεται CO<sub>2</sub> στο εξευγενισμένο αέριο που εξέρχεται από τη στήλη. Το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 22 Συνολική ποσότητα βιοαερίου που πέρασε από τη στήλη έως ότου επέλθει κορεσμός στο 1<sup>η</sup> φορά αναγεννημένο υπό κενό 30% MEA

Συνολική ποσότητα βιοαερίου που διήλθε από τη στήλη μέχρι τον κορεσμό του διαλύτη σε CO <sub>2</sub>	Μονάδες	
9,28	L	
για 42% περιεκτικότητα σε CO <sub>2</sub> του βιοαερίου		
0,42		
Αποδεκτή ποσότητα CO <sub>2</sub> από το διαλύτη		
3,89	L(CO <sub>2</sub> )	
είναι 0,25 L διαλύματος		
0,25	L MEA	
Με αναγωγή σε 1L διαλύματος MEA		
15,59	L(CO <sub>2</sub> )/L(30%MEA)	
Επομένως η ποσότητα Βιοαερίου που εξευγενίστηκε/ποσότητα διαλύτη είναι		
<b>37,12</b>	L biogas/L (30% 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%).

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

### 4.5.1 Διαστάσεις εγκατάστασης πιλοτικής κλίμακας

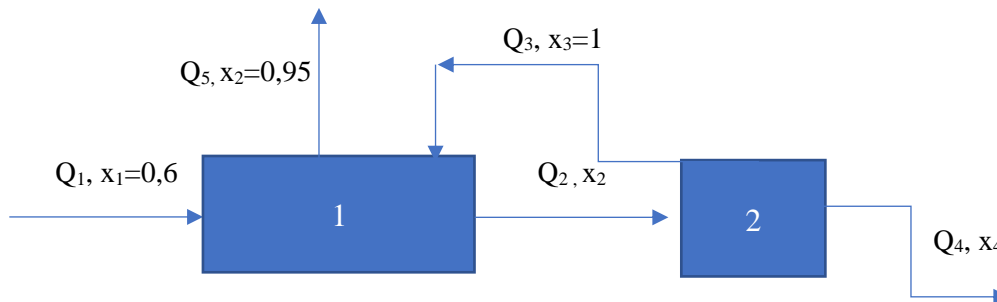
Για το σχεδιασμό της μονάδας πιλοτικής κλίμακας, θα ληφθεί υπόψη η χρήση του αναγεννημένου διαλύματος αμίνης σε συνδυασμό με την υψηλότερη παραγωγικότητα βιοαερίου που είναι ίση με 1 m<sup>3</sup>/ημέρα. Σύμφωνα με την Εξίσωση (19) 11,1 L αναγεννημένου διαλύματος MEA 30% είναι η αναγκαία ποσότητα για 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 εξευγενισμό του βιοαερίου.

#### 4.5.2 Προσδιορισμός της παροχής αντλίας ανακυκλοφορίας



Έστω  $Q_1$  η παροχή του βιοαερίου στην είσοδο του αεριοφυλακίου από τον αναερόβιο χωνευτήρα με συγκέντρωση μεθανίου  $x_1 = 0,6$ ,  $Q_2$  η παροχή εξόδου από το αεριοφυλάκιο και ταυτόχρονα παροχή εισόδου στην στήλη εξευγενισμού του βιοαερίου. Τότε είναι  $Q_4$  η θεωρητική «έξοδος» από τη στήλη εξευγενισμού με συγκέντρωση μεθανίου  $x_4=0$ , καθώς περιέχει αποκλειστικά  $CO_2$  το οποίο πρακτικά παρακρατάται εντός της στήλης, και  $Q_3$  το εξευγενισμένο 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 αεριοφυλακίου.

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) :

$$Q_1 = 0,05Q_2 + 0,631Q_1 \rightarrow 0,369Q_1 = 0,05Q_2, \text{ οπότε}$$

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

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  $307,5 \text{ L/hour}$ .

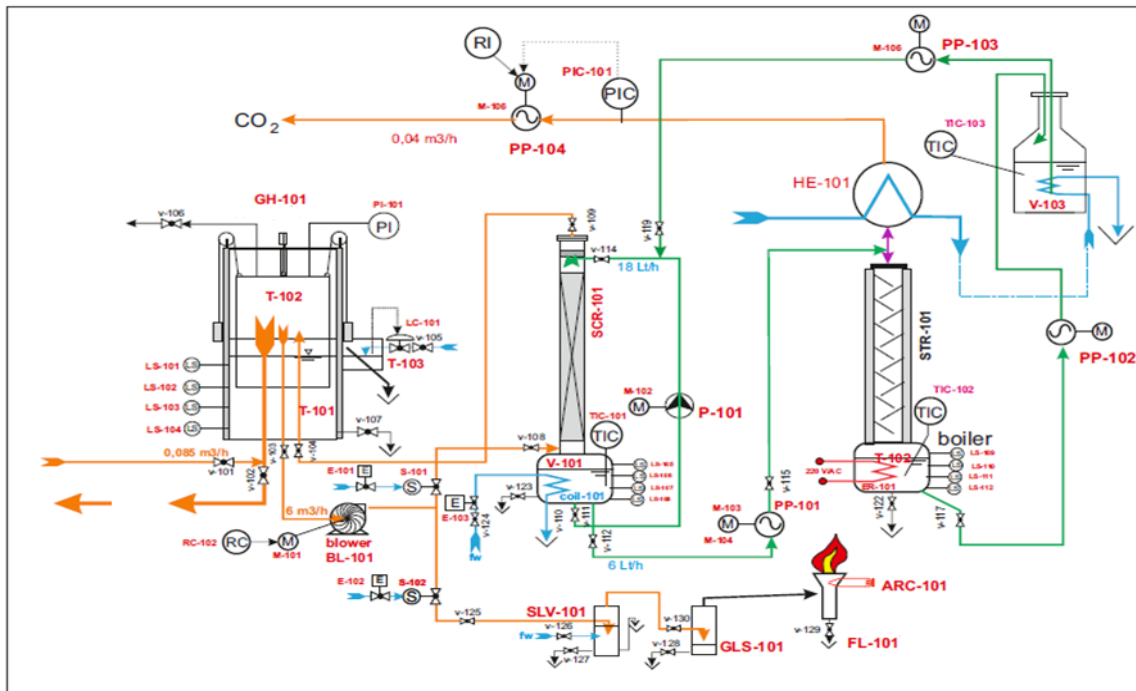
#### 4.6 Συνολικό Διάγραμμα Ροής της Διεργασίας (PID)

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  $2 \text{ m}^3$ . Το βιοαέριο θα οδηγηθεί από εκεί προς την 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  $30^\circ\text{C}$ . 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 στη στήλη αναγέννησης και ο αναγεννημένος διαλύτης θα χρησιμοποιηθεί για να γεμίσει την πλυντρίδα. Στη στήλη αναγέννησης, η θερμοκρασία του διαλύτη θα αυξηθεί μέχρι τους  $110^\circ\text{C}$  με τη χρήση θερμότητας που παράγεται από την εγκατεστημένη στη διάταξη αντίσταση. Η αυξημένη θερμοκρασία θα οδηγήσει στην απελευθέρωση του  $\text{CO}_2$  και την αναγέννηση του διαλύματος. Ένας συμπυκνωτής 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 (Ύψος: 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 το βιομεθάνιο στα 207 bar.

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



Εικόνα 30 PID πιλοτικής εγκατάστασης

#### 4.7 Διάταξη πιλοτικής κλίμακας

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, μετά την εξαγωγή των συμπερασμάτων, πραγματοποιήθηκε παραγγελία της διάταξης ημιβιομηχανικής κλίμακας για την αναβάθμιση του βιοαερίου. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το μεγαλύτερο τμήμα αυτής, δηλαδή το αεριοφυλάκιο κινητής οροφής, η στήλη απορρόφησης, η στήλη για απομάκρυνση υγρασίας και ο συμπιεστής.

Η πιλοτική αυτή εγκατάσταση στο ημιβιομηχανικό εργαστήριο της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π θα χρησιμοποιείται πλέον για τον ανεφοδιασμό απορριμματοφόρων του Δήμου Χαλανδρίου με βιομεθάνιο για την κίνησή τους.



Εικόνα 31 Αεριοφυλάκιο και στήλη χημικής απορρόφησης πιλοτικής εγκατάστασης αναβάθμισης βιοαερίου



Εικόνα 32 Στήλη απομάκρυνσης υγρασίας και συμπιεστής της πιλοτικής εγκατάστασης



## ΕΝΟΤΗΤΑ 5. Οικονομοτεχνική Ανάλυση Επενδυτικού έργου Αναβάθμισης βιοαερίου -Life Cycle Costing

### 5.1 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 βάσει 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.

### 5.2 Παραδοχές-Σενάριο

Το σενάριο που εξετάζεται αφορά το Δήμο Χαλανδρίου και συγκεκριμένα την υπόθεση ότι όλα τα απόβλητα κουζίνας των 33.000 νοικοκυριών και 7.600 επιχειρήσεων, δηλαδή μια ποσότητα 7.300 τόνων οργανικών αποβλήτων, ύστερα από την κατάλληλη προεργασία οδηγούνται σε αναερόβια χώνευση προς παραγωγή βιοαερίου. Έτσι προκύπτει η δυναμικότητα της μονάδας αναβάθμισης του βιοαερίου που παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

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).

Πίνακας 10 Παράμετροι LCC

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

### 5.3 Εκτίμηση για τα κόστη επένδυσης της μονάδας 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. [38]

$$C_{p,c} = C_{p,p} \left( \frac{I_c}{I_p} \right)$$

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

$$New\ cost = Original\ cost \left( \frac{new\ size}{original\ size} \right)^n$$

Όπου n είναι δείκτης κλίμακας στις παραγωγικότητας.

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. [21],[17]

Chemical Absorption

Πίνακας 11 CAPEX Χημικής απορρόφησης

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			<b>244.558,30</b>

Water Scrubbing

Πίνακας 12 CAPEX 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			<b>183.591,92</b>

PSA

Πίνακας 13 CAPEX PSA

Εξοπλισμός μονάδας αναβάθμισης βιοαερίου	Κόστος εξοπλισμού, CAPEX		
	Euros € (2008)	Euros € (2018)	Euros € (2018) και νέα δυναμικότητα
CO <sub>2</sub> 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			<b>471.103,80</b>

## Cryogenic Separation

Πίνακας 14 CAPEX Κρυογενικού διαχωρισμού

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			<b>629.408,53</b>

## Membrane separation

Πίνακας 15 CAPEX Διαχωρισμού με μεμβράνες

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			<b>161.422,33</b>

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 στις Κρυογενικής τεχνολογίας (Cryogenic separation).

## 5.4 Εκτίμηση για τα λειτουργικά κόστη (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 στις αντίστοιχες προσαρμογές, χρονικές και δυναμικότητας, που αναφέρθηκαν προηγουμένως για κάθε τεχνική αναβάθμισης του βιοαερίου.

Πίνακας 16 OPEX Διαφορετικών τεχνικών αναβάθμισης βιοαερίου

Τεχνική αναβάθμισης βιοαερίου	Λειτουργικά κόστη ( Operating costs)					
	Μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [kWh/m <sup>3</sup> ]	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας [€/yr]	Επιπρόσθετα κόστη στις 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	<b>60.193,07</b>
Water scrubbing	0.22	20.776,91	3.209,54	10.784,62	13.846,36	<b>48.617,43</b>
PSA	0.31	29.276,56	4.483,36	9.585,91	7.777,47	<b>51.123,30</b>
Cryogenic Separation	0.76	71.774,79	-	10.185,27	94.099,03	<b>176.059,09</b>
Membrane Separation	0.25	23.610,13	-	10.185,27	16.788,86	<b>50.584,26</b>

Από τα δεδομένα στις 1<sup>η</sup> στήλης προκύπτει το κόστος στις ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζεται στη 2<sup>η</sup> 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 στις Φυσικής απορρόφησης με χρήση απορροφητικού μέσου το νερό (Water Scrubbing), ενώ αντίθετα η πιο δαπανηρή είναι αυτή στις Κρυογενικής τεχνολογίας (Cryogenic separation).

#### Παραδοχές

- Ως κόστος στις 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 : Στις εργαζόμενος
- Η αρχική δυναμικότητα στις μονάδας είναι:  $122,51 * 1,1 = 134,761 \text{ m}^3/\text{h}$  (Υπολογισμένος στις συντελεστής ασφαλείας 10%).
- Μάζα οργανικών αποβλήτων ανά χρόνο = 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:

$$PV = A_0 \times \frac{(1 + r)^n - 1}{r(1 + r)^n}$$

Όπου:

- $A_0$  : Ετήσιο εισόδημα
- PV: Παρούσα αξία
- r: Επιτόκιο
- n: έτη

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

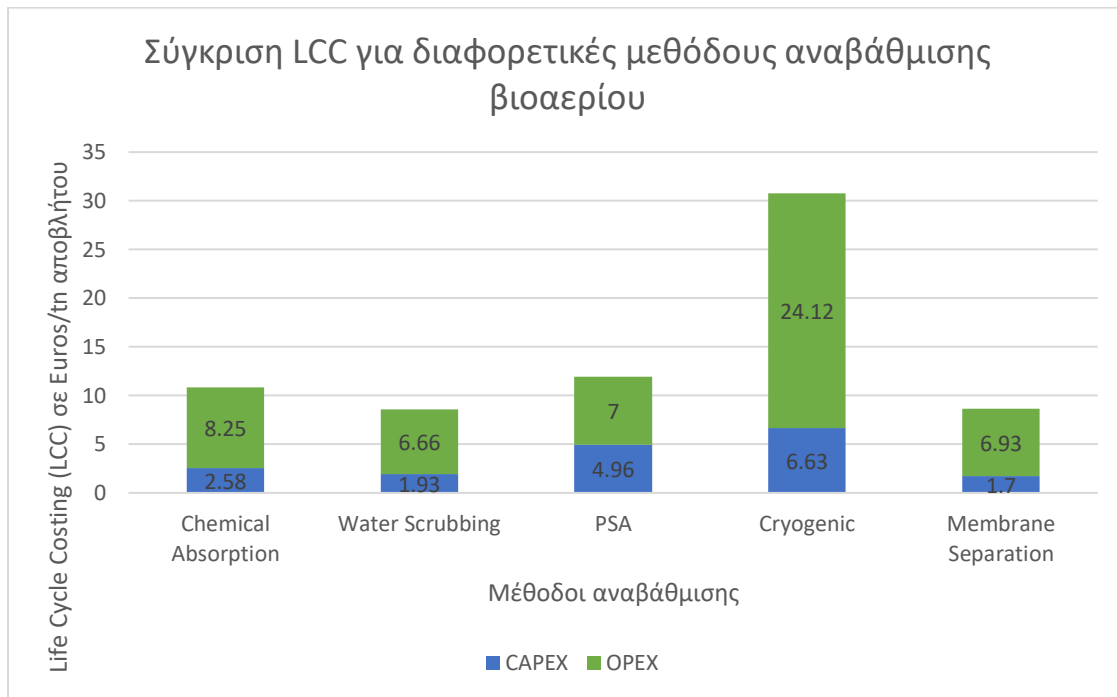
#### 5.5 LCC για στις διαφορετικές τεχνικές εξευγενισμού

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

Πίνακας 17 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα LCC διαφορετικών μεθόδων

Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Life Cycle Costing (LCC)		
	Total CAPEX [€/tn]	Total OPEX [€/tn]	LCC [€/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 23 Σύγκριση αποτελεσμάτων LCC διαφορετικών μεθόδων αναβάθμισης βιοαερίου

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

## 5.6 Ανάλυση Ευαισθησίας

Ο τύπος που ποσοτικοποιεί την εξάρτηση στις τιμές από τη συγκεκριμένη παράμετρο ελέγχου είναι ο ακόλουθος:

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

### 5.6.1 Επιτόκιο αναγωγής ( Interest rate)

Πίνακας 18 Ανάλυση ευαισθησίας ως στις επιτόκιο αναγωγής

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

### 5.6.2 Χρόνος ζωής (Depreciation period in Years)

Πίνακας 19 Ανάλυση ευαισθησίας ως στις χρόνο ζωής έργου

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



### 5.6.3 Δυναμικότητα

Πίνακας 20 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη δυναμικότητα

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

Προκύπτει ότι μεγαλύτερη επιρροή στην τιμή στις 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 στις Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής με την διάρκεια ζωής στις 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 21 Ανάλυση ευαισθησίας ως στις δυναμικότητα για συχνά συναντώμενες ροές στη βιομηχανία

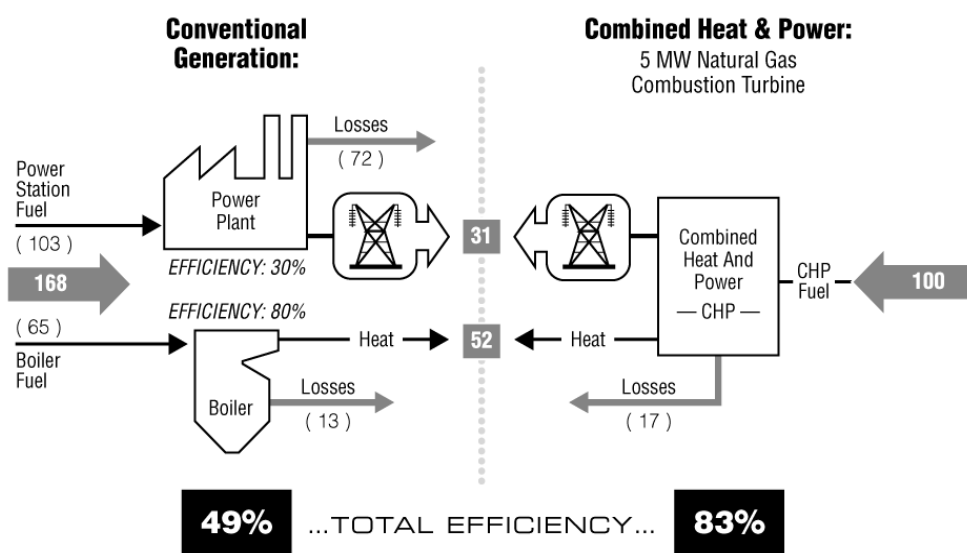
Διαφορετικές μέθοδοι αναβάθμισης βιοαερίου	Ανάλυση ευαισθησίας LCC ως στις τη δυναμικότητα			
	134,761 m <sup>3</sup> /h	75 m <sup>3</sup> /h	250 m <sup>3</sup> /h	500 m <sup>3</sup> /h
Chemical Absorption	10,82	7,53	16,27	26,39
Water Scrubbing	<b>8,59</b>	5,94	<b>13,22</b>	<b>22,32</b>
PSA	11,96	8,03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

## ΕΝΟΤΗΤΑ 6. Συμπαγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας- Combined Heat and Power (CHP)

### 6.1 Εισαγωγή στη μέθοδο 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 στις μεγάλες ποσότητες ρύπων που εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα για τη μεταφορά στις 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 (συμπαγωγής) θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστό και ως CHP. [35]

Ως συμπαγωγή 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 συμπαγωγή (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.



Εικόνα 33 Σύγκριση CHP με συμβατική μέθοδο

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

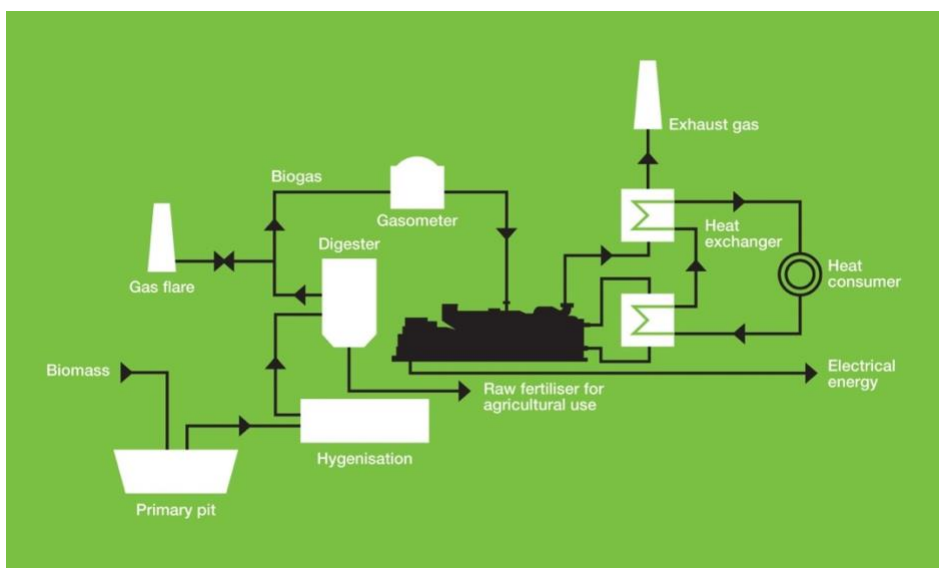
σύγχρονο σύστημα CHP μπορεί να λειτουργήσει σε θερμική απόδοση από 60 έως 80 τοις εκατό (ή περισσότερο) σε σχέση με τη χωριστή παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας η οποία λειτουργεί κυρίως με απόδοση γενικά κάτω από 50 τοις εκατό. Μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση επιφέρει εξοικονόμηση στο καύσιμο 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 διαστασιολογούνται έτσι ώστε να καλύπτουν το θερμικό 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.



Εικόνα 34 Τυπικό διάγραμμα ροής CHP

## 6.2 Τεχνοοικονομική ανάλυση CHP

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

Πίνακας 22 Ενεργειακά φορτία διαφόρων καυσίμων

Vehicle fuel	Energy content [kWh]
1 Nm <sup>3</sup> upgraded biogas (97 % methane)	9.67
1 Nm <sup>3</sup> 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)

Sources: Energinet.dk, [www.energinet.dk](http://www.energinet.dk), 2011-02-15  
Preem, [www.preem.se](http://www.preem.se), 2011-02-15

Από βιβλιογραφική αναζήτηση [33] προκύπτουν οι ακόλουθες εκτιμήσεις κόστους επένδυσης και λειτουργίας για μονάδα CHP:

Πίνακας 23 Κόστη CHP

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

Συνυπολογίζοντας τις απαραίτητες προσαρμογές βάσει της ίδιας υπόθεσης εργασίας:

Πίνακας 24 Παραδοχές LCC για CHP

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

προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με το Life Cycle Cost της μονάδας συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας ως εξής:

Η δυναμικότητα 134,761 m<sup>3</sup>/h αντιστοιχεί σε:

$$13,761 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/d} \times 365 \text{ d/yr} = 1.180.506,36 \text{ m}^3/\text{yr}$$

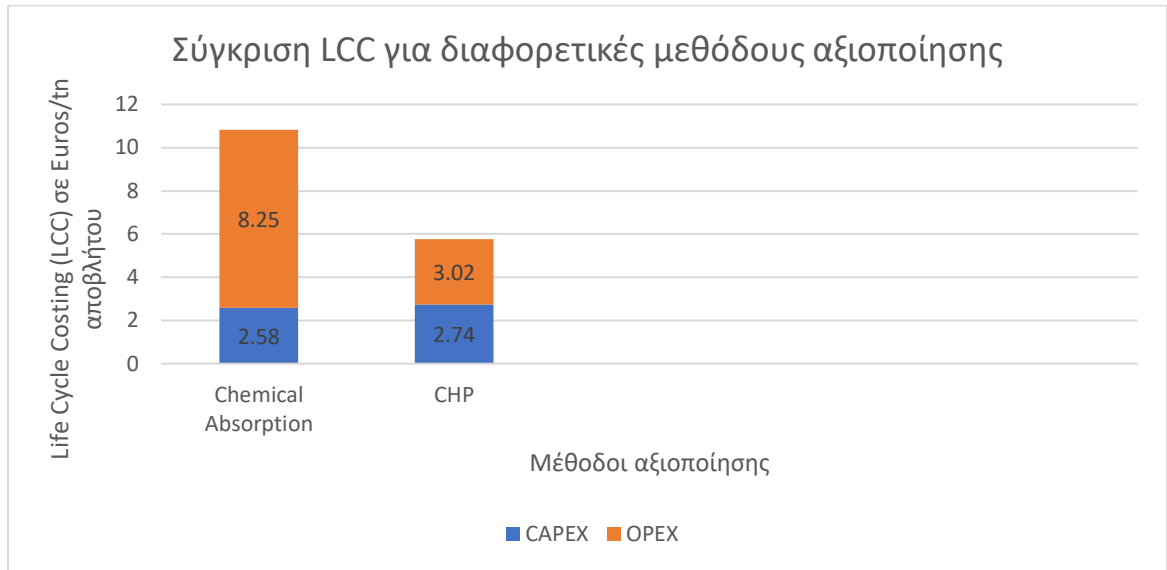
με ενεργειακό φορτίο 0.011 MWh/m<sup>3</sup> βιοαερίου προκύπτει ποσό ενέργειας 12.985,57 MWh σε 1 έτος.

Επομένως υπολογίζονται τα κόστη επένδυσης σε ορίζοντα 20ετίας αλλά και τα ετήσια λειτουργικά κόστη από τα βιβλιογραφικά δεδομένα του Πίνακα 22. Τέλος υπολογίζεται το LCC με βάση την ίδια υπόθεση παραγωγής οργανικών αποβλήτων ύψους 7300 [tn/yr]

Πίνακας 25 Αποτελέσματα LCC για CHP

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

Προκύπτει 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. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



**Διάγραμμα 24 Σύγκριση LCC μεταξύ CHP και χημικής απορρόφησης**

## Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το βιοαέριο αποτελεί μια ανερχόμενη εναλλακτική πηγή ενέργειας, με ανοδική τάση στην Ευρώπη. Η αναερόβια χώνευση οικιακών αποβλήτων προς παραγωγή αυτού και κατόπιν η αναβάθμισή του σε βιομεθάνιο το καθιστά κατάλληλο για χρήση ως αέριο κίνησης, διαδικασία που συμβαδίζει με τα σύγχρονα πρότυπα της κυκλικής οικονομίας. Η μέθοδος χημικής απορρόφησης είναι εκείνη που συνδυάζει την ικανοποίηση των απαιτήσεων του τελικού προϊόντος (καθαρότητα 97-99%) αυτών για ελάχιστες απώλειες μεθανίου (<0.1) σε ικανοποιητικό κόστος.

Σε πιλοτική κλίμακα και για τη ροή τροφοδοσίας που εξασφαλίζεται από την αναερόβια χώνευση του FORBI στον αντιδραστήρα CSTR 4m<sup>3</sup>, η μέθοδος χημικής απορρόφησης κατά αντιρροή δεν είναι εφικτή. Επομένως επιλέγεται η μέθοδος στήλης-φουσαλίδων.

Προέκυψε ότι το υδατικό διάλυμα 30% MEA είναι ο πιο αποτελεσματικός διαλύτης για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> συγκριτικά με τα διαλύματα 15% MEA-15% MDEA, 30% MDEA.

Επιπλέον, το χρονικό διάστημα 2 ωρών είναι ο βέλτιστος χρόνος αναγέννησης σε θερμοκρασία 110°C ενώ με καταιονισμό της στήλης απορρόφησης και συμπλήρωση των συνολικών απωλειών με χρήση διαλύματος αμίνης καθίστανται λειτουργικοί 5 κύκλοι αναγέννησης με επιτυχή εξευγενισμό από 148,48 έως 92,8 L βιοαερίου ανά L διαλύτη. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την αναγέννηση 250mL υδατικού διαλύματος MEA ανέρχονται σε 15,325L (STP).

Η αναγέννηση κορεσμένων διαλυμάτων αμίνης υπό κενό με τη χρήση rotary evaporator δεν είναι ικανοποιητική.

Σχετικά μέθοδο χημικής απορρόφησης και για ροή 134,7m<sup>3</sup>/h υπολογίστηκε κόστος ύψους 10,82 €/tn οικιακών αποβλήτων. Πιο οικονομικές μέθοδοι αποδείχθηκαν το water scrubbing (8,59€/tn) και ο διαχωρισμός μέσω μεμβρανών (8,63€/tn) ενώ ακριβότερη η κρυογενική μέθοδος (30,75€/tn). Από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι μεγαλύτερη επίδραση στην τιμή της Κοστολόγησης του Κύκλου Ζωής έχει η κλίμακα παραγωγής (δυναμικότητα).

Η συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (CHP) είναι, όπως αναμενόταν, λιγότερο κοστοβόρα μέθοδος αξιοποίησης του βιοαερίου. Ωστόσο οι ανάγκες που καλύπτει είναι διαφορετικές.

Σχετικά με τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα, κυριότερο σημείο αναφοράς αποτελούν τα πειράματα στην μονάδα πιλοτικής κλίμακας, ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία και πίεση), ιδιαίτερα κατά την αναγέννηση των κορεσμένων διαλυμάτων αμίνης με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Άξια μελέτης αποτελεί και η μελέτη του εξευγενισμού μέσω μικροβιακών διεργασιών με χρήση μεθανογόνων μικροοργανισμών με εξωτερική πηγή H<sub>2</sub>. Τέλος, θα ήταν ωφέλιμη η σύγκριση των αέριων εκπομπών μεταξύ συμβατικών οχημάτων και αυτών που έχουν μετατραπεί ώστε να χρησιμοποιούν bio-CNG.

## Βιβλιογραφία

1. *Ελληνική Εταιρία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων* . (2018, Σεπτέμβριος 6).  
Ανάκτηση από [www.eedsa.gr](http://www.eedsa.gr): <http://www.eedsa.gr/>
2. AEBIOM. European Biomass Association. *A Biogas Road Map for Europe*. 2012.  
Available <http://www.aebiom.org/?p=231#more-231>
3. ISWA – the International Solid Waste Association. *Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report. Statistics*, 6th Edition. Working Group on Energy Recovery, August 2012.
4. Κατσανεβάκης Ι. Μαλαμάκης Α. Περκουλίδης Γ. Τσατσαρέλης Θ. . *Αξιοποίηση Αστικών Στερεών Αποβλήτων από την ενεργειακή σκοπιά και οι προοπτικές εφαρμογής στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας*. Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010.
5. D.J. Batstone, J. K. *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*. 2002
6. Kamn, D. B.. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. 2008
7. Mata-Alvarez, J. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London: IWA publishing. 2003
8. Nicolae Scarlat, J.-F. D. . *Biogas: developments and perspectives in Europe*. 2018
9. Persson, M. . *Evaluation of Upgrading Techniques for Biogas*. 2003.
10. W. Gujer, A. J.. *Conversion Processes in Anaerobic Digestion* . 1983.
11. Waste4Think. Ανάκτηση από <https://waste4think.eu/halandri>. 2015
12. Waste4Think. *Moving towards Life Cycle Thinking by integrating Advanced Waste Management Systems*. 2015.
13. [www.halandri.gr](http://www.halandri.gr). (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://www.halandri.gr/yphresies/perivallon-aeiforia/waste4think/>
14. Παππά, Α. . *Φυσικές μέθοδοι ανάλυσης : Χρωματογραφικές , Θερμικές , Ηλεκτρομετρικές Μέθοδοι , Φασματομετρία Μάζας*. Αθήνα : Ε.Μ.Π. 2004.
15. Γεράσιμος Λυμπεράτος, Δημήτριος Βαγενάς. *Διαχείριση υγρών αποβλήτων* . Αθήνα : Τζιόλα. 2016.
16. Α.Βλυσσίδης, Ε.Γρηγοροπούλου, Γ.Λυμπεράτος. *Περιβαλλοντική μηχανική* . Αθήνα : Ε.Μ.Π, 2018.
17. J. de Hullu, J.I.W Maassen, P.A van Meel. *Comparing different biogas upgrading techniques*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2008



18. Klaus Hjuler, Nabin Aryal. *Review of Biogas Upgrading*. September 2017.
19. Bauer, Hulteberg, Persson, Tamm. *Biogas upgrading-review of commercial technologies*. 2013.
20. Persson, M.. *Evaluation of Upgrading Techniques for Biogas*. 2003. Available [www.sgc.se/dokument/Evaluation.pdf](http://www.sgc.se/dokument/Evaluation.pdf) .
21. Urban, W., Girod, K., Lohmann, H.,. *Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008*. 123 s. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen (German). 2009.
22. Adam Raphael Samuel. *BIOGAS UPGRADING AND SOLVENT REGENERATION IN MONOETHANOLAMINE AND IONIC LIQUIDS FOR CARBON DIOXIDE UTILIZATION*. University of Sheffield. December, 2014.
23. <https://www.ketek.gr/el/services/cyclical>
24. Dipl.-Ing. Onkar Dixit. *Upgrading Biogas to Biomethane Using Absorption*. Dresden, 2015.
25. Mata-Alvarez, Joan. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. London : IWA publishing, 2003.
26. D.J. Batstone, J. Keller\*, I. Angelidaki, S.V. Kalyuzhnyi, S.G. Pavlostathis, A. Rozzi, W.T.M. Sanders, H. Siegrist and V.A. Vavilin. *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*. 2002.
27. Gerardi, Michael H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. 2003.
28. W. Gujer, A. J. B. Zehnder. *Conversion Processes in Anaerobic Digestion* . 1983.
29. Hierholtzer, Anthony. *Investigating Factors Affecting the Anaerobic Digestion*. 2013.
30. J. A. Eastman, J. F. Ferguson. *Solubilization of Particulate Organic Carbon During the Acid Phase of Anaerobic Digestion*. 1981, Water Pollution Control Federation.
31. UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. (n.d.). *Biogas to biomethane*. Retrieved from <https://www.biogas-to-biomethane.com/Download/BTB.pdf>
32. Katie Elizabeth, Hannah Warren. *A techno-economic comparison of biogas upgrading technologies in Europe* . 2012.
33. Börjesson, M.; Ahlgren, E. O. *Cost-effective biogas utilisation – A modelling assessment of gas infrastructural options in a regional energy*. 2012
34. Hanne Wasmuth Brendeløkken. *Upgrading Technologies for Biogas Production Plants*. June 2016
35. Χ. Φραγκόπουλος, Η. Καρυδογιάννης, Γ. Καραλής. *Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας*, s.l. : Έκδοση από Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, ΕΛΚΕΠΑ, 1994
36. Rau' l Mun' oz . Leslie Meier . Israel Diaz .David Jeison . *A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading*, September 2015

37. Vo TT, Xia A, Rogan F, Wall DM, Murphy JD. *Sustainability assessment of large-scale storage technologies for surplus electricity using group multi-criteria decision analysis*. Clean Technol Environ Policy 1–15
38. Truc T.Q. Voa,b, David M. Walla,b, Denis Ringb, Karthik Rajendrana,b, Jerry D. Murphya. *Techno-economic analysis of biogas upgrading via amine scrubber, carbon capture and ex-situ methanation*,b. 2017
39. Eurostat. available at: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main\\_Page/el](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page/el)
40. Σιούλας, Κωνσταντίνος. *Εγχειρίδιο Βιοαερίου*. s.l. : Biogas for Eastern Europe, 2008.
41. Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, Jones DL. *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. 2008.
42. European Biogas Association. *european-biogas.eu*. . s.l. : Ανάκτηση από <http://european-biogas.eu/>, 2016.
43. Vavilin. *Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: an overview*. 2008.
44. I. Angelidaki, L.Treua et al. .*Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives*. 2018.
45. Department of Trade and Industry. *Meeting the Energy Challenge A White Paper on Energy*. May 2007.