

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Χημικών Μηχανικών
Τομέας Ι: Τομέας Χημικών Επιστημών
Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας



Διπλωματική Εργασία

**«Μελέτη συστήματος φυσικοχημικής και ενζυμικής
συγκράτησης αέριων εκπομπών πλούσιων σε CO₂»**

Μπουλαμάτσης Κωνσταντίνος

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Κωνσταντίνα Κόλλια

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Τομέας Χημικών Επιστημών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα Κόλλια Κωνσταντίνα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα, το οποίο μου έδωσε τη δυνατότητα να διευρύνω τις γνώσεις μου σχετικά με τις περιβαλλοντικές προκλήσεις και τις σύγχρονες μεθόδους αντιμετώπισής τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη Δήμητρα Μπαγάκη, Χημικό Μηχανικό και μέλος του ερευνητικού προσωπικού του εργαστηρίου, η οποία με βοήθησε σε ό,τι χρειαζόμουν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά τις δρ. Σοφία Μάη και δρ. Έλλη Μαρία Μπαραμπούτη, Δρ. Μηχανικούς για την καθοδήγησή τους καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και για τις χρήσιμες συμβουλές τους ως προς τα ζητήματα που προκύπταν.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω και όλα τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου που καθημερινά φρόντιζαν για την ομαλή λειτουργία του και τη διατήρηση ενός ευχάριστου κλίματος συνεργασίας, όπως τον Φώτη Χατζημαλιάκα, Περιβαλλοντολόγο Μηχανικό και τον Γιάννη Παχάκη, Χημικό Μηχανικό.

Τέλος, από τον προσωπικό μου κύκλο θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου για την υπομονή και τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

Μπουλαμάτσης Κωνσταντίνος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη ενός συστήματος, δέσμευσης αέριων εκπομπών CO₂ εργαστηριακής κλίμακας. Η έρευνα διεξήχθη στο πλαίσιο των περιβαλλοντικών προκλήσεων που αφορούν την κλιματική αλλαγή και τις αυξανόμενες ανάγκες για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Αρχικά, εξετάστηκε η δέσμευση CO₂ με φυσικοχημική μέθοδο και στη συνέχεια μελετήθηκε η εφαρμογή ενζυμικών καταλυτών, όπως η καρβονική ανυδράση (CA). Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε διάταξη τροποποιημένης πλυντρίδας αερίων, όπου εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων όπως του λόγου υγρού/αέριο (L/G), του ρυθμού ανακυκλοφορίας, της χρήσης πληρωτικού υλικού και της καταλυτικής δράσης της καρβονικής ανυδράσης στη δέσμευση CO₂. Χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα NH₃/NH₄Cl και K₂CO₃ με στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών δέσμευσης CO₂. Επιπλέον, υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας, διερευνήθηκε και η αξιοποίηση του υγρού χωνεύματος, ως δευτερογενές προϊόν της αναερόβιας χώνευσης κατά τη δέσμευση του CO₂.

Από τα πειράματα διαπιστώθηκε ότι η χρήση του πληρωτικού υλικού δεν είχε σημαντική επίδραση στην απόδοση των διαλυμάτων NH₃/NH₄Cl. Ωστόσο, η δέσμευση CO₂, στα διαλύματα αυτά, βελτιώθηκε με την αύξηση του λόγου L/G, με την απόδοση δέσμευσης του CO₂ να φτάνει το 91.49% για λόγο L/G 38.89 ($\frac{L}{m^3}$). Επίσης, η χρήση του αναερόβιου χωνεύματος ως διάλυμα δέσμευσης δεν παρουσίασε ικανοποιητική ικανότητα δέσμευσης CO₂ με αποδόσεις που κυμάνθηκαν από 13.93% έως 18.98%. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για τα διαλύματα K₂CO₃ (1.45M), όπου η απόδοση δέσμευσης CO₂ αυξήθηκε συναρτήσει του λόγου L/G στα απορροφητικά διαλύματα (με μέγιστη απόδοση 71.54% για L/G 16.67 ($\frac{L}{m^3}$)). Επιπλέον, όταν χρησιμοποιήθηκε το χώνευμα, η απόδοση δέσμευσης δεν επηρεάστηκε από τον λόγο L/G. Παρόλα αυτά, η χρήση του χωνεύματος σε συνδυασμό με αμμωνιακά αλλά και με ανθρακικά διαλύματα βελτίωσε σημαντικά την απόδοση της δέσμευσης CO₂ σε σχέση με τα αντίστοιχα υδατικά διαλύματα (μέγιστη απόδοση δέσμευσης με χρήση χωνεύματος για NH₃/NH₄Cl 92.02% και για K₂CO₃ (1.45M) 99.16%). Διαπιστώθηκε επιπλέον ότι η απόδοση δέσμευσης CO₂ μειώνεται συναρτήσει του χρόνου παραμονής, αλλά και ότι ο ρυθμός ανακυκλοφορίας του υγρού δεν επηρεάζει την απόδοση.

Από την άλλη, η χρήση καρβονικής ανυδράσης αύξησε την απόδοση της δέσμευσης CO₂ και επιτάχυνε σημαντικά τον ρυθμό απορρόφησης στα διαλύματα K₂CO₃ (1.45M), με βελτιωμένες αποδόσεις (99.54% και 98.24%) όταν η συγκέντρωση του ενζύμου ήταν 50 mg/L και 100 mg/L αντίστοιχα. Αξίζει να τονιστεί ότι ο συνδυασμός τόσο του αναερόβιου χωνευμένου υπολείμματος όσο

και της CA σε αυτή την πειραματική διάταξη παρέχει την υψηλότερη απόδοση (99.61%) και ταυτόχρονα τον μεγαλύτερο ρυθμό στην κινητική της αντίδρασης. Όσον αφορά την ενεργότητα του ενζύμου, αυτή μειώθηκε σχεδόν στο μισό (από 0.4-0.8 U/mL σε 0.25-0.35 U/mL) με το πέρας της εκάστοτε πειραματικής δοκιμής.

Συνολικά, η δέσμευση CO₂ κατέστη εφικτή με φυσικοχημικό τρόπο δέσμευσης και μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά με τη χρήση καρβονικής ανυδράσης. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής δύναται να συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση των διεργασιών δέσμευσης CO₂, αναδεικνύοντας νέες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, θα ήταν χρήσιμη περαιτέρω βελτιστοποίηση της ενζυμικής διεργασίας καθώς και η οικονομοτεχνική μελέτη και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συνολικού εγχειρήματος.

Abstract

This thesis focused on the study of a laboratory-scale CO₂ gas capture system. The research was conducted in the context of environmental challenges related to climate change and the increasing need to reduce greenhouse gas emissions.

Initially, CO₂ capture was investigated via a physicochemical method and then the application of enzyme catalysts such as carbonic anhydrase (CA) was studied. Experiments were carried out in a modified gas scrubber setup, where the effect of various operational parameters such as liquid/gas (L/G) ratio, recirculation rate, packing material and the catalytic activity of carbonic anhydrase on CO₂ capture were evaluated. NH₃/NH₄Cl and K₂CO₃ solutions were used to find the optimal conditions for CO₂ capture. In addition, in the light of circular economy, the utilization of the liquid digestate as a secondary product of anaerobic digestion in CO₂ capture was also investigated.

The experiments showed that the use of the packing material had no significant effect on the performance of the NH₃/NH₄Cl solutions. However, CO₂ capture, in these solutions, improved with increasing L/G ratio, with the CO₂ capture efficiency reaching 91.49% for an L/G ratio of 38.89 ($\frac{L}{m^3}$). Also, the use of anaerobic digestate as an absorbent solution did not show satisfactory CO₂ capture efficiency with yields ranging from 13.93% to 18.98%. Similar results were observed for K₂CO₃ (1.45M) solutions, where CO₂ capture efficiency increased as a function of L/G ratio in the absorbent solutions (with a maximum efficiency of 71.54% for L/G 16.67 ($\frac{L}{m^3}$)). Furthermore, when the digestate was used, the capture efficiency was not affected by the L/G ratio. However, the use of the digestate in combination with both ammonia and carbonate solutions significantly improved the CO₂ capture efficiency compared to the corresponding aqueous solutions (maximum capture efficiency using digestate for NH₃/NH₄Cl 92.02% and for K₂CO₃ (1.45M) 99.16%). It was also observed that the CO₂ capture efficiency decreased as a function of residence time, but also that the liquid recirculation rate did not affect the efficiency.

On the other hand, the use of carbonic anhydrase (CA) increased the CO₂ capture efficiency and significantly accelerated the uptake rate in K₂CO₃ (1.45M) solutions, with improved yields (99.54% and 98.24%) when the enzyme concentration was 50 mg/L and 100 mg/L, respectively. It is worth emphasizing that the combination of both anaerobic digestate and CA in this experimental setup provides the highest yield (99.61%) and at the same time the highest rate in reaction kinetics. As for the enzyme activity, it was almost halved (from 0.4-0.8 U/mL to 0.25-0.35 U/mL) by the end of each experimental trial.

Overall, CO₂ capture was made possible by a physicochemical capture method and can be significantly accelerated using carbonic anhydrase. The results of this work may contribute significantly to the improvement of CO₂ capture processes, highlighting new directions for future research. Further optimisation of the enzymatic process would be useful, as well as an econometric and environmental impact study of the overall project.

Περιεχόμενα

Θεωρητικό Μέρος	21
Κεφάλαιο 1: Εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και το φαινόμενο του θερμοκηπίου	21
1.1 Εισαγωγή.....	21
1.2 Παράγοντες της κλιματικής αλλαγής	23
1.3 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής	24
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες δέσμευσης CO₂	27
2.1 Φυσικοχημικές Τεχνολογίες.....	27
2.1.1 Εισαγωγή στη δέσμευση του CO ₂	27
2.1.2 Απορρόφηση	30
2.1.3 Προσρόφηση.....	36
2.1.4 Κρυογονικές Διεργασίες.....	39
2.1.5 Μεμβράνες	41
2.1.6 Μέθοδος CaO-looping	41
2.1.7 Φυσική δέσμευση του CO ₂	43
2.1.8 Κινητική της δέσμευσης CO ₂ σε υδατικά διαλύματα.....	45
2.2 Ενζυμικές Τεχνολογίες.....	49
2.2.1 Εισαγωγή.....	49
2.2.2 Λειτουργίες και εφαρμογές ενζύμου CA	50
2.2.3 Ακινητοποίηση του ενζύμου	51
2.2.4 Μηχανισμός κατάλυσης και κινητική ενζύμου	55
2.3 Πλυντρίδες – Scrubbers.....	59
2.3.1 Είδη και εφαρμογές πλυντρίδων	59
2.3.2 Πλυντρίδες για ενζυμική δέσμευση CO ₂	61
2.4 Εφαρμογές τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης CO ₂ σε βιομηχανίες.....	66
Κεφάλαιο 3: Αναερόβια χώνευση	72
3.1 Εισαγωγή.....	72
3.2 Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης	73
3.3 Υπόλειμμα αναερόβιας χώνευσης	76
3.3.1 Εισαγωγή.....	76
3.3.2 Επεξεργασία χωνεύματος.....	77
3.3.3 Κίνδυνοι και προκλήσεις χωνεύματος.....	78
3.3.4 Προοπτικές για το Μέλλον	81
Πειραματικό Μέρος	83

Σκοπός	83
Κεφάλαιο 4: Πειραματική Μεθοδολογία	83
4.1 Μέθοδοι ανάλυσης	83
4.1.1 Προσδιορισμός pH	83
4.1.2 Προσδιορισμός διαλυμένου οξυγόνου	84
4.1.3 Προσδιορισμός ολικού ανόργανου άνθρακα (IC), ολικού άνθρακα (TC), ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και ολικού αζώτου (TN)	85
4.1.4 Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου χωνεύματος	86
4.1.5 Προσδιορισμός ενεργότητας ενζύμου	87
4.2 Πειραματική Μεθοδολογία	88
4.2.1 Πειραματική Διάταξη	88
4.2.2 Πειραματική Διαδικασία	91
4.3 Πειραματικό πρωτόκολλο	92
4.3.1 Μελέτη επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$	92
4.3.2 Μελέτη επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος	93
4.3.3 Μελέτη επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση	94
4.3.4 Μελέτη επίδρασης L/G σε διάλυμα K_2CO_3	94
4.3.5 Μελέτη επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού	95
Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα	96
5.1 Πρωτογενή Αποτελέσματα	96
5.1.1 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$	96
5.1.2 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος	99
5.1.3 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση	102
5.1.4 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης L/G σε διάλυμα K_2CO_3	107
5.1.5 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού	108
5.2 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων	111
5.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$	111
5.2.1.1 Πείραμα 1	111
5.2.1.2 Πείραμα 3	116
5.2.1.3 Πείραμα 4	118
5.2.1.4 Πείραμα 8	119
5.2.1.5 Πείραμα 9	121
5.2.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος	122

5.2.2.1 Πείραμα 5	123
5.2.2.2 Πείραμα 7	124
5.2.2.3 Πείραμα 10	126
5.2.2.4 Πείραμα 11	128
5.2.2.5 Πείραμα 12	129
5.2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση	131
5.2.3.1 Πείραμα 13	131
5.2.3.2 Πείραμα 14	133
5.2.3.3 Πείραμα 15	136
5.2.3.4 Πείραμα 16	138
5.2.3.5 Πείραμα 18	139
5.2.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης L/G σε διάλυμα K_2CO_3	141
5.2.4.1 Πείραμα 17	142
5.2.5 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού	144
5.2.5.1 Πείραμα 19	144
5.2.5.2 Πείραμα 2	146
5.2.5.3 Πείραμα 6	148
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	150
5.3.1 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα NH_3/NH_4Cl	150
5.3.2 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος	153
5.3.3 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση	156
5.3.4 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης L/G σε διάλυμα K_2CO_3	159
5.3.5 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού	164
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	167
Κεφάλαιο 7: Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα	169
Βιβλιογραφία	171

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κινητικές σταθερές Michaelis-Menten για τις αντιδράσεις ισορροπίας προς τα εμπρός και προς τα πίσω που εμπλέκονται στην ενυδάτωση του $CO_2(aq)$	56
---	----

Πίνακας 2: Πλυντρίδες χαμηλής ενέργειας και οι εφαρμογές τους (Bhargava & Bhargava, 2016).....	60
Πίνακας 3: Πλυντρίδες υψηλής ενέργειας και οι εφαρμογές τους (Bhargava & Bhargava, 2016).....	61
Πίνακας 4: Άνω όριο στις καμπύλες αναφοράς της συσκευής TOC	85
Πίνακας 5: Πειράματα για διαφορετικούς όγκους ρυθμιστικού διαλύματος NH ₃ /NH ₄ Cl, με pH 10, ροή εισόδου αερίου 0.1 L /min και GRT 930sec	93
Πίνακας 6: Πειράματα για διαφορετικά διαλύματα απορρόφησης με βάση χώνευμα ή απιονισμένο νερό, με ροή εισόδου αερίου 0.1 L /min, αρχικό όγκο 700mL, με πληρωτικό υλικό και GRT 930sec	93
Πίνακας 7: Πειράματα επίδρασης κατάλυσης σε απορροφητικά διαλύματα K ₂ CO ₃ 1.45M, με πληρωτικό, ροή εισόδου αερίου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL, στροφές αντλίας 400rpm και GRT 930sec.....	94
Πίνακας 8: Πειράματα επίδρασης L/G σε διάλυμα K ₂ CO ₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με στροφές αντλίας 400rpm, και επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος	94
Πίνακας 9: Πειράματα επίδρασης ρυθμού αναρροής υγρού σε απορροφητικό διάλυμα K ₂ CO ₃ 1.45M, με πληρωτικό υλικό, ροή εισόδου αερίου 0.1 L /min, αρχικό όγκο 600mL και GRT 930sec.....	95
Πίνακας 10: Πείραμα 1, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL.....	96
Πίνακας 11: Πείραμα 3, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	97
Πίνακας 12: Πείραμα 4, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	97
Πίνακας 13: Πείραμα 8, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	98
Πίνακας 14: Πείραμα 9, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL	98
Πίνακας 15: Πείραμα 5, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα χώνευμα διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	99
Πίνακας 16: Πείραμα 7, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα Na ₂ CO ₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	100

Πίνακας 17: Πείραμα 10, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	100
Πίνακας 18: Πείραμα 11, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	101
Πίνακας 19: Πείραμα 12, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	102
Πίνακας 20: Πείραμα 13, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	103
Πίνακας 21: Πείραμα 14, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	103
Πίνακας 22: Μέτρηση απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης (p-NP) κατά τη διάρκεια του πειράματος 14.....	104
Πίνακας 23: Πείραμα 15, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	105
Πίνακας 24: Μέτρηση απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης (p-NP) κατά τη διάρκεια του πειράματος 15, με D=5.....	105
Πίνακας 25: Πείραμα 16, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	106
Πίνακας 26: Πείραμα 18, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL .	106
Πίνακας 27: Μέτρηση απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης (p-NP) κατά τη διάρκεια του πειράματος 18.....	107
Πίνακας 28: Πείραμα 17, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	108
Πίνακας 29: Πείραμα 19, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM.....	109
Πίνακας 30: Πείραμα 2, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή	

εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM.....	109
Πίνακας 31: Πείραμα 6, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM.....	110
Πίνακας 32: Πείραμα 1, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL	111
Πίνακας 33: Πείραμα 1, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL	113
Πίνακας 34: Πείραμα 1, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL.....	114
Πίνακας 35: Αποδόσεις πειράματος 1, για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL	116
Πίνακας 36: Πείραμα 3, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	116
Πίνακας 37: Πείραμα 3, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	117
Πίνακας 38: Πείραμα 3, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	117
Πίνακας 39: Αποδόσεις πειράματος 3, για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	118
Πίνακας 40: Πείραμα 4, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	118
Πίνακας 41: Πείραμα 4, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	118
Πίνακας 42: Πείραμα 4, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL.....	119

Πίνακας 43: Αποδόσεις πειράματος 4, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	119
Πίνακας 44: Πείραμα 8, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	119
Πίνακας 45: Πείραμα 8, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	120
Πίνακας 46: Πείραμα 8, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	120
Πίνακας 47: Αποδόσεις πειράματος 8, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	121
Πίνακας 48: Πείραμα 9, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL.....	121
Πίνακας 49: Πείραμα 9, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL	121
Πίνακας 50: Πείραμα 9, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL	122
Πίνακας 51: Αποδόσεις πειράματος 9, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL	122
Πίνακας 52: Πρωτογενή χαρακτηριστικά χωνεύματος για τα πειράματα 5, 10, 12 , 16 και 18.....	123
Πίνακας 53: Πείραμα 5, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	123
Πίνακας 54: Πείραμα 5, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	123
Πίνακας 55: Πείραμα 5, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	124
Πίνακας 56: Αποδόσεις πειράματος 5, για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	124

Πίνακας 57: Πείραμα 7, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα Na ₂ CO ₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL .	124
Πίνακας 58: Πείραμα 7, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα Na ₂ CO ₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	125
Πίνακας 59: Πείραμα 7, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO ₃ ⁻ , CO ₂ (aq), H ₂ CO ₃ , CO ₃ ²⁻ για απορροφητικό διάλυμα Na ₂ CO ₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	125
Πίνακας 60: Αποδόσεις πειράματος 7, για απορροφητικό διάλυμα Na ₂ CO ₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	126
Πίνακας 61: Πείραμα 10, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	126
Πίνακας 62: Πείραμα 10, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	127
Πίνακας 63: Πείραμα 10, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO ₃ ⁻ , CO ₂ (aq), H ₂ CO ₃ , CO ₃ ²⁻ για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL ...	127
Πίνακας 64: Αποδόσεις πειράματος 10, για απορροφητικό διάλυμα NH ₃ /NH ₄ Cl με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	128
Πίνακας 65: Πείραμα 11, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K ₂ CO ₃ 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	128
Πίνακας 66: Πείραμα 11, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K ₂ CO ₃ 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	128
Πίνακας 67: Πείραμα 11, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO ₃ ⁻ , CO ₂ (aq), H ₂ CO ₃ , CO ₃ ²⁻ για απορροφητικό διάλυμα K ₂ CO ₃ 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	129

Πίνακας 68: Αποδόσεις πειράματος 11, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	129
Πίνακας 69: Πείραμα 12, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	130
Πίνακας 70: Πείραμα 12, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	130
Πίνακας 71: Πείραμα 12, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL .	131
Πίνακας 72: Αποδόσεις πειράματος 12, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL	131
Πίνακας 73: Πείραμα 13, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	132
Πίνακας 74: Πείραμα 13, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	132
Πίνακας 75: Πείραμα 13, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	133
Πίνακας 76: Αποδόσεις πειράματος 13, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	133
Πίνακας 77: Πείραμα 14, η αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	134
Πίνακας 78: Πείραμα 14, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL .	134

Πίνακας 79: Απόδοση πειράματος 14, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL .	135
Πίνακας 80: Πείραμα 15, η αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	136
Πίνακας 81: Πείραμα 15, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL .	136
Πίνακας 82: Απόδοση πειράματος 15, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL .	137
Πίνακας 83: Πείραμα 16, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	138
Πίνακας 84: Πείραμα 16, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	138
Πίνακας 85: Πείραμα 16, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	139
Πίνακας 86: Αποδόσεις πειράματος 16, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	139
Πίνακας 87: Πείραμα 18, η αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL	140
Πίνακας 88: Πείραμα 18, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	140
Πίνακας 89: Απόδοση πειράματος 18, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	141

Πίνακας 90: Πείραμα 17, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	142
Πίνακας 91: Πείραμα 17, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	142
Πίνακας 92: Πείραμα 17, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL	143
Πίνακας 93: Αποδόσεις πειράματος 17, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL.....	143
Πίνακας 94: Πείραμα 19, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM ...	144
Πίνακας 95: Πείραμα 19, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM ...	144
Πίνακας 96: Πείραμα 19, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM	145
Πίνακας 97: Αποδόσεις πειράματος 19, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM ...	146
Πίνακας 98: Πείραμα 2, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM	146
Πίνακας 99: Πείραμα 2, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM	146
Πίνακας 100: Πείραμα 2, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση	

απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM	147
Πίνακας 101: Αποδόσεις πειράματος 2, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM ...	148
Πίνακας 102: Πείραμα 6, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM	148
Πίνακας 103: Πείραμα 6, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM	148
Πίνακας 104: Πείραμα 6, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM	149
Πίνακας 105: Αποδόσεις πειράματος 6, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM	150

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση του ατμοσφαιρικού ισοζυγίου θερμότητας. Οι μονάδες είναι επί τοις εκατό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Mitchell, 1989)	22
Σχήμα 2: Μεταβολές της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO_2 από το 1958 (Li et al., 2019)	23
Σχήμα 3: Παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά οικονομικό τομέα (Κώστας Νικολάου, n.d.)	23
Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της ολοκληρωμένης αξιακής αλυσίδας δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS) (Mon et al., 2024)	30
Σχήμα 5: Φυσική απορρόφηση (Arachchige et al., n.d.)	31
Σχήμα 6: Διάγραμμα διεργασίας δέσμευσης άνθρακα με ανακύκλωση ασβεστίου για εργοστάσιο τσιμέντου (Olabi et al., 2022)	43
Σχήμα 7: Απλοποιημένος καταλυτικός μηχανισμός ενός ενζύμου aCA	57

Σχήμα 8: Επίδραση του pH στην HCA κατά την υδρόλυση του CO ₂	58
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση του συνδυασμού της διεργασίας καταλυτικής μετατροπής CO ₂ με CA και της διεργασίας χημικής απορρόφησης (Shi et al., 2015), (Savile & Lalonde, 2011)	63
Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση μιας μονάδας δέσμευσης CO ₂ με πλύση αερίου, της CO ₂ Solution Inc. Company (Pierre, 2012)	65
Σχήμα 11: Διαδικασία αξιολόγησης των τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα (Olabi et al., 2022)	70
Σχήμα 12: Παγκόσμια ανάπτυξη του CCS στους βιομηχανικούς τομείς, 2020-2050 (δεσμευμένο CO ₂ και αριθμός έργων) (United Nations, 2011)	71
Σχήμα 13: Σχηματική αναπαράσταση του βιώσιμου κύκλου της αναερόβιας συγχώνευσης ζωικής κοπριάς και οργανικών αποβλήτων	72
Σχήμα 14: Αναερόβια χώνευση σε ιστορική αναδρομή (Gijzen, 2002)	73
Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα της αναερόβιας χώνευσης (Logan & Visvanathan, 2019)	74
Σχήμα 16: Τεχνολογίες επεξεργασίας χωνεύματος (Κοναčić et al., 2022)	78
Σχήμα 17: Πεχάμετρο	84
Σχήμα 18: Μετρητής DO	85
Σχήμα 19: Εξοπλισμός TOC-V _{CSH}	86
Σχήμα 20: Φωτόμετρο Spectroquant Pharo 300 Merck.....	87
Σχήμα 21: Φιάλη αερίου.....	88
Σχήμα 22: Ροόμετρο εισόδου	89
Σχήμα 23: Αντλία ανακυκλοφορίας υγρού	90
Σχήμα 24: Διάταξη τροποποιημένης πλυντρίδας.....	91
Σχήμα 25: Απορρόφηση της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσεως χρόνου στο Πείραμα 14	135
Σχήμα 26: Απορρόφηση της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσεως χρόνου στο Πείραμα 15	137
Σχήμα 27: Απορρόφηση της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσεως χρόνου στο Πείραμα 18	141
Σχήμα 28: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9.....	150
Σχήμα 29: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9	151
Σχήμα 30: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO ₂ για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9	152
Σχήμα 31: Μέσος όρος αποδόσεων συναρτήσεως του λόγου L/G για τα πειράματα 1, 3, 8 και 9.....	153
Σχήμα 32: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12	154

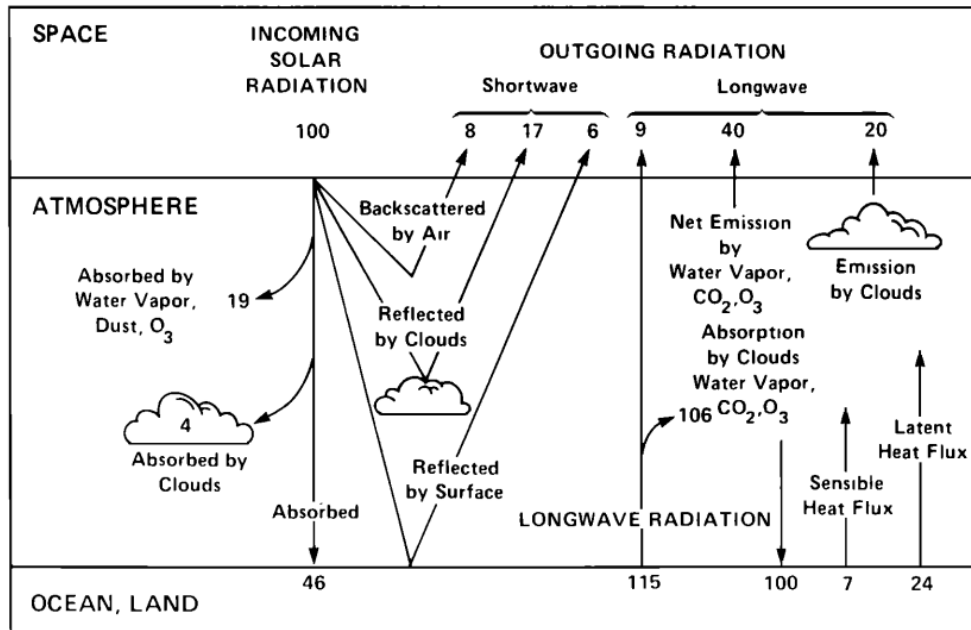
Σχήμα 33: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12	155
Σχήμα 34: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO ₂ για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12	155
Σχήμα 35: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18	156
Σχήμα 36: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO ₂ για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18	157
Σχήμα 37: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18	158
Σχήμα 38: Ενεργότητα συναρτήσεως χρόνου για τα πειράματα 14, 15 και 18	159
Σχήμα 39: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17	160
Σχήμα 40: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17	161
Σχήμα 41: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO ₂ για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17	162
Σχήμα 42: Μέσος όρος αποδόσεων δέσμευσης CO ₂ συναρτήσεως του λόγου L/G για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17	163
Σχήμα 43: Μέσος όρος αποδόσεων συναρτήσεως του GRT για τα πειράματα 13 και 17	163
Σχήμα 44: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19	164
Σχήμα 45: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19	165
Σχήμα 46: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO ₂ για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19	166

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1: Εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και το φαινόμενο του θερμοκηπίου

1.1 Εισαγωγή

Ο πλανήτης μας καθίσταται κατοικήσιμος λόγω της παρουσίας ορισμένων αερίων που παγιδεύουν την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης, δίνοντας μια μέση παγκόσμια θερμοκρασία 15°C, σε αντίθεση με τους -18°C που εκτιμάται ότι θα υπήρχε με την απουσία της ατμόσφαιρας. Το φαινόμενο αυτό είναι ευρέως γνωστό ως "φαινόμενο του θερμοκηπίου". Μακράν το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί (Mitchell, 1989). Οι υδρατμοί είναι το πιο άφθονο αέριο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, τόσο κατά βάρος όσο και κατά όγκο και σε σύγκριση με άλλα αέρια του θερμοκηπίου, οι υδρατμοί παραμένουν στην ατμόσφαιρα για πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα, όμως ο θερμότερος αέρας είναι σε θέση να συγκρατήσει περισσότερη υγρασία και καθώς το κλίμα θερμαίνεται, παρατηρείται μεγαλύτερη εξάτμιση, αυξάνοντας έτσι την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία. Η αύξηση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, συμβάλλει σε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας, δηλαδή ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η διαδικασία ανατροφοδότησης των υδρατμών είναι πιθανότατα υπεύθυνη για τον διπλασιασμό του φαινομένου του θερμοκηπίου σε σύγκριση με την προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα από μόνη της (Climate Change Connection, 2016). Ωστόσο, σημαντική είναι η συμβολή του διοξειδίου του άνθρακα και μικρότερη του όζοντος, του μεθανίου και του οξειδίου του αζώτου (Mitchell, 1989). Παρακάτω στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση του ατμοσφαιρικού ισοζυγίου θερμότητας και επεξηγείται περεταίρω.

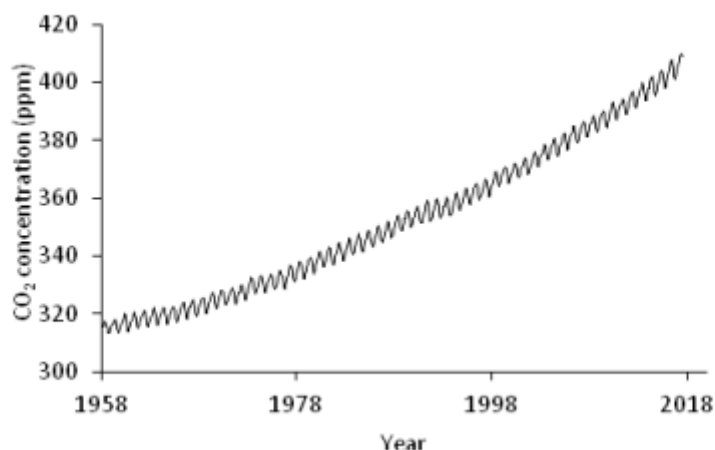


Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση του ατμοσφαιρικού ισοζυγίου θερμότητας. Οι μονάδες είναι επί τους εκατό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Mitchell, 1989)

Με την ενδυνάμωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η παγκόσμια μέση θερμοκρασία σταδιακά αυξάνεται, και η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει υπερβεί τα 400 ppm. Υπήρξαν παγκόσμιες συμφωνίες για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των επιπτώσεων του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το 1997, 149 χώρες υιοθέτησαν το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο έθεσε ως στόχο τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κάτω από τους 2 °C μέχρι το τέλος του 20^{ου} αιώνα και το 2015 υπογράφηκε η Συμφωνία του Παρισιού μεταξύ εκπροσώπων από περισσότερες από 200 χώρες. Σύμφωνα με αυτήν, η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τους 2 °C ή, αν μπορεί να επιτευχθεί, τους 1.5 °C σε σχέση με την τιμή πριν από τη βιομηχανοποίηση. Οι χώρες σε όλο τον κόσμο θα πρέπει να επιτύχουν το συντομότερο δυνατό τη σταθεροποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και να επιτύχουν τον στόχο της μηδενικής εκπομπής CO₂ στο δεύτερο μισό του 21^{ου} (J. W. Li et al., 2019).

Οι κύριοι παράγοντες που διαταράσσουν τη φυσική ισορροπία των αερίων του θερμοκηπίου είναι ενέργειες όπως η εξόρυξη καυσίμων, η ενεργός αποψίλωση των δασών, η καύση ορυκτών καυσίμων, η γεωργία και η βαριά και συνεχώς αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Με την αυξανόμενη επιρροή του φαινομένου του θερμοκηπίου στο περιβάλλον, υπάρχει μια σταδιακή, αναλογική αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα στον πλανήτη, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση του παγκόσμιου κλίματος (Stepanenko et al., 2024). Πιο συγκεκριμένα η ξηρά και η θάλασσα στην επιφάνεια της γης απορροφούν την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος από τον ήλιο και τη μετατρέπουν σε

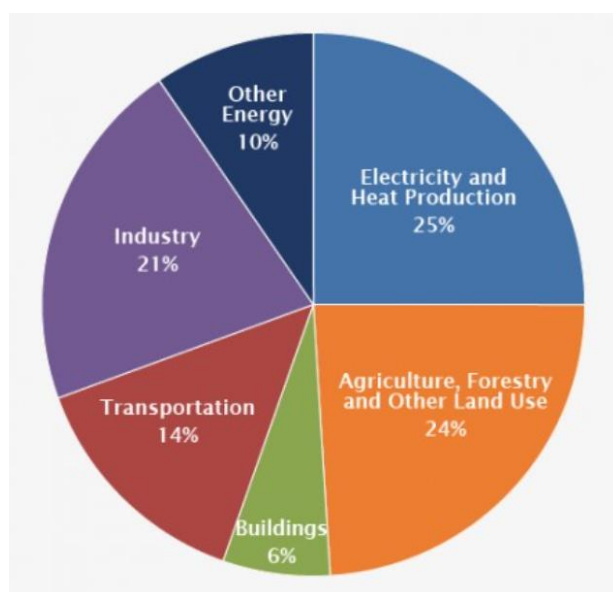
θερμότητα η οποία επιστρέφει στο διάστημα με τη μορφή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Το φαινόμενο αυτό είναι ένα φυσικό φαινόμενο που προκαλείται από την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου με τις επιρροές της στην μεταβολή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO₂ να εμφανίζονται στο Σχήμα 2 (J. W. Li et al., 2019).



Σχήμα 2: Μεταβολές της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO₂ από το 1958 (Li et al., 2019)

1.2 Παράγοντες της κλιματικής αλλαγής

Οι βασικοί παράγοντες της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζονται παρακάτω και εμφανίζονται στο Σχήμα 3 (United Nations, n.d.) :



Σχήμα 3: Παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά οικονομικό τομέα (Κώστας Νικολάου, n.d.)

- Παραγωγή ενέργειας: Η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με την καύση ορυκτών καυσίμων προκαλεί ένα μεγάλο μέρος των παγκόσμιων εκπομπών. Η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια εξακολουθεί να παράγεται με την καύση άνθρακα, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, τα οποία παράγουν διοξείδιο του άνθρακα και οξείδιο του αζώτου. Ειδικότερα, η τροφοδοσία κτιρίων σε παγκόσμιο επίπεδο καταναλώνει πάνω από το ήμισυ του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των αναγκών θέρμανσης και ψύξης.
- Παραγωγή αγαθών: Οι βιομηχανίες παράγουν εκπομπές, κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας για την παραγωγή προϊόντων όπως το τσιμέντο, ο σίδηρος, ο χάλυβας, τα ηλεκτρονικά, τα πλαστικά, τα ρούχα και άλλα.
- Αποψίλωση των δασών: Η κοπή των δασών για τη γεωργική τους εκμετάλλευση προκαλεί εκπομπές, καθώς τα δέντρα, όταν κόβονται, απελευθερώνουν τον άνθρακα που έχουν αποθηκεύσει. Κάθε χρόνο καταστρέφονται περίπου 12 εκατομμύρια στρέμματα δασών. Δεδομένου ότι τα δάση απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα, η καταστροφή τους περιορίζει επίσης την ικανότητα της φύσης να κρατήσει τις εκπομπές μακριά από την ατμόσφαιρα. Η αποψίλωση των δασών, μαζί με τη γεωργία και άλλες αλλαγές στη χρήση γης, είναι υπεύθυνη για το ένα τέταρτο περίπου των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Χρήση των μέσων μεταφοράς: Τα περισσότερα αυτοκίνητα, φορτηγά, πλοία και αεροπλάνα κινούνται με ορυκτά καύσιμα. Αυτό καθιστά τις μεταφορές σημαντικό παράγοντα που συμβάλλει στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, ιδίως εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τα οδικά οχήματα ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος, λόγω της καύσης προϊόντων με βάση το πετρέλαιο, όπως η βενζίνη, σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ταυτόχρονα, οι εκπομπές από τα πλοία και τα αεροπλάνα συνεχίζουν να αυξάνονται.

1.3 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής

Οι κυριότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζονται παρακάτω (United Nations, n.d.):

- Κλιματική αλλαγή: Καθώς αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, αυξάνεται και η θερμοκρασία της επιφάνειας του πλανήτη. Η

τελευταία δεκαετία, 2011-2020, είναι η θερμότερη που έχει καταγραφεί ποτέ. Από τη δεκαετία του 1980, κάθε δεκαετία ήταν θερμότερη από την προηγούμενη. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνουν τις ασθένειες που σχετίζονται με τη ζέστη και δυσχεραίνουν την εργασία σε εξωτερικούς χώρους. Οι πυρκαγιές ξεκινούν ευκολότερα και εξαπλώνονται ταχύτερα όταν οι συνθήκες είναι θερμότερες. Οι θερμοκρασίες στην Αρκτική έχουν αυξηθεί τουλάχιστον δύο φορές πιο γρήγορα από τον παγκόσμιο μέσο όρο.

- **Ισχυρές καταιγίδες και ακραία καιρικά φαινόμενα:** Οι καταστροφικές καταιγίδες έχουν γίνει πιο έντονες και πιο συχνές σε πολλές περιοχές. Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται, περισσότερη υγρασία εξατμίζεται, γεγονός που επιδεινώνει τις ακραίες βροχοπτώσεις και τις πλημμύρες, προκαλώντας πιο καταστροφικές καταιγίδες. Η συχνότητα και η έκταση των τροπικών καταιγίδων επηρεάζεται επίσης από τη θέρμανση του ωκεανού. Οι κυκλώνες και οι τυφώνες τρέφονται με θερμά νερά στην επιφάνεια του ωκεανού. Τέτοιες καταιγίδες συχνά καταστρέφουν σπίτια και κοινότητες, προκαλώντας θανάτους και τεράστιες οικονομικές απώλειες.
- **Αυξημένη ξηρασία:** Η κλιματική αλλαγή αλλάζει τη διαθεσιμότητα του νερού, καθιστώντας το πιο σπάνιο σε περισσότερες περιοχές. Η υπερθέρμανση του πλανήτη επιδεινώνει την έλλειψη νερού σε περιοχές που ήδη αντιμετωπίζουν πρόβλημα με το νερό και οδηγεί σε αυξημένο κίνδυνο γεωργικής ξηρασίας που επηρεάζει τις καλλιέργειες και οικολογικής ξηρασίας που αυξάνει την ευπάθεια των οικοσυστημάτων. Οι ξηρασίες μπορούν επίσης να προκαλέσουν καταστροφικές αμμοθύελλες που μπορούν να μετακινήσουν δισεκατομμύρια τόνους άμμου σε όλες τις ηπείρους. Οι έρημοι επεκτείνονται, μειώνοντας τη γη για την καλλιέργεια τροφίμων και παράλληλα, πολλοί άνθρωποι αντιμετωπίζουν πλέον την απειλή ότι δεν θα έχουν αρκετό νερό σε τακτική βάση.
- **Όξινη των ωκεανών και αύξηση της στάθμης της θάλασσας:** Ο ωκεανός απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας από την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ο ρυθμός με τον οποίο θερμαίνεται ο ωκεανός αυξήθηκε έντονα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, σε όλα τα βάθη του ωκεανού. Καθώς ο ωκεανός θερμαίνεται, ο όγκος του αυξάνεται, καθώς το νερό διαστέλλεται λόγω της θέρμανσής του. Το λιώσιμο των πάγων προκαλεί επίσης άνοδο της στάθμης της θάλασσας, απειλώντας τις παράκτιες και νησιωτικές κοινότητες. Επιπλέον, ο ωκεανός απορροφά το διοξείδιο του άνθρακα, κρατώντας το από την ατμόσφαιρα. Όμως, το περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα κάνει τον ωκεανό πιο όξινο, γεγονός που θέτει σε κίνδυνο τη θαλάσσια ζωή και τους κοραλλιογενείς υφάλους.

- Απώλεια ειδών: Ένα εκατομμύριο είδη κινδυνεύουν να εξαφανιστούν μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Οι δασικές πυρκαγιές, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και οι εισβολείς παράσιτων και ασθενειών είναι μεταξύ πολλών απειλών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Ορισμένα είδη θα μπορέσουν να μετεγκατασταθούν και να επιβιώσουν, ενώ άλλα όχι.
- Έλλειψη φαγητού: Οι αλλαγές στο κλίμα και η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων συγκαταλέγονται στους λόγους για την παγκόσμια αύξηση της πείνας και της ανθυγιεινής διατροφής. Η αλιεία, οι καλλιέργειες και το ζωικό κεφάλαιο μπορεί να καταστραφούν ή να γίνουν λιγότερο παραγωγικές. Με τον ωκεανό να γίνεται όλο και πιο όξινος, οι θαλάσσιοι πόροι που τρέφουν δισεκατομμύρια ανθρώπους κινδυνεύουν. Οι αλλαγές στο χιόνι και την παγοκάλυψη σε πολλές περιοχές της Αρκτικής έχουν διαταράξει τις προμήθειες τροφίμων από την κτηνοτροφία, το κυνήγι και την αλιεία. Η θερμική καταπόνηση μπορεί να μειώσει το νερό και τα λιβάδια για βόσκηση, προκαλώντας μείωση των αποδόσεων των καλλιεργειών και επηρεάζοντας το ζωικό κεφάλαιο.
- Φτώχεια και εκτοπισμός: Η κλιματική αλλαγή αυξάνει τους παράγοντες που θέτουν και διατηρούν τους ανθρώπους στη φτώχεια. Οι πλημμύρες μπορεί να παρασύρουν τις αστικές συνοικίες, καταστρέφοντας τα σπίτια. Η ζέστη μπορεί να καταστήσει δύσκολη την εργασία σε υπαίθριες θέσεις εργασίας. Η λειψυδρία μπορεί να επηρεάσει τις καλλιέργειες. Κατά την τελευταία δεκαετία (2010-2019), τα καιρικά φαινόμενα που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες εκτόπισαν κατά μέσο όρο 23.1 εκατομμύρια ανθρώπους κάθε χρόνο, αφήνοντας πολλούς περισσότερους ευάλωτους στη φτώχεια, με τους περισσότερους πρόσφυγες να προέρχονται από χώρες που είναι πιο ευάλωτες και λιγότερο έτοιμες να προσαρμοστούν στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.
- Επιπτώσεις στην υγεία: Η υποβαθμισμένη ποιότητα του αέρα που προκύπτει από τις εκπομπές CO₂ και την καύση ορυκτών καυσίμων μπορεί να οδηγήσει σε μια σειρά προβλημάτων υγείας στον άνθρωπο. Αυτό περιλαμβάνει αναπνευστικά προβλήματα όπως το άσθμα και η βρογχίτιδα, καρδιαγγειακές παθήσεις και άλλες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία που σχετίζονται με την έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες δέσμευσης CO₂

2.1 Φυσικοχημικές Τεχνολογίες

2.1.1 Εισαγωγή στη δέσμευση του CO₂

Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια τριών σταδίων:

Πριν την καύση: Σε αυτό το στάδιο, το διοξείδιο του άνθρακα διαχωρίζεται πριν από την διαδικασία καύσης. Πιο συγκεκριμένα, το ανθρακούχο καύσιμο θερμαίνεται στους 1000-1700 °C με οξυγόνο και υδρογόνο. Στον αντιδραστήρα *gasifier*, το αέριο σύνθεσης παράγεται υπό υψηλή πίεση. Αυτό αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Με περαιτέρω επεξεργασία το αέριο σύνθεσης μετατρέπεται σε CO₂ και υδρογόνο με την προσθήκη ατμού. Στη συνέχεια, οι πλυντρίδες αερίου-υγρού χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό του CO₂ από το υδρογόνο (Kammerer et al., 2023). Πρόκειται για μια δαπανηρή διαδικασία (Arachchige et al., n.d.), δύσκολη, με υψηλό ενεργειακό κόστος που συνδέεται με την αναγέννηση των χημικών διαλυτών (Gunawardene et al., 2022). Από την άλλη, η συγκέντρωση του CO₂ που παράγεται στο πλαίσιο αυτών των διεργασιών κυμαίνεται από 15-60%, γεγονός που διευκολύνει τη δέσμευση του (Gunawardene et al., 2022).

Πιο συγκεκριμένα οι μέθοδοι πριν την καύση χρησιμοποιούνται συχνά σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με συνδυασμένο κύκλο αεριοποίησης (Integrated gasification combined cycle (IGCC)). Κατά τη δέσμευση πριν από την καύση, τα ορυκτά καύσιμα οξειδώνονται μερικώς για τη δημιουργία αερίου σύνθεσης (*syngas*) που αποτελείται από υδρογόνο (H₂) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Το CO₂ δεσμεύεται από το αέριο σύνθεσης πριν από την καύση. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή υδρογόνου και είναι πιο ενεργειακά αποδοτική από τη δέσμευση μετά την καύση σε ορισμένες περιπτώσεις (Vaz et al., 2022). Συνήθως η χρησιμοποιούμενη μέθοδος δέσμευσης CO₂ είναι η φυσική ή χημική απορρόφηση. Οι χημικοί διαλύτες, όπως η τριτοταγής μεθυλδισθαινολαμίνη (MDEA), αποικοδομούν το CO₂ από το αέριο σύνθεσης σε μερική πίεση περίπου 1.5 MPa, ενώ οι διεργασίες με φυσικούς διαλύτες εξάγουν το CO₂ σε υψηλότερες μερικές πιέσεις. Άλλες πιθανές μέθοδοι είναι η τεχνολογία μεμβρανών και οι διαδικασίες διαχωρισμού σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. κρυογονική απόσταξη) (Malini et al., 2023).

Μετά την καύση: Πραγματοποιείται η καύση και το διοξείδιο του άνθρακα διαχωρίζεται μετά την καύση από το καυσαέριο (Arachchige et al., n.d.). Είναι ιδανική για τη δέσμευση του CO₂ από πηγές παραγωγής ενέργειας, όπως οι

θερμοηλεκτρικές μονάδες και άλλες μονάδες που χρησιμοποιούν απόβλητα για την παραγωγή ενέργειας. Αφού τα αέρια της καύσης εξέρχονται, περνούν από τη διαδικασία διαχωρισμού του CO₂ από τα άλλα αέρια χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τεχνολογία. Οι συνήθεις μέθοδοι δέσμευσης μετά την καύση περιλαμβάνουν τη χημική απορρόφηση με διαλύτες, τις διεργασίες με βάση τις αμίνες και τα στερεά προσροφητικά μέσα (Vaz et al., 2022). Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η χαμηλή μερική πίεση του CO₂ στα καυσαέρια, η οποία είναι περίπου 0.03-0.15 bar. Ακόμη, η διαδικασία μετά την καύση απαιτεί μεγάλη ποσότητα καυσαερίων για επεξεργασία και παράγει επίσης μεγάλο όγκο αποβλήτων (Malini et al., 2023).

Παρουσιάζονται παρακάτω τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της διεργασίας (Gunawardene et al., 2022).

Πλεονεκτήματα:

- Εύκολα εφαρμόσιμο για μεγάλης κλίμακας σε νεόκτιστους και υφιστάμενους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς αναβάθμιση και ανακατασκευή
- Η επισκευή δεν διακόπτει τη διεργασία ολόκληρης της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής και μπορεί να ρυθμιστεί ή να διαχειριστεί εύκολα
- Μικρότερος χρόνος που απαιτείται για τη κατασκευή

Μειονεκτήματα:

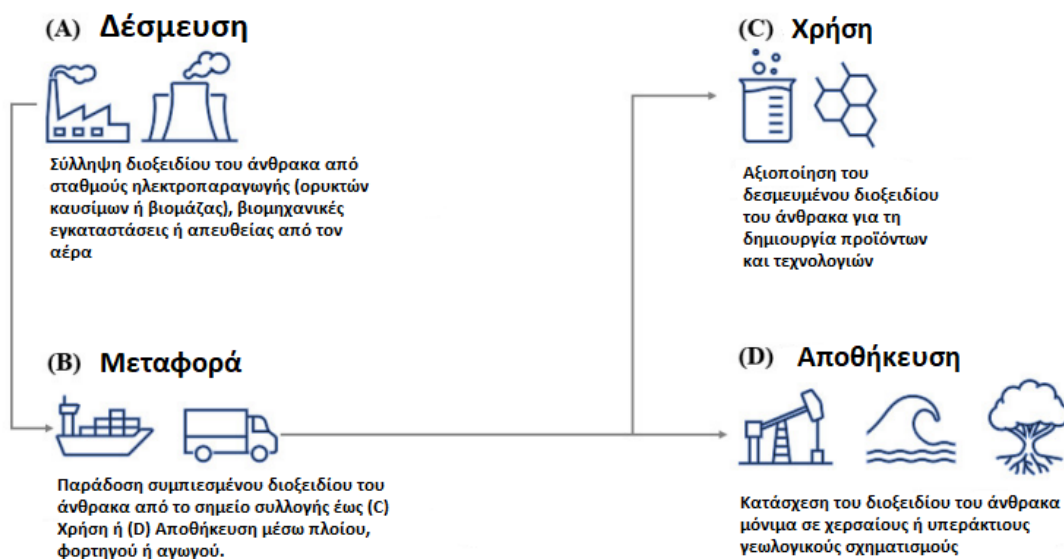
- Απαιτήση τεράστιων ενεργειακών αποθεμάτων για την αναγέννηση του ροφητικού (διαλύματος απορρόφησης)
- Απαιτεί το διαχωρισμό των προσμίξεων από το συλληφθέν CO₂
- Το CO₂ στα καυσαέρια αραιώνεται με συγκέντρωση που κυμαίνεται από 10-15%, γεγονός που απαιτεί υψηλό κόστος ανάκτησης και κεφαλαίου και 25-35% επιπλέον ενέργεια για τη λειτουργία της μονάδας

Κατά τη διάρκεια της καύσης (Καύση με οξυγόνο): Περιλαμβάνει την καύση ορυκτών καυσίμων σε περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο αντί για αέρα και έχει ως αποτέλεσμα ένα ρεύμα καυσαερίων με υψηλότερη συγκέντρωση CO₂ (Arachchige et al., n.d.). Αφενός αποφεύγει την απαίτηση χημικών ουσιών ή άλλων μέσων διαχωρισμού του CO₂ από τα καυσαέρια, αφετέρου έχει μεγάλη απαίτηση ενεργειακού κόστους για την παροχή καθαρού οξυγόνου, διότι το καθαρό οξυγόνο είναι ακριβό και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι υψηλότερες λόγω της ενεργοβόρας διαδικασίας διαχωρισμού των αερίων (Gunawardene et al., 2022). Επιπλέον, το καυσαέριο κατά την καύση με οξυγόνο περιέχει συνήθως περίπου 95% CO₂, γεγονός που καθιστά ευκολότερη τη δέσμευση και την αποθήκευσή του. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές Δέσμευσης και Αποθήκευσης διοξειδίου

του άνθρακα ή αλλιώς Carbon Capture and Storage (CCS) (Vaz et al., 2022). Η καύση με οξυγόνο χρησιμοποιείται συχνά στην παραγωγή ενέργειας και σε βιομηχανικές διεργασίες. Λόγω των διαφορετικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται όπως SO_x , HCl και NO_x υπάρχουν πιθανότητες δημιουργίας απαερίων. Το CO_2 που δεσμεύεται με το σύστημα αυτό, συμπιέζεται και μεταφέρεται με αγωγούς από αλουμίνιο, σίδηρο ή χάλυβα (Malini et al., 2023).

Το στάδιο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η δέσμευση των αερίων είναι σημαντικό για τον καθορισμό των τεχνολογιών διαχωρισμού. Στόχος είναι πάντα να παρέχεται η καλύτερη τεχνολογία που ανταποκρίνεται στις κριτήρια του κόστους, του διαθέσιμου χρόνου, της καθαρότητας και της αφθονίας του CO_2 (Vaz et al., 2022).

Ένα ακόμη ζήτημα που πρέπει να επιλυθεί είναι η διαχείριση του δεσμευμένου CO_2 . Οι τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης, που συνήθως αναφέρονται ως Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) αντιπροσωπεύουν μια ολοκληρωμένη δέσμη τεχνολογιών που έχει μεγάλες δυνατότητες να συμβάλει σημαντικά στην επίτευξη των παγκόσμιων ενεργειακών και κλιματικών στόχων με διάφορους τρόπους. Μόλις συλλεχθεί, το συμπιεσμένο CO_2 μπορεί να μεταφερθεί μέσω διάφορων καναλιών, όπως αγωγοί, πλοία, σιδηρόδρομοι ή φορτηγά, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, εάν δεν χρησιμοποιηθεί αμέσως μετά τη δέσμευση. Επιπλέον, οι CCUS προσφέρουν τη δυνατότητα διοχέτευσης CO_2 σε βαθύτατους γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως αλατούχες δεξαμενές ή άδειες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου, παρέχοντας μια ασφαλής και διαρκή φύλαξη για το αποθηκευμένο CO_2 . Το Σχήμα 4 παρέχει μια αναπαράσταση της αξιακής αλυσίδας CCUS. Επί του παρόντος, οι εγκαταστάσεις CCUS που λειτουργούν παγκοσμίως διαθέτουν την ικανότητα να μειώνουν περισσότερους από 40 εκατομμύρια μετρικούς τόνους (Mt) ισοδύναμου CO_2 ετησίως (Mon et al., 2024).



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση της ολοκληρωμένης αξιακής αλυσίδας δέσμμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS) (Mon et al., 2024)

2.1.2 Απορρόφηση

Κατά την απορρόφηση, ένα συστατικό μιας αέριας φάσης μεταφέρεται σε ένα υγρό ή ένα στερεό. Στόχος είναι η απομάκρυνση του συστατικού από την αέρια φάση όσο το δυνατόν πιο επιλεκτικά μέσω του απορροφητικού μέσου. Υπάρχει διάκριση μεταξύ χημικής και φυσικής απορρόφησης.

Η **φυσική απορρόφηση** χρησιμοποιείται συνήθως στη δέσμμευση πριν από την καύση (Kammerer et al., 2023) και χρησιμοποιεί φυσικούς διαλύτες, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω, για την απορρόφηση του CO₂ χωρίς χημική αντίδραση. Η κινητήρια δύναμη για την απορρόφηση του CO₂ στον διαλύτη οφείλεται στη διαλυτότητα, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης και τη μείωση της θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, οι καλύτερες συνθήκες για τη διαδικασία απορρόφησης CO₂ είναι σε υψηλή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία με τη φυσική απορρόφηση να λαμβάνεται υπόψη όταν η μερική πίεση του CO₂ είναι μεγαλύτερη από 3.5 bar και ταυτόχρονα απαιτείται μαζική απομάκρυνση του CO₂ (Ban et al., 2014).

Τα κύρια και σημαντικότερα πλεονεκτήματά της είναι (Ban et al., 2014) :

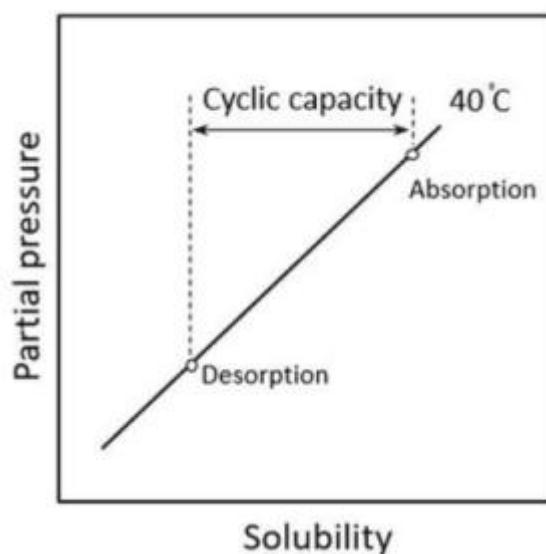
- ότι έχει σχετικά χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας
- οι σωληνώσεις και ο εξοπλισμός δεν χρειάζεται να είναι από κράμα χάλυβα, καθώς ο διαλύτης δεν είναι διαβρωτικός.
- δεν απαιτείται εξωτερική θερμότητα για τη διαδικασία απορρόφησης και η μόνη σημαντική κατανάλωση ενέργειας οφείλεται στις αντλίες ανάκτησης διαλύτη και στον συμπιεστή ανάκτησης αερίου. Έτσι, η διαδικασία

λειτουργίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με χαμηλό κόστος, γεγονός που την καθιστά σε πλεονεκτική θέση σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες.

- επιπλέον, η διαδικασία αναγέννησης του διαλύτη μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με μείωση της πίεσης, επαφή με αδρανή αέρια ή θερμική αναγέννηση. Η μείωση της πίεσης και η επαφή με αδρανές αέριο απαιτούν ελάχιστη ενέργεια, ενώ η θερμική αναγέννηση μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, αλλά εξακολουθεί να είναι σημαντικά χαμηλότερη από την ενέργεια που απαιτείται για τη χημική απορρόφηση.
- Εκτός από αυτό, η φυσική απορρόφηση είναι σε θέση να απορροφήσει επιλεκτικά το υδρόθειο, ακόμη και τις δευτερεύουσες προσμίξεις αερίου, όπως το καρβονυλοσουλφίδιο και οι μερκαπτάνες, χωρίς υποβάθμιση του διαλύτη.

Για την απομάκρυνση μαζικού CO₂, η διαλυτότητα του CO₂ στο συγκεκριμένο διαλύτη είναι το κύριο κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου διαλύτη για τη διαδικασία φυσικής απορρόφησης. Ωστόσο, ο νόμος του Henry, που θα αναλυθεί παρακάτω, ισχύει μόνο για αραιά διαλύματα (Ban et al., 2014).

Θεωρείται γενικά ότι η διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα βασίζεται στο νόμο του Henry, ο οποίος ορίζει ότι το φορτίο ενός διαλυμένου αερίου σε έναν φυσικό διαλύτη είναι ανάλογο της μερικής πίεσης του αερίου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ισορροπίας αερίου-υγρού (Σχήμα 5), ο φυσικός διαλύτης απορροφά ένα δεδομένο αέριο υπό συνθήκες υψηλής μερικής πίεσης στην αέρια φάση και το εκροφά υπό συνθήκες χαμηλότερης μερικής πίεσης. Δεδομένου ότι ένα δεδομένο αέριο διαχωρίζεται από τον διαλύτη χρησιμοποιώντας την κινητήρια δύναμη μιας διαφοράς πίεσης, είναι δυνατή η απομάκρυνση και ανάκτηση του αερίου με λιγότερη ενέργεια (Arachchige et al., n.d.).



Σχήμα 5: Φυσική απορρόφηση (Arachchige et al., n.d.)

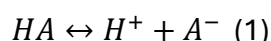
Υπάρχουν μερικοί τύποι διαδικασίας φυσικής απορρόφησης με διαφορετικούς εμπορικούς φυσικούς διαλύτες που διατίθενται στην αγορά, οι οποίοι είναι μη διαβρωτικοί και μη τοξικοί, όπως (Ban et al., 2014) :

- Estasolvan (φωσφορικό τριβουτύλιο ή TBP),
- Fluor Solvent (ανθρακικό προπυλένιο ή PC),
- Purisol (κανονική μεθυλική πυρρολιδόνη ή NMP),
- Rectisol και Ifrexol (μεθανόλη),
- Selexol (διμεθυλαιθέρας πολυαιθυλενογλυκόλης ή DEPG) και
- Sepasolv-MPE (μείγμα διακυλαιθέρων πολυαιθυλενογλυκόλης)

Η **χημική απορρόφηση** περιλαμβάνει την αντίδραση του CO₂ με έναν χημικό διαλύτη για να σχηματιστεί μια ασθενώς συνδεδεμένη ενδιάμεση ένωση, η οποία μπορεί να αναγεννηθεί με την εφαρμογή θερμότητας, παράγοντας τον αρχικό διαλύτη και ένα ρεύμα CO₂. Η εκλεκτικότητα αυτής της μορφής διαχωρισμού είναι σχετικά υψηλή και μπορεί να παραχθεί ένα σχετικά καθαρό ρεύμα CO₂. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν τη χημική απορρόφηση κατάλληλη για τη δέσμευση CO₂ για βιομηχανικά καυσαέρια (Kammerer et al., 2023),(Wang et al., 2011).

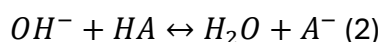
Μία κατηγορία χημικών διαλυτών είναι τα ρυθμιστικά διαλύματα. Ένα ρυθμιστικό διάλυμα Henderson-Hasselbalch είναι ένα όξινο ή βασικό υδατικό διάλυμα που αποτελείται από ένα μείγμα ενός ασθενούς οξέος και της συζυγούς βάσης του ή μιας ασθενούς βάσης και του συζυγούς της οξέος. Το pH του μεταβάλλεται ελάχιστα έως καθόλου όταν προστίθεται σε αυτό μικρή ποσότητα ισχυρού οξέος ή βάσης. Τα ρυθμιστικά διαλύματα χρησιμοποιούνται ως μέσο διατήρησης του pH σε μια σχεδόν σταθερή τιμή σε μια ευρεία ποικιλία χημικών εφαρμογών. Στη φύση, υπάρχουν πολλά ζωντανά συστήματα που χρησιμοποιούν ρυθμιστικά διαλύματα για τη ρύθμιση του pH. Για παράδειγμα, το ρυθμιστικό σύστημα διττανθρακικών χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του pH του αίματος και τα διττανθρακικά δρουν επίσης ως ρυθμιστικό στοιχείο στον ωκεανό (Bookin et al., 2009).

Τα ρυθμιστικά διαλύματα αντιστέκονται στην αλλαγή του pH λόγω της χημικής ισορροπίας μεταξύ του ασθενούς οξέος HA και της συζυγούς βάσης A⁻ η οποία φαίνεται στην εξίσωση (1) (Bookin et al., 2009).

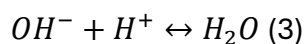


Όταν προστίθεται κάποιο ισχυρό οξύ σε ένα μίγμα ισορροπίας του ασθενούς οξέος και της συζυγούς βάσης του, προστίθενται ιόντα υδρογόνου (H⁺) και η ισορροπία μετατοπίζεται προς τα αριστερά, σύμφωνα με την αρχή του Le Chatelier. Εξαιτίας αυτού, η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου αυξάνεται κατά λιγότερο από το ποσό που αναμενόταν για την ποσότητα του ισχυρού οξέος που προστέθηκε. Ομοίως, εάν προστεθεί ισχυρή βάση στο μείγμα, η συγκέντρωση ιόντων

υδρογόνου μειώνεται κατά λιγότερο από το ποσό που αναμένεται για την ποσότητα του αλκαλίου που προστίθεται (βλ. εξίσωση (2)) (Bookin et al., 2009).



Μόνο ένα μικρό μέρος καταναλώνεται στην αντίδραση εξουδετέρωσης η οποία είναι η αντίδραση που οδηγεί σε αύξηση του pH (εξίσωση (3)) (Bookin et al., 2009).



Το pH ενός ρυθμιστικού διαλύματος μπορεί να μεταβάλλεται μόνο εντός ενός στενού εύρους, ανεξάρτητα από το τι άλλο μπορεί να υπάρχει στο διάλυμα. Στα βιολογικά συστήματα αυτή είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των ενζύμων. Για παράδειγμα, στο ανθρώπινο αίμα ένα μείγμα ανθρακικού οξέος (H_2CO_3) και διττανθρακικών (HCO_3^-) είναι παρόν στο κλάσμα του πλάσματος που αποτελεί τον κύριο μηχανισμό για τη διατήρηση του pH του αίματος μεταξύ 7.35 και 7.45 (Bookin et al., 2009). Εάν η τιμή του pH ενός διαλύματος αυξάνεται ή μειώνεται υπερβολικά, η αποτελεσματικότητα ενός ενζύμου μειώνεται σε μια διαδικασία, γνωστή ως μετουσίωση, η οποία είναι συνήθως μη αναστρέψιμη. Στη βιομηχανία, οι ρυθμιστικοί παράγοντες χρησιμοποιούνται σε διεργασίες ζύμωσης και στον καθορισμό των σωστών συνθηκών για τις βαφές που χρησιμοποιούνται για τον χρωματισμό των υφασμάτων. Χρησιμοποιούνται επίσης στη χημική ανάλυση και στη βαθμονόμηση των μετρητών pH (Bookin et al., 2009).

Για τα όξινα ρυθμιστικά διαλύματα το pH μπορεί να ρυθμιστεί στην επιθυμητή τιμή με την προσθήκη ενός ισχυρού οξέος, όπως υδροχλωρικό οξύ. Για τα βασικά διαλύματα, μπορεί να προστεθεί μια ισχυρή βάση, όπως το υδροξείδιο του νατρίου. Εναλλακτικά, ένα ρυθμιστικό διάλυμα μπορεί να παρασκευαστεί από μείγμα ενός οξέος και της συζυγούς βάσης του. Για παράδειγμα, ένα ρυθμιστικό διάλυμα οξικού οξέος μπορεί να παρασκευαστεί από μείγμα οξικού οξέος και οξικού νατρίου. Ομοίως, ένα αλκαλικό ρυθμιστικό διάλυμα μπορεί να παρασκευαστεί από ένα μείγμα της βάσης και του συζυγούς οξέος της (Bookin et al., 2009).

Η εξίσωση Henderson-Hasselbalch (εξίσωση (4)) αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό του pH ενός ρυθμιστικού διαλύματος μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του ασθενούς οξέος ή της ισχυρής βάσης ανάλογα (Bookin et al., 2009).

$$pH = pK_a + \log_{10} \frac{[A^-]}{[HA]} \quad (4)$$

Η pK_a αντιπροσωπεύει τη σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης διάσπασης του ασθενούς οξέος. Είναι ένα μέτρο της τάσης του οξέος να δώσει ένα πρωτόνιο (H^+). Όσο χαμηλότερη είναι η pK_a , τόσο ισχυρότερο είναι το οξύ και όσο υψηλότερη

είναι η pK_a , τόσο ασθενέστερο είναι το οξύ. Επίσης, ισχύει η εξίσωση (5) για τον υπολογισμό της pK_a σύμφωνα με την αντίδραση ισορροπίας (εξίσωση (1)) (Bookin et al., 2009).

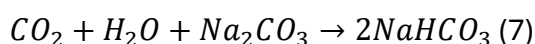
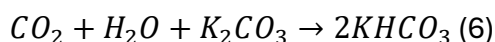
$$pK_a = -\log_{10}(K_a) = -\log_{10}\left(\frac{[H^+][A^-]}{[HA]}\right) \quad (5)$$

Τα ρυθμιστικά διαλύματα έχουν καλύτερη ρυθμιστική ικανότητα για τιμές pH κοντά στην pK_a , ενώ όσο απομακρύνεται από αυτήν η ρυθμιστική ικανότητα χάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν το pH είναι ίσο με την pK_a , ο όρος \log_{10} στην εξίσωση (5) γίνεται μηδέν, άρα η συγκέντρωση της συζυγούς βάσης ($[A^-]$) είναι ίση με τη συγκέντρωση του ασθενούς οξέος ($[HA]$) στο ρυθμιστικό διάλυμα. Σε αυτό το σημείο, το ρυθμιστικό διάλυμα βρίσκεται στη βέλτιστη κατάσταση ώστε να αντιστέκεται στις μεταβολές του pH, διότι κάθε προσθήκη ενός όξινου ή βασικού συστατικού στο διάλυμα θα εξουδετερώνεται από την παρουσία ίσης συγκέντρωσης της συζυγούς βάσης του (Bookin et al., 2009).

Πολλές μελέτες έχουν καταδείξει τη χρήση **ανθρακικών διαλυμάτων** όπως ανθρακικό κάλιο, ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό νάτριο για την απορρόφηση CO_2 . Η τεχνολογία απορρόφησης ανθρακικών αλάτων έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως,

- χαμηλό κόστος διαλύτη
- υψηλή χημική διαλυτότητα του CO_2 στον διαλύτη
- χαμηλή τοξικότητα του διαλύτη
- χαμηλή ευαισθησία στην αποικοδόμηση και τη διάβρωση
- ιδιαίτερα αποτελεσματική και οικονομική αναγέννηση σε υψηλές θερμοκρασίες

Σε σύγκριση με άλλα ανθρακικά διαλύματα, το διάλυμα ανθρακικού καλίου (K_2CO_3) έχει υψηλότερη ικανότητα δέσμευσης και χρησιμοποιείται συχνότερα και επίσης, η αντίδραση απορρόφησης μεταξύ CO_2 και διαλύματος K_2CO_3 είναι εξώθερμη με το ανθρακικό να μετατρέπεται σε διττανθρακικό όπως δίνεται στην εξίσωση (6) και (7).



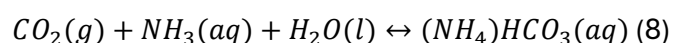
Ωστόσο, η εφαρμογή του διαλύματος K_2CO_3 για την απορρόφηση CO_2 αποτελεί μια σημαντική πρόκληση ως προς τον αργό ρυθμό αντίδρασης απορρόφησης. Για τη βελτίωση του ρυθμού αντίδρασης και της αποτελεσματικότητας της διεργασίας, αρκετοί ερευνητές έχουν διερευνήσει τη χρήση ενεργοποιητών

(activators), οι οποίοι μπορούν να αυξήσουν τον ρυθμό αντίδρασης, μειώνοντας έτσι το μέγεθος του εξοπλισμού και το κόστος κεφαλαίου (Ochedi et al., 2021).

Κατά την απορρόφηση, χρησιμοποιούνται υψηλές θερμοκρασίες (> 60 °C), ώστε να αποφευχθεί η καθίζηση του άλατος. Η διεργασία γίνεται υπό αυξημένη πίεση (>20 bar), η οποία οδηγεί σε βελτιωμένη μεταφορά μάζας (Kammerer et al., 2023).

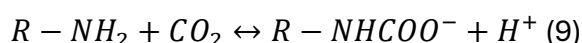
Οι **διαλύτες με βάση την NH₃** έχουν τα πλεονεκτήματα της χαμηλής αποικοδόμησης στο περιβάλλον των καυσαερίων, του χαμηλού επιπέδου διάβρωσης, της εύκολης αναγέννησης, της υψηλής ικανότητας απορρόφησης και της ικανότητας δέσμευσης πολλαπλών ρύπων (NO_x και SO_x). Επιπλέον, οι διεργασίες με βάση υδατικών διαλυμάτων με αμμωνία (NH₃) επιτρέπουν την απομάκρυνση του CO₂ σε υψηλές πιέσεις, μειώνοντας έτσι το κόστος συμπίεσης του CO₂ (Ochedi et al., 2021).

Η συνολική διεργασία αναπαρίσταται από την παρακάτω εξίσωση (8):



Η διαφυγή της NH₃ είναι το σημαντικότερο εμπόδιο στην εφαρμογή αυτή, λόγω της πτητικής της ικανότητας. Ο υψηλός ρυθμός εξάτμισης NH₃ θα μειώσει τη συγκέντρωση της στο διάλυμα, οδηγώντας σε χαμηλότερη ικανότητα απορρόφησης CO₂ με αποτέλεσμα να απαιτείται αναπλήρωση NH₃ για να διατηρηθεί σταθερή η περιεκτικότητα της (Ochedi et al., 2021).

Οι **αμίνες** διακρίνονται γενικά σε πρωτογενείς (δύο άτομα υδρογόνου στο άζωτο), δευτερογενείς (ένα άτομο υδρογόνου στο άζωτο) και τριτογενείς αμίνες (κανένα άτομο υδρογόνου στο άζωτο). Οι πρωτογενείς και δευτερογενείς αμίνες είναι ασθενείς βάσεις, οι οποίες μπορούν να αντιδράσουν με το CO₂ σχηματίζοντας καρβαμικό (Ochedi et al., 2021). Η αντίδραση της πρωτογενούς αμίνης με το διοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζεται στην εξίσωση 9.



Οι πρωτογενείς και δευτερογενείς αμίνες έχουν ταχύτερη κινητική αντίδρασης αλλά υψηλή θερμότητα αντίδρασης και απαιτούν υψηλή ενέργεια αναγέννησης, ενώ οι τριτογενείς αμίνες έχουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης, χαμηλότερη θερμότητα απορρόφησης, χαμηλή ενέργεια αναγέννησης αλλά πιο αργή κινητική αντίδρασης (Ochedi et al., 2021).

Η μονοαιθανολαμίνη (MEA) και η μεθυλδαιθανολαμίνη (MDEA) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία διαχωρισμού του CO₂. Σε αυτή τη διαδικασία, το αέριο που πρόκειται να καθαριστεί εισέρχεται σε ένα περιέκτη υπό αυξημένη πίεση. Λεπτά κατανεμημένα σταγονίδια του απορροφητή αμίνης ψεκάζονται σε αυτό. Το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται πρώτα στο νερό και στη συνέχεια

συνδέεται με τη μονοαιθανολαμίνη σε μια χημική αντίδραση (Kammerer et al., 2023).

Μια εναλλακτική λύση έναντι των αμινών είναι τα **άλατα αμινοξέων**. Για να αυξηθεί η διαλυτότητα, τα αμινοξέα εξουδετερώνονται με μια ισχυρή βάση, όπως υδροξείδιο του νατρίου ή του καλίου. Η χρήση αμινοξέων έχει το πλεονέκτημα ότι είναι σταθερά έναντι οξειδωτικής και θερμικής αποικοδόμησης (Kammerer et al., 2023).

Τα άλατα αμινοξέων έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, όπως η χαμηλή πίεση ατμών, η χαμηλή τοξικότητα, η ιοντική φύση και το καλό δυναμικό βιοαποικοδόμησης (Ochedi et al., 2021).

Η αργινίνη, η προλίνη, η γλυσίνη και η σαρκosίνη που αναμειγνύονται με νάτριο, κάλιο ή λίθιο εφαρμόζονται ευρέως για την απορρόφηση CO₂ και η απόδοση απορρόφησης CO₂ των υδατικών διαλυμάτων λυσινικού καλίου ξεπερνά τα περισσότερα άλατα αμινοξέων και είναι συγκρίσιμη με τη μονοαιθανολαμίνη (Ochedi et al., 2021).

Τα **ιοντικά υγρά** είναι άλατα σε υγρή κατάσταση ή πολύ πυκνά υδατικά διαλύματα αλάτων, τα οποία αποτελούνται από ανιόντα και κατιόντα. Όταν χρησιμοποιούνται ιοντικά υγρά για τη δέσμευση CO₂, η πίεση ατμών μπορεί να αμεληθεί. Επίσης, είναι ελάχιστα εύφλεκτα, διαλύουν πολύ καλά το CO₂ και είναι θερμικά και χημικά σταθερά. Τα ιοντικά υγρά ταξινομούνται σε τρεις ομάδες: Ιοντικά υγρά σε θερμοκρασία δωματίου, Ιοντικά υγρά ειδικών εργασιών και Ιοντικά υγρά μεμβράνης με υποστήριξη. Τα ιοντικά υγρά σε θερμοκρασία δωματίου αποτελούνται από οργανικά κατιόντα και οργανικά ή ανόργανα ανιόντα. Τα ιοντικά υγρά ειδικών εργασιών συμπεριφέρονται ως χημικοί διαλύτες σε χαμηλές πιέσεις (<1 bar) και μπορούν να απορροφήσουν έως και τρεις φορές περισσότερο CO₂ από τα ιοντικά υγρά σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος, μια κατάλληλη εναλλακτική λύση, σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, καθίσταται ένα μείγμα ιοντικών υγρών ειδικών εργασιών και ιοντικών υγρών μεμβράνης με υποστήριξη (Kammerer et al., 2023).

2.1.3 Προσρόφηση

Σε μια διαδικασία **προσρόφησης**, συστατικά αέριας φάσης προσκολλώνται στη στερεά επιφάνεια. Στην περίπτωση της **φυσικής προσρόφησης**, οι ουσίες προσδένονται στην επιφάνεια του στερεού με δυνάμεις διασποράς London, ενώ στην περίπτωση της **χημικής προσρόφησης**, τα μόρια σχηματίζουν χημικό δεσμό (ομοιοπολικό ή ιοντικό) στη διεπιφάνεια της φάσης. Είναι σημαντικό τα προσροφητικά, εκτός από τις χημικές τους ιδιότητες, να έχουν μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με τη μάζα τους. Επιπλέον, το προσροφητικό θα πρέπει να έχει

διαθεσιμότητα, εκλεκτικότητα CO₂, υψηλή σταθερότητα, εύκολη αναγέννηση, χαμηλό κόστος και επαρκή ικανότητα προσρόφησης (Kammerer et al., 2023).

Φυσικά προσροφητικά υλικά (Lai et al., 2021):

- ζεόλιθοι
- πυριτικά υλικά
- MOF
- ενεργός άνθρακας
- COF
- υλικά με βάση τα αλκαλικά μέταλλα/οξειδία μετάλλων
- διατεταγμένος πορώδης άνθρακας,
- ACF
- γραφένιο
- CMS
- και τα σύνθετα υλικά τους μέσω διαδικασίας ενσωμάτωσης με χρήση διαφόρων προσροφητικών

Ζεόλιθοι: Τα φυσικά και συνθετικά ροφητικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες διαχωρισμού αερίων και σε διαδικασίες καθαρισμού καυσαερίων. Τα πορώδη πυριτικά συστήματα με βάση το ζεόλιθο έχουν αρνητικό φορτίο στη δομή των πόρων τους, το οποίο βοηθά στο διαχωρισμό των μορίων CO₂ μέσω του φαινομένου της μοριακής κοσκίνισης (Arachchige et al., n.d.). Οι ζεόλιθοι μπορούν να παραχθούν συνθετικά ή φυσικά και είναι μικροπορώδη και κρυσταλλικά υλικά πυριτικού σκελετού. Έχουν ομοιόμορφο μέγεθος πόρων (0.5-1.2 nm) και συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο καναλιών. Τα κατιόντα αλκαλίων και αλκαλικών γαιών έχουν ενσωματωθεί σε ζεόλιθους χαμπαζίτη που μελετήθηκαν για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίοι με νάτριο και ασβέστιο είχαν πλεονεκτήματα σε διαχωρισμούς υψηλής θερμοκρασίας και ο ζεόλιθος NaX έδειξε καλά αποτελέσματα στο διαχωρισμό σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, η προσρόφηση CO₂ με ζεόλιθους εξαρτάται από τη δομή τους, τη σύνθεση του πλαισίου τους, το σχήμα, το μέγεθος, την καθαρότητα, την πολικότητα και τις κατιονικές καταστάσεις. Ένας άλλος μηχανισμός είναι η επιλεκτική προσρόφηση μορίων με μεγάλη ενεργητική διπολική και τετραπολική ροπή. Το CO₂ έχει υψηλή τετραπολική ροπή που μπορεί να αλληλεπιδράσει με το πεδίο ηλεκτρονίων που δημιουργείται από τα δομικά κατιόντα των ζεόλιθων. Η απορρόφηση του CO₂ επηρεάζεται από την πίεση και τη θερμοκρασία, έτσι χρησιμοποιείται πίεση άνω των 2 bar (Kammerer et al., 2023).

Πυριτικά υλικά: Τα προσροφητικά διοξειδίου του πυριτίου είναι μεσοπορώδη υλικά με κανονικό κυλινδρικό μεσοπορώδες κανάλι με πόρους διαμέτρου 2-30 nm και μεγάλη επιφάνεια (700-1500 m²·g⁻¹). Τα μεσοπορώδη υλικά διοξειδίου του πυριτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσρόφηση CO₂ λόγω της

υψηλής χημικής και θερμικής σταθερότητάς τους, της ρυθμιζόμενης διαμέτρου πόρων, της μεγάλης ειδικής επιφάνειας και της εύκολης προσρόφησης διοξειδίου του πυριτίου. Αυτά τα μεσοπορώδη υλικά διοξειδίου του πυριτίου μπορούν να συντεθούν χρησιμοποιώντας επεξεργασία sol-gel, τεχνικές υποβοηθούμενες από πρότυπα, τεχνικές υποβοηθούμενες από μικροκύματα και μεθόδους χημικής διάβρωσης (Lai et al., 2021).

MOFs: Οι νανοδομές που προέρχονται από MOF έχουν χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για προσρόφηση CO₂ αλλά και για προσρόφηση υδρογόνου, προσρόφηση μεθανίου/αιθανίου, προσρόφηση άλλων υδρογονανθράκων, καθώς και στην κατάλυση δεδομένης της εξαιρετικής χημικά ρυθμιζόμενης γεωμετρίας των πόρων τους, της επιφανειακής λειτουργικότητας εντός των πλαισίων και των υψηλών επιφανειών επαφής. Αυτά τα χαρακτηριστικά υφής μπορούν με τη σειρά τους να διευκολύνουν μεγάλες ικανότητες προσρόφησης και τον έλεγχο της εκλεκτικότητας στην προσρόφηση. Τα MOFs παρουσιάζουν τρισδιάστατες κρυσταλλογραφικά καλά καθορισμένες δομές και ανώτερες επιφάνειες από 1000-10000 m²·g⁻¹. Αυτά τα προσροφητικά είναι νέα υβριδικά υλικά που αποτελούνται από ιόντα μετάλλων, συμπλέγματα μετάλλων και οργανικά συνδετικά με μεγέθη πόρων που κυμαίνονται έως και 150 nm (Lai et al., 2021).

Ενεργός άνθρακας: Ο ενεργός άνθρακας είναι ένα ανθρακούχο προσροφητικό υλικό που μπορεί να συντεθεί με φυσικές ή χημικές διαδικασίες ενεργοποίησης ή με συνδυασμό και των δύο. Ο ενεργός άνθρακας έχει άμορφη δομή με υψηλό βαθμό πορώδους, ο οποίος μπορεί να βρεθεί σε μορφή σκόνης, κόκκων, σφαιριδίων, ινών και υφασμάτων. Έχει κυλινδρικό, ορθογώνιο ή ακανόνιστο σχήμα πόρων με διαμέτρους πόρων που κυμαίνονται από 0.8-10 nm (μικροπόροι), 10-50 nm (μεσοπόροι) και 50-2000 nm (μακροπόροι). Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενεργού άνθρακα για τη δέσμευση CO₂ περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος, καλή θερμική σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες υπό αδρανή ατμόσφαιρα, χαμηλή αντιδραστικότητα οξέων-βάσεων, υψηλή ικανότητα προσρόφησης σε πίεση περιβάλλοντος, καλά αναπτυγμένη δομή πόρων, μεγάλη πορώδη επιφάνεια, ρυθμιζόμενη επιφανειακή σύσταση και δομή πόρων, καλές μηχανικές ιδιότητες, καλή σταθερότητα σε υγρή κατάσταση, εύκολη αναγέννηση, υψηλή υδροφοβικότητα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ατμοσφαιρική πίεση και μέτρια θερμοκρασία (Lai et al., 2021),(Arachchige et al., n.d.). Οι δοκιμασμένοι παράγοντες προσρόφησης μπορούν να διαχωρίσουν ένα μείγμα 14% CO₂ με υπολειμματικό N₂ στους 50 °C (Kammerer et al., 2023).

Ροφητικά με βάση πολυμερή: Τα ροφητικά με βάση τα πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δέσμευση CO₂ σε κλειστά περιβάλλοντα, όπως τα αεροσκάφη, τα υποβρύχια και τα διαστημόπλοια, με συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂<1%). Ωστόσο, το κόστος αυτών των απορροφητικών υλικών είναι πολύ υψηλό για εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας (Arachchige et al., n.d.).

Χημικά προσροφητικά υλικά (Lai et al., 2021) :

- σύνθετα προσροφητικά που παρασκευάζονται με εμποτισμό με K_2CO_3 , δυαδικό ευτηκτικό μείγμα (KNO_3 και $LiNO_3$), $NaNO_3$, Al_2O_3 , TiO_2 , MnO_2 , ZnO , ιοντικό υγρό (IL),
- υδατική αμίνη [δηλ, τετρααιθυλενοπενταμίνη (TEPA), πολυ(αλλυλαμίνη) (PAA), πολυαιθυλενοϊμίνη (PEI), αιθυλενοδιαμίνη (EDA), διαιθυλενοτριαμίνη (DETA), πεντααιθυλενοεξαμίνη (PEHA), N-διμεθυλαιθυλενοδιαμίνη (DMEDA), μονοαιθανολαμίνη (MEA), λυσίνη, γλυκίνη, προλίνη, αλανίνη, τριαιθυλενοτετραμίνη (TETA) και 2-αμινο-2-μεθυλο-1-προπανόλη (AMP)]

Προσροφητικά με βάση την αμίνη: Οι αμίνες χρησιμοποιούνται για τη λειτουργικότητα στερεών πορωδών υλικών. Μια υψηλή πυκνότητα ομάδων αμίνης στο υλικό φορέα είναι επιθυμητή. Στερεά προσροφητικά υλικά που έχουν λειτουργήσει με πολυμερείς αμίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό (Kammerer et al., 2023).

2.1.4 Κρυογονικές Διεργασίες

Στην **κρυογονική διαδικασία**, το διοξείδιο του άνθρακα διαχωρίζεται φυσικά από το καυσαέριο. Αυτό μπορεί να γίνει με συμπύκνωση, εξάχνωση ή απόσταξη. Η προϋπόθεση για μια κρυογονική διεργασία είναι ότι η θερμοκρασία εξάχνωσης του CO_2 πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εξάχνωσης του άλλου αέριου συστατικού. Επιπλέον, οι κρυογονικές τεχνολογίες διαχωρίζουν το αέριο CO_2 από τα καυσαέρια χρησιμοποιώντας τις διαφορετικές ιδιότητες συμπύκνωσης και αποσυμπίεσης τους. Αυτή η μέθοδος μπορεί να επιτύχει υψηλότερη ανάκτηση CO_2 (99.99%) και καθαρότητα (99.99%) από άλλες τεχνολογίες διαχωρισμού. Παρόλο που μπορεί να υπάρχει κίνδυνος απόφραξης από άλλα συστατικά (π.χ. νερό) και αύξηση του κόστους δέσμευσης (Kammerer et al., 2023), (Song et al., 2019).

Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (πάνω από περίπου 70%) στο αέριο, τόσο πιο αποδοτική γίνεται η μέθοδος αυτή. Για την παραγωγή υγρού CO_2 , η κρυογονική δέσμευση CO_2 είναι επίσης κατάλληλη, επειδή η μεταφορά με άντληση του υγρού CO_2 απαιτεί λιγότερη ενέργεια. Μια υβριδική διεργασία που αποτελείται από μια διεργασία προσρόφησης ακολουθούμενη από μια κρυογονική διεργασία αποτελεί μία ιδανική λύση (Kammerer et al., 2023).

Εμπορικά, ο διαχωρισμός με χρήση της κρυογονικής διαδικασίας πραγματοποιείται για ρεύματα αερίων αποβλήτων με περισσότερο από 90% CO_2 , επειδή η διεργασία είναι οικονομικά αποδοτική μόνο σε επίπεδα άνω αυτής της συγκέντρωσης. Η διαδικασία αυτή περιορίζεται επίσης από την υψηλή ενέργεια

που απαιτείται για την ψύξη. Είναι συμβατές με διεργασίες πριν την καύση ή καύσης με οξυγόνο. Λόγω του υψηλού κόστους ψύξης, πρέπει να αναπτυχθούν διεργασίες για να μειωθεί το κόστος αυτό (Kammerer et al., 2023).

Παραδείγματα τεχνολογιών κρυογένεσης είναι οι κρυογονικοί packed bed reactors, ο εξωτερικός βρόχος ψύξης κρυογονικής δέσμευσης άνθρακα, η διαδικασία δέσμευσης CO₂ έναντι της εξάχνωσης, η κρυογονική απόσταξη, η ελεγχόμενη ζώνη κατάψυξης, η διαδικασία CryoCell και το σύστημα ψύξης Stirling. Η τεχνολογία CryoCell® χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα από το φυσικό αέριο σε υγρή μορφή. Ένα άλλο συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο και η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το διαφορετικό σημείο εξάχνωσης του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου. Μια στερεή φάση με καθαρό διοξείδιο του άνθρακα δημιουργείται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Μια πυκνή φάση με υψηλό ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα και μια ελαφριά φάση με χαμηλό ποσοστό δημιουργούνται. Σε ένα δοχείο διαχωρισμού οι φάσεις υποβάλλονται σε φυσικό διαχωρισμό. Στον πυθμένα του δοχείου συλλέγεται το στερεό διοξείδιο του άνθρακα και λιώνει εκεί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να προσαρμοστεί για διαφορετικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα στο φυσικό αέριο (Kammerer et al., 2023),(Song et al., 2019).

Πλεονεκτήματα των κρυογονικών τεχνολογιών δέσμευσης CO₂:

Κατά τη δέσμευση του CO₂, η χρήση και η αποθήκευση είναι οι τυπικές διαδρομές για μεγάλες ποσότητες CO₂. Και για τις δύο αυτές διαδρομές, είναι απαραίτητη η συμπίεση και η μεταφορά με αγωγούς για την παράδοση του παραγόμενου CO₂ σε καθορισμένες τοποθεσίες. Η καθαρότητα του προϊόντος του CO₂ είναι βασικός παράγοντας για τη μεταφορά, τη χρήση και την αποθήκευση- ειδικά για την αποθήκευση, καθώς η τοποθεσία είναι συνήθως μακριά από τη μονάδα δέσμευσης CO₂. Το CO₂ υψηλής καθαρότητας μπορεί εύκολα να συμπιεστεί στην απαιτούμενη πίεση και στη συνέχεια να μεταφερθεί. Κατά τη διάρκεια των κρυογονικών διαδικασιών, το CO₂ μπορεί να δεσμευτεί σε διάφορες φάσεις, π.χ. σε υγρή, στερεή ή συνδυασμό (πολτός CO₂). Σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες διαχωρισμού, το CO₂ που δεσμεύεται με κρυογονικές μεθόδους, όπως αναφέρθηκε, μπορεί να επιτύχει υψηλότερη καθαρότητα (πάνω από 99.99%) λόγω των εγγενών ιδιοτήτων της αποσυμπίεσης.

Υψηλής καθαρότητας CO₂ μπορούν να μετατραπούν αποτελεσματικότερα σε πολύτιμες χημικές ουσίες με καταλυτικές ή βιολογικές αντιδράσεις (π.χ. αναμόρφωση μεθανίου με ατμό και τεχνητή φωτοσύνθεση), και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανικά τρόφιμα, λιπάσματα και άλλα.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των κρυογονικών διεργασιών είναι ότι μπορεί να αποφευχθεί μια πρόσθετη επεξεργασία συμπίεσης και συνεπώς η συνολική ενεργειακή ποινή μειώνεται. Επίσης, το προϊόν CO₂ χαμηλής θερμοκρασίας θα

μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί ως πιθανή πηγή ψυχρής ενέργειας στη βιομηχανία (π.χ. μηχανικός καθαρισμός), και συνεπώς, μπορεί να ενσωματωθεί με άλλες διεργασίες χαμηλής θερμοκρασίας (π.χ. υγροποίηση φυσικού αερίου). Σε σύγκριση με την παραδοσιακή διαδικασία απορρόφησης ή προσρόφησης, το κόστος κεφαλαίου (CAPEX) των κρυογονικών μεθόδων είναι χαμηλό λόγω του μικρότερου εξοπλισμού τους (χωρίς τη χρήση μεγάλου πύργου απορρόφησης/προσρόφησης). Επιπλέον τα λειτουργικά έξοδα των κρυογονικών μεθόδων μειώνονται επειδή ο διαλύτης/προσροφητικό αναγεννιέται (Song et al., 2019).

2.1.5 Μεμβράνες

Οι **μεμβράνες** που χρησιμοποιούνται είναι οι πολυμερή μεμβράνες, οι κεραμικές μεμβράνες, οι υβριδικές μεμβράνες και οι μεμβράνες επαφής. Οι διεργασίες των μεμβρανών διαχωρίζουν τα άτομα και τα μόρια ανάλογα με το μέγεθός τους. Τα μεγάλα σωματίδια δεν μπορούν να περάσουν μέσα από τη μεμβράνη και κατακρατούνται. Τα χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης καθορίζονται από τη διαπερατότητα και την εκλεκτικότητα. Μόνο η βαθμίδα συγκέντρωσης είναι η κινητήρια δύναμη του διαχωρισμού, επομένως, αυτές οι μέθοδοι είναι ενεργειακά ευνοϊκές, διότι δεν απαιτούν επιπλέον ενέργεια (Kammerer et al., 2023).

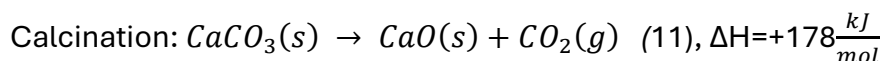
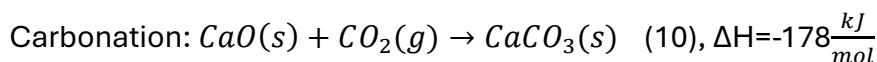
Οι μεμβράνες αναφέρονται συχνά ως πιθανές μέθοδοι διαχωρισμού μετά την καύση. Η χαμηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και η χαμηλή πίεση στο καυσαέριο είναι ένα σημαντικό πρόβλημα στη χρήση μεμβρανών. Ακόμη, πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για να δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα, δηλαδή πρέπει να είναι ανθεκτικές στη γήρανση και την πλαστικοποίηση, να έχουν υψηλή εκλεκτικότητα διοξειδίου του άνθρακα/αζώτου και υψηλή διαπερατότητα διοξειδίου του άνθρακα, να είναι οικονομικές και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικά συστατικά μεμβρανών (Kammerer et al., 2023).

Ορισμένες μεμβράνες είναι από τη φύση τους υδρόφοβες και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα χωρίς τροποποιήσεις. Παρόλα αυτά η απόδοση μπορεί να αυξηθεί με τροποποιήσεις στη χημική και θερμική σταθερότητα, την επιλογή υλικού, το πάχος, την ανθεκτικότητα, τη διαπερατότητα και την επιφάνεια επαφής (Kammerer et al., 2023).

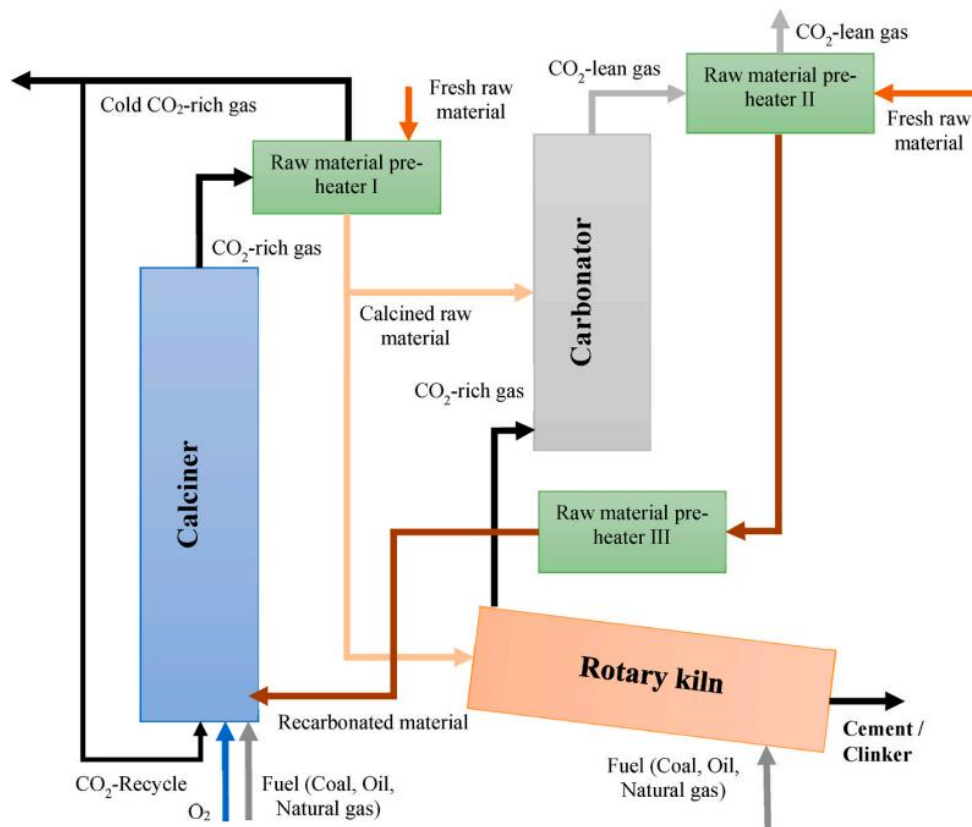
2.1.6 Μέθοδος CaO-looping

Το CaO αντιδρά με το CO₂ σε εύρος θερμοκρασιών 600-800 °C και αναγεννάται σε θερμοκρασία υψηλότερη των 800°C, όπου και διακόπτεται η αντίδραση που

ονομάζεται carbonation (ενανθράκωση) και ξεκινάει η αντίστροφη, η calcination (ασβεστοποίηση). Οι αντιδράσεις αυτές εμφανίζονται στις παρακάτω εξισώσεις (Sun et al., 2018) :



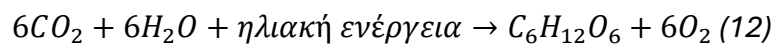
Το $CaCO_3/CaO$ με βρόχο ασβεστίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, έχει μελετηθεί ευρέως για τη δέσμευση άνθρακα στην τσιμεντοβιομηχανία, καθώς το ασβεστολιθικό $CaCO_3$ αποτελεί βασική πρώτη ύλη στην παραγωγή τσιμέντου. Επιπλέον, ο κλίβανος λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες καθιστώντας τον κατάλληλο για την κίνηση της διαδικασίας πύρωσης με ελάχιστες εξωτερικές ενεργειακές απαιτήσεις για την προστιθέμενη μονάδα δέσμευσης άνθρακα. Η επιλογή ενσωμάτωσης του Tail-end CaL ήταν η πιο μελετημένη επιλογή CaL, καθώς είναι εύκολο να ενσωματωθεί στην πλευρά της διεργασίας κατάντη με μικρές διασυνδέσεις με την κύρια αμαξοστοιχία παραγωγής τσιμέντου. Στο tail-end CaL το καυσαέριο από τον κλίβανο διοχετεύεται στον ανθρακοποιητή μέσω του CaO που παράγεται από τον καυστήρα, το οποίο υποκαθιστά μέρος του $CaCO_3$ του ακατέργαστου υλικού. Η δέσμευση άνθρακα λαμβάνει χώρα στον ανθρακοποιητή μέσω μιας εξώθερμης αντίδρασης ενανθράκωσης σε θερμοκρασίες περίπου $650^\circ C$. Στον calciner, η αναγέννηση του $CaCO_3$ σε CaO πραγματοποιείται μέσω μιας ενδόθερμης αντίδρασης πύρωσης. Η όλη διεργασία λαμβάνει χώρα σε αυξημένες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τη διεργασία αμίνης και χρησιμοποιεί CaO, μια πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου. Στον πυρωτήρα, ένα μέρος της πρώτης ύλης τροφοδοτείται στον κλίβανο για την παραγωγή του τσιμέντου, αλλά το υπόλοιπο μέρος της πρώτης ύλης τροφοδοτείται στον ανθρακοποιητή για δέσμευση άνθρακα λόγω της καύσης του καυσίμου σε έναν κλίβανο (Olabi et al., 2022).



Σχήμα 6: Διάγραμμα διεργασίας δέσμευσης άνθρακα με ανακύκλωση ασβεστίου για εργοστάσιο τσιμέντου (Olabi et al., 2022)

2.1.7 Φυσική δέσμευση του CO₂

Κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα και το μετατρέπουν σε γλυκόζη και νερό με την ενέργεια του ηλιακού φωτός. Η παρακάτω αντίδραση, εξίσωση (12), αναπαριστά τη διαδικασία αυτή:



Η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα στους χλωροπλάστες του φυτού καταλύεται από το ένζυμο ριβουλόζη-1.5-διφωσφορική καρβοξυλάση/οξυγενάση (Kammerer et al., 2023).

Η ενέργεια χάνεται σε πολλαπλά στάδια κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, εμποδίζοντας τα φυτά να δεσμεύουν αποτελεσματικότερα τον άνθρακα και να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χημική ενέργεια. Όσον αφορά την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι φωτοσυλλέκτες των χλωροπλάστων απορροφούν μόνο την ακτινοβολία που έχει μήκος κύματος μεταξύ 400 nm και 700 nm, το οποίο είναι περίπου ισοδύναμο με το φάσμα του ορατού φωτός. Τα μήκη κύματος σε αυτό το φάσμα αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 50% της συνολικής

ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, και ορισμένα από αυτά τα μήκη κύματος ανακλώνται αντί να απορροφώνται, μειώνοντας περαιτέρω την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που τα φυτά μπορούν να μετατρέψουν σε χημική ενέργεια. Επιπλέον, οι χλωροπλάστες αντιμετωπίζουν συχνά διακυμάνσεις του φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας, μεταβαίνοντας σε συνθήκες ήλιου-σκιάς και σκιάς-ήλιου λόγω των σύννεφων και άλλων φύλλων ή φυτών που κινούνται με τον άνεμο. Κατά τη διάρκεια αυτών των μεταβάσεων, μπορεί να χρειαστούν αρκετά λεπτά για να επανέλθει η φωτοσύνθεση στη μέγιστη λειτουργία υπό τις νέες συνθήκες φωτισμού, γεγονός που έχει εκτιμηθεί ότι «κοστίζει» 10% έως 40% της πιθανής δέσμευσης CO₂. Η φωτοαναπνοή και οι στοματικές και μεσοφυλικές αγωγιμότητες, οι οποίες καθορίζουν πόσο CO₂ φτάνει στους χλωροπλάστες, μπορούν επίσης να περιορίσουν τη φωτοσυνθετική απόδοση. Η φωτοαναπνοή συμβαίνει όταν το O₂ αντί για CO₂ δεσμεύεται στο Rubisco, ένα βασικό ένζυμο στην οδό δέσμευσης του άνθρακα, παράγοντας μια διαφορετική ένωση που πρέπει να ανακυκλωθεί μέσω της οδού της φωτοαναπνοής για να ανακτηθεί πίσω μέρος του άνθρακα για τη φωτοσύνθεση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να μειώσει τη φωτοσυνθετική απόδοση κατά 20% έως 50%.

Η φωτοσύνθεση έχει διάφορες μορφές, με τις οδούς C₃, C₄ και τον μεταβολισμό των οξέων της κρυσταλλοτροφίας Crassulacean Acid Metabolism (CAM) να είναι οι πιο συνηθισμένες στα φυτά. Περίπου το 85% των φυτών, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών καλλιεργειών όπως η σόγια, το ρύζι και το σιτάρι, χρησιμοποιούν τη φωτοσυνθετική οδό C₃. Σε αυτά τα φυτά, οι φωτοσυνθετικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στους χλωροπλάστες των μεσοφυλικών κυττάρων των φύλλων. Το CO₂ εισέρχεται στο φύλλο μέσω των στοματικών πόρων πριν φτάσει στους χλωροπλάστες. Όταν αυτά τα στόματα ανοίγουν για να εισέλθει CO₂, απελευθερώνεται επίσης νερό από τα φύλλα μέσω της διαπνοής. Ως εκ τούτου, τα φυτά πρέπει να εξισορροπούν τη δέσμευση CO₂ με την απώλεια νερού. Σε συνθήκες ξηρασίας, τα φυτά κρατούν τα στόματα κλειστά για να αποτρέψουν την απώλεια νερού. Αυτό εμποδίζει επίσης την είσοδο του CO₂ στα κύτταρα του μεσοφύλλου, οδηγώντας σε αύξηση της φωτοαναπνοής, η οποία συμβαίνει όταν το Rubisco, ένα βασικό ένζυμο της φωτοσύνθεσης, συνδέεται με O₂ αντί για CO₂.

Ως απάντηση στη φωτοαναπνοή, τα μονοπάτια C₄ και CAM έχουν εξελιχθεί ανεξάρτητα σε περίπου 3% και 6% των ανθοφόρων φυτικών ειδών, αντίστοιχα. Τα C₄ και CAM φωτοσυνθετικά μονοπάτια χρησιμοποιούν περισσότερη ενέργεια για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε γλυκόζη από ό,τι το C₃ μονοπάτι, αλλά έχουν το πλεονέκτημα της συγκέντρωσης του CO₂ γύρω από τη Rubisco, αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της αντίδρασης καρβοξυλίωσης, καθώς το CO₂ δεν ανταγωνίζεται πλέον με το O₂ για τη δέσμευση στο Rubisco.

Στα φυτά C4, όπως ο αραβόσιτος και το ζαχαροκάλαμο, το CO₂ εισέρχεται στα κύτταρα του μεσόφυλλου όπου μετατρέπεται σε ένα ενδιάμεσο προϊόν άνθρακα που μεταφέρεται από τα κύτταρα του μεσόφυλλου σε ένα άλλο κύτταρο του φύλλου, το δεματικό περίβλημα. Στα κύτταρα της θήκης των δεσμίδων, το ενδιάμεσο προϊόν άνθρακα μετατρέπεται στη συνέχεια ξανά σε CO₂ και συνδέεται με τη Rubisco και συνεχίζεται η πορεία δέσμευσης του άνθρακα. Στα φυτά CAM, όπως ο ανανάς και η αλόη βέρα, τα στόματα ανοίγουν μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας για να αποτρέψουν την απώλεια νερού. Το CO₂ που εισέρχεται στους χλωροπλάστες του μεσοφύλλου μετατρέπεται στη συνέχεια σε ένα ενδιάμεσο προϊόν. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα ενδιάμεσα προϊόντα άνθρακα μετατρέπονται ξανά σε CO₂, όπου στη συνέχεια συνδέονται με τη Rubisco και, όπως και με τη διαδικασία C4, συνεχίζεται η δέσμευση του άνθρακα. Δεδομένου ότι τα φυτά C4 και CAM αποθηκεύουν CO₂ ως ενδιάμεσα προϊόντα, έχουν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς το πότε να ανοίγουν τα στόματά τους, επιτρέποντάς τους να εξοικονομούν νερό καλύτερα από τα φυτά C3. Οι φωτοσυνθετικές οδοί C4 και CAM τείνουν να συναντώνται σε φυτά που είναι ενδημικά σε θερμά, ξηρά περιβάλλοντα, όπου η απώλεια νερού μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα.

Η τρέχουσα κατάσταση της (μη) αποτελεσματικότητας της φωτοσύνθεσης, σε συνδυασμό με τον αριθμό των δυνατοτήτων βελτίωσής της, υπογραμμίζει τις δυνατότητες της μηχανικής φωτοσύνθεσης για την αύξηση της δέσμευσης άνθρακα για τροφή και αποθήκευση. Οι επιστήμονες έχουν ήδη αποδείξει σε πειράματα θερμοκηπίου και πεδίου πώς μπορούμε να αυξήσουμε τη φωτοσύνθεση μέσω της μηχανικής επεξεργασίας διαφόρων τμημάτων της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης της ταχύτητας με την οποία οι φωτοσυνθετικοί μηχανισμοί ανταποκρίνονται στις διακυμάνσεις του φωτός της προσθήκης συντομότερων και λιγότερο δαπανηρών ενεργειακά μονοπατιών ανάκτησης της φωτοαναπνοής και της χειραγώγησης των φωτοσυνθετικών ενζύμων για την αύξηση των ρυθμών αντίδρασης. Εκτός από αυτές τις τροποποιήσεις, υπάρχει ακόμη ένας τεράστιος αριθμός επιλογών για τη μηχανική της φωτοσύνθεσης που διερευνάται, από την επέκταση του εύρους των μηκών κύματος που μπορούν να απορροφηθούν από την κεραία φωτοσυλλογής έως την εισαγωγή καρβοξυσωμάτων, τμημάτων συγκέντρωσης άνθρακα από γαλαζοπράσινη άλγη, σε μονοπάτια φωτοσύνθεσης C3 (Matthews, 2023).

2.1.8 Κινητική της δέσμευσης CO₂ σε υδατικά διαλύματα

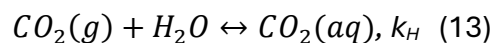
Ο γενικός μηχανισμός δέσμευσης CO₂ σε υδατικά περιβάλλοντα και ο διαχωρισμός του από άλλα αέρια, μπορεί να διασπαστεί στα 5 ακόλουθα στάδια (Pierre, 2012) :

- 1) Διαλυτοποίηση των μορίων του αερίου CO₂ στο νερό στην πλευρά της δέσμευσης του CO₂, σύμφωνα με την ισορροπία του Henry, με

αποτέλεσμα, ουδέτερα υδατικά μόρια $\text{CO}_2(\text{aq})$ να εισάγονται στο υδατικό διάλυμα σε άμεση επαφή με το αέριο.

- 2) Αναστρέψιμη μετατροπή με αποπρωτονίωση του ουδέτερου είδους $\text{CO}_2(\text{aq})$, που συνήθως ονομάζεται ενυδάτωση, σε ανιοντικό διττανθρακικό είδος HCO_3^- , σύμφωνα με μια χημική ισορροπία που εξαρτάται από το pH
- 3) Μεταφορά τόσο των ουδέτερων όσο και των ανιοντικών υδατικών ειδών CO_2 , από την πλευρά δέσμευσης του CO_2 προς την πλευρά απελευθέρωσης του CO_2 , με μοριακή διάχυση εντός του υδατικού μέσου ή/και με εξαναγκασμένη κυκλοφορία του ρευστού.
- 4) Αντίστροφη μετατροπή των ανιόντων HCO_3^- σε ουδέτερα είδη $\text{CO}_2(\text{aq})$, σύμφωνα με την ίδια χημική ισορροπία όπως στο βήμα 2.
- 5) Εξάτμιση του $\text{CO}_2(\text{aq})$ στο αέριο για την απελευθέρωση των αέριων ειδών CO_2 , στην πλευρά της απελευθέρωσης του CO_2 , σύμφωνα με την ίδια ισορροπία Henry όπως στο βήμα 1.

Σχετικά με τα παραπάνω βήματα η χημική ισορροπία του Henry μπορεί να γραφεί ως εξής (Pierre, 2012) :



Η σταθερά ισορροπίας k_H της εξίσωσης (13) είναι γνωστή ως σταθερά του Henry και συνήθως γράφεται όπως στην εξίσωση (14) γνωστή ως νόμος του Henry (Pierre, 2012) :

$$N(\text{CO}_2(\text{Aq})) = \frac{P(\text{CO}_2(\text{g}))}{k_H} \quad (14)$$

Μετά τη μετατροπή του μοριακού κλάσματος $N(\text{CO}_2(\text{aq}))$ στη μοριακή συγκέντρωση $[\text{CO}_2(\text{aq})]$ στο νερό, η (14) μπορεί να μετατραπεί στην εξίσωση (15) (Pierre, 2012) :

$$[\text{CO}_2(\text{aq})] = \frac{P(\text{CO}_2(\text{g}))}{0.018 \times k_H} \quad (15)$$

Η ακριβής φύση αυτών των ουδέτερων ειδών $\text{CO}_2(\text{aq})$ είναι αμφιλεγόμενη. Ένα ακόμα ουδέτερο μοριακό είδος είναι το μόριο του ανθρακικού οξέος H_2CO_3 , το οποίο θα μπορούσε πράγματι να συντεθεί σε σχεδόν καθαρή κατάσταση σε ειδικές συνθήκες, από μια ακριβή στοιχειομετρική μοριακή αναλογία $N(\text{CO}_2)/N(\text{H}_2\text{O}) \approx 1$. Ωστόσο, αυτά τα μόρια H_2CO_3 είναι μετασταθή και καθίστανται εντελώς ασταθή στην παρουσία μιας μικρής περίσσειας νερού. Ως εκ τούτου, παραμένουν παρόντα σε διαλύματα με πολύ χαμηλή μοριακή αναλογία ($< 3/1000$) σε κορεσμένο με CO_2 νερό στους 25°C , σε σύγκριση με τα απλά διαλυμένα είδη $\text{CO}_2(\text{aq})$ (Pierre, 2012).

Η ισορροπία Henry είναι άμεση συνέπεια των απλών μοριακών συγκρούσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της αέριας και της υγρής φάσης, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν

χημικές αντιδράσεις. Ως εκ τούτου, όσον αφορά τα πρώτα στρώματα υγρών μορίων νερού σε άμεση επαφή με το αέριο, θεωρείται εμμέσως ότι η ισορροπία αυτή αποκαθίσταται και διατηρείται πολύ γρήγορα, ανεξάρτητα από περαιτέρω διάχυση ή μετασχηματισμούς του ουδέτερου είδους $\text{CO}_2(\text{aq})$. Κατά συνέπεια, για δεδομένη μερική πίεση $P(\text{CO}_2(\text{aq}))$, η συγκέντρωση $[\text{CO}_2(\text{aq})]$ στα υδατικά στρώματα σε άμεση επαφή με το αέριο αυτό μπορεί να θεωρηθεί σταθερή (Pierre, 2012).

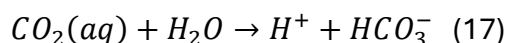
Από την άλλη πλευρά, η ισορροπία με ένα παχύτερο στρώμα νερού, όπως απαιτείται για παράδειγμα για τον πειραματικό προσδιορισμό της σταθεράς του Henry, είναι πολύ πιο αργή. Ο λόγος είναι ότι αυτό απαιτεί τη διάχυση τόσο των ουδέτερων όσο και των ανιονικών ειδών CO_2 , από τα υδατίνα στρώματα σε άμεση επαφή με το αέριο προς ολόκληρο τον όγκο του υγρού. Επίσης, όταν η σταθερά Henry του CO_2 προσδιορίζεται σε καθαρό νερό (χωρίς προσθήκη ηλεκτρολύτη), τα ουδέτερα είδη $\text{CO}_2(\text{aq})$ κυριαρχούν σε πολύ μεγάλο βαθμό έναντι των ανιονικών ειδών CO_2 (Pierre, 2012).

Κατά συνέπεια, η (15) αφορά πρακτικά μόνο τα ουδέτερα είδη. Τέλος, για να ευνοηθεί η διάλυση των ειδών $\text{CO}_2(\text{aq})$ στην πλευρά της δέσμευσης, αλλά και η απελευθέρωση του αερίου CO_2 στην πλευρά της απελευθέρωσης, η επιφάνεια ανταλλαγής μεταξύ των αέριων φάσεων και του υδατικού μέσου πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών "πλυντρίδων" CO_2 (Pierre, 2012).

Στη συνέχεια, η θερμοκρασία αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς η συγκέντρωση $\text{CO}_2(\text{aq})$ στο νερό αυξάνεται σημαντικά όταν η θερμοκρασία μειώνεται. Η εξίσωση (16) συσχετίζει την σταθερά ισορροπίας k_H με την θερμοκρασία (T) (Crovetto, 1991),(Pierre, 2012).

$$\ln(k_H) = 4.800 + \frac{3934.40}{T} - \frac{941290}{T^2} \quad (16)$$

Όσον αφορά τα στάδια 2 και 4, μπορεί να γραφτεί η πρώτη ισορροπία αποπρωτονίωσης ή η λεγόμενη ενυδάτωση των ειδών $\text{CO}_2(\text{aq})$ προς σχηματισμό διττανθρακικών ανιόντων HCO_3^- (Pierre, 2012) :



με $Ka_1 = 10^{-6.35} = 4.47 \times 10^{-7}$, σε $T=25^\circ\text{C}$

Το CO_2 έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο νερό και η μη καταλυόμενη ενυδάτωσή του σε διττανθρακικό συμβαίνει με πολύ αργό ρυθμό 0.037 s^{-1} (Boron, 2010).

Σύμφωνα με την εξίσωση (17), το pH πέφτει γρήγορα κάτω από το 7 μόλις το CO₂ διαλυθεί σε αποσταγμένο νερό με αρχικό pH 7, όπως συμβαίνει πράγματι για τον προσδιορισμό της σταθεράς Henry σε καθαρό νερό. Από την άλλη πλευρά, εάν το pH μπορεί να διατηρηθεί σε τιμή > pK_{a1} = 6.35 με τη βοήθεια ρυθμιστικού διαλύματος, ευνοείται ο σχηματισμός ιόντων HCO₃⁻, αν και η συγκέντρωση CO₂(aq) παραμένει σταθερή στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού βάσει του νόμου του Henry. Συνολικά, επειδή τα ανιόντα HCO₃⁻ είναι πολύ πιο διαλυτά στο νερό από τα ουδέτερα είδη CO₂(aq), μπορεί να διαλυθεί πολύ μεγαλύτερη συνολική συγκέντρωση CO₂ σε υδατικό διάλυμα. Αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται στη βάση της ιδέας για τη χρήση καταλύτη για τη δέσμευση του CO₂ σε υδατικά μέσα, όπου ο ρόλος του καταλύτη είναι απλώς να επιταχύνει το σχηματισμό των ανιόντων HCO₃⁻ (Pierre, 2012).

Ο κινητικός μηχανισμός της εξίσωσης (17) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του χρησιμοποιούμενου καταλύτη με τα ένζυμα ανθρακικής ανυδράσης να αποτελούν έναν τύπο καταλύτη. Χωρίς καταλύτη, άρα σε όξινο pH ισορροπίας, η προς τα εμπρός αντίδραση για την παραγωγή ανιόντων HCO₃⁻ από είδη CO₂(aq) είναι πρώτης τάξης με σταθερά ρυθμού ≈ 0.15 sec⁻¹. Η αντίστροφη αντίδραση είναι ταχύτερη, με σταθερά ρυθμού ≈ 50 sec⁻¹. Σε βασικές συνθήκες όπου τα ανιόντα OH⁻ είναι άφθονα, ο κύριος μηχανισμός περιλαμβάνει μια άμεση επίθεση αυτών των ανιόντων στο είδος CO₂(aq). Ως εκ τούτου, κάθε βάση είναι καταλύτης της δέσμευσης του CO₂ και ανταγωνίζεται το ένζυμο της καρβονικής ανυδράσης. Συνολικά, όπως κάθε καταλύτης, το ένζυμο τροποποιεί μόνο τον κινητικό ρυθμό τόσο της εμπρόσθιας όσο και της αντίστροφης αντίδρασης και όχι τη θερμοδυναμική ισορροπία (Pierre, 2012). Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί περεταίρω η χρήση και οι ιδιότητες του ενζύμου της καρβονικής ανυδράσης.

Μια άλλη άμεση συνέπεια της δέσμευσης CO₂ σε υδατικά μέσα αφορά την επίδραση της μερικής πίεσης P(CO₂(capture)) στην πλευρά της δέσμευσης. Σύμφωνα με το νόμο του Henry, εξίσωση (15), η συγκέντρωση του διαλυμένου [CO₂(aq)] στο νερό αυξάνεται με τη μερική πίεση P(CO₂(g)) του CO₂ στο αέριο που βρίσκεται σε επαφή με το υδατικό μέσο. Με τη σειρά τους, οι συγκεντρώσεις ισορροπίας [H⁺] και [HCO₃⁻] αυξάνονται με την P(CO₂(g)), ως συνέπεια των αντιδράσεων ισορροπίας ενυδάτωσης στην εξίσωση (17), εκτός εάν μπορεί να προστεθεί ένα ολοένα και ισχυρότερο και ταχύτερα αντιδρών ρυθμιστικό διάλυμα για τη διατήρηση ενός pH > pK_{a1}. Αυτό όμως γίνεται ολοένα και πιο δύσκολο να επιτευχθεί καθώς αυξάνεται η P(CO₂(g)). Δηλαδή, η αποτελεσματικότητα του ενζύμου για την επιτάχυνση της δέσμευσης του CO₂ μειώνεται καθώς αυξάνεται η μερική πίεση P(CO₂(g)) στην πλευρά της δέσμευσης (Pierre, 2012).

2.2 Ενζυμικές Τεχνολογίες

2.2.1 Εισαγωγή

Η ενζυμική δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τον μετριασμό των εκπομπών CO₂. Είναι εμπνευσμένη από τη διαδικασία μεταβολισμού του CO₂ στα κύτταρα και προσφέρει μια πράσινη και ισχυρή εναλλακτική λύση για την αποτελεσματική μετατροπή του CO₂ λόγω της ανώτερης στερεοεκλεκτικότητας και χημειο-επιλεκτικότητας της (Shi et al., 2015).

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση ενζύμων ανθρακικής ανυδράσης (Carbonic Anhydrase – CA), είναι γνωστό ότι επιταχύνουν την ενυδάτωση ουδέτερων μορίων CO₂ σε ιοντικά διττανθρακικά HCO₃⁻, παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα να καταλύουν την αναστρέψιμη μετατροπή ουδέτερων μορίων CO₂ σε νερό, που ονομάζονται CO₂(aq), σε ιοντικά είδη H⁺ και HCO₃⁻ (Pierre, 2012).

Τα ένζυμα ανθρακικής ανυδράσης ανήκουν στην ομάδα E.C.4.2.1.1 από τη Διεθνή Επιτροπή Ενζύμων, σε συμφωνία με τη Διεθνή Ένωση Καθαρής και Εφαρμοσμένης Χημείας (IUPAC). Οι αριθμοί αυτοί υποδηλώνουν ότι ανήκουν στην κατηγορία 4, την κατηγορία των λυάσεων που συγκεντρώνει τα ένζυμα που είναι ικανά να καταλύουν μια αντίδραση προσθήκης σε ένα υπόστρωμα που φέρει διπλό δεσμό (όπως O=C=O), στην υποκατηγορία 2 που αντιστοιχεί στη δημιουργία ενός απλού δεσμού C-O με προσθήκη ενός ατόμου οξυγόνου (λυάση άνθρακα-οξυγόνου), με ένα άτομο οξυγόνου που φέρνει μια ομάδα ύδατος (υδρολυάση, πρώτος αριθμός 1), με το HCO₃⁻ να είναι το προϊόν ή το υπόστρωμα (αντίστροφη αντίδραση) μεταξύ ενός καταλόγου πιθανών υποστρωμάτων (αφυδάτωση ανθρακικών αλάτων, δεύτερος αριθμός 1). Ένζυμα αυτής της ομάδας υπάρχουν στην πραγματικότητα και στις 3 κατηγορίες του έμβιου κόσμου: προκαρυώτες, αρχαία και ευκαρυώτες (Pierre, 2012).

Υπάρχουν πέντε διακριτές κατηγορίες CAs (α, β, γ, δ και ζ), με την κατηγορία α να είναι η μόνη κατηγορία που απαντάται στα θηλαστικά. Αυτή η κλάση είναι η πιο καλά χαρακτηρισμένη από τις πέντε. Η β-ανθρακική ανυδράση βρίσκεται στα ανώτερα φυτά και σε ορισμένους προκαρυώτες, ενώ η γ υπάρχει μόνο στα αρχαιοβακτήρια. Οι τάξεις δ και ζ έχουν παρατηρηθεί μόνο στα φύκη. Οι τάξεις αυτές διαφέρουν ως προς την πρωτογενή αλληλουχία αμινοξέων και την τρισδιάστατη τριτοταγή δομή (α, β, γ), γεγονός που υποδηλώνει τη συγκλίνουσα εξέλιξη μιας βιοχημικής αντίδρασης απαραίτητης για τις διαδικασίες της ζωής (de Oliveira Maciel et al., 2022), (Pierre, 2012), (Frost & McKenna, 2014). Δεν υπάρχουν σημαντικές ομολογίες αλληλουχίας μεταξύ των εκπροσώπων των διαφόρων οικογενειών CA. Ωστόσο, όλα τα μέλη περιέχουν ένα μεταλλικό ιόν στο ενεργό τους κέντρο, το οποίο είναι απαραίτητο για την καταλυτική αντίδραση (Leimbrink et al., 2017).

Επειδή η ενυδάτωση του CO₂(aq) πραγματοποιείται επίσης χωρίς ένζυμο, είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί η μη ενζυμική συνεισφορά από τα δεδομένα που λαμβάνονται με το ένζυμο. Η ενεργότητα ανά mg ενζύμου, στην πραγματικότητα μια "σχετική προστιθέμενη ενεργότητα" v_r , μπορεί να εκφραστεί σε μονάδες ανά mg ($U \cdot mg^{-1}$) σύμφωνα με την εξίσωση Wilbur (18), όπου v_{enz} είναι ο ρυθμός μείωσης του pH με το ένζυμο και v_0 ο ρυθμός μείωσης του pH χωρίς ένζυμο (Pierre, 2012).

$$v_r(U \cdot mg^{-1}) = \frac{v_{enz} - v_0}{v_0 \times m_{enz}} = \frac{t_0 - t_{enz}}{t_{enz} \times m_{enz}} \quad (18)$$

Οι βιοχημικοί παραδοσιακά μετρούν τη συγκέντρωση του ενζύμου σε προετοιμασίες σε "μονάδες" ("U"), όπου 1U ορίζεται ως η ποσότητα του ενζύμου που καταλύει τη μετατροπή 1μολ υποστρώματος σε 1 λεπτό σε συνθήκες που πρέπει να καθοριστούν (φύση και συγκέντρωση υποστρώματος, θερμοκρασία, υγρό μέσο, pH).

2.2.2 Λειτουργίες και εφαρμογές ενζύμου CA

Τα ένζυμα CA μπορούν να λειτουργήσουν ως υδράσες, καθώς καταλύουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης και αφυδάτωσης ισορροπίας του CO₂(aq), όπως εξηγήθηκε, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και ως εστεράσες, υδρολύοντας υποστρώματα όπως το παρα-νιτροφενυλακετικό (p-NPA) σε παρα-νιτροφαινόλη (p-NP). Η απόδοση της δέσμευσης του CO₂ εξαρτάται από τη δραστηριότητα της υδράσης. Η πιο συνηθισμένη μανομετρική τεχνική για τον προσδιορισμό της δραστηριότητας της CA είναι το πρωτόκολλο των Wilbur-Anderson που βασίζεται στη μείωση του pH κατά την ενυδάτωση του CO₂. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ευρέως ένα πρωτόκολλο μέτρησης της ενεργότητας CA κατά την κατάλυση της p-NPA. Η αντίδραση αυτή ακολουθείται συνήθως με τη μέτρηση της απορρόφησης στο υπεριώδες-ορατό λόγω p-NP, μετά την ανάμιξη υδατικού διαλύματος CA με διάλυμα υποστρώματος p-NPA (Pierre, 2012).

Η CA έχει εμπλακεί σε διάφορες φυσιολογικές διεργασίες, όπως η ανταλλαγή αερίων στη διεπιφάνεια αέρα-νερού, η μεταφορά CO₂ και HCO₃⁻ διαμέσου των μεμβρανών, οι βιοσυνθετικές αντιδράσεις σε μεταβολικά ενεργούς ιστούς, η ισορροπία οξέος-βάσης, η έκκριση, η ασβεστοποίηση, η μεταγωγή σήματος, η ογκογένεση και ο πολλαπλασιασμός. Οι δυνατότητες της CA για το σχεδιασμό παρεμποδιστών φαρμάκων έχουν διερευνηθεί, δημιουργώντας μια μακρά φαρμακολογική ιστορία σε πολλούς τομείς, και εμπλέκεται σε διάφορες φυσιολογικές αποκρίσεις, όπως η αναπνοή, η ρύθμιση του pH, η κατακράτηση Na⁺, η ασβεστοποίηση, η καρκινογένεση, η έκκριση ηλεκτρολυτών, η γλυκονογένεση, η ουρεογένεση και η λιπογένεση (Frost & McKenna, 2014).

Οι CAs έχουν επίσης προσελκύσει το βιομηχανικό ενδιαφέρον ως βιοκαταλύτες για τη δέσμευση άνθρακα από τα καυσαέρια των ανθρακικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής (Savile & Lalonde, 2011), καθώς και για τη χρήση των CAs σε φύκια για τη δέσμευση του CO₂ και τη μετατροπή του σε βιοκαύσιμα ή άλλα πολύτιμα προϊόντα. Οι CAs έχουν καταστεί ελκυστικός υποψήφιος για πολυάριθμες βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές λόγω των ευνοϊκών ιδιοτήτων τους, όπως η γρήγορη κινητική (δηλαδή απαιτείται λιγότερο ένζυμο), η εύκολη έκφραση, η υψηλή διαλυτότητα και η ενδιάμεση αντοχή στη θερμότητα (Frost & McKenna, 2014) και αποτελείται από ένα βιομιμητικό παράγοντα δέσμευσης του CO₂, καθώς μπορεί να έχει οικονομικά αποδοτική παραγωγή, είναι επαναχρησιμοποιήσιμος και ως βιολογικός καταλύτης μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και υπό ήπιες πειραματικές συνθήκες (Bond et al., 2001). Επιπλέον, όπως όλοι οι ενζυμικοί καταλύτες, η CA είναι ανανεώσιμη, μη πτητική και βιοδιασπώμενη (Kunze et al., 2015).

Ωστόσο, η αποτελεσματική εφαρμογή αυτών των διαδικασιών απαιτεί συχνά τη χρήση ανθεκτικών ενζύμων ικανών να λειτουργούν υπό τις απαιτητικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν τη διαδικασία δέσμευσης CO₂ (de Oliveira Maciel et al., 2022), (Fradette et al., 2017), (Kunze et al., 2015). Οι εν λόγω διεργασίες θεωρούνται σκληρές για τα βιολογικά δεδομένα, καθώς λαμβάνουν χώρα υπό αυξημένες θερμοκρασίες ή/και ακραίο pH, υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο, υψηλή ιοντική ισχύ και υψηλή διατηρητική τάση (Fradette et al., 2017), (Savile & Lalonde, 2011).

2.2.3 Ακίνητοποίηση του ενζύμου

Η σταθερότητα του ενζύμου εξαρτάται από την πηγή του ενζύμου και για να είναι οικονομικά βιώσιμη η δέσμευση, το ένζυμο πρέπει να παραμένει σταθερό και λειτουργικό με την πάροδο του χρόνου (de Oliveira Maciel et al., 2022), (Fradette et al., 2017). Κατά συνέπεια, οι CAs που παρουσιάζουν σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες προσελκύουν σημαντική προσοχή (de Oliveira Maciel et al., 2022), (Unsworth et al., 2007). Αυτές οι θερμοσταθερές CAs μπορούν να προέρχονται από ακραιόφιλα ή να προέρχονται μέσω μελετών πρωτεϊνικής μηχανικής (Fradette et al., 2017), (Leimbrink et al., 2017). Επιπλέον, η ακίνητοποίηση των CA πάνω σε κατάλληλους φορείς ή η τροποποίηση της διαδικασίας απορρόφησης μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των περιορισμών που αναφέρθηκαν (Shi et al., 2015). Τα δεδομένα δείχνουν ότι τα α-CA που απομονώνονται από θερμόφιλους οργανισμούς είναι οι πλέον κατάλληλοι υποψήφιοι για χρήση σε βιοτεχνολογικές διεργασίες (Di Fiore et al., 2013). Το BCA (Bovine Carbonic Anhydrase), ένα ένζυμο τύπου α, λειτουργεί βέλτιστα στους 35°C και σε εύρος pH 7.0-7.5. Μπορεί να αδρανοποιηθεί γρήγορα σε θερμοκρασίες άνω των 60°C, γεγονός που περιορίζει τη χρήση του σε κύκλους

απορρόφησης και εκρόφησης, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν στους 40-60°C και 70-80°C, αντίστοιχα (de Oliveira Maciel et al., 2022).

Η σημασία των CAs στις διαδικασίες δέσμευσης άνθρακα διερευνάται ως πιθανή στρατηγική για την αύξηση της παραγωγής βιοκαυσίμων. Τα κυανοβακτήρια αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη πηγή βιοκαυσίμων, καθώς καταναλώνουν CO₂, απαιτούν ελάχιστα μικροθρεπτικά συστατικά και παράγουν λιπίδια και υδρογονάνθρακες. Διεθνείς και εθνικές ομάδες διερευνούν την έμμεση χρήση της ενδογενούς CA των φυκών στην εναπόθεση ασβεστίτη ή τη δέσμευση CO₂ ως βιοκαύσιμα (Pires et al., 2012), (Shekh et al., 2012). Το CO₂ σε φυσαλίδες δεν είναι ιδανικό για καλλιέργειες φυκιών ή κυανοβακτηρίων λόγω της χαμηλής διαλυτότητάς του, με αποτέλεσμα την απώλεια αερίου. Η CA μπορεί να το περιορίσει αυτό με τη δημιουργία διττανθρακικών, ενός διαλυτού και προτιμώμενου άνθρακα για πολλά στελέχη φυκών (Frost & McKenna, 2014). Επιπλέον, το CA μπορεί να εξαχθεί από άλγη του γλυκού νερού, όπως η *Chlorella vulgaris* (L. Li et al., 2012).

Η χρήση διαλυμένης και ελεύθερης CA για την απορρόφηση CO₂ μπορεί να έχει ένα πιθανό μειονέκτημα λόγω των υψηλών απαιτήσεων θερμοκρασίας στο στάδιο αναγέννησης του διαλύτη, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε αδρανοποίηση του ενζύμου και να οδηγήσει σε υψηλό κόστος αναπλήρωσης του ενζύμου (de Oliveira Maciel et al., 2022). Ωστόσο, μελέτες έχουν δείξει ότι εάν η δραστηριότητα του CA διατηρείται κατά τη διάρκεια της ακινητοποίησης, μπορεί να παρατηρηθεί καταλυτική επίδραση στην απορρόφηση CO₂. Η παρατήρηση αυτή είναι λογική επειδή τα υποστρώματα (CO₂ και H₂O) και τα προϊόντα (HCO₃⁻ και H⁺) είναι μικρά και ιδιαίτερα ευέλικτα, επιτρέποντάς τους να αλληλεπιδρούν με την CA ακόμη και όταν αυτή συνδέεται με ένα στερεό υλικό (Leimbrink et al., 2017).

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχει αφιερωθεί μεγάλη προσπάθεια στην ακινητοποίηση της CA σε διάφορα υποστρώματα για την ενσωμάτωσή της σε εφαρμογές ή συσκευές έκπλυσης CO₂ (Bond et al., 2001), (Pierre, 2012). Τα πλεονεκτήματα της ακινητοποίησης της CA είναι η αυξημένη σταθερότητα του ενζύμου, η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του ενζύμου και η ευκολία στην ανάκτηση του ενζύμου, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του κόστους λειτουργίας της διεργασίας (de Oliveira Maciel et al., 2022), (Kunze et al., 2015), (Shi et al., 2015). Επιπλέον, η αντιδραστικότητα της ακινητοποιημένης CA μπορεί να διαμορφωθεί μέσω της φυσικοχημικής φύσης και των δομικών χαρακτηριστικών του χρησιμοποιούμενου υλικού στήριξης (Yoshimoto & Walde, 2018). Η HCA II (ανθρώπινη CA) μπορεί να ακινητοποιηθεί λόγω της παρουσίας πολλαπλών καταλοίπων λυσίνης στην επιφάνειά της, καθώς και ελεύθερων ομάδων υδροξυλίου που διευκολύνουν τη χημεία ακινητοποίησης (Ozdemir, 2009). Στρατηγικές για την ακινητοποίηση του ενζύμου έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για

την παράταση της λειτουργικής διάρκειας ζωής του CA σε σχέση με την ελεύθερη μορφή του (de Oliveira Maciel et al., 2022).

Τα ενζυμικά μόρια μπορούν να ακινητοποιηθούν είτε σε στερεούς φορείς είτε εντός ή επί μαλακών πολυμοριακών συγκροτημάτων και πολυμερικών υλικών, όπου οι ενζυμικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα εντοπισμένα σε διεπιφάνειες ή εντός μικρών υδατικών όγκων. Η απλούστερη μέθοδος ακινητοποίησης είναι η φυσική προσρόφηση των ενζυμικών μορίων σε στερεό ή μαλακό φορέα (Yoshimoto & Walde, 2018). Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές ακινητοποίησης περιλαμβάνουν την προσρόφηση, την ομοιοπολική σύνδεση, τον εγκλωβισμό, την ενθυλάκωση και τη διασταύρωση ενζυμικών συσσωματωμάτων και τις λεπτές υγρές μεμβράνες.

Κατά τη διαδικασία της **προσρόφησης**, οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις όπως οι ηλεκτροστατικές, οι δεσμοί υδρογόνου και οι δυνάμεις van der Waals επιτρέπουν στο ένζυμο να προσκολληθεί στη μήτρα (de Oliveira Maciel et al., 2022). Οι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη χρήση της BCA (ανθρακική ανυδράση βοοειδών) ακινητοποιημένης σε σφαιρίδια μεσοπορώδους πυριτίας (SBA-15), με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα μικκύλιο με υδρόφοβο φραγμό στον πυρήνα του και ένα εξωτερικό υδρόφιλο στρώμα. Η ενεργότητα του ενζύμου ήταν παρόμοια με εκείνη του ελεύθερου ενζύμου, αλλά με πρόσθετα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως σταθερότητα, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και αντοχή στην αποθήκευση. Το μεσοπορώδες αργιλοπυριτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε επίσης ως φορέας για την CA, λόγω της μεγάλης επιφάνειας και του μεγέθους των πόρων του. Το ακινητοποιημένο ένζυμο παρέμεινε πάνω από 50% ενεργό μετά από 25 ημέρες στους 25°C, ενώ το ελεύθερο ένζυμο ήταν μόνο 20% ενεργό μετά την ίδια επεξεργασία. Ωστόσο, το ένζυμο φάνηκε να υποβαθμίζεται ή να μετουσιώνεται, λειτουργώντας μόνο με 20% ικανότητα ενανθράκωσης μετά από 7 κύκλους (Wanjari et al., 2012).

Ο **εγκλωβισμός** περιλαμβάνει τον φυσικό εγκλωβισμό ενός ενζύμου μέσα σε μια μήτρα, μια απλή μέθοδος που μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση πολυμερών υλικών βιολογικής βάσης, όπως το αλγινικό νάτριο και η χιτοζάνη (de Oliveira Maciel et al., 2022). Ως μήτρες ακινητοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν νανοσωματίδια ή υδρογέλες με βάση τη χιτοζάνη. Τόσο η χιτοζάνη όσο και το αλγινικό είναι πολυσακχαρίτες, βιοσυμβατοί και χρησιμοποιούνται σε πολλές βιολογικές εφαρμογές. Τα επικαλυμμένα με χιτοζάνη σφαιρίδια αλγινικού άλατος είναι μη τοξικά και βιοδιασπώμενα (Simsek-Ege et al., 2002). Το CA από βακτήρια διατήρησε έως και το 50% της αρχικής του ενεργότητας μετά από 30 ημέρες αποθήκευσης κατά τη διάρκεια μελετών (Prabhu et al., 2011). Περαιτέρω μελέτες με το CA του *B. pumilus* συνδεδεμένο σε σφαιρίδια χιτοζάνης έδειξαν ότι έχει καλύτερη κινητική ενεργότητας εστεράσης από το ελεύθερο ένζυμο (Yadav et al., 2012). Το CA μπορεί να παγιδευτεί σε αφρό πολυουρεθάνης

(PU) για σκοπούς δέσμευσης CO₂. Κατά τη διαδικασία αυτή, το προπολυμερές HYPOL αναμιγνύεται με το διάλυμα του ενζύμου και ο πολυμερισμός ξεκινά με μια πυρηνόφιλη επίθεση από υδροξείδιο στις καρβονυλικές ομάδες, ακολουθούμενη από ένα συμβάν πρωτονίωσης/αποπρωτονίωσης που απελευθερώνει CO₂. Μετά από 7 κύκλους, δεν παρατηρήθηκε έκπλυση του ενζύμου ή μείωση της δραστηριότητας του CA και μετά από 45 ημέρες αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου, ο αφρός CA-PU διατήρησε το 100% της δραστηριότητάς του, ενώ το ελεύθερο ένζυμο ήταν εντελώς ανενεργό μετά από το ίδιο χρονικό διάστημα στους 4°C (Frost & McKenna, 2014), (Ozdemir, 2009). Η ενθυλάκωση, μια μέθοδος παρόμοια με τον εγκλωβισμό, περιλαμβάνει τον περιορισμό ενός ενζύμου σε μια δικτυακή δομή, με αποτέλεσμα υψηλή απόδοση, σταθερότητα και ειδική δραστηριότητα (de Oliveira Maciel et al., 2022).

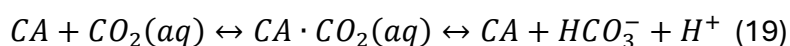
Η **ομοιοπολική σύνδεση** είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος λόγω της ικανότητάς της να ενισχύει τον δεσμό μεταξύ του ενζύμου και της μήτρας, ξεπερνώντας άλλες μεθόδους όπως η προσρόφηση (de Oliveira Maciel et al., 2022). Τα νανοσωματίδια του ενζύμου, ομοιοπολικά συνδεδεμένα με νανοσωματίδια Fe-O-SiO με λειτουργικότητα οκτα(αμινοφαινυλ)σιλικοξάνης, επέδειξαν πλήρη επαναχρησιμοποίηση μετά από απλό διαχωρισμό με χρήση μαγνητών. Τα νανοσωματίδια του ενζύμου είχαν καλύτερες επιδόσεις από το ελεύθερο ένζυμο, με πάνω από 80% της ενεργότητας να διατηρείται μετά από 30 ημέρες αποθήκευσης, αποδεικνύοντας τη δυναμική τους για την αποτελεσματικότητα της δέσμευσης CO₂. Σε μια άλλη μελέτη, συντέθηκαν νανοβιοκαταλύτες χρησιμοποιώντας ηλεκτροστατική ακινητοποίηση του HCA II σε νανοσωματίδια Ag ή Au. Τα σωματίδια Ag διατήρησαν το 87% της ενζυμικής ενεργότητας μετά από 30 ημέρες αποθήκευσης, ενώ τα νανοσωματίδια Au έδειξαν πλήρη διατήρηση της ενεργότητας μετά από 20 επαναχρησιμοποιήσεις. Ωστόσο, αυτοί οι νανοκαταλύτες παρουσιάζουν παρόμοια κινητική με το ελεύθερο ένζυμο (Vinoba et al., 2011). Κατά τη διάρκεια μιας άλλης μελέτης, η CA ακινητοποιήθηκε σε μη πορώδη νανοσωματίδια με βάση το διοξείδιο του πυριτίου και μετά τη διεξαγωγή της διαδικασίας απορρόφησης σε αλκαλικό διάλυμα για περίοδο 60 ημερών στους 50°C, η ακινητοποιημένη CA μπορούσε να διατηρήσει το 56-88% της αρχικής της ενεργότητας, ενώ μόνο το 30% της αρχικής ενεργότητας διατηρήθηκε για την ελεύθερη CA (Shi et al., 2015).

Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν προσπαθήσει να ακινητοποιήσουν το (CA) μεταξύ **λεπτών υγρών μεμβρανών** για την εξαγωγή CO₂ από τα καυσαέρια. Η διάταξη αποτελείται από τρεις ζώνες: ένα λεπτό υγρό στρώμα μεταξύ δύο μεμβρανών, ένα λεπτό υδατικό στρώμα που περιέχει CA και μια ροή αέρα πλούσια σε CO₂ στη μία πλευρά. Το CO₂ διαχέεται στο υδατικό στρώμα, διαλύεται και σχηματίζει διττανθρακικό. Στην πλευρά της εκρόφησης, ένα αέριο σάρωσης, απλός αέρας ή κενό με χαμηλότερες συγκεντρώσεις CO₂ ωθεί την ισορροπία ώστε

να ευνοηθεί ο σχηματισμός CO₂ στην πλευρά εκρόφησης της υγρής μεμβράνης. Αυτή η διάταξη υποστηρίζει την προσρόφηση και την εκρόφηση του CO₂ με τη μερική πίεση του CO₂ ως κινητήρια δύναμη (Bao & Trachtenberg, 2006). Ωστόσο, υπάρχουν πολλά τεχνολογικά και πρακτικά προβλήματα με τον σχεδιασμό, συμπεριλαμβανομένης της ξήρανσης της μεμβράνης, του pH της φάσης CA και του κόστους.

2.2.4 Μηχανισμός κατάλυσης και κινητική ενζύμου

Το απλούστερο μοντέλο ενζυμικής κινητικής που εφαρμόζεται στα ένζυμα CA είναι το πολύ κλασικό μοντέλο Henri-Michaelis-Menten. Οι χημικές αντιδράσεις που διέπουν αυτό το μοντέλο μπορούν να συνοψιστούν από την (19) στην περίπτωση της ενυδάτωσης του CO₂, όπου CA·CO₂(aq) αντιπροσωπεύει ένα λεγόμενο σύμπλοκο ενζύμου-υποστρώματος Michaelis (Pierre, 2012) :



Με σταθερές ρυθμού, k_1 , k_{-1} , k_{cat} και k_{-2} .

Το 1913, οι Michaelis και Menten θεώρησαν ότι στην αρχή του προϊόντος σχηματισμού (σήμερα HCO₃⁻), η δεύτερη αντίστροφη αντίδραση που αντιστοιχεί στην κινητική σταθερά k_{-2} ήταν πολύ αργή και θα μπορούσε να μηδενιστεί, έτσι ώστε ο αρχικός ρυθμός σχηματισμού v_0 αυτής του προϊόντος θα μπορούσε να γραφεί ως εξής:

$$v_0 = \frac{d[HCO_3^-]}{dt} = k_{cat} \times [CA \cdot CO_2(aq)] \quad (20)$$

Ο μηχανισμός αυτός συνεπάγεται επίσης ότι τα είδη CA, CO₂(aq) και CA·CO₂(aq) βρίσκονταν σε σχεδόν θερμοδυναμική ισορροπία, η οποία περιγράφεται από μια θερμοδυναμική σταθερά ισορροπίας K_m που ονομάζεται σταθερά Michaelis και ορίζεται από τη σχέση (21):

$$K_m = \frac{k_{-1}}{k_1} = \frac{[CA] \times [CO_2(aq)]}{[CA \cdot CO_2(aq)]} \quad (21)$$

Η ταχύτητα v_0 μπορεί να γραφτεί και ως συνάρτηση της v_{max} και της K_m (εξίσωση 22) όπου v_{max} είναι η μέγιστη τιμή του ρυθμού σχηματισμού των HCO₃⁻ όταν η συνολική συγκέντρωση του ενζύμου έχει δεσμευτεί στο σύμπλοκο ενζύμου-υποστρώματος (εξίσωση 23).

$$v_0 = \frac{v_{max} \times [CO_2(aq)]}{K_m + [CO_2(aq)]} \quad (22)$$

$$v_{max} = k_{cat} \times [CA]_t \quad (23)$$

Ένα παράδειγμα τέτοιων κινητικών σταθερών συγκεντρώνεται για παράδειγμα στον Πίνακα 1 για την πιο αποτελεσματική ανθρώπινη CA (ισοένζυμο CA II), όσον

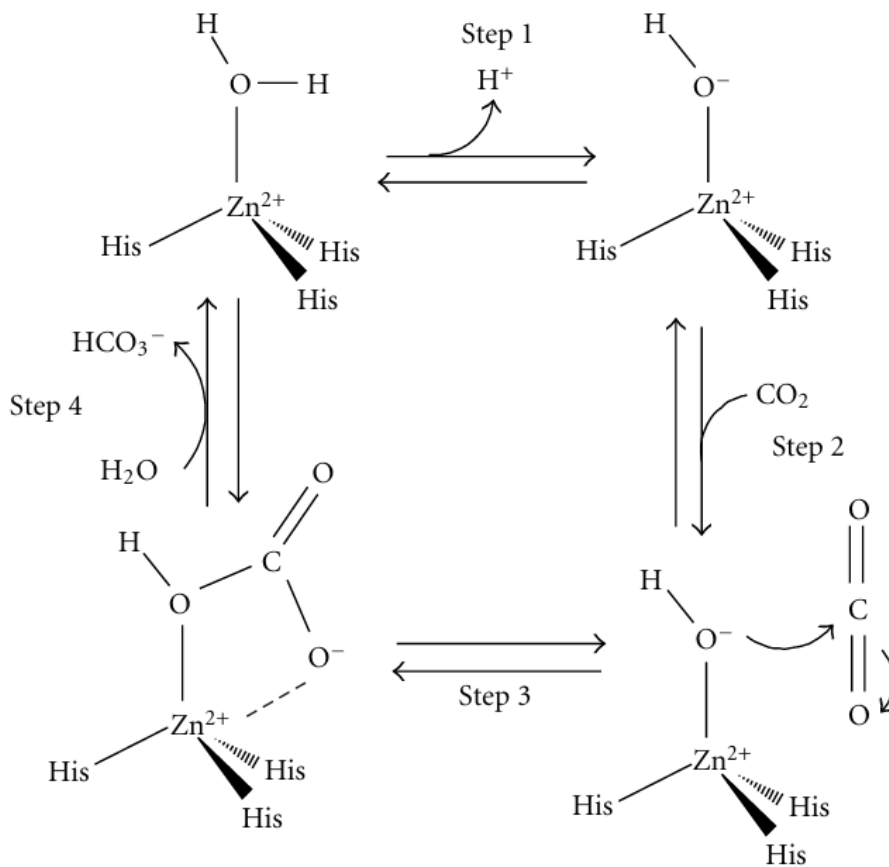
αφορά τόσο την προς τα εμπρός όσο και την αντίστροφη αντίδραση, για την οποία $\text{CO}_2(\text{aq})$ και HCO_3^- είναι, αντίστοιχα, τα υποστρώματα. Ο Πίνακας 1 δείχνει ότι ο ενζυμικός αριθμός κύκλου εργασιών της αντίδρασης ενυδάτωσης προς τα εμπρός είναι υψηλός, καθώς και ο λόγος αυτού του κύκλου εργασιών προς τη σταθερά Michaelis. Αυτοί οι υψηλοί αριθμοί αποτελούν την αφετηρία της ιδέας για τη διερεύνηση της ενζυμικής δέσμευσης του CO_2 (Pierre, 2012).

Πίνακας 1: Κινητικές σταθερές Michaelis-Menten για τις αντιδράσεις ισορροπίας προς τα εμπρός και προς τα πίσω που εμπλέκονται στην ενυδάτωση του $\text{CO}_2(\text{aq})$

Υπόστρωμα	Kcat (s^{-1})	Km (M)	Kcat/Km ($\text{s}^{-1}\text{M}^{-1}$)
$\text{CO}_2(\text{aq})$	10^6	0.012	8.33×10^7
HCO_3^-	4×10^5	0.026	1.54×10^7

Ωστόσο, σύμφωνα με την εξίσωση (19), ένα πρωτόνιο H^+ ανταλλάσσεται επίσης κατά την ενυδάτωση του $\text{CO}_2(\text{aq})$. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 7. Όσον αφορά το ενεργό κέντρο ενός ενζύμου αCA, το μοντέλο περιλαμβάνει 4 διαδοχικά βήματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Pierre, 2012) :

1. Οι προσδέτες του ενζύμου κοντά στο ενεργό κέντρο προκαλούν πόλωση του δεσμού O-H στο H_2O που συντονίζεται με το άτομο Zn. Αυτό διευκολύνει την αποπρωτονίωσή του και μετατρέπεται σε προσδέτη OH^- , ενώ το χαμένο πρωτόνιο συλλαμβάνεται από ένα κατάλοιπο ιστιδίνης κοντά στο ενεργό κέντρο.
2. Το άτομο οξυγόνου αυτού του προσδέτη OH^- εκτελεί μια πυρηνόφιλη επίθεση στο άτομο C ενός εισερχόμενου μορίου CO_2 .
3. Ως αποτέλεσμα αυτής της πυρηνόφιλης επίθεσης σχηματίζεται ένα μόριο HCO_3^- και δεσμεύεται στο κέντρο συντονισμού του Zn.
4. Αυτός ο προσδέτης HCO_3^- είναι ευμετάβλητος και με τη σειρά του μπορεί να αντικατασταθεί γρήγορα με έναν προσδέτη H_2O , ο οποίος αναγεννά το ενεργό κέντρο του ενζύμου στην αρχική του κατάσταση.



Σχήμα 7: Απλοποιημένος καταλυτικός μηχανισμός ενός ενζύμου αCA

Μια πιο απλή προσεγγιστική εξίσωση που εφαρμόζεται για τη δέσμευση CO₂ σε συνθήκες όπου η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι αρκετά χαμηλή ώστε να αγνοούνται οι αντιδράσεις αναστολής, είναι η εξίσωση (24). Λαμβάνει υπόψη μόνο τη σταθερά Michaelis $K_m^{CO_2}$ και τον αντίστοιχο αριθμό μετατροπής k_{cat} , καθώς και μια σταθερά k_4 που περιγράφει την κινητική της μεταφοράς πρωτονίων μεταξύ του ενζυμικού ισομερούς $_H E$ και του ρυθμιστικού διαλύματος B.

$$\frac{[E]_t}{\theta} = \frac{1}{k_4 \times [B]} + \frac{1}{k_{cat}} \times \left(1 + \frac{K_m^{CO_2}}{[CO_2]}\right) \quad (24)$$

Όταν πρέπει να ληφθεί υπόψη η αναστολή από τα HCO₃⁻ και CO₂, η εξίσωση αυτή μπορεί να μετατραπεί στην (25)

$$\frac{[E]_t}{\theta} = \frac{k_{cat} \times [B]}{K_m^B \times \left[1 + \left(\frac{[HCO_3^-]}{K_i}\right) \times \left(1 + \frac{K_i^{CO_2}}{[CO_2]}\right)\right] + [B] \times \left(1 + \frac{K_m^{CO_2}}{[CO_2]}\right)} \quad (25)$$

όπου,

K_m^B : Σταθερά Michaelis ρυθμιστικού διαλύματος

$K_i^{CO_2}$: σταθερά αναστολής από το CO₂

$K_i^{HCO_3^-}$: σταθερά αναστολής από το HCO_3^-

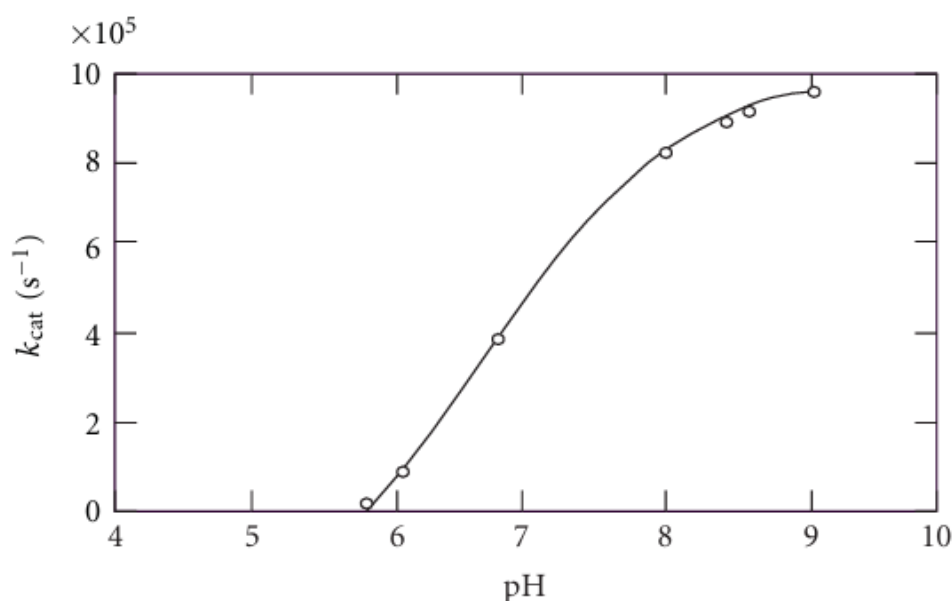
Η προηγούμενη αποτελεσματική ρυθμιστική σταθερά k_4 δίνεται από τη σχέση (26):

$$k_4 = \frac{k_{cat}}{K_m} \quad (26)$$

Μια πιθανή σταθερά αναστολής HCO_3^- μπορεί επίσης να οριστεί από την εξίσωση (27):

$$K_{i,app}^{HCO_3^-} = \frac{K_i^{HCO_3^-}}{1 + \frac{K_i^{CO_2}}{[CO_2]}} \quad (27)$$

Γενικά, η επίδραση του pH στη δραστηριότητα της CA για την ενυδάτωση του $CO_2(aq)$ είναι πολύπλοκη. Ωστόσο, σύμφωνα με δεδομένα για την k_{cat} που αναφέρονται στο Σχήμα 8, η ανθρώπινη CA φθάνει τη μέγιστη δραστηριότητά της σε $pH > 8$. Επιπλέον, η σταθερότητα της CA εξαρτάται από την πηγή του ενζύμου.



Σχήμα 8: Επίδραση του pH στην HCA κατά την υδρόλυση του CO_2

Η επίδραση της θερμοκρασίας για τις HCA και BCA στην ενυδάτωση του $CO_2(aq)$ μελετήθηκε σε ρυθμιστικό διάλυμα με pH ίσο με 9. Και για τα δύο ένζυμα, οι σταθερές k_{cat} και $K_m^{CO_2}$ αυξήθηκαν καθώς η θερμοκρασία αυξανόταν από $5^\circ C$ στους $30^\circ C$. Η HCA ήταν κάπως πιο ενεργή από την BCA (υψηλότερη k_{cat}) και παρουσίασε καλύτερη συγγένεια για το CO_2 (χαμηλότερη K_m)

Ωστόσο, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται η μετουσίωση του ενζύμου CA, επειδή μεταβάλλεται προοδευτικά η διαμόρφωση του. Ως εκ τούτου, ο χρόνος

ζωής όταν παραμένει ενεργό μειώνεται. Αυτή η συγκεκριμένη πτυχή μελετήθηκε στην αντίδραση υδρόλυσης του παρανιτροφαινυλακετικού από το ένζυμο BCA, όπου η κινητική της θερμικής μετουσίωσης θα μπορούσε να περιγραφεί από μια εξίσωση τύπου Arrhenius (εξίσωση 28):

$$-\frac{d[E]}{dt} = k_d \times [E] \quad (28)$$

Στην εξίσωση αυτή, το [E] δηλώνει τη συγκέντρωση του ενεργού ενζύμου και η k_d είναι η κινητική σταθερά μετουσίωσης. Η τελευταία σταθερά ακολουθεί ένα νόμο τύπου Arrhenius ως συνάρτηση της θερμοκρασίας T, σύμφωνα με την εξίσωση 29 όπου E_d είναι η ενέργεια μετουσίωσης.

$$k_d = A_d \times e^{\left(-\frac{E_d}{R \times T}\right)} \quad (29)$$

2.3 Πλυντρίδες – Scrubbers

2.3.1 Είδη και εφαρμογές πλυντρίδων

Η υγρή **πλυντρίδα ή wet scrubber**, είναι συμβατή και αποτελεσματική συσκευή ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την απομάκρυνση σωματιδίων ή/και αερίων από βιομηχανικά ρεύματα καυσαερίων. Ένα wet scrubber λειτουργεί με την ανάμιξη του ρεύματος καυσαερίου με ένα υγρό πλύσεως - συνήθως νερό. Τα σωματίδια ή τα αέρια συλλέγονται στο υγρό πλύσης. Οι υγρές πλυντρίδες είναι γενικά οι καταλληλότερες συσκευές ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τη συλλογή σωματιδίων και αερίων σε ένα ενιαίο σύστημα. Τα συστήματα ρύπανσης προσφέρουν μια ποικιλία συστημάτων υγρού καθαρισμού ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογή σε διεργασίες. Πολλές σημαντικές μεταβλητές λειτουργίας λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση του μεγέθους και του τύπου της πλυντρίδας για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή (Bhargava & Bhargava, 2016).

Τύποι υγρών πλυντρίδων (Bhargava & Bhargava, 2016) :

- Chemical scrubbers/gas scrubbers
- Particulate scrubbers/venturi scrubbers
- Ammonia scrubbers
- Chlorine scrubbers
- Particulate/dust scrubbers
- Sulfuric acid scrubbers

Ο σχεδιασμός της πλυντρίδας θα επηρεαστεί από ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών, όπως (Bhargava & Bhargava, 2016) :

- Τη φύση των σωματιδίων/σκόνης που πρόκειται να απομακρυνθούν

- Κατανομή μεγέθους σωματιδίων, αρχικό φορτίο/συγκέντρωση του ρύπου στο ρεύμα αποβλήτων και κατά πόσον είναι εύφλεκτο ή αναφλέξιμο
- Απαιτούμενη απόδοση απομάκρυνσης
- Θερμοκρασία και ρυθμός ροής του ρεύματος αποβλήτων
- Θέση της πλυντρίδας, σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο

Πολλές βιομηχανίες στον τομέα των χημικών προϊόντων και των δομικών υλικών ενδέχεται να υποχρεούνται να μειώσουν την ποσότητα των σωματιδίων που απελευθερώνουν στο περιβάλλον. Οι απαιτήσεις αυτές εξαρτώνται συνήθως από την εφαρμογή και την τοποθεσία. Σε όλες τις πλυντρίδες σχηματίζονται σταγονίδια του μέσου καθαρισμού, γενικά πολύ μεγαλύτερα από τα σωματίδια που πρόκειται να συλληθούν. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το μέσο πλύσης είναι το νερό, περιστασιακά χρησιμοποιείται μια διαφορετική ουσία. Διαφορετικοί τύποι συσκευών πλύσης χρησιμοποιούν διαφορετικά μέσα σχηματισμού σταγονιδίων νερού και διαφορετικά μέσα εξασφάλισης σχετικής ταχύτητας μεταξύ των σταγονιδίων νερού και του αερίου προς καθαρισμό. Σε όλες τις περιπτώσεις ο μηχανισμός καθαρισμού περιλαμβάνει την προσάρτηση σωματιδίων στα σταγονίδια. Τα σταγονίδια συλλέγονται στη συνέχεια και διοχετεύονται σε ένα φρεάτιο. Οι πλυντρίδες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι (Bhargava & Bhargava, 2016) :

- (i) Θάλαμος ψεκασμού ή πύργος ψεκασμού
- (ii) Φυγοκεντρικός ή κυκλωνικός καθαριστής
- (iii) Ψεκαστήρας με στόμιο ή αυτοπροκαλούμενο ψεκασμό
- (iv) Πλυντρίδα Ventury

Οι πλυντρίδες μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως χαμηλής και υψηλής ενέργειας με τους τύπους και τις εφαρμογές του καθενός να παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (2 και 3).

Πίνακας 2: Πλυντρίδες χαμηλής ενέργειας και οι εφαρμογές τους (Bhargava & Bhargava, 2016)

Πλυντρίδες χαμηλής ενέργειας	Εφαρμογές
Spray scrubbers	Απομάκρυνση χονδρόκοκκων σωματιδίων και μέτρια απόδοση απομάκρυνσης για αέριους ρύπους.
Wet cyclonic scrubbers	Μέτρια/υψηλή απομάκρυνση σωματιδίων έως 5 microns
Vertical baffled scrubbers	Μέτρια έως υψηλή απομάκρυνση για καθαριστήρες χονδρόκοκκων σωματιδίων έως 3 microns & αέριων ρύπων

Horizontal baffled spray scrubbers	Υψηλή απόδοση για αέριους ρύπους
Packed bed scrubbers	Υψηλή απόδοση για αέριους ρύπους

Πίνακας 3: Πλυντρίδες υψηλής ενέργειας και οι εφαρμογές τους (Bhargava & Bhargava, 2016)

Πλυντρίδες υψηλής ενέργειας	Εφαρμογές
Venturi scrubbers	Πολύ υψηλή απόδοση για λεπτά σωματίδια με μερική απομάκρυνση των αέριων ρύπων.
Ejector scrubbers	Πολύ υψηλή απόδοση για τα χονδρόκοκκα σωματίδια και τους αέριους ρύπους
High efficiency wet filters	Πολύ υψηλή απόδοση για λεπτόκοκκα σωματίδια διαλυτά στο υγρό πλύσης
Cleanable high efficiency air filter	Για την απομάκρυνση αερολυμάτων P205, SO ₃ κ.λπ.
High efficiency air filter	Για την απομάκρυνση κολλώδων και λιπαρών σωματιδίων, αερολυμάτων και ομίχλης

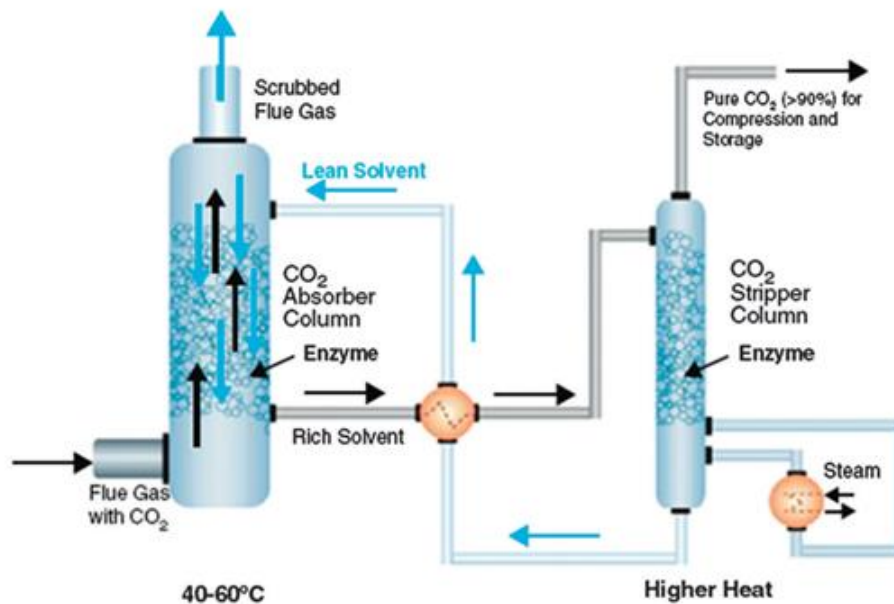
2.3.2 Πλυντρίδες για ενζυμική δέσμευση CO₂

Οι δοκιμές με μια πλυντρίδα ενζυμικής δέσμευσης CO₂ απέδωσαν αποτελεσματικά και ένα συνεχές σύστημα που δοκιμάστηκε σε ένα εργοστάσιο της Alcoa δέσμευσε το 80% των εκπομπών CO₂ (Pierre, 2012), (Bond et al., 2001), (Goff & Rochelle, 2004). Σε μια παραλλαγή μιας τέτοιας διεργασίας, ακινητοποιήθηκε το ένζυμο με ομοιοπολικό εμβολιασμό σε πορώδη χάλυβα με επικάλυψη πυριτίου και το νερό ψεκάστηκε προς τα κάτω μέσω των καυσαερίων. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με μέγεθος πόρων ενζυμικού φορέα περίπου ίσο με 2μm και φορτίο ενζύμου 2mg·mL⁻¹ (Bhattacharya et al., 2003). Εκτός αυτού, αποδείχθηκε επίσης ότι τα ένζυμα CA θα μπορούσαν να προωθήσουν την κινητική απορρόφησης του CO₂ σε ανθρακικό κάλιο ή υδατικούς διαλύτες αμίνης. Το μοντέλο αναλύεται παρακάτω αναλυτικά.

Το CLEA (cross linked enzyme aggregates/διασυνδεδεμένα ενζυμικά συσσωματώματα) είναι μια μέθοδος που δεν χρειάζεται ένα φορέα για την ακινητοποίηση της CA. Περιλαμβάνει καταβύθιση του ενζύμου με τη χρήση κορεσμένων αλάτων ή διαλυτών, ακολουθούμενη από διασταυρούμενη σύνδεση για την αποφυγή της διάλυσης του ενζύμου. Κατά τη διασταυρούμενη σύνδεση, τα κατάλοιπα λυσίνης αντιδρούν με μια ομάδα αλδεϋδης από τον διασταυρούμενο συνδέτη, δημιουργώντας ένα πολύπλοκο δίκτυο όπου τα CA συνδέονται ομοιοπολικά. Η μέθοδος αυτή μειώνει το κόστος που συνδέεται με την

ακίνητοποίηση, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για μήτρα (de Oliveira Maciel et al., 2022). Τα συσσωματωμένα σωματίδια CA μπορούν να ανακτηθούν ευκολότερα από ένα υδατικό διάλυμα από ό,τι τα μη συσσωματωμένα ελεύθερα μόρια CA (Yoshimoto & Walde, 2018).

Τα υδατικά διαλύματα N-μεθυλοδιαιθανολαμίνης (MDEA) χρησιμοποιούνται συνήθως για το διαχωρισμό CO₂ υψηλής πίεσης λόγω της υψηλής χωρητικότητας φόρτωσης, της χημικής και θερμικής σταθερότητας και της χαμηλής πτητικότητας. Η μεθυλοδιαιθανολαμίνη (MDEA) έχει προταθεί ως πιθανό υποκατάστατο της μονοιαθανολαμίνης (MEA), παρουσιάζοντας θερμότητα απορρόφησης περίπου 65% της τιμής που παρατηρείται για τη MEA, αλλά χαμηλότερη φόρτιση CO₂ ανά κιλό διαλύτη και βραδύτερη κινητική (de Oliveira Maciel et al., 2022). Αυτή η αντιδραστική μέθοδος απορρόφησης με υδατικά διαλύματα αλκανολαμινών έχει καθιερωθεί για τη δέσμευση CO₂ μετά την καύση (Kunze et al., 2015). Ωστόσο, υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης μπορούν να επιτευχθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που έρχεται σε σύγκρουση με την προτίμηση για χαμηλές θερμοκρασίες προκειμένου να αξιοποιηθεί η υψηλή ικανότητα απορρόφησης (Leimbrink et al., 2017). Αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την προσθήκη ενός καταλύτη που ενισχύει τον ρυθμό και επιτρέπει υψηλούς ρυθμούς αντίδρασης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μια επιτυχημένη περίπτωση αφορούσε την ενσωμάτωση της CA-καταλυτικής μετατροπής του CO₂ στη χημική απορρόφηση του CO₂ με τη χρήση αναγεννώμενων αλκαλικών υδατικών διαλυτών (βλ. Σχήμα 9) (Shi et al., 2015). Μεταξύ των διαφόρων προσεγγίσεων απορρόφησης, η CA βελτιώνει τόσο την κινητική όσο και την απόδοση απορρόφησης CO₂, εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (de Oliveira Maciel et al., 2022).



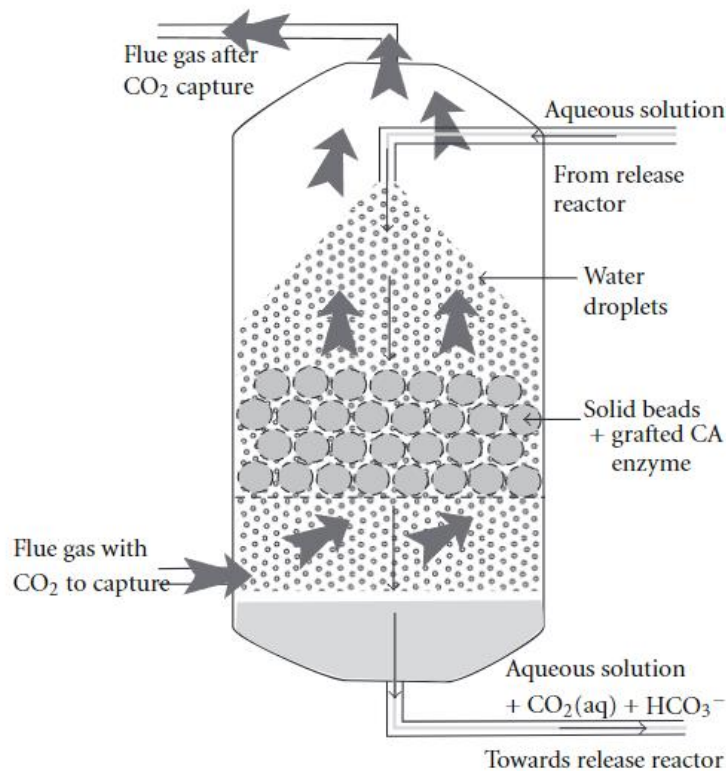
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση του συνδυασμού της διεργασίας καταλυτικής μετατροπής CO₂ με CA και της διεργασίας χημικής απορρόφησης (Shi et al., 2015), (Savile & Lalonde, 2011)

Οι υψηλής αλκαλικής σταθερότητας CAs μπορούν να αποτελέσουν κατάλληλη επιλογή για τέτοιες συνθήκες, προωθώντας βελτιωμένους ρυθμούς αντίδρασης χωρίς να χάνουν τη δραστηκότητά τους πολύ γρήγορα. Έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες για την κατανόηση της κινητικής και του μηχανισμού που κρύβεται πίσω από την απορρόφηση του CO₂ σε ανθρακικά διαλύματα υπό συνθήκες αλκαλικού μέσου (de Oliveira Maciel et al., 2022).

Ο **Leimbrink και η ομάδα του** χρησιμοποίησαν το CA ως βιοκαταλύτη σε πιλοτική κλίμακα-πληρωμένη στήλη για να εκτελέσουν ενζυμική αντιδραστική απορρόφηση "Enzymatic Reactive Absorption" (ERA). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνουν τη σύνθεση της υγρής φάσης (30-50% κ.β. MDEA), το υγρό φορτίο της στήλης ($8-24 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), τη θερμοκρασία του απορροφητή (20-40 °C) και την εφαρμογή της CA είτε σε διαλυμένη είτε σε ακινητοποιημένη μορφή. Πριν από τη χρήση της CA, οι δοκιμές συμβατότητας με διαλύτες έδειξαν ότι η CA είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε αντιδραστική απορρόφηση λόγω της σταθερότητάς της σε υδατικά διαλύματα MDEA σε θερμοκρασίες έως 60 °C και τιμές pH από 7-11. Η συγκέντρωση του ενζύμου ήταν 0.2% κ.β. στη διαλυμένη μορφή του, αλλά μόνο 0.0038% κ.β. στην κοκκώδη ακινητοποιημένη μορφή του. Επιπλέον, ο ογκομετρικός ρυθμός ροής του ρεύματος αερίου εισόδου καθορίστηκε σε τιμή $7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ με σταθερό κλάσμα CO₂ 15% vol.. Η προσθήκη CA ενισχύει σημαντικά την απόδοση απορρόφησης CO₂, με τα βέλτιστα οφέλη να παρατηρούνται σε υψηλές αναλογίες L/G (υγρού/αερίου) (Kunze et al., 2015). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η λειτουργία σε χαμηλότερη

συγκέντρωση αμίνης και υψηλότερα φορτία υγρού είναι ευνοϊκές, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία εξάρτηση της θερμοκρασίας των απορροφημένων μοριακών ροών για την ERA στους 20 και 40 °C. Ωστόσο, στους 20 °C με 30% κ.β. MDEA, ο ρυθμός απορρόφησης με διαλυμένη CA αυξήθηκε περισσότερο από εννέα φορές σε σύγκριση με τον ρυθμό απορρόφησης χωρίς το ένζυμο (Leimbrink et al., 2017).

Το μοντέλο που περιγράφεται από τους Bhattacharya et al. και Bond et al., έχει μελετηθεί εντατικά (Bhattacharya et al., 2003), (Bond et al., 2001) και απεικονίζεται στο Σχήμα 10. Αρχικά είχε αναπτυχθεί από την εταιρεία "CO₂ Solution Inc." (Pierre, 2012) και συνήθως περιλαμβάνει το ένζυμο ακινητοποιημένο σε στερεό φορέα, ο οποίος είναι συσκευασμένος σε αντιδραστήρα κλίνης όπου ένα υδατικό διάλυμα ψεκάζεται μέσω ενός ακροφυσίου στην κορυφή του. Το αέριο το οποίο περιέχει CO₂ εγχέεται στον πυθμένα σε αντίθετη ροή με το υγρό, διότι η δέσμευση συμβαίνει όταν τα αντίθετα ρεύματα υδατικού διαλύματος και αερίου, από τα οποία πρέπει να καθαριστεί το CO₂, έρχονται σε επαφή μέσω μιας κλίνης ενζύμων με υποστήριξη. Έτσι, το υγρό ρέει ως σταγονίδια στην ακινητοποιημένη ενζυμική κλίνη και η ενυδάτωση του CO₂ λαμβάνει χώρα εντός του ρέοντος υγρού. Το ένζυμο επέτρεψε τη μείωση του μεγέθους του αντιδραστήρα σε σύγκριση με την ίδια διεργασία χωρίς ένζυμο. Επιπλέον, η διεργασία διαπιστώθηκε ότι είναι πιο οικονομική από μια διεργασία που βασίζεται στη δέσμευση CO₂ από διάλυμα αμίνης, η οποία απαιτούσε θέρμανση του διαλύματος αμίνης για την ανάκτηση του CO₂ (Pierre, 2012), (Goff & Rochelle, 2004).



Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση μιας μονάδας δέσμευσης CO₂ με πλύση αερίου, της CO₂ Solution Inc. Company (Pierre, 2012)

Ο διαλύτης K₂CO₃ (1.45M) χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με CA (0-0.5 g/l) σε μια **μονάδα επίδειξης** ικανή να επεξεργαστεί 10 τόνους CO₂/ημέρα από λέβητα φυσικού αερίου, από την CO₂ Solutions Inc. Τα ενζυμικά καταλυόμενα υδατικά διαλύματα αλάτων μπορούν να αντικαταστήσουν τους ακριβούς και περιβαλλοντικά επικίνδυνους διαλύτες αμινών για τη δέσμευση CO₂ μετά την καύση. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες αυτών των διαλυτών επιτρέπουν τη χρήση χαμηλής ποιότητας, μηδενικής αξίας θερμότητας από τη μονάδα προέλευσης βιομηχανικών αποβλήτων για την απογύμνωση (σπάσιμο του δεσμού μεταξύ του διαλύτη και του CO₂) του διαλύτη σε χαμηλή θερμοκρασία (<80°C) για τη δημιουργία ενός συμπυκνωμένου ρεύματος CO₂ για δέσμευση και ευεργετική επαναχρησιμοποίηση. Το ψυχθέν καυσαέριο με 9.7% mol CO₂ εισήλθε στον πύργο απορρόφησης στους 30-40°C και σε πίεση ελαφρώς πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση, ερχόμενο σε επαφή με το αντίθετο ρεύμα με τον φτωχό διαλύτη (υδατικό διάλυμα ανθρακικών/διττανθρακικών) που στάζει στη συσκευασία. Το CA διαλύθηκε ομοιογενώς στον διαλύτη και ρέει ελεύθερα σε όλο τον απορροφητή και τον απογυμνωτή της εγκατάστασης. Πριν από την επίτευξη σταθερής λειτουργίας, το φορτίο του διαλύτη που τροφοδοτούσε τον απορροφητή αυξανόταν με την πάροδο του χρόνου και μείωνε το ποσοστό δέσμευσης του CO₂. Με λόγο L/G 10.8 kg/kg η απόδοση δέσμευσης που επιτεύχθηκε ήταν 83%. Το ένζυμο και ο διαλύτης παρουσίασαν σταθερή απόδοση, ελάχιστη αποικοδόμηση, μη παραγωγή αποβλήτων και χαμηλή θερμότητα για την αναγέννηση του διαλύτη

σε χαμηλές θερμοκρασίες, οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους (Fradette et al., 2017).

Σε έναν τύπο διεργασίας που αναπτύχθηκε αρχικά από την **NASA** για τον καθαρισμό της ατμόσφαιρας του περιβάλλοντος σε κλειστές κατοικημένες καμπίνες, το CO₂ συλλαμβάνεται μέσω λεπτών υδατικών υμενίων στα οποία διαλύεται μέρος του. Η συγκέντρωση CO₂ σε τέτοιες ατμόσφαιρες είναι χαμηλή, συνήθως της τάξης του 0.1% ή λιγότερο. Ο πυρήνας της υγρής μεμβράνης περιλαμβάνει ένα λεπτό στρώμα (π.χ. πάχους 330μm) ενζυμικού διαλύματος σε ρυθμιστικό διάλυμα υδατικού φωσφορικού άλατος, το οποίο συμπιέζεται μεταξύ 2 μικροπορώδων υδρόφοβων μεμβρανών πολυπροπυλενίου, οι οποίες συγκρατούνται από λεπτά μεταλλικά πλέγματα που εξασφαλίζουν το πάχος και την ακαμψία της υγρής μεμβράνης. Το CO₂ από την ατμόσφαιρα προς καθαρισμό, διαλύεται αυθόρμητα μέσα στην υγρή μεμβράνη στη μία πλευρά της μεμβράνης. Διαχέεται κατά μήκος της υγρής μεμβράνης και εξατμίζεται από την άλλη υγρή μεμβράνη στην αντίθετη πλευρά, είτε σε κενό είτε σε αέριο φορέα. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το N₂ και το O₂ μπορούν να διαλυθούν μόνο ως ουδέτερα μόρια, συνεπώς η διαλυτότητά τους στο νερό είναι περιορισμένη σε σύγκριση με το CO₂ (Pierre, 2012).

Κατά τη δυνητική κλιμάκωση της τεχνολογίας απορρόφησης με τη μεσολάβηση CA, όπως προαναφέρθηκε το κόστος επένδυσης μπορεί να μειωθεί με τη μείωση του μεγέθους του απορροφητήρα λόγω της καταλυτικής δράσης του ενζύμου, με αποτέλεσμα χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για τη διαδικασία αναγέννησης. Επιπλέον, η τεχνολογία επιτρέπει αυξημένη δέσμευση CO₂ ανά μονάδα διαλύτη, οδηγώντας σε μειωμένη χρήση διαλυτών. Μελέτες αποκαλύπτουν σημαντική επίδραση της CA στην κινητική της αντίδρασης, με αποτέλεσμα τη μείωση του ύψους του απορροφητή κατά περισσότερο από 90%. Επιπλέον, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος έχει τη δυνατότητα να είναι ο μισός σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα απορρόφησης MEA (de Oliveira Maciel et al., 2022).

Οι πλυντρίδες CO₂ που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον ακινητοποιημένη CA, διότι η εμπορική CA είναι δαπανηρή και η ακινητοποίησή της σε ένα φορέα επιτρέπει τη χρήση της για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πριν χαθεί από την πλύση (leaching), άρα και τη μείωση του λειτουργικού κόστους (Pierre, 2012).

2.4 Εφαρμογές τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ σε βιομηχανίες

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές εταιρίες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου άνθρακα (Mariam Ahmad, 2023) :

Global Thermostat: Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 4000

Η τεχνολογία Direct Air Capture (DAC) της Global Thermostat, που ιδρύθηκε το 2010, χρησιμοποιεί μια κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διαδικασία που ονομάζεται "Συγκρότημα απομάκρυνσης διοξειδίου του άνθρακα-Carbon Dioxide Removal Assembly" (CDRA), η οποία περιλαμβάνει τη δέσμευση του CO₂ με τη χρήση ενός προσροφητικού υλικού που αναγεννάται από μια πηγή θερμότητας χαμηλού βαθμού. Στη συνέχεια, το CO₂ συμπιέζεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου, στην παραγωγή τσιμέντου ή ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ανανεώσιμων καυσίμων.

Climeworks: Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 4000

Η Climeworks είναι μια ελβετική εταιρεία που ειδικεύεται στην τεχνολογία άμεσης δέσμευσης αέρα (DAC), η οποία περιλαμβάνει την εξαγωγή διοξειδίου του άνθρακα απευθείας από την ατμόσφαιρα. Η εταιρεία ιδρύθηκε το 2009 από τον Christoph Gebald και τον Jan Wurzbacher και έχει καταστεί σημαντικός παράγοντας στον κλάδο της δέσμευσης άνθρακα. Η Climeworks διαθέτει αρκετές εγκαταστάσεις DAC σε όλο τον κόσμο, μεταξύ άλλων στην Ελβετία, την Ιταλία και την Ισλανδία, και έχει συνεργασίες με διάφορους οργανισμούς και εταιρείες, όπως η Audi, η Microsoft και η Swiss Re, για να προωθήσει την ανάπτυξη και την εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμευσης άνθρακα.

SAIPEM : Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 11000

Το CO₂ Solutions είναι μια τεχνολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα που αναπτύχθηκε από την ιταλική εταιρεία μηχανικών και ενεργειακών υπηρεσιών Saipem, το 1997. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί μια προσέγγιση που βασίζεται σε ένζυμα για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από βιομηχανικές εκπομπές, όπως αυτές από σταθμούς παραγωγής ενέργειας, εργοστάσια τσιμέντου και χαλυβουργεία. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας CO₂ Solutions είναι η ικανότητά της να δεσμεύει διοξείδιο του άνθρακα με χαμηλότερο κόστος από τις παραδοσιακές τεχνικές δέσμευσης άνθρακα, όπως οι διαλύτες με βάση την αμίνη. Επιπλέον, η χρήση ενζύμων επιτρέπει μια πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία, καθώς δεν απαιτεί τοξικές χημικές ουσίες ούτε παράγει επιβλαβή παραπροϊόντα.

LanzaTech: Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 150000

Η LanzaTech είναι μια εταιρεία βιοτεχνολογίας που ειδικεύεται στην ανάπτυξη και εμπορική εκμετάλλευση της τεχνολογίας δέσμευσης και αξιοποίησης του άνθρακα (CCU). Η εταιρεία ιδρύθηκε στη Νέα Ζηλανδία το 2005 από τον Dr. Sean Simpson και έκτοτε έχει επεκταθεί σε τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών, της Κίνας, της Ινδίας και της Ευρώπης. Η τεχνολογία CCU της LanzaTech περιλαμβάνει τη δέσμευση αερίων

αποβλήτων, όπως αυτά που παράγονται από βιομηχανικές διεργασίες, και τη μετατροπή τους σε πολύτιμα χημικά και καύσιμα με τη χρήση μικροοργανισμών. Εκτός από την τεχνολογία CCU, η LanzaTech αναπτύσσει και άλλες τεχνολογίες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, όπως μια διαδικασία μετατροπής του διοξειδίου του άνθρακα σε νέα υλικά, όπως πολυμερή και πλαστικά.

Carbon Clean: Δέσμευση άνθρακα το 2022 (σε τόνους CO₂): 335745

Η Carbon Clean Solutions Limited, είναι μια εταιρεία που παρέχει τεχνολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα χαμηλού κόστους για να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η εταιρεία ιδρύθηκε το 2009 και έχει την έδρα της στο Λονδίνο του Ηνωμένου Βασιλείου, με πρόσθετα γραφεία στην Ινδία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Η τεχνολογία της Carbon Clean χρησιμοποιεί έναν ιδιόκτητο διαλύτη για τη δέσμευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από βιομηχανικές διεργασίες, όπως εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και εργοστάσια τσιμέντου. Το συλληφθέν CO₂ διαχωρίζεται στη συνέχεια από τον διαλύτη και συμπιέζεται σε καθαρή μορφή, η οποία μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί για επαναχρησιμοποίηση ή να δεσμευτεί μόνιμα στο υπέδαφος.

Aker Carbon Capture: Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 400000

Η Aker Carbon Capture, θυγατρική της Aker Solutions, είναι κορυφαίος παίκτης στον κλάδο της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Η Aker Carbon Capture χρησιμοποιεί τη δική της καινοτόμα τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα για τη δέσμευση CO₂ από καυσαέρια αποβλήτων που παράγονται από διάφορες βιομηχανίες, όπως διυλιστήρια πετρελαίου και εργοστάσια τσιμέντου. Οι μορφολογικές λύσεις της εταιρείας είναι σχεδιασμένες για εύκολη μεταφορά και εγκατάσταση, ενώ παρέχει επίσης υπεράκτιες και ολοκληρωμένες λύσεις.

Carbon Engineering: Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 1 εκατομμύρια

Η Carbon Engineering έχει συγκεντρώσει σημαντική χρηματοδότηση ύψους 110 εκατομμυρίων δολαρίων και έχει καθιερωθεί ως σημαντικός πρωταγωνιστής στον κλάδο. Διαθέτει μία μοναδική της τεχνική υγρού DAC, η οποία χρησιμοποιεί διάλυμα υδροξειδίου του καλίου για την παγίδευση του CO₂ και έχει συγκεντρώσει την εμπιστοσύνη και τις επενδύσεις από γνωστά ονόματα όπως η Chevron, η Occidental, η Airbus, η Air Canada και ο Bill Gates, μεταξύ άλλων. Η Carbon Engineering έχει παραχωρήσει άδεια χρήσης της τεχνολογίας DAC στην 1PointFive με στόχο την κατασκευή ενός εργοστασίου κλίμακας μεγατόνων στη λεκάνη Permian στις ΗΠΑ. Το εργοστάσιο αυτό θα έχει τη δυνατότητα δέσμευσης 1 εκατομμυρίου τόνων CO₂ ετησίως από το 2024.

Quest Carbon Capture & Storage (SHELL): Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 1.2 εκατομμύρια

Το Quest Carbon Capture and Storage είναι ένα έργο που αναπτύχθηκε και λειτουργεί από τη Shell Canada, το οποίο περιλαμβάνει τη δέσμευση και αποθήκευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από ένα εργοστάσιο αναβάθμισης ασφάλτου στην Αλμπέρτα του Καναδά. Το έργο ολοκληρώθηκε το 2015 και αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα έργα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) στον κόσμο. Το έργο Quest χρησιμοποιεί μια διαδικασία που ονομάζεται σύλληψη μετά την καύση για τη δέσμευση έως και 1 εκατομμυρίου μετρικών τόνων εκπομπών CO₂ ετησίως από τον αναβαθμιστή Scotford, μια εγκατάσταση που επεξεργάζεται ασφάλτο από την άμμο πετρελαίου. Το συλληφθέν CO₂ στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω αγωγού και αποθηκεύεται βαθιά στο υπέδαφος σε μια αλατούχα δεξαμενή, όπου αναμένεται να παραμείνει παγιδευμένο για χιλιάδες χρόνια.

CarbonFree: Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 800 εκατομμύρια

Η CarbonFree είναι μια εταιρεία που χρησιμοποιεί πατενταρισμένες τεχνολογίες για τη δέσμευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από σταθερές σημειακές πηγές εκπομπών και τη μετατροπή τους σε χημικές ουσίες αρνητικές ως προς τον άνθρακα. Τα καινοτόμα προϊόντα της εταιρείας, τα SkyCycle™ και SkyMine®, χρησιμοποιούν αυτό το συλληφθέν CO₂ για τη δημιουργία χρήσιμων χημικών προϊόντων, όπως το διττανθρακικό νάτριο, το ανθρακικό ασβέστιο με καθίζηση και το υδροχλωρικό οξύ. Η αρθρωτή και κλιμακούμενη τεχνολογία της CarbonFree μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτόπου, εξαλείφοντας την ανάγκη για δαπανηρή υποδομή για τη μεταφορά και την αποθήκευση του συλληφθέντος CO₂. Στόχος της εταιρείας είναι να βοηθήσει όλες τις βιομηχανικές μονάδες παραγωγής να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και να δημιουργήσουν βιώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα.

CarbFix: Δέσμευση άνθρακα ανά έτος (σε τόνους CO₂): 1 δισεκατομμύριο / διάρκεια ζωής

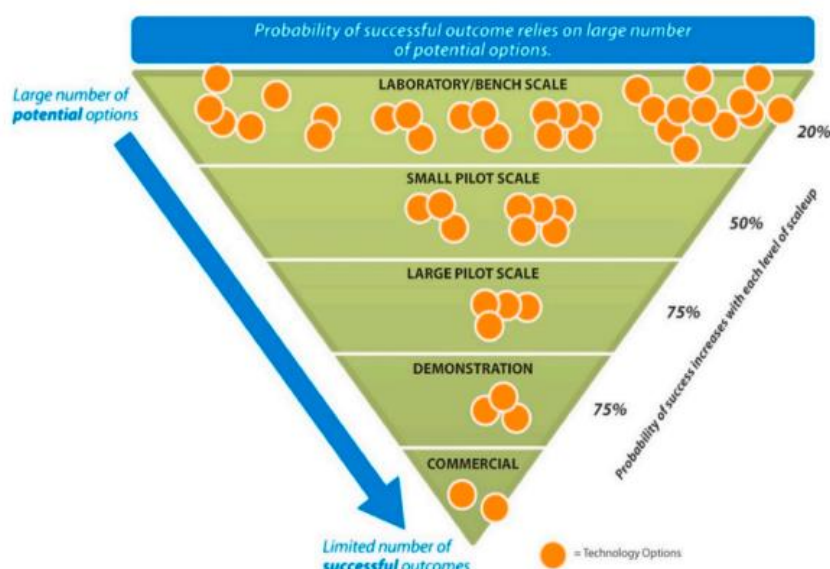
Η Carbfix ιδρύθηκε το 2006 και είναι μια ισλανδική εταιρεία που ειδικεύεται στην τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS). Η μοναδική προσέγγιση της εταιρείας στην CCS περιλαμβάνει την έγχυση του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα σε βασालτικούς βραχώδεις σχηματισμούς βαθιά κάτω από την επιφάνεια της Γης. Η διαδικασία της Carbfix περιλαμβάνει τη διάλυση του CO₂ σε νερό και στη συνέχεια την έγχυση του διαλύματος που προκύπτει στους βασालτικούς βραχώδεις σχηματισμούς. Μόλις φτάσει στο υπέδαφος, το διαλυμένο CO₂ αντιδρά με τα ορυκτά του πετρώματος και στερεοποιείται σε μια ορυκτή μορφή, αφαιρώντας το ουσιαστικά από την ατμόσφαιρα και κλειδώνοντάς το για χιλιάδες χρόνια. Η προσέγγιση της Carbfix βασίζεται στην επιτάχυνση μιας φυσικής διαδικασίας κατά την οποία το διαλυμένο CO₂ αλληλεπιδρά με αντιδραστικούς βραχώδεις σχηματισμούς για τη δημιουργία σταθερών ανθρακικών ορυκτών.

Αυτό δημιουργεί μια ασφαλή και μόνιμη λύση αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα, η οποία συμβάλλει στη μείωση των επιπτώσεων του στο περιβάλλον.

Παρόλο που υπάρχουν πολλές πληροφορίες σχετικά με την τεχνολογία, τα οικονομικά και τις πολιτικές σχετικά με τη βιομηχανική CCUS, πολλά κενά και προκλήσεις στη γνώση και τη δράση παραμένουν. Τα σημαντικότερα από αυτά περιλαμβάνουν (United Nations, 2010) :

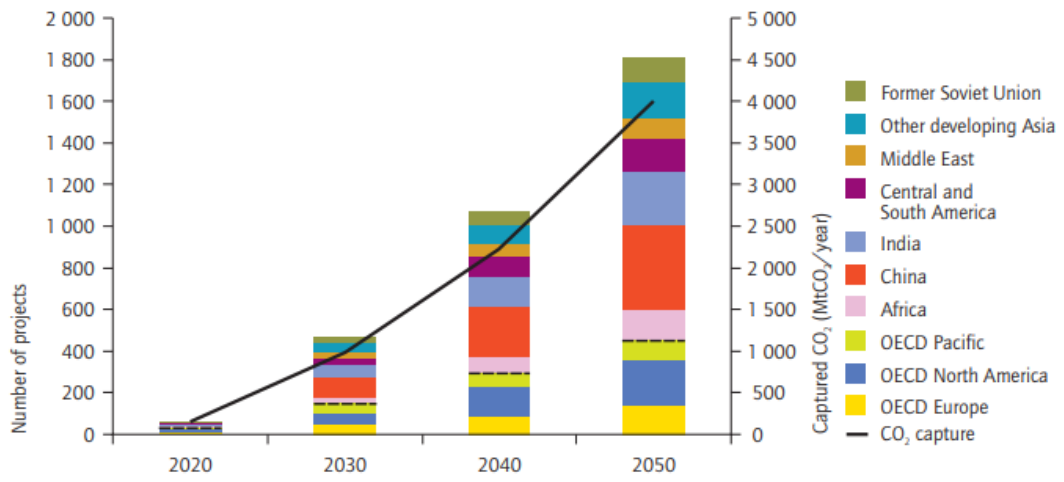
- Έλλειψη δεδομένων για τις εκπομπές και τις προβλέψεις εκπομπών,
- Έλλειψη πραγματικών δεδομένων σχετικά με το κόστος μηχανικής,
- Ασυνέπειες στην αναφορά δεδομένων εκτιμώμενου κόστους,
- Η εμπιστευτικότητα των βιομηχανικών δεδομένων,
- Έλλειψη ευαισθητοποίησης και πολιτικής βούλησης για την παροχή βιομηχανικής CCUS,
- Χαμηλή ευαισθητοποίηση και περιορισμένη σχετική ανθρώπινη ικανότητα στις αναπτυσσόμενες χώρες- και
- Έλλειψη προόδου στην ανάπτυξη πολιτικών για την CCUS σε παγκόσμιο πλαίσιο

Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 11, στο οποίο φαίνεται ότι επικρατεί περισσότερο η εργαστηριακή κλίμακα σε σχέση με την βιομηχανική.



Σχήμα 11: Διαδικασία αξιολόγησης των τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα (Olabi et al., 2022)

Όμως, προβλέπεται ότι μέχρι το 2050 η παγκόσμια ανάπτυξη του CCS στους βιομηχανικούς τομείς θα εμφανίσει μεγάλη πρόοδο, με τα δεδομένα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Παγκόσμια ανάπτυξη του CCS στους βιομηχανικούς τομείς, 2020-2050 (δεσμευμένο CO₂ και αριθμός έργων) (United Nations, 2011)

Παρά το γεγονός ότι η αναερόβια τεχνολογία χρονολογείται για περισσότερα από 100 χρόνια, η τεχνολογία εξακολουθεί να βρίσκεται υπό ανάπτυξη, προσαρμόζοντας νέα συστήματα επεξεργασίας στις σύγχρονες απαιτήσεις. Στην πραγματικότητα, οι περισσότερες πρόοδοι επιτεύχθηκαν κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών, όταν αναπτύχθηκαν συστήματα αντιδραστήρων υψηλής ταχύτητας και αποκτήθηκε βαθιά γνώση της μικροβιολογίας των αναερόβιων κοινοτήτων. Αυτή η γνώση οδήγησε σε καλύτερη κατανόηση της αναερόβιας επεξεργασίας και στη συνέχεια σε ευρύτερες δυνατότητες εφαρμογής. Η αναερόβια χώνευση μπορεί να θεωρηθεί ως μία από τις παλαιότερες τεχνολογίες για τη σταθεροποίηση των αποβλήτων (νερού) και εφαρμόζεται από τα τέλη του 19ου αιώνα, κυρίως για την επεξεργασία οικιακών αποβλήτων (νερού) σε σηπτικές δεξαμενές, την επεξεργασία πολτών σε χωνευτήρες και για την επεξεργασία της λυματολάσπης σε δημοτικές μονάδες επεξεργασίας (Van Lier et al., 2001).

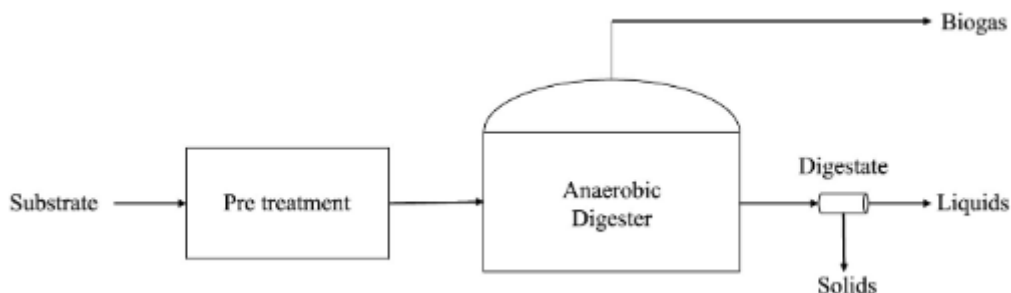
Παρακάτω παρουσιάζεται, στο Σχήμα 14, η ιστορική αναδρομή της αναερόβιας χώνευσης:

Time scale	1800		1900			2000	
	1775		1850		1950		2025
Anaerobic wastewater treatment			About 1860 Mouas Automatic scavenger (MAS)	1895 Exeter, MAS Septic tank Imhoff tank			High-rate systems AF, UASB, FB
Biogas uses	1778 Volta discovers methane		Exploitation of natural gas at household level	Rural biogas Production from solid waste		Commercial exploitation of methane from geological deposits	Exploitation of methane from landfills and high-rate digesters
Anaerobic digestion of solid waste				Chinese-type/ Indian-type for energy recovery in rural Asia			High-rate systems Biocel, Dranco, RUDAD Vagron, Valorga

Σχήμα 14: Αναερόβια χώνευση σε ιστορική αναδρομή (Gijzen, 2002)

3.2 Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης

Στο Σχήμα 15 αναπαρίσταται η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, η οποία και αναφέρεται αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα της αναερόβιας χώνευσης (Logan & Visvanathan, 2019)

Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης: Η αναερόβια χώνευση θεωρείται συχνά ότι είναι μια πολύπλοκη διεργασία, με την ίδια τη χώνευση να βασίζεται σε μια αναγωγική διεργασία που αποτελείται από έναν αριθμό βιοχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα υπό ανοξικές συνθήκες. Ο σχηματισμός μεθανίου στην αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει τέσσερα διαφορετικά στάδια: υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση. Γενικά σε μια διεργασία αναερόβιας χώνευσης, το βήμα περιορισμού του ρυθμού μπορεί να οριστεί ως το βήμα που προκαλεί αποτυχία της διεργασίας υπό επιβαλλόμενη κινητική πίεση. Οι περισσότεροι ερευνητές αναφέρουν ότι ο περιορισμός του ρυθμού για τα σύνθετα οργανικά υποστρώματα είναι το στάδιο της υδρόλυσης λόγω του σχηματισμού τοξικών παραπροϊόντων ή μη επιθυμητών πτητικών λιπαρών οξέων (VFA) που σχηματίζονται κατά το στάδιο της υδρόλυσης, ενώ η μεθανογένεση είναι το περιοριστικό στάδιο του ρυθμού για τα εύκολα βιοαποικοδομήσιμα υποστρώματα. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις με τους μικροοργανισμούς που εκτελούν τις αντιδράσεις αποικοδόμησης σε κάθε μία από αυτές τις φάσεις να διαφέρουν σημαντικά όσον αφορά τη φυσιολογία, τις διατροφικές ανάγκες, την κινητική ανάπτυξη και την ευαισθησία στο περιβάλλον. Επιπλέον, είναι δύσκολο να διατηρηθεί μια λεπτή ισορροπία μεταξύ αυτών των δύο ομάδων: των μικροοργανισμών που σχηματίζουν οξέα και των μικροοργανισμών που σχηματίζουν μεθάνιο, οι οποίοι οδηγούν σε αστάθεια του αντιδραστήρα και κατά συνέπεια σε χαμηλή απόδοση μεθανίου. Οι δύο κύριες ομάδες μικροοργανισμών θα μπορούσαν να διαχωριστούν φυσικά με σκοπό την αξιοποίηση της διαφοράς στην κινητική ανάπτυξής τους. Προκειμένου να επιτευχθεί ο διαχωρισμός φάσεων, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές, όπως ο διαχωρισμός με μεμβράνες, ο κινητικός έλεγχος και ο έλεγχος του pH (Adekunle & Okolie, 2015).

Προεπεξεργασία: Η μεθανογενετική (methanogenic) διεργασία περιορίζεται γενικά από τον ρυθμό υδρόλυσης των αιωρούμενων ουσιών και των οργανικών στερεών. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την αναερόβια επεξεργασία στερεών αποβλήτων, πολτών και κοπριάς, καθώς και υγρών αποβλήτων με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών (SS), όπως τα οικιακά λύματα. Μέσω

αποτελεσματικής προεπεξεργασίας το αιωρούμενο υπόστρωμα μπορεί να γίνει καλύτερα προσβάσιμο για τα αναερόβια βακτήρια, βελτιστοποιώντας το μεθανογενετικό δυναμικό των προς επεξεργασία αποβλήτων. Στόχος είναι η επιτάχυνση της χώνευσης των στερεών αποβλήτων και των ιλύων, όπως η λυματολάσπη, ώστε να αυξηθεί ο βαθμός αποικοδόμησης και να μειωθεί έτσι η ποσότητα της ιλύος που πρέπει να διατεθεί (Van Lier et al., 2001).

Ένα ευρύ φάσμα τύπων βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα (πρώτη ύλη) για την παραγωγή βιοαερίου από τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Το υπόστρωμα πρέπει να καλύπτει τις διατροφικές απαιτήσεις των μικροοργανισμών όσον αφορά τις πηγές ενέργειας και τα διάφορα συστατικά που είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία νέων κυττάρων. Το υπόστρωμα θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία συστατικών που είναι απαραίτητα για τη δραστηριότητα των συστημάτων μικροβιακών ενζύμων, όπως ιχνοστοιχεία και βιταμίνες. Η σύνθεση του υποστρώματος είναι σημαντική στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και επηρεάζει τελικά και την ποιότητα του υπολείμματος χώνευσης (digestate), τόσο όσον αφορά την περιεκτικότητα σε φυτικά θρεπτικά συστατικά όσο και την πιθανή επιμόλυσή του από μέταλλα, οργανικές ενώσεις και οργανισμούς που προκαλούν ασθένειες (Adekunle & Okolie, 2015).

Η επιλογή του σωστού υλικού δίνει τη δυνατότητα να επηρεαστεί το αποτέλεσμα της διαδικασίας, να μεγιστοποιήσει την παραγωγή ενέργειας και να παράγει βιολογικό λίπασμα καλής ποιότητας. Η πιο συνηθισμένη βιομάζα που χρησιμοποιείται στην ευρωπαϊκή παραγωγή βιοαερίου παρατίθεται παρακάτω (Adekunle & Okolie, 2015) :

- Κοπριά ζώων
- Γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα
- Χωνεύσιμα οργανικά απόβλητα από τις βιομηχανίες τροφίμων και αγροτικών προϊόντων (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων και της εστίασης
- Λάσπη λυμάτων
- Ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες (π.χ. αραβόσιτος)

Η σημασία του υποστρώματος για τους μικροοργανισμούς: Η σύνθεση ενός υποστρώματος είναι πολύ σημαντική για τους μικροοργανισμούς στη διεργασία παραγωγής βιοαερίου και συνεπώς για τη σταθερότητα της διεργασίας και την παραγωγή αερίου. Όταν πρόκειται για τη διάσπαση του οργανικού υλικού στη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (λόγος C/N) θεωρείται επίσης πολύ σημαντικός, επομένως η απόδοση της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης αποδεικνύεται ότι βελτιώνεται με τη χρήση υποστρωμάτων από διαφορετικές πηγές και με τις κατάλληλες αναλογίες (Adekunle & Okolie, 2015).

3.3 Υπόλειμμα αναερόβιας χώνευσης

3.3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στην αναερόβια χώνευση, τα οργανικά υλικά αποικοδομούνται από βακτήρια, απουσία οξυγόνου, μετατρέποντάς τα σε μείγμα μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα (βιοαερίου). Το χωνευμένο υπόλειμμα (**digestate**) ή αλλιώς λάσπη από τον χωνευτή είναι πλούσιο σε αμμώνιο και άλλα θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται ως οργανικό λίπασμα (Adekunle & Okolie, 2015).

Το αναερόβιο απόβλητο περιέχει μακροθρεπτικά συστατικά (N, P, K, Ca, S και Mg) και μικροθρεπτικά συστατικά (B, Cl, Mn, Fe, Zn, Cu, Mo και Ni). Έτσι, έχουν μεγάλη πιθανότητα να βλάψουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία λόγω του υψηλότερου δυναμικού εκπομπής NH₃ και της υψηλής συγκέντρωσης σε μικροθρεπτικά συστατικά (Logan & Visvanathan, 2019). Μετά το διαχωρισμό στερεού-υγρού, το υγρό μέρος περιέχει υψηλό ποσοστό αζώτου και το στερεό μέρος περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο (Logan & Visvanathan, 2019). Επομένως, το υγρό κλάσμα έχει μεγαλύτερες δυνατότητες ως λίπασμα, ενώ το στερεό κλάσμα έχει μεγαλύτερες δυνατότητες τροποποίησης της σύστασης του εδάφους (Κοναčić et al., 2022). Επιπροσθέτως, το στερεό κλάσμα μπορεί να υποστεί επεξεργασία με κομποστοποίηση ή ξήρανση, ενώ το υγρό κλάσμα μπορεί να υποστεί επεξεργασία με τεχνολογία μεμβρανών, εξάτμιση, απομάκρυνση και περαιτέρω βιολογικές διεργασίες (Logan & Visvanathan, 2019).

Η περιεκτικότητα του χωνεύματος σε βαρέα μέταλλα μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό. Οι διακυμάνσεις αυτές σχετίζονται με τα υλικά εισόδου, τα οποία συνήθως ταξινομούνται ως πράσινα απόβλητα (οργανικά απόβλητα από ιδιωτικούς κήπους και δημόσιους χώρους πρασίνου) και βιοαπόβλητα (πράσινα απόβλητα και απόβλητα τροφίμων και κουζίνας από νοικοκυριά, εστιατόρια, επιχειρήσεις εστίασης, χώρους λιανικής πώλησης και απόβλητα από μονάδες επεξεργασίας τροφίμων). Επιπλέον, η προέλευση του υλικού εισόδου θα μπορούσε να είναι σημαντική, επειδή η εναέρια εναπόθεση των βαρέων μετάλλων είναι συνήθως υψηλότερη σε αστικά περιβάλλοντα από ό,τι σε αγροτικές περιοχές, ενώ η εποχή συλλογής του υλικού εισόδου θα μπορούσε να διαδραματίσει ρόλο, καθώς η εναπόθεση των HMs τείνει να κορυφώνεται το χειμώνα (Κοναčić et al., 2022).

Το **χαμηλής ποιότητας χώνευμα** έχει υψηλότερες αναλογίες NH₄⁺:ολικό N (TN), μειωμένη περιεκτικότητα σε οργανικά μέταλλα, μειωμένη περιεκτικότητα σε ολικό (TC) και οργανικό άνθρακα (TOC), μειωμένες βιολογικές απαιτήσεις οξυγόνου (BOD), αυξημένες τιμές pH, χαμηλότερες αναλογίες C:N και μειωμένο ιξώδες σε σχέση με την αχώνευτη ζωική κοπριά (Κοναčić et al., 2022).

Το **υψηλής ποιότητας χώνευμα** είναι κατάλληλο για εδαφολογική λίπανση χαρακτηρίζεται από ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις ιδιότητές του, όπως η δηλωμένη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, η τιμή του pH, η περιεκτικότητα σε ξηρή ουσία και οργανικά μέταλλα και η ομοιογένεια.

Εξίσου σημαντικά είναι και τα χαρακτηριστικά του χωνεύματος που σχετίζονται με την υγεία και την ασφάλεια, όπως η καθαρότητα (απαλλαγμένη από πλαστικό, πέτρες, γυαλί, μη χωνεύσιμη ύλη κ.λπ.), η υγιεινή ή η απολύμανση (απαλλαγμένη από παθογόνα και άλλα ανεπιθύμητα βιολογικά περιεχόμενα) και η ασφάλεια (ασφαλής για τους ζωντανούς οργανισμούς και το περιβάλλον). Αυτές οι ανησυχίες απαιτούν αυστηρούς ελέγχους και περιορισμούς στην ανεπιθύμητη περιεκτικότητα τόσο σε οργανικούς όσο και σε ανόργανους χημικούς ρύπους. Ως εκ τούτου, ο μόνος εφικτός τρόπος για να εξασφαλιστεί η παραγωγή υψηλής ποιότητας digestate είναι η χρήση υψηλής ποιότητας πρώτης ύλης ως υπόστρωμα για την αναερόβια χώνευση (Κοναčić et al., 2022).

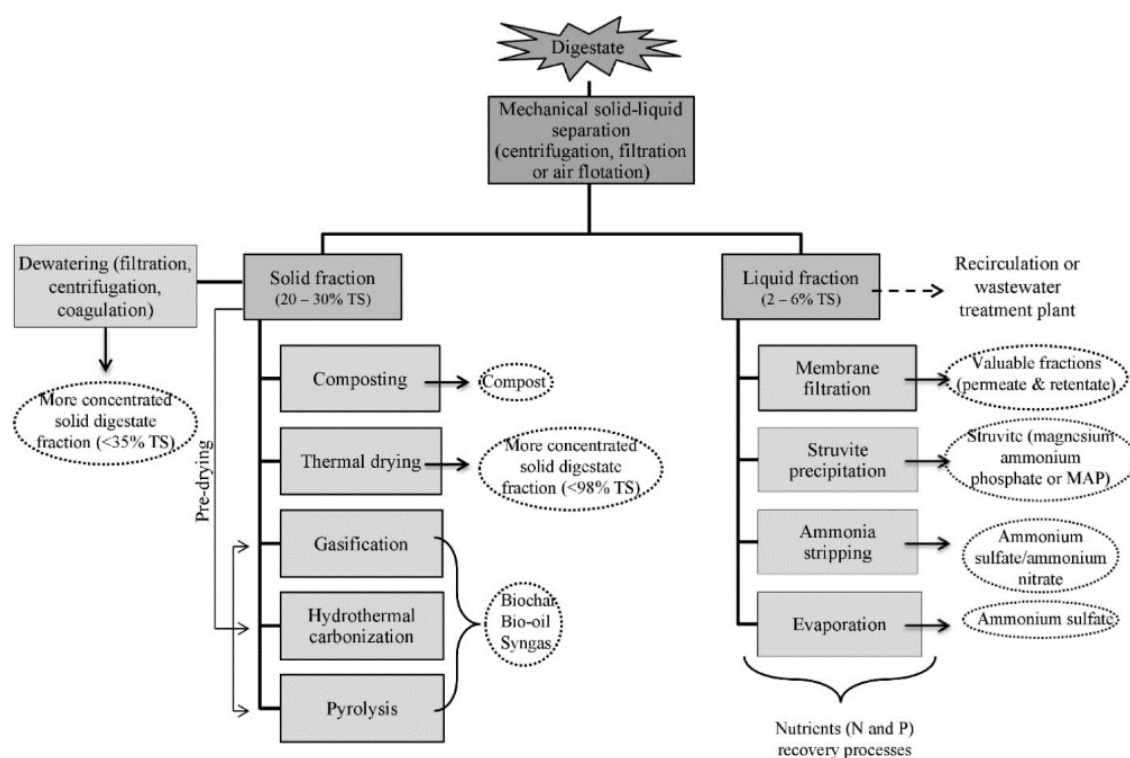
Το υψηλό δυναμικό λίπανσης του χωνεύματος συνδέεται επίσης στενά με την υψηλή περιεκτικότητα σε διαθέσιμο στα φυτά P, K και άλλα θρεπτικά συστατικά. Όπως αναφέρθηκε, ο P υπάρχει τόσο στο στερεό κλάσμα του χωνεύματος (οργανική και ανόργανη μορφή) όσο και στο υγρό κλάσμα στο οποίο επικρατεί η ανόργανη μορφή. Το χώνευμα μπορεί να επηρεάσει τα επίπεδα του διαθέσιμου στα φυτά P με δύο τρόπους - με άμεση πρόσληψη ανόργανου P ή με διέγερση των μικροοργανισμών να υποβληθούν σε διαφορετικές δραστηριότητες. Ο μετασχηματισμός του οργανικού P εξαρτάται από την αναλογία C/P, ενώ ο μετασχηματισμός του ανόργανου P εξαρτάται από το pH του εδάφους και την παρουσία μεταλλικών κατιόντων. Η κλασματοποίηση ή η κομποστοποίηση του χωνεύματος θα μπορούσε να βελτιώσει τη δέσμευση του C στο έδαφος (Κοναčić et al., 2022).

3.3.2 Επεξεργασία χωνεύματος

Οι κύριοι στόχοι της επεξεργασίας του χωνεύματος είναι: (i) η μείωση του όγκου για τη βελτίωση της διαχειρισιμότητας και τη μείωση του κόστους μεταφοράς και (ii) η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών σε συμπυκνωμένη μορφή. Σε γενικές γραμμές, οι διεργασίες επεξεργασίας digestate μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: (α) Μερική επεξεργασία - αυτή αποσκοπεί στη μείωση του όγκου ή στο διαχωρισμό του σε στερεά και υγρά κλάσματα που μπορούν να διαχειριστούν ή να αποθηκευτούν ευκολότερα. Αποτελεί συνήθως το πρώτο βήμα στην επεξεργασία digestate και είναι λιγότερο απαιτητική σε ενέργεια και φθηνότερη αν συγκριθεί με την (β) πλήρη καθαρισμό-όπου τα πολύτιμα συστατικά διαχωρίζονται και συμπυκνώνονται ενώ το υπόλοιπο υγρό κλάσμα

καθαρίζεται, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση στη διαδικασία AD ή την απευθείας απόρριψη σε ένα υδατικό σώμα (Κοναζιό et al., 2022).

Οι διαφορετικές τεχνολογίες επεξεργασίας (βλ. Σχήμα 16) οδηγούν σε διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά και τιμές λίπανσης του τελικού προϊόντος. Παρόλο που απαιτείται σημαντικό κόστος κεφαλαίου λόγω των κατάλληλων μηχανημάτων, της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και αντιδραστηρίων, το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος που προκύπτει από τη μείωση της κατανάλωσης νερού, ενέργειας και πρώτης ύλης καθιστά τις τεχνολογίες αυτές κερδοφόρα επένδυση μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Δεδομένου ότι η επεξεργασία του χωνεύματος έχει μόλις πρόσφατα (περίπου τα τελευταία 10-15 χρόνια), γίνει εστία ενδιαφέροντος, δεν υπάρχει τυποποιημένη διαδικασία και μάλλον υπάρχει μεγάλη ποικιλία συστημάτων επεξεργασίας (Κοναζιό et al., 2022).



Σχήμα 16: Τεχνολογίες επεξεργασίας χωνεύματος (Κοναζιό et al., 2022)

3.3.3 Κίνδυνοι και προκλήσεις χωνεύματος

Ο ακατάλληλος χειρισμός και η διασπορά του χωνευμένου υπολείμματος μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικό κίνδυνο, είτε λόγω διαρροής νιτρικών στο έδαφος ή το νερό του αποδέκτη είτε λόγω πιθανών αέριων απωλειών αμμωνίας, μεθανίου και οξειδίου του αζώτου. Επίσης, το χωνευμένο υπόλειμμα έχει υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διαχείριση, τη μεταφορά και τη διασπορά του στον αγρό (Logan & Visvanathan, 2019). Η περιεκτικότητα αυτή σε νερό που κυμαίνεται από 60% έως 90%. Το χωνευμένο

υπόλειμμα υψηλής υγρασίας χαρακτηρίζεται συχνά από υψηλό ιξώδες και κακή ρευστότητα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές χωρικές απαιτήσεις για την αποθήκευση και το χειρισμό. Αυτό δημιουργεί προκλήσεις για πολλές πόλεις, καθώς αυξάνει το κόστος μεταφοράς του χωνευμένου υπολείμματος και δεν ευνοεί τις επακόλουθες μεθόδους διάθεσης, όπως η υγειονομική ταφή ή η αποτέφρωση Ταυτόχρονα, η υψηλή περιεκτικότητα του χωνευμένου υπολείμματος σε υγρασία δημιουργεί προκλήσεις στη διαδικασία αφυδάτωσης. Οι συμβατικές μέθοδοι, όπως η μηχανική συμπίεση, ο φυγοκεντρικός διαχωρισμός και η στράγγιση, αποδεικνύονται αναποτελεσματικές για την αποτελεσματική μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία του χωνευμένου υπολείμματος. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα του χωνευμένου υπολείμματος σε νερό οδηγεί στην παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων υγρών αποβλήτων κατά την επεξεργασία, περιπλέκοντας και αυξάνοντας το κόστος της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και δημιουργώντας διάφορα πιθανά περιβαλλοντικά ζητήματα (Guan et al., 2024). Ακόμη, είναι πλούσιο σε οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά, ιδίως άζωτο, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κήπους, δάση, χώρους αναψυχής και άθλησης και σε ιχθυόλιμνες ως λίπασμα ή βελτιωτικό εδάφους/τροποποιητικό εδάφους, όμως μπορεί επίσης και να προκαλέσει υπερβολική εξαέρωση αμμωνίας και διασπορά οξειδωμένων μορφών N μέσω της έκπλυσης νιτρικών (NO_3^-) ή των εκπομπών οξειδίου του αζώτου (N_2O). Για να επιτευχθούν σημαντικές θετικές επιδράσεις, τα digestate πρέπει να ενσωματώνονται άμεσα και αμέσως στο έδαφος μετά τη διασπορά στον αγρό. Εάν αντιμετωπιστούν με αυτόν τον τρόπο, το διαθέσιμο N θα αντιστοιχεί στην περιεκτικότητά τους σε $\text{NH}_4^+\text{-N}$ συν ένα μικρό μέρος των οργανικών κλασμάτων N (10-20%) (Kovačić et al., 2022). Επομένως η ακατάλληλη χρήση του χωνευμένου υπολείμματος με μολυσματικές ουσίες μπορεί να οδηγήσει σε μετάδοση ασθενειών μέσω της τροφικής αλυσίδας, εάν δεν επιβληθούν κατάλληλοι και αυστηροί έλεγχοι. Επιπλέον, απαιτείται νομοθεσία για την επιβολή κατάλληλων επιπέδων επεξεργασίας και προτύπων για την ασφαλή διάθεση των οργανικών αποβλήτων, εκτός από την εφαρμογή της τεχνολογίας της αναερόβιας χώνευσης. Άλλες νομοθεσίες για την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη, η ζήτηση για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ο φόρος υγειονομικής ταφής για τα οργανικά απόβλητα, η ζήτηση για οργανικά λιπάσματα, οι υψηλές τιμές των ορυκτών καυσίμων και η ρύπανση του περιβάλλοντος επηρεάζουν επίσης τη διαχείριση του χωνευμένου υπολείμματος (Logan & Visvanathan, 2019).

Τα παθογόνα μικρόβια (*Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Listeria perfringens*, *Campylobacter jejuni*, *Cryptosporidium parvum*, *Giardia intestinalis*, *Clostridium botulinum*), τα οποία δεν αποτελούν μείζον πρόβλημα στην αναερόβια χώνευση διαφόρων ζωικών αποβλήτων, μπορούν να επιβιώσουν από τη διαδικασία της χώνευσης και να παραμείνουν στο χώνευμα. Για αυτό το λόγο, τα ζωικά υποπροϊόντα που προέρχονται από τη

βιομηχανία τροφίμων και δεν είναι κατάλληλα για ανθρώπινη χρήση, τα οποία χρησιμοποιούνται για αναερόβια χώνευση, απαιτούν παστερίωση. Εκτός από την παστερίωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι προεπεξεργασίας για τη μείωση του αριθμού των παθογόνων μικροοργανισμών στο τελικό digestate όπως η επεξεργασία με χλώριο, υπεριώδεις φως, όζον και υψηλή εσωτερική πίεση στο δοχείο. Η σωστή υγιεινή του χωνεύματος εξαρτάται επίσης από την ποιότητα των υποστρωμάτων που τροφοδοτούνται στον αντιδραστήρα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, καθώς και από την απόδοση του αντιδραστήρα, τη θερμοκρασία χώνευσης, το χρόνο παραμονής του πολτού, το pH και τη συγκέντρωση NH_3 (Κοναčić et al., 2022).

Η παρουσία βαρέων μετάλλων στο χωνευμένο υπόλειμμα αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό κίνδυνο. Αυτά τα βαρέα μέταλλα προέρχονται από διάφορες πρώτες ύλες χωνευμένου υπολείμματος, ιδίως από την κοπριά των ζώων, η οποία παράγεται σε μεγάλες ποσότητες παγκοσμίως. Για την ενίσχυση της υγείας και της παραγωγικότητας των ζώων, ιχνοστοιχεία όπως Zn, Cu, As και Cr προστίθενται συνήθως στις ζωοτροφές. Ωστόσο, τα στοιχεία αυτά δεν απορροφώνται πλήρως από τα ζώα και απεκκρίνονται, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση βαρέων μετάλλων στα κόπρανα και στη συνέχεια στο χωνευμένο υπόλειμμα με βάση την κοπριά των ζώων. Η απόρριψη βιομηχανικών, αστικών και γεωργικών λυμάτων στους ποταμούς αποτελεί σημαντική πηγή μόλυνσης των υδάτινων πόρων από βαρέα μέταλλα. Επιπλέον, τα βαρέα μέταλλα εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από βιομηχανικές απορρίψεις, τις εκπομπές οχημάτων και τα δευτερογενή αερολύματα. Η ατμοσφαιρική εναπόθεση χρησιμεύει ως κρίσιμη οδός για την εισαγωγή βαρέων μετάλλων στα υδάτινα σώματα μέσω των βροχοπτώσεων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα βαρέα μέταλλα μπορούν εύκολα να προσροφηθούν σε αιωρούμενα σωματίδια στο νερό, με επακόλουθο την αυξημένη περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα στο χωνευμένο υπόλειμμα που παράγεται από την επεξεργασμένη ιλύ (Guan et al., 2024).

Τα βαρέα μέταλλα αναμειγνύονται ως πρόσθετα για να βελτιώσουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των πλαστικών σακουλών ή εισάγονται ακούσια ως ρύποι. Παράλληλα με την καθημερινή απόρριψη των υπολειμμάτων φαγητού, οι πλαστικές σακούλες έχουν γίνει ένα διαδεδομένο συστατικό των απορριμμάτων της κουζίνας. Άλλες ουσίες στα απορρίμματα κουζίνας που περιέχουν βαρέα μέταλλα είναι τα λαχανικά, φρούτα, συσκευασίες τροφίμων και ποτών, βαρέα μέταλλα που απελευθερώνονται σταδιακά από τα γηρασμένα μαγειρικά σκεύη και μαχαιροπήρουνα, καθώς και προϊόντα καπνού. Τα βαρέα μέταλλα αντιπροσωπεύουν μια κατηγορία τοξικών και επίμονων ουσιών που δεν μπορούν να αποικοδομηθούν με φυσικό τρόπο. Κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, όταν οι προαναφερθείσες ουσίες που περιέχουν βαρέα μέταλλα χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη, μπορούν να συσσωρευτούν στο χωνευμένο

υπόλειμμα σε δυνητικά επικίνδυνες συγκεντρώσεις . Όταν το χωνευμένο απόβλητο που περιέχει βαρέα μέταλλα χρησιμοποιείται απευθείας ως λίπασμα ή βελτιωτικό εδάφους χωρίς κατάλληλη επεξεργασία και διάθεση, τα βαρέα μέταλλα συσσωρεύονται και απελευθερώνονται στο περιβάλλον, διεισδύοντας στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Αυτό επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τους υδάτινους πόρους, αποτελώντας σοβαρή απειλή για την ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα (Guan et al., 2024).

3.3.4 Προοπτικές για το Μέλλον

Περίπου 180 εκατομμύρια τόνοι χώννευμα παράγονται ετησίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το μεγαλύτερο μέρος του παραγόμενου digestate (120 εκατομμύρια τόνοι) είναι γεωργικής προέλευσης (συνήθως μείγμα κοπριάς και φυτών, ιδίως ενεργειακών καλλιεργειών). Περίπου 46 εκατομμύρια τόνοι παράγονται από το οργανικό κλάσμα των σύμμεικτων αστικών στερεών αποβλήτων, τουλάχιστον 7 εκατομμύρια τόνοι από βιοαπόβλητα που διαχωρίζονται στην πηγή, ενώ οι μικρότερες ποσότητες (περίπου 1.7 εκατομμύρια τόνοι έκαστη) προέρχονται από τη λυματολάσπη και τα υποπροϊόντα της αγροτικής/τροφικής βιομηχανίας. Το χώννευμα που απομένει μετά την αναερόβια χώννευση αποθηκεύεται πριν από την αξιοποίηση. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την απαιτούμενη περίοδο αποθήκευσης του χωνεύματος, όπως οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί για την εφαρμογή, η σταθεροποίηση του χωνεύματος, η γεωγραφική θέση, ο τύπος εδάφους και καλλιέργειας και η ζήτησή του. Η αποθήκευση του χωνεύματος απαιτεί σημαντικό κόστος και κατάληψη γης. Η πιο συνηθισμένη χρήση του είναι η απευθείας εφαρμογή σε γεωργική γη, η οποία είναι μια γνωστή και δοκιμασμένη τεχνολογία. Επιπλέον, ορισμένοι παράγοντες, όπως η ανομοιομορφία (η οποία καθορίζεται από τις ιδιότητες της βιομάζας που χρησιμοποιήθηκε για την αναερόβια χώννευση), η εξαιρετικά μεταβλητή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, ο μεγάλος όγκος του χωνεύματος και η αδυναμία διασποράς του κοντά στη μονάδα βιοαερίου, επηρεάζουν τα οικονομικά της εμπορίας του, καθιστώντας μερικές φορές δύσκολη τη χρήση του. Για τους λόγους αυτούς, δίνεται όλο και μεγαλύτερη έμφαση στις κατάλληλες επιλογές επεξεργασίας του χωνεύματος (Kovačić et al., 2022).

Η τρέχουσα πρακτική της διαχείρισης του χωνευμένου υπολείμματος είναι η αξιοποίηση του χωνευμένου υπολείμματος ως λίπασμα καλλιεργειών ή βελτιωτικό του εδάφους. Οι μελλοντικές προοπτικές της διαχείρισης του χωνευμένου υπολείμματος που περιλαμβάνουν την καλλιέργεια μικροφυκών, την παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοαιθανόλης είναι ευρείες. Στο μέλλον πρέπει να ακολουθηθεί μια νέα ολοκληρωμένη προσέγγιση της αναερόβιας χώννευσης που

λαμβάνει υπόψη τόσο την απόδοση σε βιοαέριο όσο και την ποιότητα του χωνευμένου υπολείμματος (Logan & Visvanathan, 2019).

Τέλος, η καθιέρωση σαφώς καθορισμένων προτύπων, κανόνων και η εφαρμογή σαφούς πολιτικής υποστήριξης και κινήτρων είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση πρακτικών επεξεργασίας χωνευμένου υπολείμματος. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις προκλήσεις, οι μελλοντικές προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν στους ακόλουθους τομείς (Guan et al., 2024) :

1. Αύξηση των προσπαθειών στην αξιοποίηση των πόρων και ανάπτυξη νέων χωνευμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, όπως η κομποστοποίηση σε υψηλή θερμοκρασία, αναερόβια ξηρή συν-χώννευση, κ.λπ. για τη βελτίωση του ποσοστού ανακύκλωσης του οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών στο χωνευμένο υπόλειμμα.
2. Αντιμετώπιση του ζητήματος της αποτελεσματικής αφυδάτωσης του χωνευμένου υπολείμματος με την ανάπτυξη νέων υλικών, όπως ο βιοάνθρακας και η υδροθερμική απανθράκωση για την για τη βελτίωση των ποσοστών αφυδάτωσης του χωνευμένου υπολείμματος.
3. Περαιτέρω ανάπτυξη της ευφυούς και ψηφιακής τεχνολογίας για την επίτευξη εκλεπτυσμένης παρακολούθησης της διαχείρισης του χωνευμένου υπολείμματος καθώς και της λειτουργικής διαχείρισης.
4. Βελτίωση και συμπλήρωση των σχετικών νόμων και κανονισμών για την προώθηση της χρήσης και τη διάθεση του χωνευμένου υπολείμματος.

Πειραματικό Μέρος

Σκοπός

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η μελέτη συστήματος χημικής απορρόφησης CO₂ με ενζυμική κατάλυση και αξιοποίηση αναερόβιου χωνεύματος σε πειραματική διάταξη πλυντρίδας. Παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος και μελετώνται στην παρούσα εργασία είναι το είδος του απορροφητικού διαλύματος, το pH, ο λόγος L/G, ο χρόνος παραμονής, η ανακυκλοφορία του υγρού και η χρήση ενζυμικού καταλύτη. Το αέριο που εισάγεται, προέρχεται από εμπορική φιάλη μίγματος ατμοσφαιρικού αέρα 80% (O₂, N₂) και 20% CO₂. Η δέσμευση μετριέται ποσοτικά ως προς τον ανόργανο άνθρακα που περιέχει το κάθε δείγμα υγρού διαλύματος και η απόδοση της διεργασίας καθορίζεται από τη συνολική ποσότητα αερίου που διοχετεύεται σε κάθε πείραμα και από το χρόνο. Η δέσμευση του CO₂ πραγματοποιείται μέσω της αμφίδρομης αντίδρασης μετατροπής του σε ανθρακικά ανιόντα HCO₃⁻ σε υδατικό περιβάλλον. Επιπλέον, εκτός της φυσικοχημικής δέσμευσης CO₂, μελετάται και η ενζυμική δέσμευση του CO₂ με τη χρήση του ενζύμου καρβονική ανυδράση.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική Μεθοδολογία

4.1 Μέθοδοι ανάλυσης

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιούνταν οι ακόλουθες μετρήσεις:

- Προσδιορισμός pH
- Προσδιορισμός διαλυμένου οξυγόνου
- Προσδιορισμός ολικού άνθρακα ή total carbon (TC)
- Προσδιορισμός ολικού ανόργανου άνθρακα ή inorganic carbon (IC)
- Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα ή total organic carbon (TOC)
- Προσδιορισμός αζώτου ή total nitrogen (TN)
- Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου χωνεύματος
- Προσδιορισμός ενεργότητας ενζύμου

4.1.1 Προσδιορισμός pH

Για την μέτρηση pH χρησιμοποιείται ψηφιακό πεχάμετρο HI2550 pH/ORP & EC/TDS/NaCl Meter της εταιρείας HANNA instruments για όγκο περίπου 5-10 mL υγρού διαλύματος που βρίσκεται μέσα σε δοχεία falcon. Το πεχάμετρο αποτελείται από ένα ποτενσιόμετρο, ένα γυάλινο ηλεκτρόδιο αναφοράς και μια

συσκευή εξισορρόπησης της θερμοκρασίας. Η κλίμακα των μετρήσεων είναι από 0.0 έως 14.0 και η σχετική ακρίβεια ± 0.1 .

Πρώτα γίνεται η βαθμονόμηση του οργάνου με διαφορετικά πρότυπα διαλύματα με pH 4, 7, 10 και δημιουργείται η καμπύλη αναφοράς. Έπειτα, πριν από κάθε μέτρηση ξεπλένεται το ηλεκτρόδιο με απιονισμένο νερό, τοποθετείται στο διάλυμα έως ότου να σταθεροποιηθεί η ένδειξη η οποία καταγράφεται και τέλος ξεπλένεται ξανά, και τοποθετείται σε ειδικό διάλυμα αποθήκευσης (storage solution).



Σχήμα 17: Πεχάμετρο

4.1.2 Προσδιορισμός διαλυμένου οξυγόνου

Ο προσδιορισμός του διαλυμένου οξυγόνου ή dissolved oxygen (DO) γίνεται με τη χρήση του μετρητή ProODO της εταιρείας YSI που χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα οπτικής βάσης για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου. Η ODO είναι μια μη καταναλωτική τεχνολογία - το οξυγόνο δεν καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Επομένως, δεν απαιτείται ανάδευση για ακριβείς μετρήσεις, με αποτέλεσμα τη συλλογή δεδομένων με ακρίβεια. Το εύρος των μετρήσεων είναι από 0 έως 50 mg/L και λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -10°C έως 60°C .

Πρώτα αφαιρείται το προστατευτικό κάλυμμα από τον αισθητήρα, βυθίζεται στο διάλυμα για περίπου 20-30 δευτερόλεπτα έως ότου σταθεροποιηθεί η ένδειξη η οποία και καταγράφεται. Ο αισθητήρας ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και τοποθετείται στο ειδικό προστατευτικό κάλυμμα που τον διατηρεί σε υγρό περιβάλλον.



Σχήμα 18: Μετρητής DO

4.1.3 Προσδιορισμός ολικού ανόργανου άνθρακα (IC), ολικού άνθρακα (TC), ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και ολικού αζώτου (TN)

Οι μετρήσεις των IC, TC, TOC και TN πραγματοποιούνται στη συσκευή TOC-VCSH και TN της εταιρείας Shimadzu. Αρχικά, ανοίγεται η φιάλη υπερκάθαρου αέρα που συνδέεται με τη συσκευή και η κεντρική μονάδα του TOC. Ενεργοποιούνται οι φούρνοι για την μέτρηση TC και TN και αναμένεται να φτάσουν κοντά στους 720°C (περίπου 40-50 λεπτά). Γίνεται μια έκπλυση (wash) προκειμένου να καθαριστεί ο σωλήνας από τυχόν υπολείμματα χρησιμοποιώντας απιονισμένο νερό. Επιλέγονται οι κατάλληλες καμπύλες αναφοράς που καθορίζουν και τα όρια των τιμών κάθε μέτρησης. Για τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όρια για κάθε καμπύλη αναφοράς:

Πίνακας 4: Άνω όριο στις καμπύλες αναφοράς της συσκευής TOC

TC (mg/L)	IC (mg/L)	TN (mg/L)
1000	1000	200

Ο υπολογισμός του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) πραγματοποιείται αυτόματα με αφαίρεση του ανόργανου άνθρακα από τον ολικό ($TOC = TC - IC$) για αυτό και δεν ορίζεται κάποια καμπύλη αναφοράς.

Έπειτα η συσκευή είναι έτοιμη να δεχτεί δείγματα για μέτρηση. Το κάθε δείγμα αραιώνεται κατάλληλα με απιονισμένο νερό μέσα σε ογκομετρική φιάλη προκειμένου οι τιμές να βρίσκονται εντός ορίων της καμπύλης. Τοποθετείται σε δοχεία falcon και στη συνέχεια το σωληνάκι της συσκευής βυθίζεται σε αυτό.



Σχήμα 19: Εξοπλισμός TOC-V_{CSH}

4.1.4 Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου χωνεύματος

Για την μέτρηση του αμμωνιακού αζώτου στο χώνευμα χρησιμοποιήθηκε φωτόμετρο Spectroquant Pharo 300 Merck και οι οδηγίες του αμμωνίου ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) από την εταιρεία Merck, που παρείχε το έτοιμο kit. Παρακάτω παρατίθενται οι αντίστοιχες οδηγίες που ακολουθήθηκαν:

- Ελέγχθηκε η τιμή του pH του δείγματος , η οποία πρέπει να είναι σε pH 4-13
- Προστέθηκε σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα με μια πιπέτα, 5mL του δείγματος
- Προστέθηκε με μία πιπέτα 0.6mL του αντιδραστηρίου $\text{NH}_4\text{-1B}$ και αναμίχθηκαν
- Προστέθηκε 1 μπλε μικροκουταλάκι του αντιδραστηρίου $\text{NH}_4\text{-2B}$
- Ανακινήθηκε δυνατά μέχρι να διαλυθεί το στερεό αντιδραστήριο
- Αναμονή 5 λεπτά (χρόνος αντίδρασης)
- Προστέθηκαν 4 σταγόνες του αντιδραστηρίου $\text{NH}_4\text{-3B}$ και αναμίχθηκαν
- Αναμονή 5 λεπτά (χρόνος αντίδρασης)
- Αδειάστηκε το διάλυμα στην επιθυμητή κυψελίδα
- Επιλέχθηκε η μέθοδος με τον AutoSelector
- Τοποθετήθηκε η κυψελίδα στον υποδοχέα κυψελίδων



Σχήμα 20: Φωτόμετρο Spectroquant Pharo 300 Merck

4.1.5 Προσδιορισμός ενεργότητας ενζύμου

Για την παρακολούθηση της ενεργότητας της καρβονικής ανυδράσης χρησιμοποιήθηκε πρωτόκολλο p-NPA (ενεργότητα εστεράσης) με βάση την διαμεσολαβούμενη υδρόλυση του παρα-νιτροφενυλακετικού (p-NPA) σε παρα-νιτροφαινόλη (p-NP). Η ίδια ενζυμική δραστική περιοχή που είναι υπεύθυνη για την επιτάχυνση της ενυδάτωσης του CO₂ επιταχύνει επίσης αυτή την αντίδραση υδρόλυσης (Ores et al., 2016). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο ανάλυσης (SERVA), 0.1mL διαλύματος ενζύμου και 1mL διαλύματος οξικού p-νιτροφαινικού οξέος (p-NPA) 3mM προστέθηκαν σε κυψελίδα χαλαζία 1 cm που περιείχε 1.9mL 0.04 M Tris/HCl pH 7.6. Η αντίδραση διεξήχθη στους 25°C και το βασικό διάλυμα του p-NPA παρασκευάστηκε σε ακετόνη. Μετά την προσθήκη του υποστρώματος (p-NPA), η ένταση της απορρόφησης στα 348nm για την p-νιτροφαινόλη ακολουθήθηκε σε συνάρτηση με το χρόνο (10min) και η κλίση της καμπύλης χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ενζυμικής δραστικότητας. Μια μονάδα ενζυμικής δραστικότητας (U) ορίστηκε ως η ποσότητα ενζύμου που απαιτείται για την απελευθέρωση 1μmol p-νιτροφαινόλης ανά λεπτό υπό τις συνθήκες της ανάλυσης. Τα αποτελέσματα εκφράζονται επίσης σε όρους ειδικής ενεργότητας (U/mg) σύμφωνα με την εξίσωση 30 :

$$\frac{U}{mg} = \frac{\Delta A_{348nm} \times 3}{5.4 \times (mg \text{ ένζυμο στο μείγμα αντίδρασης}) \times \text{min.}} \quad (30)$$

Ο γραμμομοριακός συντελεστής απόσβεσης της ρ-νιτροφαινόλης στα 348nm είναι $5400 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

4.2 Πειραματική Μεθοδολογία

4.2.1 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη τύπου πλυντρίδα που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία απεικονίζεται στο Σχήμα 24 και περιλαμβάνει:

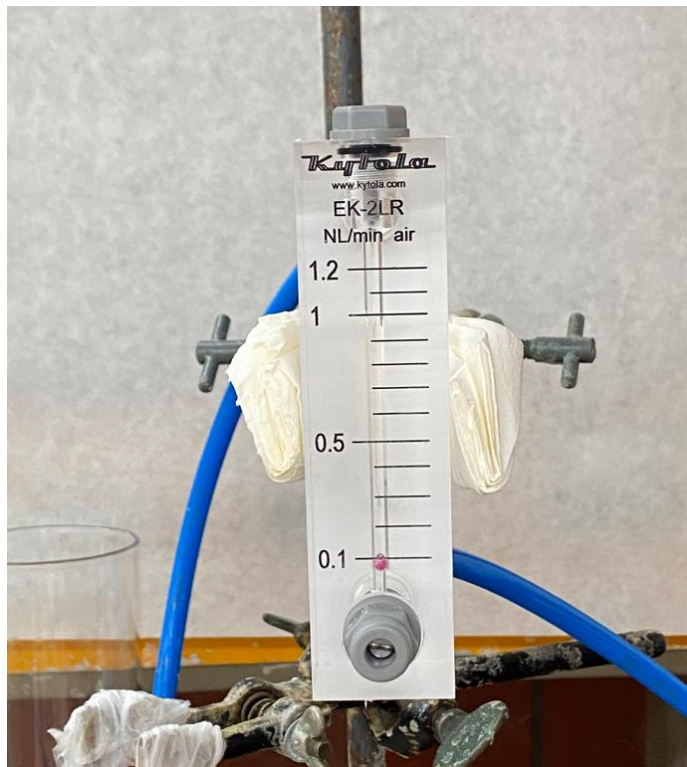
Φιάλη μίγματος αερίου: Περιέχει μίγμα 80% αέρα (79% N_2 και 21% O_2) και 20% CO_2 . Η πίεση εξόδου της φιάλης ρυθμίζεται από τον ρυθμιστή ροής που υπάρχει στο άκρο της.



Σχήμα 21: Φιάλη αερίου

Σωλήνες ροής αερίων: Έχουν μπλε χρώμα και επιτρέπουν την ομαλή διέλευση του αερίου χωρίς μεγάλες μεταβολές στην πίεση.

Ροόμετρο εισόδου: Μετράει την παροχή αερίου στην είσοδο σε L/min και μπορεί να ρυθμιστεί από το έμβολο που υπάρχει στο κάτω μέρος βιδώνοντας ή ξεβιδώνοντας.



Σχήμα 22: Ροόμετρο εισόδου

Ροόμετρο εξόδου: Χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ροής εξόδου του αερίου από το σύστημα.

Γυάλινη σφαιρική φιάλη 1L: Γεμίζεται με το αντίστοιχο διάλυμα κάθε πειράματος.

Διαχυτήρας αερίου: Δημιουργεί φυσαλίδες κατά την είσοδο του αερίου μέσα στο υγρό με αποτέλεσμα την πιο ομοιόμορφη διοχέτευση του αερίου.

Αντλία ανακυκλοφορίας: Χρησιμοποιείται η αντλία PUMP drive PD 5006 της εταιρείας Heidolph.



Σχήμα 23: Αντλία ανακυκλοφορίας υγρού

Σωλήνας αναρροής: Εισάγεται στη σφαιρική φιάλη με το υγρό και με τη χρήση της αντλίας το υγρό αναρροφάται και αφού περάσει μέσα από τα σωληνάκια της αντλίας ξαναεισέρχεται στο σύστημα μέσω ακροφυσίου.

Σωλήνας εξόδου υγρού: Χρησιμοποιείται για τη λήψη δειγμάτων και ανοίγει με την περιστροφή βαλβίδας.

Ακροφύσιο: Βρίσκεται στην κορυφή της στήλης και επιτρέπει στο αναρρέον υγρό να εισέρχεται ξανά στη στήλη.

«Διάτρητη» σφαιρική φιάλη: Μετά το ακροφύσιο, το υγρό εισέρχεται στη σφαιρική φιάλη η οποία στο τελείωμα της είναι διάτρητη με στόχο να προσομοιάζει τη διεργασία του ψεκασμού ο οποίος διευκολύνει τη δέσμευση του αερίου.

Γυάλινος σωλήνας με στόμιο εξόδου αερίου: Από εκεί διέρχεται προς τα πάνω το αέριο το οποίο καταλήγει στο στόμιο εξόδου και εξέρχεται από το σύστημα προς το ροόμετρο εξόδου. Επίσης από εκεί περνάει το υγρό αναρροής μετά τον «ψεκασμό». Με αυτόν τον τρόπο το αέριο και το υγρό βρίσκονται σε αντιρροή.



Σχήμα 24: Διάταξη τροποποιημένης πλυντρίδας

4.2.2 Πειραματική Διαδικασία

Για κάθε πείραμα που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω εκτελέστηκαν 2 επαναλήψεις. Σε κάθε πείραμα τα βήματα που ακολουθούνταν ήταν τα ακόλουθα:

- 1 Στήνεται η διάταξη όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.2.1 χωρίς την προσθήκη κάποιου υγρού. Το σύστημα πρέπει να είναι κλειστό.
- 2 Ο επιθυμητός όγκος του εκάστοτε διαλύματος τοποθετείται στη σφαιρική φιάλη και κλείνεται με εσφυρισμένο πώμα.
- 3 Ανοίγεται η φιάλη αερίου με περιστροφή της βαλβίδας και ρύθμιση της πίεσης.
- 4 Λαμβάνεται δείγμα 5-10 mL από το διάλυμα σε δοχείο falcon. Αυτό αποτελεί και το πρώτο (τυφλό) δείγμα προς μέτρηση του πειράματος.

- 5 Ανοίγεται η αντλία στην επιθυμητή παροχή (με ρύθμιση των στροφών της) και αρχίζει η αναρροή του υγρού.
- 6 Λαμβάνεται δείγμα υγρού (5-10 mL) ανά τακτά χρονικά διαστήματα (20-30 λεπτά) μέσω του σωλήνα εξόδου υγρού.
- 7 Για κάθε δείγμα υγρού μετρείται το pH και το διαλυμένο οξυγόνο.
- 8 Πραγματοποιείται διήθηση υπό κενό και κατόπιν κατάλληλη αραίωση σε ογκομετρική φιάλη, ώστε να είναι έτοιμο το υγρό δείγμα να μετρηθεί στο TOC.
- 9 Προσδιορίζονται οι συγκεντρώσεις TOC, TN, IC και TC.
- 10 Αφού σταθεροποιηθεί η τιμή του IC και η καμπύλη IC συναρτήσει του χρόνου (t) φτάσει σε ένα πλατό, το πείραμα τερματίζεται. Κλείνει η φιάλη του αερίου και καθαρίζονται τα γυάλινα σκεύη της διάταξης καθώς και τα σωληνάκια του υγρού με απιονισμένο νερό.

4.3 Πειραματικό πρωτόκολλο

Μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού για τις πλυντρίδες είναι ο **λόγος L/G**, γνωστός και ως λόγος υγρού προς αέριο, ο οποίος εκφράζεται σε L/m³. Στην πειραματική μας διάταξη, η παράμετρος L/G υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση (31):

$$\frac{L}{G} \left(\frac{L}{m^3} \right) = \frac{\text{Όγκος διαλύματος απορρόφησης (L)}}{\text{Ροή εισόδου αερίου} \left(\frac{L}{\text{min}} \right) \times 10^{-3} \left(\frac{m^3}{L} \right) \times \text{Χρόνος πειράματος (min)}} \quad (31)$$

Για να είναι ο λόγος L/G μια συγκρίσιμη παράμετρος λειτουργίας, πρέπει να χρησιμοποιείται η ίδια διάρκεια δοκιμής για τις συγκριτικές δοκιμές.

Ακόμη, πρέπει να υπολογιστεί και ο **χρόνος παραμονής** σε μία πλυντρίδα, ο οποίος αναφέρεται στο μέσο χρόνο που περνάει ένας αέριος ή υγρός ρύπος μέσα στο σύστημα. Αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και τη λειτουργία των πλυντρίδων. Ο χρόνος παραμονής εκφράζεται συνήθως σε δευτερόλεπτα και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση (32):

$$GRT(\text{Χρόνος παραμονής αερίου})(s) = \frac{\text{Όγκος συστήματος (L)}}{\text{Ροή εισόδου αερίου} \left(\frac{L}{\text{min}} \right)} = \frac{1.55 L}{\text{Ροή εισόδου αερίου} \left(\frac{L}{\text{min}} \right)} \times 60 \quad (32)$$

4.3.1 Μελέτη επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα NH₃/NH₄Cl

Μία από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν στην πειραματική διάταξη πλυντρίδας ήταν η επίδραση του αρχικού όγκου του εκάστοτε διαλύματος. Εξετάστηκε για το ρυθμιστικό διάλυμα NH₃/NH₄Cl με pH 10, η αλλαγή του όγκου του υγρού που επηρεάζει τελικά το λόγο L/G του συστήματος, δηλαδή το λόγο του υγρού προς το αέριο και εκφράζεται σε L υγρού ανά m³ αερίου. Ακόμη εξετάστηκε μία δευτερεύουσα παράμετρος, η οποία αφορά τη χρήση ή μη ενός πληρωτικού

υλικού που ονομάζεται ceramic rings (δαχτυλίδια από κεραμικό υλικό), όπως φαίνεται στο Σχήμα 24 στην Ενότητα 4.2.1.

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν με διαφορετικό όγκο ρυθμιστικού διαλύματος καθώς και οι σταθερές συνθήκες που είχαν οριστεί.

Πίνακας 5: Πειράματα για διαφορετικούς όγκους ρυθμιστικού διαλύματος $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$, με pH 10, ροή εισόδου αερίου 0.1 L /min και GRT 930sec

ΠΕΙΡΑΜΑ	Αρχικός όγκος διαλύματος (mL)	Στροφές αντλίας (rpm)	L/G (L/m^3)	Πληρωτικό υλικό
1	800	500	44.44	OXI
3	700	500	38.89	ΝΑΙ
4	700	500	38.89	OXI
8	600	400	33.33	ΝΑΙ
9	400	400	22.22	ΝΑΙ

Παρόλο που κάποια πειράματα διήρκησαν παραπάνω χρόνο, για να γίνει η σύγκριση του L/G, διατηρήθηκε σταθερός ο χρόνος πειράματος για τον υπολογισμό του (180min), έτσι ώστε να συγκριθούν μόνο οι σημαντικές παράμετροι (όγκος διαλύματος απορρόφησης και ροή εισόδου αερίου).

4.3.2 Μελέτη επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος

Μια άλλη παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η χρήση χωνεύματος ως διάλυμα απορρόφησης. Εξετάστηκε η χρήση του χωνεύματος ως αυτούσιο διάλυμα, η χρήση του ως βάση σε διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ ή K_2CO_3 1.45M/1M, αλλά πραγματοποιήθηκε και η χρήση υδατικού διαλύματος Na_2CO_3 1.45M για να γίνει η σύγκριση της αξιοποίησης του χωνεύματος ως βάση διαλύματος. Σε όλα τα πειράματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκε το πληρωτικό υλικό.

Πίνακας 6: Πειράματα για διαφορετικά διαλύματα απορρόφησης με βάση χώνευμα ή απιονισμένο νερό, με ροή εισόδου αερίου 0.1 L /min, αρχικό όγκο 700mL, με πληρωτικό υλικό και GRT 930sec

ΠΕΙΡΑΜΑ	Διάλυμα απορρόφησης	Στροφές αντλίας (rpm)	pH
5	Χώνευμα	500	8.0
7	Na_2CO_3 1.45M	450	11.7
10	Ρυθμιστικό $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με	400	9.7

	βάση το χώνευμα		
11	K₂CO₃ 1.45M με βάση το χώνευμα	400	11.6
12	K₂CO₃ 1M με βάση το χώνευμα	400	11.4

4.3.3 Μελέτη επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση

Η πιο σημαντική παράμετρος που διερευνήθηκε ήταν η χρήση του ενζύμου καρβονικής ανυδράσης σε διαλύματα K₂CO₃ 1.45M. Συγκρίθηκε η χρήση του ενζύμου σε διαφορετικές συγκεντρώσεις και σε διαφορετικά διαλύματα με βάση απιονισμένο νερό ή χώνευμα σε αρχικό όγκο 600mL. Ακόμη, έγινε η σύγκριση και με τα ίδια διαλύματα χωρίς το ένζυμο για να διαπιστωθεί αν το ένζυμο ήταν αποτελεσματικό. Σε όλα τα πειράματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκε το πληρωτικό υλικό.

Πίνακας 7: Πειράματα επίδρασης κατάλυσης σε απορροφητικά διαλύματα K₂CO₃ 1.45M, με πληρωτικό, ροή εισόδου αερίου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL, στροφές αντλίας 400rpm και GRT 930sec

ΠΕΙΡΑΜΑ	Βάση διαλύματος	pH	CA (mg/L)
13	Απιονισμένο νερό	11.8	0
14	Απιονισμένο νερό	12.3	100
15	Απιονισμένο νερό	12.2	50
16	Χώνευμα	11.5	0
18	Χώνευμα	11.3	50

4.3.4 Μελέτη επίδρασης L/G σε διάλυμα K₂CO₃

Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση της ροής εισόδου του αερίου για το απορροφητικό διάλυμα K₂CO₃ 1.45M. Παράλληλα εξετάστηκαν παράγοντες όπως η χρήση του χωνεύματος ως βάση του διαλύματος και η αλλαγή του όγκου του υγρού. Η αλλαγή της ροής του αερίου και η αλλαγή του όγκου του υγρού επηρεάζουν επίσης το λόγο L/G του συστήματος. Σε όλα τα πειράματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκε πληρωτικό υλικό.

Πίνακας 8: Πειράματα επίδρασης L/G σε διαλύματα K₂CO₃ 1.45M με πληρωτικό υλικό, με στροφές αντλίας 400rpm, και επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος

ΠΕΙΡΑΜΑ	Ροή εισόδου αερίου (L/min)	Βάση διαλύματος	Αρχικός όγκος διαλύματος (mL)	pH	L/G (L/m ³)	GRT (s)
13	0.1	Απιονισμένο νερό	600	11.8	16.67	930

17	0.25	Απιονισμένο νερό	600	12.1	6.67	372
11	0.1	Χώνευμα	700	11.6	19.44	930
16	0.1	Χώνευμα	600	11.5	16.67	930

Παρόλο που κάποια πειράματα διήρκησαν παραπάνω χρόνο, για να γίνει η σύγκριση του L/G, διατηρήθηκε σταθερός ο χρόνος πειράματος για τον υπολογισμό του (360min), έτσι ώστε να συγκριθούν μόνο οι σημαντικές παράμετροι (όγκος διαλύματος απορρόφησης και ροή εισόδου αερίου).

4.3.5 Μελέτη επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση του ρυθμού ανακυκλοφορίας του υγρού, ο οποίος επηρεάζεται ανάλογα με τις στροφές της περισταλτικής αντλίας. Οι στροφές της αντλίας που εξετάστηκαν ήταν 200, 300 και 400 rpm σε διαλύματα K_2CO_3 1.45M με αρχικό όγκο 600mL και ροή εισόδου αερίου 0.1 L/min. Μία δευτερεύουσα παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η χρήση ή μη της πάνω φιάλης της διάταξης, η οποία προσομοιάζε τον ψεκασμό του υγρού που πραγματοποιείται στις πλυντρίδες, διότι στο κάτω μέρος της είναι διάτρητη. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν το μέγεθος των σταγόνων με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο παρακάτω κεφάλαιο. Σε όλα τα πειράματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκε πληρωτικό υλικό.

Πίνακας 9: Πειράματα επίδρασης ρυθμού αναρροής υγρού σε απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M, με πληρωτικό υλικό, ροή εισόδου αερίου 0.1 L /min, αρχικό όγκο 600mL και GRT 930sec

ΠΕΙΡΑΜΑ	Ρυθμός αναρροής (mL/min)	Στροφές αντλίας (rpm)	Πάνω φιάλη	pH
2	29	200	NAI	12.1
19	43	300	NAI	11.9
6	58	400	OXI	12.2
13	58	400	NAI	11.8

Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα

5.1 Πρωτογενή Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πρωτογενή αποτελέσματα των πειραμάτων σε κάθε περίπτωση.

5.1.1 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα NH₃/NH₄Cl

Πίνακας 10: Πείραμα 1, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH₃/NH₄Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
1A	0	10.0	8.70	184.90	4820.50	34.00	150.90
	20	9.7	8.92	928.50	4925.00	520.50	408.25
	40	9.5	8.89	1071.50	5035.00	982.50	89.00
	60	9.2	8.84	1490.50	4895.00	1380.00	110.25
	80	9.1	8.70	1707.50	4902.00	1694.00	13.60
	100	8.9	8.73	2093.50	4988.50	2031.50	62.15
	120	8.7	8.73	2311.00	4968.50	2306.00	5.00
	140	8.5	8.40	2652.50	5115.00	2652.50	0.00
	160	8.3	8.35	2735.00	5015.00	2735.00	0.00
	180	8.1	8.29	2728.50	4938.50	2728.50	0.00
	200	7.9	8.25	2970.50	5320.00	2970.50	0.00
	220	7.8	7.90	2928.00	5295.00	2928.00	0.00
	240	7.9	7.73	3111.00	5205.00	3110.50	0.25
	260	7.9	7.90	3088.00	5205.00	3088.00	0.00
1B	0	10.2	9.83	325.30	4727.00	94.00	231.40
	20	9.8	9.4	915.50	4755.00	671.70	243.80
	40	9.3	8.85	1557.00	4711.00	1317.00	239.50
	60	9.2	8.91	1970.00	4765.00	1675.00	295.20
	80	9.1	8.86	2356.00	4801.00	1980.00	375.80
	100	8.9	8.78	2662.00	5058.00	2310.00	352.20
	120	8.7	8.65	3102.00	5100.00	2738.00	364.10
	140	8.1	8.7	3165.00	5340.00	2899.00	266.00
	160	7.8	8.65	3388.00	5249.00	3069.00	318.90
	180	7.8	8.67	3449.00	5153.00	3093.00	355.30
	200	7.8	8.69	3483.00	5222.00	3146.00	337.40

Πίνακας 11: Πείραμα 3, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
3A	0	10	8.80	359.90	4131.50	225.30	134.60
	40	9.3	8.35	1373.00	4368.00	1274.50	98.55
	60	9	8.45	1842.50	4481.50	1842.50	0.00
	80	8.8	8.50	2328.50	4451.50	2328.50	0.00
	100	8.4	8.10	2720.50	4656.50	2720.50	0.00
	120	8.1	7.95	2874.50	4571.00	2874.50	0.00
	140	7.9	7.80	3059.50	4691.00	3059.50	0.00
	160	7.9	7.90	3017.50	4578.00	3017.50	0.00
	180	7.9	7.90	3007.50	4683.00	3007.50	0.00
3B	0	9.8	8.80	249.85	3987.50	56.55	193.30
	20	9.5	9.63	845.50	4903.00	727.00	118.40
	40	9.2	8.50	1308.50	4916.50	1284.50	23.85
	60	8.9	8.80	1861.50	5015.00	1861.50	0.00
	80	8.7	8.30	2233.00	5015.00	2233.00	0.00
	100	8.4	8.38	2484.00	4857.50	2484.00	0.00
	120	8.1	8.25	2786.50	5045.00	2786.50	0.00
	140	7.9	8.25	2826.50	4958.50	2826.50	0.00
	160	7.7	8.05	2722.50	4734.50	2722.50	0.00

Πίνακας 12: Πείραμα 4, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
4A	0	9.8	9.00	367.35	4624.50	255.80	111.60
	20	9.6	9.05	753.50	4925.00	653.00	100.20
	40	9.2	8.36	1382.00	4865.50	1382.00	0.00
	60	9.0	8.21	1760.50	5010.00	1760.50	0.00
	80	8.8	8.60	2283.00	5170.00	2243.50	39.60
	100	8.5	8.50	2571.00	5110.00	2569.50	1.80
	120	8.1	8.35	2903.00	5315.00	2903.00	0.00
	140	7.9	8.30	2878.50	4869.50	2878.50	0.00
	160	7.9	8.15	2838.50	5165.00	2838.50	0.00
	180	7.9	8.15	2962.50	5175.00	2929.50	33.35
	205	7.8	8.00	2977.00	5165.00	2977.00	0.00
4B	0	9.8	9.15	200.70	4344.50	78.55	122.20
	20	9.5	8.60	779.00	5155.00	655.00	123.95
	40	9.2	8.38	1288.50	4975.00	1288.50	0.00
	60	8.9	8.25	1869.50	5240.00	1862.50	6.70
	80	8.6	8.10	2399.00	5150.00	2212.50	186.40
	100	8.3	8.13	2687.50	5185.00	2687.50	0.00

	120	8.0	7.95	2839.00	5020.00	2839.00	0.00
	140	7.9	7.90	2843.00	4461.50	2843.00	0.00
	160	7.9	7.85	2877.50	4522.50	2877.50	0.00

Πίνακας 13: Πείραμα 8, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
8A	0	9.9	8.10	372.15	3373.50	84.35	287.80
	20	9.4	8.44	919.50	3950.50	733.00	186.50
	40	9.0	8.20	1671.00	4160.50	1549.50	121.50
	60	8.7	8.15	2150.50	4234.00	2076.00	74.50
	80	8.4	8.30	2610.50	4256.00	2537.50	73.00
	100	8.1	8.10	2746.50	4238.00	2753.00	0.00
	120	7.9	8.03	2902.50	4289.00	2918.50	0.00
	140	7.9	8.00	2986.50	4413.50	2984.50	2.00
	160	7.8	8.00	3023.50	4312.50	3031.50	0.00
	183	7.9	7.97	3049.50	4236.00	3037.00	12.50
8B	0	9.9	8.85	297.20	4024.00	71.85	225.35
	20	9.3	8.49	962.50	3857.50	776.00	186.50
	40	9.0	8.32	1537.50	3865.50	1451.00	86.50
	60	8.7	8.28	2036.00	3859.50	2043.00	0.00
	80	8.3	8.25	2415.50	3917.50	2428.50	0.00
	100	7.9	7.95	2594.50	3837.50	2620.50	0.00
	120	7.8	7.87	2650.50	4015.00	2721.50	0.00
	140	7.8	7.90	2632.50	3869.50	2682.50	0.00
	160	7.8	7.84	2706.00	3943.00	3052.50	0.00
	180	7.8	7.82	2565.00	3748.50	2924.00	0.00
	200	7.8	7.82	2727.00	3944.00	3029.00	0.00
	220	7.8	7.76	2730.50	4002.00	2861.00	0.00

Πίνακας 14: Πείραμα 9, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
9A	0	9.8	8.47	327.15	3669.00	116.45	210.70
	20	9.2	8.48	1014.00	3820.00	912.00	102.00
	40	8.8	8.33	1622.50	4063.00	1639.00	0.00
	60	8.4	8.32	1995.00	3700.00	2031.00	0.00
	80	8.0	8.02	2287.00	4024.00	2330.00	0.00
	100	7.9	8.00	2263.00	3965.00	2298.50	0.00
	120	7.9	8.00	2328.50	3912.00	2352.50	0.00
	140	7.8	8.00	2280.00	3841.00	2312.50	0.00

	160	7.9	7.99	2277.00	3901.00	2301.50	0.00
	180	7.8	8.04	2278.00	3878.50	2286.00	0.00
9B	0	9.7	8.67	473.35	3840.00	226.15	247.20
	20	9.2	8.17	1062.50	3756.50	920.50	142.00
	40	8.8	8.04	1476.00	3681.00	1497.00	0.00
	60	8.4	8.01	1998.50	3736.50	1986.00	12.50
	80	8.0	8.03	2249.00	3906.50	2288.00	0.00
	100	7.9	7.87	2319.00	3873.00	2388.50	0.00
	120	7.8	7.66	2402.00	4023.00	2440.00	0.00
	140	7.9	7.86	2348.50	3356.00	2378.50	0.00
	160	7.9	7.60	2348.50	4013.50	2610.50	0.00
	180	7.8	7.62	2426.50	4098.25	2704.75	0.00

5.1.2 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος

Πίνακας 15: Πείραμα 5, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα χώνευμα διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
5A	0	7.8	7.20	868.00	251.10	459.50	408.50
	20	7.3	7.85	885.00	222.25	462.90	422.25
	40	7.1	7.90	848.00	247.25	481.80	366.20
	60	7.2	8.00	826.50	237.90	452.15	374.30
	80	7.2	7.95	815.00	264.65	472.60	342.60
	100	7.1	7.80	895.50	405.90	444.00	451.50
	120	7.1	7.90	799.70	410.60	433.30	366.30
	140	7.1	7.75	818.00	437.40	439.40	378.60
	160	7.1	7.71	869.20	425.00	450.70	418.50
5B	0	8.2	2.85	839.75	286.00	426.50	413.25
	20	7.2	6.27	790.00	259.25	425.75	364.00
	40	7.2	7.33	795.50	279.50	458.50	337.00
	60	7.1	7.50	792.00	276.75	454.00	338.00
	80	7.1	7.48	802.25	275.00	452.25	350.00
	100	7.2	7.60	902.50	277.75	450.50	452.00
	120	7.1	7.50	818.50	276.00	439.25	379.25

Στο χρόνο 0, στα πειράματα με τη χρήση άλατος, τα TC, IC και TOC είναι 0, διότι το άλας περιέχει ανθρακικά ιόντα και η πρώτη μέτρηση λαμβάνεται ως blank-λευκό δείγμα και αφαιρείται από όλες τις υπόλοιπες.

Πίνακας 16: Πείραμα 7, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα Na_2CO_3 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
7A	0	11.8	7.80	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	11.1	8.30	470.00	0.00	560.00	0.00
	40	10.8	7.50	455.00	0.00	335.00	120.00
	60	10.6	8.06	1025.00	0.00	500.00	525.00
	80	10.4	8.18	1130.00	0.00	1000.00	130.00
	100	10.2	8.40	1490.00	0.00	815.00	675.00
	120	10.2	8.22	1925.00	0.00	1535.00	390.00
	140	10	8.15	2080.00	0.00	1810.00	270.00
	160	9.9	8.25	2465.00	0.00	2265.00	200.00
	180	9.9	8.15	1745.00	0.00	2740.00	0.00
	200	9.8	8.11	2800.00	0.00	2375.00	425.00
	220	9.8	8.10	3335.00	0.00	2995.00	340.00
	240	9.7	8.05	3065.00	0.00	3385.00	0.00
	265	9.6	8.10	2935.00	0.00	3902.50	0.00
	295	9.5	8.20	2585.00	0.00	2525.00	60.00
	325	9.4	8.15	4080.00	0.00	3885.00	195.00
360	9.3	8.35	5137.50	0.00	5132.50	5.00	
7B	0	11.6	7.65	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	10.9	8.02	850.00	0.00	220.00	630.00
	60	10.6	8.20	395.00	0.00	125.00	270.00
	90	10.6	8.25	965.00	0.00	1510.00	0.00
	120	10.3	8.30	865.00	0.00	2380.00	0.00
	150	10.3	8.40	2490.00	0.00	2625.00	0.00
	180	10.1	8.39	2960.00	0.00	3175.00	0.00
	210	10.1	8.20	2025.00	0.00	2670.00	0.00
	240	10	8.37	2515.00	0.00	2800.00	0.00
	270	10	8.35	3565.00	0.00	4110.00	0.00
	300	9.9	8.37	4335.00	0.00	4605.00	0.00
	330	9.9	8.44	4370.00	0.00	4480.00	0.00
	360	9.8	8.20	4095.00	0.00	5235.00	0.00
	390	9.7	8.28	4755.00	0.00	5250.00	0.00
420	9.8	8.36	4755.00	0.00	5205.00	0.00	

Πίνακας 17: Πείραμα 10, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
10A	0	9.7	7.59	717.25	6795.00	473.50	243.75

	20	9.6	7.95	1165.25	6872.50	941.75	223.50
	40	9.5	8.33	1537.75	7450.00	1422.00	115.75
	60	9.3	8.30	2065.00	7377.50	1950.75	114.25
	80	9.1	8.18	2607.50	7357.50	2512.50	95.00
	100	9	7.99	3177.50	7102.50	2977.50	200.00
	120	8.6	8.06	3612.50	7280.00	3492.50	120.00
	140	8.6	8.03	3842.50	7295.00	3802.50	40.00
	160	8.3	7.88	4225.00	7240.00	4202.50	22.50
	180	8.4	7.66	4385.00	7422.50	4290.00	95.00
	205	8.2	7.77	4512.50	7350.00	4435.00	77.50
	235	8.1	7.45	4569.50	7695.00	4542.50	27.00
	255	8.1	7.52	4701.50	7665.00	4505.50	196.00
10B	0	9.6	8.58	852.50	7755.00	560.00	292.50
	30	9.2	8.52	1755.00	7745.00	1533.00	222.00
	60	9	8.42	2602.00	7820.00	2640.50	0.00
	90	8.6	8.29	3546.50	8035.00	3696.50	0.00
	120	8.3	8.07	4266.00	7640.00	4444.00	0.00
	150	8.1	8.00	4745.50	7550.00	4852.50	0.00
	180	8	7.77	4849.00	7925.00	4972.00	0.00
	210	7.9	7.34	4657.50	7750.00	4612.00	45.50
255	7.9	7.46	4813.00	7920.00	5180.00	0.00	

Πίνακας 18: Πείραμα 11, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
11A	0	11.7	5.28	0.00	62.45	0.00	0.00
	30	11	7.60	835.00	218.95	1975.00	0.00
	55	10.8	7.90	1435.00	241.60	1360.00	75.00
	85	10.5	8.15	2740.00	319.40	4160.00	0.00
	115	10.3	8.29	3160.00	408.40	4970.00	0.00
	175	10.1	8.11	4180.00	444.45	4940.00	0.00
	205	10	7.80	4830.00	466.90	6660.00	0.00
	235	9.9	7.62	6855.00	486.75	7285.00	0.00
	265	9.7	7.54	6240.00	463.00	6425.00	0.00
	295	9.6	7.72	8085.00	493.95	7955.00	130.00
	325	9.5	7.99	5805.00	441.60	5015.00	790.00
	355	9.4	7.82	6875.00	481.55	7800.00	0.00
395	9.4	7.53	8785.00	516.50	8065.00	720.00	
11B	0	11.5	6.02	0.00	47.80	0.00	0.00
	30	10.8	7.75	3245.00	74.45	2450.00	795.00
	60	10.5	7.60	3645.00	92.65	2985.00	660.00
	100	10.2	7.96	5490.00	121.70	2670.00	2820.00
	120	10.1	8.13	4840.00	182.00	3110.00	1730.00
	150	10	7.79	6290.00	128.50	6965.00	0.00
	180	9.9	7.48	7675.00	145.80	6145.00	1530.00

	210	9.8	7.60	8260.00	138.60	8245.00	15.00
	245	9.7	7.36	9190.00	151.00	7485.00	1705.00
	270	9.6	7.19	9065.00	157.90	7355.00	1710.00
	300	9.5	7.43	9890.00	139.25	7452.50	2437.50
	330	9.4	7.85	9715.00	137.15	6690.00	3025.00
	360	9.4	7.68	10670.00	155.35	7467.50	3202.50

Πίνακας 19: Πείραμα 12, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
12A	0	11.5	6.86	0.00	78.00	0.00	0.00
	30	10.7	7.99	430.00	63.90	1710.00	0.00
	75	10.3	7.20	3615.00	59.65	3250.00	365.00
	100	10.1	7.40	3025.00	58.55	4910.00	0.00
	125	10	7.42	5970.00	99.30	5605.00	365.00
	155	9.9	7.90	6930.00	102.85	6790.00	140.00
	185	9.6	7.70	7845.00	103.60	7990.00	0.00
	220	9.4	7.79	8480.00	103.30	7830.00	650.00
	245	9.3	7.85	8635.00	83.85	9245.00	0.00
	275	9.2	7.96	9925.00	95.30	10285.00	0.00
	315	9	7.70	9415.00	91.55	10330.00	0.00
345	8.9	7.54	10700.00	110.15	10535.00	165.00	
12B	0	11.3	5.83	0.00	188.85	0.00	0.00
	30	10.7	6.33	2050.00	210.40	1840.00	210.00
	60	10.4	6.55	2945.00	219.85	3345.00	0.00
	90	10.2	6.49	4060.00	205.50	4340.00	0.00
	120	10.1	6.60	5575.00	232.50	5595.00	0.00
	150	9.8	6.64	6830.00	212.30	7065.00	0.00
	210	9.5	6.70	7540.00	221.60	8050.00	0.00
	240	9.4	6.51	9190.00	225.25	9420.00	0.00
	270	9.4	6.61	9745.00	231.90	10000.00	0.00
	300	9.2	6.55	10240.00	220.25	10775.00	0.00
	330	9.1	6.52	10310.00	237.05	11035.00	0.00
360	9.1	6.28	10775.00	223.50	10830.00	0.00	

5.1.3 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση

Στο πείραμα 13A και 14 δεν μετρήθηκε το διαλυμένο οξυγόνο DO καθώς δεν ήταν διαθέσιμη η συσκευή κατά την εκτέλεσή του. Επίσης, για το πείραμα 14, 15 και 18 πραγματοποιήθηκε μία επανάληψη, λόγω οικονομίας ποσότητας του ενζύμου. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων 14, 15 και 18, στα οποία χρησιμοποιήθηκε ένζυμο CA, υπολογίστηκε η ενεργότητα με βάση το πρωτόκολλο που έχει παρουσιαστεί στην ενότητα 4.1.5, προκειμένου να μελετηθεί η υποβάθμιση του

ενζύμου. Μετά από κάθε πίνακα πρωτογενών αποτελεσμάτων των πειραμάτων αυτών, εμφανίζονται οι πρωτογενείς πίνακες της απορρόφησης της παρανιτροφαινόλης (p-NP) μαζί με το χρόνο.

Πίνακας 20: Πείραμα 13, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
13A	0	11.7	-	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.3	-	2725.00	0.00	520.00	0.00
	60	10.9	-	-	0.00	-	-
	90	10.7	-	990.00	0.00	1440.00	0.00
	120	10.6	-	2995.00	0.00	2430.00	0.00
	150	10.3	-	4310.00	0.00	3015.00	0.00
	180	10.1	-	4255.00	0.00	3830.00	0.00
	210	10.3	-	4015.00	0.00	3015.00	0.00
	240	10.1	-	-	0.00	-	-
	270	10.0	-	5125.00	0.00	3615.00	0.00
	300	10.0	-	7455.00	0.00	5525.00	0.00
	330	9.8	-	7890.00	0.00	8795.00	0.00
360	9.8	-	8955.00	0.00	6185.00	0.00	
13B	0	11.9	7.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.3	6.77	1495.00	0.00	695.00	800.00
	60	11.0	6.80	1585.00	0.00	1985.00	0.00
	90	10.6	6.50	2540.00	0.00	3360.00	0.00
	120	10.5	6.64	3565.00	0.00	3895.00	0.00
	150	10.3	6.72	4105.00	0.00	2455.00	1650.00
	180	10.3	6.73	5160.00	0.00	3295.00	1865.00
	210	10.2	6.62	3950.00	0.00	4130.00	0.00
	240	9.9	6.64	4805.00	0.00	3595.00	1210.00
	270	9.9	6.76	9080.00	0.00	7100.00	1980.00
	300	9.9	6.63	8450.00	0.00	7085.00	1365.00
	330	9.7	6.74	10505.00	0.00	8265.00	2240.00
360	9.7	6.66	10160.00	0.00	7255.00	2905.00	

Πίνακας 21: Πείραμα 14, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
14	0	12.3	-	0.00	0.00	0.00	0.00
	15	11.4	-	-	0.00	1370.00	-

30	11	-	200.00	0.00	1500.00	0.00
45	11	-	260.00	0.00	1380.00	0.00
60	10.6	-	2410.00	0.00	2200.00	0.00
90	10.5	-	3990.00	0.00	4490.00	0.00
120	10.2	-	2950.00	0.00	2280.00	0.00
150	10.1	-	5140.00	0.00	5680.00	0.00
180	9.9	-	5310.00	0.00	6280.00	0.00
210	9.9	-	6780.00	0.00	7780.00	0.00
270	9.8	-	5800.00	0.00	6980.00	0.00
330	9.5	-	9900.00	0.00	10380.00	0.00
360	9.3	-	9770.00	0.00	10840.00	0.00
390	9.3	-	11970.00	0.00	12670.00	0.00
420	9.1	-	10640.00	0.00	11670.00	0.00
450	9.1	-	10160.00	0.00	12050.00	0.00

Πίνακας 22: Μέτρηση απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης (p-NP) κατά τη διάρκεια του πειράματος 14

D (αραίωση)	10	1
Χρόνος δειγματοληψίας (min)	0	450
	A (348nm)	
Τυφλό (αντιδραστήριο+νερό)	0.484	0.484
Χρόνος (min)		
0	0.473	0.473
0.5	0.479	0.497
1	0.483	0.512
1.5	0.488	0.538
2	0.492	0.564
2.5	0.498	0.596
3	0.503	0.623
3.5	0.509	0.651
4	0.515	0.678
4.5	0.521	0.705
5	0.526	0.732
5.5	0.533	0.763
6	0.538	0.786
6.5	0.544	0.82
7	0.550	0.846
7.5	0.558	0.878
8	0.564	0.909
8.5	0.571	0.935
9	0.581	0.959
9.5	0.592	0.991
10	0.600	1.016

Πίνακας 23: Πείραμα 15, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
15	0	12.2	6.99	0.00	0.00	0.00	0.00
	25	11.1	6.60	695.00	0.00	1475.00	0.00
	55	10.8	6.61	2085.00	0.00	2615.00	0.00
	85	10.5	6.74	2660.00	0.00	2975.00	0.00
	115	10.4	6.70	4020.00	0.00	4815.00	0.00
	145	10.2	6.84	6320.00	0.00	7765.00	0.00
	205	10	6.88	6165.00	0.00	6750.00	0.00
	235	9.9	6.70	5130.00	0.00	6660.00	0.00
	265	9.9	6.75	7585.00	0.00	8330.00	0.00
	295	9.7	6.54	8445.00	0.00	9590.00	0.00
	325	9.7	6.66	9535.00	0.00	10000.00	0.00
	355	9.6	6.55	9570.00	0.00	10525.00	0.00
	385	9.5	6.78	9335.00	0.00	10920.00	0.00
	415	9.4	6.75	11025.00	0.00	11955.00	0.00
	450	9.4	6.44	11385.00	0.00	12730.00	0.00

Πίνακας 24: Μέτρηση απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης (p-NP) κατά τη διάρκεια του πειράματος 15, με $D=5$

Χρόνος δειγματοληψίας (min)	0	25	115	235	325	450
	A (348nm)					
Τυφλό (αντιδραστήριο+νερό)	0.382	0.382	0.382	0.401	0.401	0.401
Χρόνος (min)						
0	0.377	0.390	0.416	0.410	0.421	0.449
0.5	0.383	0.404	0.423	0.415	0.426	0.450
1	0.388	0.414	0.428	0.420	0.431	0.454
1.5	0.398	-	0.434	0.424	0.436	0.458
2	0.403	0.422	0.442	0.431	0.441	0.461
2.5	0.410	0.432	0.447	0.435	0.445	0.465
3	0.416	0.440	0.457	0.438	0.448	0.469
3.5	0.424	0.451	0.464	0.443	0.455	0.474
4	0.432	0.459	0.472	0.449	0.460	0.479
4.5	0.438	0.469	0.478	0.456	0.466	0.485
5	0.447	0.476	0.486	0.459	0.470	0.488
5.5	0.453	0.486	0.493	0.466	0.475	0.496
6	0.461	0.495	0.500	0.474	0.481	0.499
6.5	0.470	0.505	0.508	0.474	0.487	0.504
7	0.479	0.514	0.516	0.481	0.493	0.507
7.5	0.484	0.524	0.522	0.486	0.498	0.512
8	0.493	0.533	0.530	0.493	0.503	0.515
8.5	0.500	0.544	0.539	0.498	0.510	0.521
9	0.506	0.556	0.546	0.504	0.515	0.526

9.5	0.515	0.570	0.555	0.510	0.520	0.531
10	0.523	0.579	0.562	0.517	0.528	0.536

Πίνακας 25: Πείραμα 16, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
16A	0	11.5	5.44	0.00	247.55	0.00	0.00
	30	10.9	6.61	1315.00	191.75	1285.00	30.00
	65	10.5	6.67	4345.00	162.65	3600.00	745.00
	95	10.3	6.93	5525.00	190.85	5070.00	455.00
	125	10.1	6.71	6040.00	215.70	6080.00	0.00
	155	9.9	6.86	6955.00	230.70	7775.00	0.00
	185	9.7	6.85	9390.00	213.70	9155.00	235.00
	225	9.6	6.73	8285.00	230.50	8810.00	0.00
	255	9.5	6.77	10170.00	230.35	11020.00	0.00
	290	9.4	6.78	11790.00	254.55	12305.00	0.00
	325	9.2	6.62	9665.00	363.90	7775.00	1890.00
	360	9.3	6.72	13570.00	234.70	13145.00	425.00
390	9.2	6.60	13370.00	220.50	13120.00	250.00	
16B	0	11.5	6.90	0.00	154.80	0.00	0.00
	30	10.8	6.85	1610.00	194.40	1100.00	510.00
	60	10.6	6.69	2430.00	194.20	1410.00	1020.00
	90	10.4	6.90	4230.00	170.75	2610.00	1620.00
	120	10.3	6.87	5310.00	185.30	4135.00	1175.00
	150	10.1	6.82	6345.00	216.30	4555.00	1790.00
	180	10	6.93	6800.00	183.20	7630.00	0.00
	240	9.7	6.90	8105.00	200.50	9235.00	0.00
	270	9.6	6.73	8305.00	250.70	10270.00	0.00
	300	9.4	6.74	10885.00	204.95	11045.00	0.00
	330	9.4	6.75	11345.00	197.50	11360.00	0.00
	360	9.3	6.53	11450.00	214.30	12255.00	0.00
390	9.2	6.45	11490.00	192.95	12545.00	0.00	

Πίνακας 26: Πείραμα 18, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
18	0	11.3	6.40	0.00	165.20	0.00	0.00
	45	10.8	5.23	2675.00	177.85	1305.00	1370.00
	60	10.7	5.91	2545.00	185.55	1205.00	1340.00
	90	10.4	6.33	6190.00	259.10	5035.00	1155.00

	130	10.2	6.52	7345.00	219.15	6340.00	1005.00
	160	10	6.85	8230.00	275.85	7255.00	975.00
	220	9.8	6.69	11630.00	249.55	10495.00	1135.00
	250	9.7	6.70	11505.00	257.80	11150.00	355.00
	280	9.6	6.64	14070.00	269.00	13185.00	885.00
	310	9.4	6.73	13550.00	275.00	14055.00	0.00
	340	9.4	6.73	13265.00	283.30	13960.00	0.00
	370	9.3	6.61	14265.00	269.90	14160.00	105.00
	410	9.2	6.66	16245.00	274.75	15420.00	825.00
	450	9.1	6.46	17085.00	286.55	16850.00	235.00

Πίνακας 27: Μέτρηση απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης (p-NP) κατά τη διάρκεια του πειράματος 18

D (αραίωση)	10				5		
Χρόνος δειγματοληψίας (min)	0	60	160	250	310	370	450
	A (348nm)						
Τυφλό (αντιδραστήριο+νερό)	0.402	0.402	0.402	0.529	0.529	0.529	0.529
Χρόνος (min)							
0	0.514	0.523	0.484	0.559	0.580	0.509	0.540
0.5	0.520	0.530	0.489	0.564	0.588	0.514	0.542
1	0.526	0.539	0.492	0.569	0.594	0.520	0.548
1.5	0.533	0.541	0.498	0.572	0.599	0.527	0.555
2	0.538	0.548	0.502	0.578	0.607	0.531	0.562
2.5	-	0.557	0.509	0.586	0.615	0.540	0.568
3	0.550	0.562	0.512	0.591	0.621	0.545	0.573
3.5	0.556	0.571	0.517	0.595	0.634	0.556	0.580
4	0.565	0.574	0.523	0.600	0.642	0.564	-
4.5	0.571	0.581	0.529	0.607	0.647	0.573	0.585
5	0.583	0.593	0.534	0.616	0.653	0.581	0.592
5.5	0.587	-	0.542	0.620	0.658	0.589	0.598
6	0.592	0.605	0.547	0.624	0.663	0.593	0.606
6.5	0.602	0.613	0.552	0.630	0.671	0.600	0.612
7	0.608	0.617	-	0.636	0.685	0.611	0.621
7.5	0.617	0.624	0.565	0.641	0.690	0.616	0.626
8	0.624	0.636	0.572	0.646	0.698	0.623	0.634
8.5	0.633	0.639	0.578	0.654	0.707	0.635	0.646
9	0.642	0.646	0.585	0.657	0.715	0.641	0.655
9.5	0.649	0.654	0.592	0.664	0.723	0.656	0.663
10	0.659	0.661	0.598	0.670	0.731	0.662	0.669

5.1.4 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης L/G σε διάλυμα K_2CO_3

Ο πίνακας για το πείραμα 11 έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 5.1.2 και οι πίνακες για τα πειράματα 13 και 16 έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 5.1.3.

Πίνακας 28: Πείραμα 17, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
17A	0	12	6.46	0.00	0.00	0.00	0.00
	40	10.9	7.11	1665.00	0.00	815.00	850.00
	65	10.7	6.97	1270.00	0.00	1255.00	15.00
	95	10.6	6.90	3180.00	0.00	2845.00	335.00
	155	10.3	6.51	4390.00	0.00	4155.00	235.00
	185	10.2	6.73	4845.00	0.00	4830.00	15.00
	215	10.1	6.70	4015.00	0.00	5545.00	0.00
	245	10	6.62	6235.00	0.00	6780.00	0.00
	275	9.9	6.50	6510.00	0.00	7055.00	0.00
	305	9.8	6.67	8935.00	0.00	8995.00	0.00
	335	9.7	6.96	7705.00	0.00	9085.00	0.00
	365	9.6	6.70	9115.00	0.00	9665.00	0.00
	395	9.5	6.74	10195.00	0.00	10875.00	0.00
	420	9.5	6.80	8900.00	0.00	11360.00	0.00
450	9.5	7.04	9745.00	0.00	11675.00	0.00	
17B	0	12.2	6.84	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.1	7.03	1070.00	0.00	815.00	255.00
	70	10.8	6.99	-	0.00	2065.00	-
	115	10.5	6.27	3555.00	0.00	3535.00	20.00
	145	10.3	6.73	5140.00	0.00	3820.00	1320.00
	180	10.2	6.65	4270.00	0.00	4825.00	0.00
	210	10	6.73	4685.00	0.00	6215.00	0.00
	240	10	6.79	4715.00	0.00	6425.00	0.00
	300	9.8	6.67	3625.00	0.00	7850.00	0.00
	330	9.7	6.80	6105.00	0.00	6550.00	0.00
	360	9.6	6.61	8435.00	0.00	9945.00	0.00
	390	9.5	6.78	10840.00	0.00	11100.00	0.00
	420	9.5	6.52	9980.00	0.00	10745.00	0.00
450	9.3	6.74	10665.00	0.00	12190.00	0.00	

5.1.5 Πρωτογενή αποτελέσματα μελέτης επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού

Ο πίνακας για το πείραμα 13, όπως αναφέρθηκε, έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 5.1.3.

Πίνακας 29: Πείραμα 19, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
19A	0	11.9	6.32	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.2	6.77	-	0.00	5.00	-
	60	10.8	6.75	500.00	0.00	1500.00	0.00
	90	10.6	6.89	1345.00	0.00	2530.00	0.00
	120	10.5	6.77	1575.00	0.00	3195.00	0.00
	150	10.3	6.57	1545.00	0.00	1570.00	0.00
	180	10.2	6.74	3820.00	0.00	3175.00	645.00
	215	10	6.39	4990.00	0.00	4600.00	390.00
	240	9.9	6.63	4035.00	0.00	3165.00	870.00
	270	9.9	6.68	6050.00	0.00	4895.00	1155.00
	300	9.9	6.64	4755.00	0.00	3585.00	1170.00
	335	9.8	6.71	6450.00	0.00	4310.00	2140.00
	360	9.7	6.66	8295.00	0.00	5965.00	2330.00
	390	9.6	6.72	8345.00	0.00	8020.00	325.00
420	9.5	6.75	9315.00	0.00	8980.00	335.00	
19B	0	11.9	7.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	11.3	6.96	2800.00	0.00	-	-
	60	10.8	7.01	3800.00	0.00	670.00	3130.00
	90	10.6	7.06	5380.00	0.00	1195.00	4185.00
	120	10.4	6.97	6530.00	0.00	1540.00	4990.00
	150	10.2	6.82	7225.00	0.00	1505.00	5720.00
	180	10.1	6.62	8550.00	0.00	4235.00	4315.00
	210	9.9	6.79	9780.00	0.00	6420.00	3360.00
	270	9.8	6.80	10760.00	0.00	8655.00	2105.00
	300	9.7	6.75	10570.00	0.00	8445.00	2125.00
	330	9.6	6.69	9905.00	0.00	6630.00	3275.00
	365	9.5	6.62	14215.00	0.00	7855.00	6360.00
390	9.4	6.75	13715.00	0.00	8705.00	5010.00	

Πίνακας 30: Πείραμα 2, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
2A	0	12	6.56	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.2	6.37	85.00	0.00	550.00	0.00
	60	10.9	6.98	1530.00	0.00	980.00	550.00
	90	10.8	6.94	1665.00	0.00	1215.00	450.00
	120	10.6	6.87	2655.00	0.00	2605.00	50.00

	180	10.4	7.15	4165.00	0.00	4055.00	110.00
	210	10.3	7.87	4100.00	0.00	3835.00	265.00
	240	10.3	6.76	4600.00	0.00	4910.00	0.00
	270	10.2	6.84	5900.00	0.00	5965.00	0.00
	300	10.1	6.86	5250.00	0.00	5355.00	0.00
	330	10	6.55	6665.00	0.00	6665.00	0.00
	360	9.9	6.84	5665.00	0.00	7400.00	0.00
	390	9.9	6.86	7570.00	0.00	8345.00	0.00
	420	9.9	6.84	7405.00	0.00	7780.00	0.00
2B	0	12.2	6.15	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.2	6.36	1330.00	0.00	140.00	1190.00
	60	11	7.07	2505.00	0.00	2400.00	105.00
	90	10.7	7.05	2640.00	0.00	1460.00	1180.00
	120	10.6	6.78	1685.00	0.00	2420.00	0.00
	150	10.5	6.70	2905.00	0.00	4285.00	0.00
	210	10.3	6.70	5025.00	0.00	5610.00	0.00
	240	10.2	7.04	6335.00	0.00	7110.00	0.00
	270	10.1	6.99	6080.00	0.00	5135.00	945.00
	300	10	6.95	6615.00	0.00	4965.00	1650.00
	330	9.9	6.76	5825.00	0.00	3700.00	2125.00
	360	9.9	6.84	7110.00	0.00	5045.00	2065.00
	390	9.8	6.64	7685.00	0.00	6375.00	1310.00
420	9.8	6.75	8060.00	0.00	6085.00	1975.00	

Πίνακας 31: Πείραμα 6, πρωτογενή αποτελέσματα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM

Πείραμα	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC (mg/L)
6A	0	12	6.46	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.1	6.55	835.00	0.00	950.00	0.00
	60	10.8	6.53	2035.00	0.00	2110.00	0.00
	90	10.5	6.63	5395.00	0.00	3640.00	1755.00
	120	10.4	6.80	3555.00	0.00	2660.00	895.00
	150	10.3	6.86	3335.00	0.00	2655.00	680.00
	180	10.2	6.73	5730.00	0.00	3110.00	2620.00
	240	10	6.58	5835.00	0.00	3965.00	1870.00
	270	9.9	6.49	6795.00	0.00	4315.00	2480.00
	300	9.9	6.61	8235.00	0.00	6115.00	2120.00
	330	9.8	6.50	8975.00	0.00	7765.00	1210.00
6B	0	12.4	6.66	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	11.3	6.60	-	0.00	-	-
	60	10.9	6.68	835.00	0.00	435.00	400.00
	90	10.7	6.84	-	0.00	-	-
	120	10.5	6.96	-	0.00	-	-

	150	10.3	6.93	2055.00	0.00	3250.00	0.00
	210	10.1	6.69	4450.00	0.00	4435.00	15.00
	240	10	6.66	5155.00	0.00	6175.00	0.00
	270	10	6.57	5790.00	0.00	7565.00	0.00
	300	9.9	6.58	6855.00	0.00	8165.00	0.00
	330	9.8	6.61	7915.00	0.00	9030.00	0.00
	360	9.8	6.59	7595.00	0.00	10105.00	0.00

5.2 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Η επεξεργασία των παραπάνω πρωτογενών αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων TC, TN, IC και TOC μετά την αραίωση, τον υπολογισμό της αθροιστικής μάζας του IC, των αποδόσεων και των συγκεντρώσεων των ιόντων διαφόρων μορφών άνθρακα. Υπολογίστηκαν επίσης οι μέσες τιμές των 2 επαναλήψεων, η τυπική απόκλιση, και σχεδιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα με το χρόνο. Σε κάποια σημεία δεν εμφανίζεται τυπική απόκλιση, διότι κάποιες τιμές δεν υπήρχαν στην δεύτερη επανάληψη του πειράματος ή κάποιες τιμές του IC ήταν αρνητικές λόγω σφάλματος του μηχανήματος TOC, με αποτέλεσμα να μην παρουσιαστούν κάποιες τιμές των ανθρακικών ιόντων, μερικές τυπικές αποκλίσεις της αθροιστικής μάζας, αλλά ακόμη και τιμές του TOC.

5.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα NH₃/NH₄Cl

5.2.1.1 Πείραμα 1

Όπως προαναφέρθηκε, σε κάθε μέτρηση γίνεται αραίωση πριν το δείγμα τοποθετηθεί στο μηχάνημα TOC προκειμένου η τιμή να βρίσκεται εντός των καμπυλών βαθμονόμησης. Η τελική τιμή προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή αραίωσης και της τιμής που έχει μετρηθεί. Έπειτα, υπολογίζεται ο μέσος όρος των 2 επαναλήψεων καθώς και η τυπική απόκλιση τους. Για τις μετρήσεις που δεν παρουσιάζεται τυπική απόκλιση, σημαίνει ότι δεν υπήρχε επανάληψη του πειράματος στο συγκεκριμένο χρονικό σημείο.

Πίνακας 32: Πείραμα 1, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH₃/NH₄Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
1	0	10.1 ± 0.1	9.27 ± 0.80	255.10 ± 99.28	4773.75 ± 66.11	64.00 ± 42.43	191.15 ± 56.92
	20	9.8 ± 0.1	9.16 ± 0.34	922.00 ± 9.19	4840.00 ± 120.21	596.10 ± 106.91	326.03 ± 116.28
	40	9.4 ± 0.1	8.87 ± 0.03	1314.25 ± 343.30	4873.00 ± 229.10	1149.75 ± 236.53	164.25 ± 106.42

60	9.2 ± 0.0	8.88 ± 0.05	1730.25 ± 339.06	4830.00 ± 91.92	1527.50 ± 208.60	202.73 ± 130.78
80	9.1 ± 0.0	8.78 ± 0.11	2031.75 ± 458.56	4851.50 ± 71.42	1837.00 ± 202.23	194.70 ± 256.11
100	8.9 ± 0.0	8.76 ± 0.04	2377.75 ± 401.99	5023.25 ± 49.14	2170.75 ± 196.93	207.18 ± 205.10
120	8.7 ± 0.0	8.69 ± 0.06	2706.50 ± 559.32	5034.25 ± 92.98	2522.00 ± 305.47	184.55 ± 253.92
140	8.3 ± 0.3	8.55 ± 0.21	2908.75 ± 362.39	5227.50 ± 159.10	2775.75 ± 174.30	266.00
160	8.1 ± 0.4	8.50 ± 0.21	3061.50 ± 461.74	5132.00 ± 165.46	2902.00 ± 236.17	318.90
180	8.0 ± 0.2	8.48 ± 0.27	3088.75 ± 509.47	5045.75 ± 151.67	2910.75 ± 257.74	355.30
200	7.9 ± 0.1	8.47 ± 0.31	3226.75 ± 362.39	5271.00 ± 69.30	3058.25 ± 124.10	337.40
220	7.8	7.90	2928.00	5295.00	2928.00	0.00
240	7.9	7.73	3111.00	5205.00	3110.50	0.25
260	7.9	7.90	3088.00	5205.00	3088.00	0.00

Επιπλέον, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της **αθροιστικής μάζας** ανόργανου άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα η αθροιστική μάζα για κάθε επανάληψη υπολογίστηκε ως εξής:

Για κάθε δείγμα υπολογίστηκε ο όγκος διαλύματος αφαιρώντας από τον όγκο υγρού που εισήχθη στην αρχή τον όγκο του δείγματος και τον όγκο που απορρίπτεται κατά τη λήψη του δείγματος. Μετά υπολογίστηκε η μάζα IC στο διάλυμα που μένει πολλαπλασιάζοντας τη συγκέντρωση IC του δείγματος που μετρήθηκε με τον όγκο του διαλύματος. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η μάζα IC στο δείγμα (5-10 mL ανάλογα το πείραμα) και η μάζα IC στο διάλυμα που απορρίπτεται. Οι 3 αυτές μάζες αθροίστηκαν για κάθε δείγμα και προέκυψε η αθροιστική μάζα του IC. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά και οι πράξεις:

- **Όγκος διαλύματος για το πρώτο δείγμα** = $V_{\text{αρχικός}} - V_{\text{δείγματος}} - V_{\text{απόρριψης}}$
- **Όγκος διαλύματος για τα επόμενα δείγματα** = $V_{\text{προηγούμενου διαλύματος}} - V_{\text{δείγματος}} - V_{\text{απόρριψης}}$
- **Μάζα IC στο διάλυμα** = $V_{\text{διαλύματος}} \times \text{Συγκέντρωση IC (mg/L)}$
- **Μάζα IC στο δείγμα** = $V_{\text{δείγματος}} \times \text{Συγκέντρωση IC (mg/L)}$
- **Μάζα IC που απορρίπτεται** = $V_{\text{απόρριψης}} \times \text{Συγκέντρωση IC (mg/L)}$
- **Αθροιστική μάζα IC για το πρώτο δείγμα** = Μάζα IC στο διάλυμα
- **Αθροιστική μάζα IC για τα επόμενα δείγματα** = $\text{Μάζα IC στο διάλυμα} + \text{Μάζα IC στο προηγούμενο δείγμα} + \text{Μάζα IC προηγούμενου δείγματος που απορρίπτεται}$

Ο υπολογισμένος μέσος όρος της αθροιστικής μάζας του IC μαζί με την τυπική απόκλιση κάθε μέτρησης, για το πείραμα 1, παρουσιάζεται στον πίνακα 33. Ομοίως υπολογίζεται και για υπόλοιπα πειράματα.

Πίνακας 33: Πείραμα 1, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL

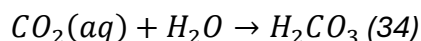
Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	49.70 ± 32.87
20	451.52 ± 78.98
40	856.15 ± 167.93
60	1111.72 ± 140.13
80	1298.82 ± 124.14
100	1489.76 ± 103.41
120	1675.78 ± 155.67
140	1787.34 ± 57.93
160	1809.58 ± 73.96
180	1754.85 ± 71.96
200	1815.58 ± 28.87
220	1717.27
240	1768.21
260	1753.19

Οι χημικές αντιδράσεις του ανόργανου άνθρακα περιλαμβάνουν τις ακόλουθες μορφές του: διαλυτό CO_2 ($CO_2(aq)$), ανθρακικό οξύ (H_2CO_3), όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-) και ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}). Ο ολικός ανόργανος άνθρακας (C_{in}) ισούται με το άθροισμα των συγκεντρώσεων όλων των προαναφερθέντων ειδών. Ο τρόπος υπολογισμού τους φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις (Μπαραμπούτη, 2006) :

$$C_{in} = CO_2(aq) + H_2CO_3 + HCO_3^- + CO_3^{2-} \quad (33)$$

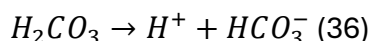
Οι ισορροπίες που λαμβάνουν χώρα είναι οι ακόλουθες:

Για την εξίσωση ισορροπίας του διαλυτού CO_2 ισχύει η εξίσωση 34 και η σταθερά K_1 υπολογίζεται από την 35.



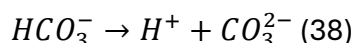
$$\text{με σταθερά ισορροπίας } K_1 = \frac{H_2CO_3}{CO_2(aq)} = 1.3 \times 10^{-3} \quad (35)$$

Για την εξίσωση ισορροπίας του ανθρακικού οξέος ισχύει η εξίσωση 36 και η σταθερά K_2 υπολογίζεται από την 37.



$$\text{με σταθερά ισορροπίας } K_2 = \frac{H^+ \times HCO_3^-}{H_2CO_3} = 2 \times 10^{-4} \quad (37)$$

Για την εξίσωση ισορροπίας των όξινων ανθρακικών ανιόντων ισχύει η εξίσωση 38 και η σταθερά K_3 υπολογίζεται από την 39.



$$\text{με σταθερά ισορροπίας } K_3 = \frac{H^+ \times CO_3^{2-}}{HCO_3^-} = 4.69 \times 10^{-11} \quad (39)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων και γνωρίζοντας την ολική συγκέντρωση του ανόργανου άνθρακα C_{in} μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση των όξινων ανθρακικών ιόντων HCO_3^- από την ακόλουθη εξίσωση (40):

$$HCO_3^- = \frac{C_{in}}{\left(1 + \frac{10^{-pH}}{K_1 \times K_2} + \frac{10^{-pH}}{K_2} + \frac{K_3}{10^{-pH}}\right)} \quad (40)$$

ενώ η συγκέντρωση του διαλυμένου CO_2 ($CO_2(aq)$) υπολογίζεται από την εξίσωση (41):

$$CO_2(aq) = \frac{10^{-pH} \times HCO_3^-}{K_1 \times K_2} \quad (41)$$

Οι συγκεντρώσεις των διαφορετικών μορφών άνθρακα υπολογίζονται βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας για όλα τα πειράματα. Τα αποτελέσματα του πειράματος 1 παρουσιάζονται στον πίνακα 34. Παρατηρείται στο πείραμα 1 αλλά και σε όλα τα πειράματα ότι ο άνθρακας στο διάλυμα βρίσκεται κυρίως υπό τη μορφή όξινων ανθρακικών ανιόντων (HCO_3^-) και διαλυτού CO_2 ($CO_2(aq)$). Σε πολύ μικρότερες έως και μηδενικές συγκεντρώσεις βρίσκονται τα άλλα δύο είδη H_2CO_3 και CO_3^{2-} .

Πίνακας 34: Πείραμα 1, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$CO_2(aq)$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
1A	0	23.14	0.01	0.00	0.00
	20	421.18	0.32	0.00	0.00
	40	854.70	1.04	0.00	0.00
	60	1281.62	3.11	0.00	0.00
	80	1594.95	4.87	0.01	0.01
	100	1949.42	9.44	0.01	0.01
	120	2236.25	17.16	0.02	0.02
	140	2582.74	31.41	0.04	0.04
	160	2658.80	51.25	0.07	0.07
	180	2632.43	80.42	0.10	0.10
	200	2823.11	136.70	0.18	0.18
	220	2751.89	167.75	0.22	0.22
	240	2956.16	143.14	0.19	0.19
260	2934.78	142.10	0.18	0.18	
1B	0	53.91	0.01	0.00	0.00
	20	518.08	0.32	0.00	0.00
	40	1202.18	2.32	0.00	0.00
	60	1555.59	3.78	0.00	0.00
	80	1864.23	5.70	0.01	0.01
	100	2216.67	10.73	0.01	0.01
	120	2655.19	20.38	0.03	0.03

	140	2796.93	85.45	0.11	0.11
	160	2884.41	175.83	0.23	0.23
	180	2906.97	177.20	0.23	0.23
	200	2956.78	180.24	0.23	0.23

Υπολογίστηκε επίσης η **απόδοση** δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα ως προς τον άνθρακα που εισήχθη στο σύστημα. Αυτή υπολογίστηκε ξεχωριστά για κάθε επανάληψη πειράματος. Ο γενικός τύπος της απόδοσης φαίνεται στην εξίσωση (42):

$$\text{Απόδοση (\%)} = \frac{\text{Μάζα ανόργανου άνθρακα που δεσμεύτηκε σε χρόνο } t \text{ (g)}}{\text{Μάζα ανόργανου άνθρακα που εισήχθη στο σύστημα σε χρόνο } t \text{ (g)}} \times 100 \quad (42)$$

Η **μάζα του ανόργανου άνθρακα που δεσμεύτηκε** είναι η τελευταία τιμή της αθροιστικής μάζας για το εκάστοτε πείραμα, αφού περιλαμβάνει την συνολική ποσότητα IC που δεσμεύτηκε. Μετατρέπεται πρώτα σε γραμμάρια διαιρώντας με το 1000.

Όσον αφορά τη **μάζα ανόργανου άνθρακα που εισήχθη**, υπολογίζεται με διαφορετικό τρόπο. Για κάθε πείραμα είναι γνωστή η ροή εισόδου του αερίου που ρυθμίζεται από το ροόμετρο εισόδου. Το αέριο αποτελείται από μίγμα ατμοσφαιρικού αέρα 80% (O₂, N₂) και 20% CO₂, το οποίο προσομοιάζει τους βιομηχανικούς καπνούς (Pierre, 2012). Επομένως, η συνολική ροή αερίου πολλαπλασιάζεται με το 20% προκειμένου να βρεθεί η ροή CO₂ σε L/min. Ωστόσο, η ροή αυτή πρέπει να μετατραπεί σε g/min καθώς η απόδοση υπολογίζεται με βάση τη μάζα. Θεωρώντας ότι το CO₂ είναι ιδανικό αέριο σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου, 25 °C και 1atm αντίστοιχα, γίνεται η χρήση της καταστατικής εξίσωσης ιδανικών αερίων, για να υπολογιστεί η πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα σε συνθήκες δωματίου (βλ. εξίσωση (43)):

$$P \times V = n \times R \times T \quad (43)$$

όπου, P πίεση σε atm, V όγκος σε L, n γραμμομόριο σε mol, R παγκόσμια σταθερά των αερίων σε $\frac{\text{L}\cdot\text{atm}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$, T θερμοκρασία σε K.

Για να βρεθεί η πυκνότητα, θα πρέπει η παραπάνω εξίσωση σε συνδυασμό με την εξίσωση 44 να μετατραπεί στην εξίσωση 45 :

$$n = \frac{m}{M_r} \quad (44)$$

$$\rho = \frac{P \times M_r}{R \times T} \quad (45)$$

όπου, M_r μοριακή μάζα του CO₂ σε g/mol και ρ πυκνότητα σε g/L.

Το μοριακό βάρος του CO₂ είναι 44 g/mol και σε συνθήκες δωματίου η πυκνότητα υπολογίζεται ίση με 1.80 g/L. Η ροή αερίου σε g/min προκύπτει από τη ροή σε

L/min πολλαπλασιασμένη με (1.80 g/L). Ωστόσο, για τον υπολογισμό της απόδοσης απαιτούνται μόνο τα g/min του ανόργανου άνθρακα C_{in} που εισήχθησαν και όχι του CO_2 . Το Ar του άνθρακα είναι 12 g/mol και το Mr του CO_2 44 g/mol επομένως, η ροή του C σε g/min ισούται με το λόγο των Mr επί τη ροή του CO_2 (g/min). Τέλος, η ροή του C (g/min) πολλαπλασιάζεται με το συνολικό χρόνο διεξαγωγής του πειράματος t. Οι υπολογισμοί φαίνονται αναλυτικά και στις παρακάτω εξισώσεις (46,47,48,49):

$$\text{Ροή } CO_2 \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = 0.2 \times \text{Ροή εισόδου αερίου μίγματος} \quad (46)$$

$$\text{Ροή } CO_2 \left(\frac{g}{\text{min}} \right) = 1.80 \left(\frac{g}{L} \right) \times \text{Ροή } CO_2 \left(\frac{L}{\text{min}} \right) \quad (47)$$

$$\text{Ροή } C \left(\frac{g}{\text{min}} \right) = \frac{12}{44} \times \text{Ροή } CO_2 \left(\frac{g}{\text{min}} \right) \quad (48)$$

$$\text{Μάζα ανόργανου άνθρακα που εισήχθη στο σύστημα σε χρόνο } t \text{ (g)} = \text{Ροή } C \left(\frac{g}{\text{min}} \right) \times \text{Χρόνος πειράματος (min)} \quad (49)$$

Οι αποδόσεις για όλα τα πειράματα υπολογίζονται βάσει των παραπάνω τύπων και οι αποδόσεις για τα 1A και 1B παρουσιάζονται στον πίνακα 35:

Πίνακας 35: Αποδόσεις πειράματος 1, για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 800mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
1A	68.68
1B	93.50

5.2.1.2 Πείραμα 3

Πίνακας 36: Πείραμα 3, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
3	0	9.9 ± 0.1	8.80 ± 0.00	304.88 ± 77.82	4059.50 ± 101.82	140.93 ± 119.32	163.95 ± 41.51
	40	9.3 ± 0.1	8.43 ± 0.11	1340.75 ± 45.61	4642.25 ± 387.85	1279.50 ± 7.07	61.20 ± 52.82
	60	9.0 ± 0.1	8.63 ± 0.25	1852.00 ± 13.44	4748.25 ± 377.24	1852.00 ± 13.44	0.00 ± 0.00
	80	8.8 ± 0.1	8.40 ± 0.14	2280.75 ± 67.53	4733.25 ± 398.45	2280.75 ± 67.53	0.00 ± 0.00

100	8.4 ± 0.0	8.24 ± 0.20	2602.25 ± 167.23	4757.00 ± 142.13	2602.25 ± 167.23	0.00 ± 0.00
120	8.1 ± 0.0	8.10 ± 0.21	2830.50 ± 62.23	4808.00 ± 335.17	2830.50 ± 62.23	0.00 ± 0.00
140	7.9 ± 0.0	8.03 ± 0.32	2943.00 ± 164.76	4824.75 ± 189.15	2943.00 ± 164.76	0.00 ± 0.00
160	7.8 ± 0.1	7.98 ± 0.11	2870.00 ± 208.60	4656.25 ± 110.66	2870.00 ± 208.60	0.00 ± 0.00
180	7.9	7.90	3007.50	4683.00	3007.50	0.00

Πίνακας 37: Πείραμα 3, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	95.17 ± 80.94
40	821.56 ± 20.59
60	1156.65 ± 45.70
80	1370.01 ± 115.36
100	1503.76 ± 186.99
120	1560.21 ± 153.05
140	1548.43 ± 212.55
160	1482.36 ± 182.01
180	1604.93

Πίνακας 38: Πείραμα 3, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
3A	0	153.33	0.06	0.00	0.00
	40	1163.39	2.24	0.00	0.00
	60	1753.51	6.74	0.01	0.01
	80	2248.25	13.70	0.02	0.02
	100	2648.69	40.56	0.05	0.05
	120	2773.29	84.73	0.11	0.11
	140	2907.69	140.79	0.18	0.18
	160	2867.78	138.86	0.18	0.18
	180	2858.27	138.40	0.18	0.18
3B	0	43.62	0.03	0.00	0.00
	20	632.43	0.77	0.00	0.00
	40	1192.93	2.89	0.00	0.00
	60	1786.29	8.65	0.01	0.01
	80	2165.46	16.62	0.02	0.02
	100	2418.43	37.03	0.05	0.05
	120	2688.39	82.13	0.11	0.11
	140	2686.25	130.07	0.17	0.17
	160	2522.72	193.60	0.25	0.25

Πίνακας 39: Αποδόσεις πειράματος 3, για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
3A	90.81
3B	86.17

5.2.1.3 Πείραμα 4

Πίνακας 40: Πείραμα 4, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
4	0	9.8 ± 0.0	9.08 ± 0.11	284.03 ± 117.84	4484.50 ± 197.99	167.18 ± 125.33	116.90 ± 7.50
	20	9.6 ± 0.1	8.83 ± 0.32	766.25 ± 18.03	5040.00 ± 162.63	654.00 ± 1.41	112.08 ± 16.79
	40	9.2 ± 0.0	8.37 ± 0.01	1335.25 ± 66.11	4920.25 ± 77.43	1335.25 ± 66.11	0.00 ± 0.00
	60	9.0 ± 0.1	8.23 ± 0.03	1815.00 ± 77.07	5125.00 ± 162.63	1811.50 ± 72.12	3.35 ± 4.74
	80	8.7 ± 0.1	8.35 ± 0.35	2341.00 ± 82.02	5160.00 ± 14.14	2228.00 ± 21.92	113.00 ± 103.80
	100	8.4 ± 0.1	8.32 ± 0.26	2629.25 ± 82.38	5147.50 ± 53.03	2628.50 ± 83.44	0.90 ± 1.27
	120	8.1 ± 0.1	8.15 ± 0.28	2871.00 ± 45.25	5167.50 ± 208.60	2871.00 ± 45.25	0.00 ± 0.00
	140	7.9 ± 0.0	8.10 ± 0.28	2860.75 ± 25.10	4665.50 ± 288.50	2860.75 ± 25.10	0.00 ± 0.00
	160	7.9 ± 0.0	8.00 ± 0.21	2858.00 ± 27.58	4843.75 ± 454.32	2858.00 ± 27.58	0.00 ± 0.00
	180	7.9	8.15	2962.50	5175.00	2929.50	33.35
	205	7.8	8.00	2977.00	5165.00	2977.00	0.00

Πίνακας 41: Πείραμα 4, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα NH_3/NH_4Cl χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	114.32 ± 86.68
20	435.85 ± 11.85
40	872.33 ± 71.78
60	1154.50 ± 7.55
80	1386.11 ± 96.01
100	1582.35 ± 69.84
120	1685.21 ± 180.87
140	1626.39 ± 189.64
160	1608.06 ± 139.18
180	1719.94
205	1748.39

Πίνακας 42: Πείραμα 4, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
4A	0	197.30	0.12	0.00	0.00
	20	549.81	0.53	0.00	0.00
	40	1283.48	3.11	0.00	0.00
	60	1675.47	6.44	0.01	0.01
	80	2166.18	13.20	0.02	0.02
	100	2501.92	30.43	0.04	0.04
	120	2800.78	85.57	0.11	0.11
	140	2735.67	132.46	0.17	0.17
	160	2697.66	130.62	0.17	0.17
	180	2784.14	134.81	0.18	0.18
	205	2797.94	170.56	0.22	0.22
4B	0	60.58	0.04	0.00	0.00
	20	569.80	0.69	0.00	0.00
	40	1196.64	2.90	0.00	0.00
	60	1787.25	8.65	0.01	0.01
	80	2151.52	20.79	0.03	0.03
	100	2612.62	50.36	0.07	0.07
	120	2721.43	104.67	0.14	0.14
	140	2701.94	130.83	0.17	0.17
	160	2734.72	132.42	0.17	0.17

Πίνακας 43: Αποδόσεις πειράματος 4, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ χωρίς πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
4A	86.87
4B	96.10

5.2.1.4 Πείραμα 8

Πίνακας 44: Πείραμα 8, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
8	0	9.9 ± 0.0	8.48 ± 0.53	334.68 ± 53.00	3698.75 ± 459.97	78.10 ± 8.84	256.58 ± 44.16
	20	9.4 ± 0.1	8.47 ± 0.04	941.00 ± 30.41	3904.00 ± 65.76	754.50 ± 30.41	186.50 ± 0.00
	40	9.0 ± 0.0	8.26 ± 0.08	1604.25 ± 94.40	4013.00 ± 208.60	1500.25 ± 69.65	104.00 ± 24.75
	60	8.7 ± 0.0	8.22 ± 0.09	2093.25 ± 80.96	4046.75 ± 264.81	2059.50 ± 23.33	74.50

80	8.4 ± 0.1	8.28 ± 0.04	2513.00 ± 137.89	4086.75 ± 239.36	2483.00 ± 77.07	73.00
100	8.0 ± 0.1	8.03 ± 0.11	2670.50 ± 107.48	4037.75 ± 283.20	2686.75 ± 93.69	0.00 ± 0.00
120	7.9 ± 0.1	7.95 ± 0.11	2776.50 ± 178.19	4152.00 ± 193.75	2820.00 ± 139.30	0.00 ± 0.00
140	7.9 ± 0.1	7.95 ± 0.07	2809.50 ± 250.32	4141.50 ± 384.67	2833.50 ± 213.55	1.00 ± 1.41
160	7.8 ± 0.0	7.92 ± 0.11	2864.75 ± 224.51	4127.75 ± 261.28	3042.00 ± 14.85	0.00 ± 0.00
180	7.9 ± 0.1	7.90 ± 0.11	2807.25 ± 342.59	3992.25 ± 344.71	2980.50 ± 79.90	6.25 ± 8.84
200	7.8	7.82	2727.00	3944.00	3029.00	0.00
220	7.8	7.76	2730.50	4002.00	2861.00	0.00

Πίνακας 45: Πείραμα 8, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	44.82 ± 4.58
20	416.08 ± 25.51
40	803.30 ± 11.41
60	1062.80 ± 30.18
80	1223.34 ± 30.46
100	1260.71 ± 46.40
120	1252.16 ± 50.01
140	1186.04 ± 42.72
160	1197.40 ± 161.76
180	1144.67 ± 82.64
200	1178.39
220	1118.71

Πίνακας 46: Πείραμα 8, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
8A	0	61.43	0.03	0.00	0.00
	20	654.85	1.00	0.00	0.00
	40	1474.66	5.67	0.01	0.01
	60	2013.21	15.45	0.02	0.02
	80	2470.52	37.83	0.05	0.05
	100	2656.07	81.15	0.11	0.11
	120	2773.69	134.30	0.17	0.17
	140	2836.41	137.34	0.18	0.18
	160	2849.17	173.68	0.23	0.23
	183	2886.31	139.76	0.18	0.18
8B	0	52.33	0.03	0.00	0.00
	20	708.35	1.37	0.00	0.00
	40	1380.92	5.31	0.01	0.01
	60	1981.21	15.20	0.02	0.02
	80	2360.84	45.51	0.06	0.06

	100	2490.48	120.59	0.16	0.16
	120	2557.81	155.92	0.20	0.20
	140	2521.16	153.68	0.20	0.20
	160	2868.90	174.88	0.23	0.23
	180	2748.13	167.52	0.22	0.22
	200	2846.82	173.53	0.23	0.23
	220	2688.92	163.91	0.21	0.21

Πίνακας 47: Αποδόσεις πειράματος 8, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
8A	60.46
8B	51.79

5.2.1.5 Πείραμα 9

Πίνακας 48: Πείραμα 9, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
9	0	9.8 ± 0.1	8.57 ± 0.14	400.25 ± 103.38	3754.50 ± 120.92	171.30 ± 77.57	228.95 ± 25.81
	20	9.2 ± 0.0	8.33 ± 0.22	1038.25 ± 34.29	3788.25 ± 44.90	916.25 ± 6.01	122.00 ± 28.28
	40	8.8 ± 0.0	8.19 ± 0.21	1549.25 ± 103.59	3872.00 ± 270.11	1568.00 ± 100.41	0.00 ± 0.00
	60	8.4 ± 0.0	8.17 ± 0.22	1996.75 ± 2.47	3718.25 ± 25.81	2008.50 ± 31.82	6.25 ± 8.84
	80	8.0 ± 0.0	8.03 ± 0.01	2268.00 ± 26.87	3965.25 ± 83.09	2309.00 ± 29.70	0.00 ± 0.00
	100	7.9 ± 0.0	7.94 ± 0.09	2291.00 ± 39.60	3919.00 ± 65.05	2343.50 ± 63.64	0.00 ± 0.00
	120	7.9 ± 0.1	7.83 ± 0.24	2365.25 ± 51.97	3967.50 ± 78.49	2396.25 ± 61.87	0.00 ± 0.00
	140	7.9 ± 0.1	7.93 ± 0.10	2314.25 ± 48.44	3598.50 ± 342.95	2345.50 ± 46.67	0.00 ± 0.00
	160	7.9 ± 0.0	7.80 ± 0.28	2312.75 ± 50.56	3957.25 ± 79.55	2456.00 ± 218.50	0.00 ± 0.00
	180	7.8 ± 0.0	7.83 ± 0.30	2352.25 ± 105.01	3988.38 ± 155.39	2495.38 ± 296.10	0.00 ± 0.00

Πίνακας 49: Πείραμα 9, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	65.27 ± 28.95
20	336.78 ± 1.31
40	559.58 ± 45.61
60	687.47 ± 29.76
80	752.83 ± 32.84

100	727.61 ± 11.39
120	701.54 ± 16.39
140	645.45 ± 25.57
160	631.46 ± 6.38
180	639.87 ± 27.38

Πίνακας 50: Πείραμα 9, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
9A	0	89.82	0.05	0.00	0.00
	20	846.98	2.06	0.00	0.00
	40	1582.51	9.65	0.01	0.01
	60	1977.39	30.28	0.04	0.04
	80	2233.51	85.90	0.11	0.11
	100	2184.45	105.77	0.14	0.14
	120	2235.77	108.26	0.14	0.14
	140	2173.41	132.49	0.17	0.17
	160	2187.30	105.91	0.14	0.14
	180	2148.50	130.97	0.17	0.17
9B	0	183.00	0.14	0.00	0.00
	20	854.88	2.07	0.00	0.00
	40	1445.41	8.81	0.01	0.01
	60	1933.58	29.61	0.04	0.04
	80	2193.25	84.36	0.11	0.11
	100	2269.99	109.91	0.14	0.14
	120	2293.24	139.79	0.18	0.18
	140	2260.48	109.45	0.14	0.14
	160	2480.97	120.13	0.16	0.16
	180	2542.07	154.96	0.20	0.20

Πίνακας 51: Αποδόσεις πειράματος 9, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με πληρωτικό υλικό, με pH 10, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 400mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
9A	35.11
9B	37.30

5.2.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος

Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές παρτίδες χωνεύματος στα πειράματα. Το αναερόβιο χώνευμα προέρχεται από την πιλοτική μονάδα αναερόβιας χώνευσης

που διαχειρίζεται η Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ και βρίσκεται στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. Στον πίνακα 52 παρουσιάζονται τα πρωτογενή χαρακτηριστικά του χωνεύματος, πριν την ανάμιξη του με το εκάστοτε διάλυμα, για κάθε πείραμα ξεχωριστά.

Πίνακας 52: Πρωτογενή χαρακτηριστικά χωνεύματος για τα πειράματα 5, 10, 12, 16 και 18

Πείραμα	pH	TC (mg/L)	TN (mg/L)	IC (mg/L)	TOC (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)
5A, 5B	7.8	868.00	251.10	459.50	408.50	0.09
10A, 10B	8.3	717.25	300.00	473.50	243.57	2.27
12B, 16A, 16B	7.9	971.40	472.10	684.10	287.30	0.44
18	8.0	1031.00	492.70	721.00	319.40	0.33

5.2.2.1 Πείραμα 5

Πίνακας 53: Πείραμα 5, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
5	0	8.0 ± 0.3	5.03 ± 3.08	853.88 ± 19.98	268.55 ± 24.68	443.00 ± 23.33	410.88 ± 3.36
	20	7.3 ± 0.1	7.06 ± 1.12	837.50 ± 67.18	240.75 ± 26.16	444.33 ± 26.27	393.13 ± 41.19
	40	7.2 ± 0.1	7.62 ± 0.40	821.75 ± 37.12	263.38 ± 22.80	470.15 ± 16.48	351.60 ± 20.65
	60	7.2 ± 0.1	7.75 ± 0.35	809.25 ± 24.40	257.33 ± 27.47	453.08 ± 1.31	356.15 ± 25.67
	80	7.2 ± 0.1	7.72 ± 0.33	808.63 ± 9.02	269.83 ± 7.32	462.43 ± 14.39	346.30 ± 5.23
	100	7.2 ± 0.1	7.70 ± 0.14	899.00 ± 4.95	341.83 ± 90.62	447.25 ± 4.60	451.75 ± 0.35
	120	7.1 ± 0.0	7.70 ± 0.28	809.10 ± 13.29	343.30 ± 95.18	436.28 ± 4.21	372.78 ± 9.16
	140	7.1	7.75	818.00	437.40	439.40	378.60
	160	7.1	7.71	869.20	425.00	450.70	418.50

Πίνακας 54: Πείραμα 5, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	294.98 ± 17.98
20	295.84 ± 19.84
40	296.06 ± 16.06
60	270.64 ± 7.22
80	260.18 ± 17.79
100	236.39 ± 10.46
120	223.94 ± 0.42
140	213.53
160	218.87

Πίνακας 55: Πείραμα 5, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
5A	0	431.86	26.33	0.03	0.03
	20	387.70	74.74	0.10	0.10
	40	368.77	112.66	0.15	0.15
	60	363.54	88.22	0.11	0.11
	80	379.98	92.21	0.12	0.12
	100	339.84	103.82	0.13	0.13
	120	331.65	101.32	0.13	0.13
	140	336.32	102.75	0.13	0.13
5B	0	413.38	10.03	0.01	0.01
	20	342.32	83.07	0.11	0.11
	40	368.65	89.46	0.12	0.12
	60	347.49	106.16	0.14	0.14
	80	346.15	105.75	0.14	0.14
	100	362.22	87.90	0.11	0.11
	120	336.20	102.71	0.13	0.13

Πίνακας 56: Αποδόσεις πειράματος 5, για απορροφητικό διάλυμα χωνεύματος διηθημένο με πληρωτικό υλικό, με pH 8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
5A	13.93
5B	18.98

5.2.2.2 Πείραμα 7

Πίνακας 57: Πείραμα 7, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα Na_2CO_3 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
7	0	11.7 ± 0.1	7.73 ± 0.11	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	11.0 ± 0.1	8.16 ± 0.20	660.00 ± 268.70	0.00 ± 0.00	390.00 ± 240.42	630.00
	60	10.6 ± 0.0	8.13 ± 0.10	710.00 ± 445.48	0.00 ± 0.00	312.50 ± 265.17	397.50 ± 180.31
	90	10.5 ± 0.1	8.22 ± 0.05	1047.50 ± 116.67	0.00 ± 0.00	1255.00 ± 360.62	130.00
	120	10.3 ± 0.1	8.26 ± 0.06	1395.00 ± 749.53	0.00 ± 0.00	1957.50 ± 597.51	390.00

150	10.2 ± 0.2	8.28 ± 0.18	2285.00 ± 289.91	0.00 ± 0.00	2217.50 ± 576.29	270.00
180	10.0 ± 0.1	8.27 ± 0.17	2352.50 ± 859.13	0.00 ± 0.00	2957.50 ± 307.59	0.00 ± 0.00
210	10.0 ± 0.2	8.16 ± 0.06	2412.50 ± 548.01	0.00 ± 0.00	2522.50 ± 208.60	425.00
240	9.9 ± 0.2	8.21 ± 0.23	2790.00 ± 388.91	0.00 ± 0.00	3092.50 ± 413.66	0.00 ± 0.00
270	9.8 ± 0.3	8.23 ± 0.18	3250.00 ± 445.48	0.00 ± 0.00	4006.25 ± 146.72	0.00 ± 0.00
300	9.7 ± 0.3	8.29 ± 0.12	3460.00 ± 1237.44	0.00 ± 0.00	3565.00 ± 1470.78	30.00 ± 42.43
330	9.7 ± 0.4	8.30 ± 0.21	4225.00 ± 205.06	0.00 ± 0.00	4182.50 ± 420.73	195.00
360	9.6 ± 0.4	8.28 ± 0.11	4616.25 ± 737.16	0.00 ± 0.00	5183.75 ± 72.48	2.50 ± 3.54
390	9.7	8.28	4755.00	0.00	5250.00	0.00
420	9.8	8.36	4755.00	0.00	5205.00	0.00

Πίνακας 58: Πείραμα 7, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα Na_2CO_3 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	257.59 ± 156.13
60	199.57 ± 161.79
90	784.75 ± 256.64
120	1184.25 ± 455.75
150	1310.39 ± 454.90
180	1650.88 ± 381.99
210	1374.91 ± 299.16
240	1553.39 ± 84.10
270	1962.62 ± 452.61
300	1772.49 ± 1030.85
330	1911.42 ± 650.47
360	2303.70 ± 529.85
390	2614.08
420	2592.60

Πίνακας 59: Πείραμα 7, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα Na_2CO_3 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
7A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	81.11	0.00	0.00	0.00
	40	84.61	0.01	0.00	0.00
	60	174.38	0.02	0.00	0.00
	80	459.09	0.07	0.00	0.00
	100	467.44	0.11	0.00	0.00
	120	880.38	0.21	0.00	0.00
	140	1231.81	0.47	0.00	0.00
	160	1649.64	0.80	0.00	0.00

	180	1995.59	0.97	0.00	0.00
	200	1831.81	1.12	0.00	0.00
	220	2310.01	1.41	0.00	0.00
	240	2739.06	2.10	0.00	0.00
	265	3285.82	3.17	0.00	0.00
	295	2196.55	2.67	0.00	0.00
	325	3470.79	5.31	0.01	0.01
	360	4685.04	9.03	0.01	0.01
7B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	46.56	0.00	0.00	0.00
	60	43.60	0.00	0.00	0.00
	90	526.64	0.05	0.00	0.00
	120	1229.36	0.24	0.00	0.00
	150	1355.91	0.26	0.00	0.00
	180	1995.92	0.61	0.00	0.00
	210	1678.46	0.51	0.00	0.00
	240	1905.56	0.73	0.00	0.00
	270	2797.09	1.08	0.00	0.00
	300	3353.91	1.62	0.00	0.00
	330	3262.87	1.58	0.00	0.00
	360	4037.70	2.46	0.00	0.00
	390	4248.17	3.26	0.00	0.00
420	4014.56	2.45	0.00	0.00	

Πίνακας 60: Αποδόσεις πειράματος 7, για απορροφητικό διάλυμα Na_2CO_3 1.45M με πληρωτικό υλικό, με pH 11.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
7A	54.58
7B	62.87

5.2.2.3 Πείραμα 10

Πίνακας 61: Πείραμα 10, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
10	0	9.7 ± 0.1	8.09 ± 0.70	784.88 ± 95.64	7275.00 ± 678.82	516.75 ± 61.16	268.13 ± 34.47
	20	9.4 ± 0.3	8.24 ± 0.40	1460.13 ± 417.02	7308.75 ± 616.95	1237.38 ± 418.08	222.75 ± 1.06
	60	9.2 ± 0.2	8.36 ± 0.08	2333.50 ± 379.72	7598.75 ± 312.89	2295.63 ± 487.73	114.25
	100	8.8 ± 0.3	8.14 ± 0.21	3362.00 ± 260.92	7568.75 ± 659.38	3337.00 ± 508.41	200.00
	120	8.5 ± 0.2	8.07 ± 0.01	3939.25 ± 462.09	7460.00 ± 254.56	3968.25 ± 672.81	120.00
	160	8.2 ± 0.1	7.94 ± 0.08	4485.25 ± 368.05	7395.00 ± 219.20	4527.50 ± 459.62	22.50
	180	8.2 ± 0.3	7.72 ± 0.08	4617.00 ± 328.10	7673.75 ± 355.32	4631.00 ± 482.25	95.00

	205	8.1 ± 0.2	7.56 ± 0.30	4585.00 ± 102.53	7550.00 ± 282.84	4523.50 ± 125.16	61.50 ± 22.63
	255	8.0 ± 0.1	7.49 ± 0.04	4757.25 ± 78.84	7792.50 ± 180.31	4842.75 ± 476.94	196.00

Πίνακας 62: Πείραμα 10, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	350.06 ± 40.50
20	820.10 ± 270.38
60	1460.94 ± 329.08
100	2022.77 ± 379.59
120	2320.24 ± 476.48
160	2503.38 ± 406.76
180	2463.08 ± 400.82
205	2305.01 ± 195.00
255	2414.90 ± 431.04

Πίνακας 63: Πείραμα 10, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
10A	0	383.14	0.29	0.00	0.00
	20	792.93	0.77	0.00	0.00
	40	1237.03	1.50	0.00	0.00
	60	1780.68	3.43	0.00	0.00
	80	2365.59	7.23	0.01	0.01
	100	2833.69	10.90	0.01	0.01
	120	3396.23	32.81	0.04	0.04
	140	3697.69	35.72	0.05	0.05
	160	4085.41	78.75	0.10	0.10
	180	4176.76	63.95	0.08	0.08
	205	4298.60	104.32	0.14	0.14
	235	4382.56	133.89	0.17	0.17
255	4346.86	132.80	0.17	0.17	
10B	0	471.51	0.46	0.00	0.00
	30	1423.71	3.46	0.00	0.00
	60	2512.96	9.67	0.01	0.01
	90	3594.61	34.73	0.05	0.05
	120	4320.19	83.28	0.11	0.11
	150	4681.64	143.03	0.19	0.19
	180	4766.10	183.31	0.24	0.24
	210	4383.16	212.23	0.28	0.28
	255	4922.98	238.37	0.31	0.31

Πίνακας 64: Αποδόσεις πειράματος 10, για απορροφητικό διάλυμα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 9.7, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
10A	84.28
10B	99.76

5.2.2.4 Πείραμα 11

Πίνακας 65: Πείραμα 11, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
11	0	11.6 ± 0.1	5.65 ± 0.52	0.00 ± 0.00	55.13 ± 10.36	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	10.9 ± 0.1	7.68 ± 0.11	2040.00 ± 1704.13	146.70 ± 102.18	2212.50 ± 335.88	795.00
	55	10.7 ± 0.2	7.75 ± 0.21	2540.00 ± 1562.71	167.13 ± 105.32	2172.50 ± 1149.05	367.50 ± 413.66
	85	10.4 ± 0.2	8.06 ± 0.13	4115.00 ± 1944.54	220.55 ± 139.80	3415.00 ± 1053.59	2820.00
	115	10.2 ± 0.1	8.21 ± 0.11	4000.00 ± 1187.94	295.20 ± 160.09	4040.00 ± 1315.22	1730.00
	175	10.0 ± 0.1	7.80 ± 0.45	5927.50 ± 2471.34	295.13 ± 211.18	5542.50 ± 852.06	1530.00
	205	9.9 ± 0.1	7.70 ± 0.14	6545.00 ± 2425.38	302.75 ± 232.14	7452.50 ± 1120.76	15.00
	235	9.8 ± 0.1	7.49 ± 0.18	8022.50 ± 1651.09	318.88 ± 237.41	7385.00 ± 141.42	1705.00
	265	9.7 ± 0.1	7.37 ± 0.25	7652.50 ± 1997.58	310.45 ± 215.74	6890.00 ± 657.61	1710.00
	295	9.6 ± 0.1	7.58 ± 0.21	8987.50 ± 1276.33	316.60 ± 250.81	7703.75 ± 355.32	1283.75 ± 1631.65
	325	9.5 ± 0.1	7.92 ± 0.10	7760.00 ± 2764.79	289.38 ± 215.28	5852.50 ± 1184.40	1907.50 ± 1580.38
	355	9.4 ± 0.0	7.75 ± 0.10	8772.50 ± 2683.47	318.45 ± 230.66	7633.75 ± 235.11	3202.50
395	9.4	7.53	8785.00	516.50	8065.00	720.00	

Πίνακας 66: Πείραμα 11, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	1460.68 ± 221.36
55	1433.47 ± 739.94
85	2161.30 ± 630.12
115	2491.29 ± 812.42
175	3270.03 ± 433.09
205	4194.91 ± 523.84
235	4056.40 ± 11.40
265	3648.76 ± 235.44
295	3905.25 ± 267.39
325	2891.17 ± 454.79

355	3615.12 ± 82.22
395	3860.30

Πίνακας 67: Πείραμα 11, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
11A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	347.10	0.01	0.00	0.00
	55	343.50	0.02	0.00	0.00
	85	1675.24	0.20	0.00	0.00
	115	2567.19	0.49	0.00	0.00
	175	3105.47	0.95	0.00	0.00
	205	4532.51	1.74	0.00	0.00
	235	5305.80	2.57	0.00	0.00
	265	5198.96	3.99	0.01	0.01
	295	6697.93	6.47	0.01	0.01
	325	4362.66	5.31	0.01	0.01
	355	6968.39	10.67	0.01	0.01
	395	7205.13	11.03	0.01	0.01
11B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	618.80	0.04	0.00	0.00
	60	1202.06	0.15	0.00	0.00
	100	1531.35	0.37	0.00	0.00
	120	1955.06	0.60	0.00	0.00
	150	4740.08	1.82	0.00	0.00
	180	4475.52	2.17	0.00	0.00
	210	6359.29	3.88	0.01	0.01
	245	6056.68	4.65	0.01	0.01
	270	6192.75	5.98	0.01	0.01
	300	6483.09	7.89	0.01	0.01
	330	5976.73	9.15	0.01	0.01
	360	6671.34	10.22	0.01	0.01

Πίνακας 68: Αποδόσεις πειράματος 11, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.6, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
11A	99.54
11B	98.40

5.2.2.5 Πείραμα 12

Πίνακας 69: Πείραμα 12, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
12	0	11.4 ± 0.1	6.35 ± 0.73	0.00 ± 0.00	133.43 ± 78.38	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	10.7 ± 0.0	7.16 ± 1.17	1240.00 ± 1145.51	137.15 ± 103.59	1775.00 ± 91.92	210.00
	60	10.4 ± 0.1	6.88 ± 0.46	3280.00 ± 473.76	139.75 ± 113.28	3297.50 ± 67.18	365.00
	90	10.2 ± 0.1	6.95 ± 0.64	3542.50 ± 731.86	132.03 ± 103.91	4625.00 ± 403.05	0.00 ± 0.00
	120	10.1 ± 0.1	7.01 ± 0.58	5772.50 ± 279.31	165.90 ± 94.19	5600.00 ± 7.07	365.00
	150	9.9 ± 0.1	7.27 ± 0.89	6880.00 ± 70.71	157.58 ± 77.39	6927.50 ± 194.45	140.00
	210	9.5 ± 0.1	7.25 ± 0.77	8010.00 ± 664.68	162.45 ± 83.65	7940.00 ± 155.56	650.00
	240	9.4 ± 0.1	7.18 ± 0.95	8912.50 ± 392.44	154.55 ± 99.98	9332.50 ± 123.74	0.00 ± 0.00
	270	9.3 ± 0.1	7.29 ± 0.95	9835.00 ± 127.28	163.60 ± 96.59	10142.50 ± 201.53	0.00 ± 0.00
	300	9.1 ± 0.1	7.13 ± 0.81	9827.50 ± 583.36	155.90 ± 91.00	10552.50 ± 314.66	0.00 ± 0.00
	330	9.0 ± 0.1	7.03 ± 0.72	10505.00 ± 275.77	173.60 ± 89.73	10785.00 ± 353.55	165.00
	360	9.1	6.28	10775.00	223.50	10830.00	0.00

Πίνακας 70: Πείραμα 12, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	1174.75 ± 78.78
60	2153.97 ± 83.98
90	2940.04 ± 174.45
120	3475.56 ± 100.05
150	4163.97 ± 281.60
210	4566.14 ± 426.74
240	5167.38 ± 517.73
270	5440.67 ± 437.49
300	5494.55 ± 766.25
330	5535.33 ± 689.76
360	5922.97

Πίνακας 71: Πείραμα 12, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
12A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	510.35	0.04	0.00	0.00
	75	1678.74	0.32	0.00	0.00
	100	3086.61	0.94	0.00	0.00
	125	3814.52	1.47	0.00	0.00
	155	4945.29	2.39	0.00	0.00
	185	6727.40	6.50	0.01	0.01
	220	6995.19	10.71	0.01	0.01
	245	8439.01	16.27	0.02	0.02
	275	9551.79	23.18	0.03	0.03
	315	9831.06	37.81	0.05	0.05
	345	10109.37	48.95	0.06	0.06
12B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	549.15	0.04	0.00	0.00
	60	1535.65	0.24	0.00	0.00
	90	2489.16	0.60	0.00	0.00
	120	3517.23	1.07	0.00	0.00
	150	5449.16	3.32	0.00	0.00
	210	7002.87	8.52	0.01	0.01
	240	8415.67	12.89	0.02	0.02
	270	8933.83	13.68	0.02	0.02
	300	10006.86	24.28	0.03	0.03
	330	10389.77	31.74	0.04	0.04
	360	10196.75	31.15	0.04	0.04

Πίνακας 72: Αποδόσεις πειράματος 12, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.4, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 700mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
12A	98.50
12B	99.81

5.2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση

5.2.3.1 Πείραμα 13

Πίνακας 73: Πείραμα 13, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K₂CO₃ 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
13	0	11.8 ± 0.1	7.04	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	11.3 ± 0.0	6.77	2110.00 ± 869.74	0.00 ± 0.00	607.50 ± 123.74	800.00
	60	11.0 ± 0.1	6.80	1585.00	0.00 ± 0.00	1985.00	0.00
	90	10.7 ± 0.1	6.50	1765.00 ± 1096.02	0.00 ± 0.00	2400.00 ± 1357.65	0.00 ± 0.00
	120	10.6 ± 0.1	6.64	3280.00 ± 403.05	0.00 ± 0.00	3162.50 ± 1035.91	0.00 ± 0.00
	150	10.3 ± 0.0	6.72	4207.50 ± 144.96	0.00 ± 0.00	2735.00 ± 395.98	1650.00
	180	10.2 ± 0.1	6.73	4707.50 ± 639.93	0.00 ± 0.00	3562.50 ± 378.30	1865.00
	210	10.3 ± 0.1	6.62	3982.50 ± 45.96	0.00 ± 0.00	3572.50 ± 788.42	0.00 ± 0.00
	240	10.0 ± 0.1	6.64	4805.00	0.00 ± 0.00	3595.00	1210.00
	270	10.0 ± 0.1	6.76	7102.50 ± 2796.61	0.00 ± 0.00	5357.50 ± 2464.27	1980.00
	300	10.0 ± 0.1	6.63	7952.50 ± 703.57	0.00 ± 0.00	6305.00 ± 1103.09	1365.00
	330	9.8 ± 0.1	6.74	9197.50 ± 1849.08	0.00 ± 0.00	8530.00 ± 374.77	2240.00
	360	9.8 ± 0.1	6.66	9557.50 ± 852.06	0.00 ± 0.00	6720.00 ± 756.60	2905.00

Πίνακας 74: Πείραμα 13, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K₂CO₃ 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	337.01 ± 58.66
60	1045.25
90	1698.60
120	1589.70 ± 425.37
150	1369.51 ± 273.01
180	1666.82 ± 362.52
210	1575.05 ± 121.34
240	1383.92
270	2402.97
300	2359.37 ± 75.46
330	3058.71 ± 903.84
360	2429.40 ± 351.85

Πίνακας 75: Πείραμα 13, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
13A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	50.20	0.00	0.00	0.00
	60	-	-	-	-
	90	429.77	0.03	0.00	0.00
	120	847.51	0.08	0.00	0.00
	150	1557.36	0.30	0.00	0.00
	180	2407.68	0.74	0.00	0.00
	210	1557.36	0.30	0.00	0.00
	240	-	-	-	-
	270	2460.21	0.95	0.00	0.00
	300	3760.08	1.45	0.00	0.00
	330	6783.49	4.14	0.01	0.01
	360	4770.43	2.91	0.00	0.00
13B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	67.10	0.00	0.00	0.00
	60	348.86	0.01	0.00	0.00
	90	1171.87	0.11	0.00	0.00
	120	1568.52	0.19	0.00	0.00
	150	1268.10	0.24	0.00	0.00
	180	1701.99	0.33	0.00	0.00
	210	2368.72	0.57	0.00	0.00
	240	2618.31	1.27	0.00	0.00
	270	5171.06	2.50	0.00	0.00
	300	5160.14	2.50	0.00	0.00
	330	6687.84	5.13	0.01	0.01
	360	5870.57	4.51	0.01	0.01

Πίνακας 76: Αποδόσεις πειράματος 13, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.8, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
13A	75.77
13B	67.30

5.2.3.2 Πείραμα 14

Πίνακας 77: Πείραμα 14, η αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00
15	781.13
30	849.66
45	768.59
60	1173.41
90	2310.94
120	1199.63
150	2753.97
180	3003.81
210	3593.31
270	3162.04
330	4479.24
360	4562.31
390	5139.49
420	4602.42
450	4726.44

Πίνακας 78: Πείραμα 14, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

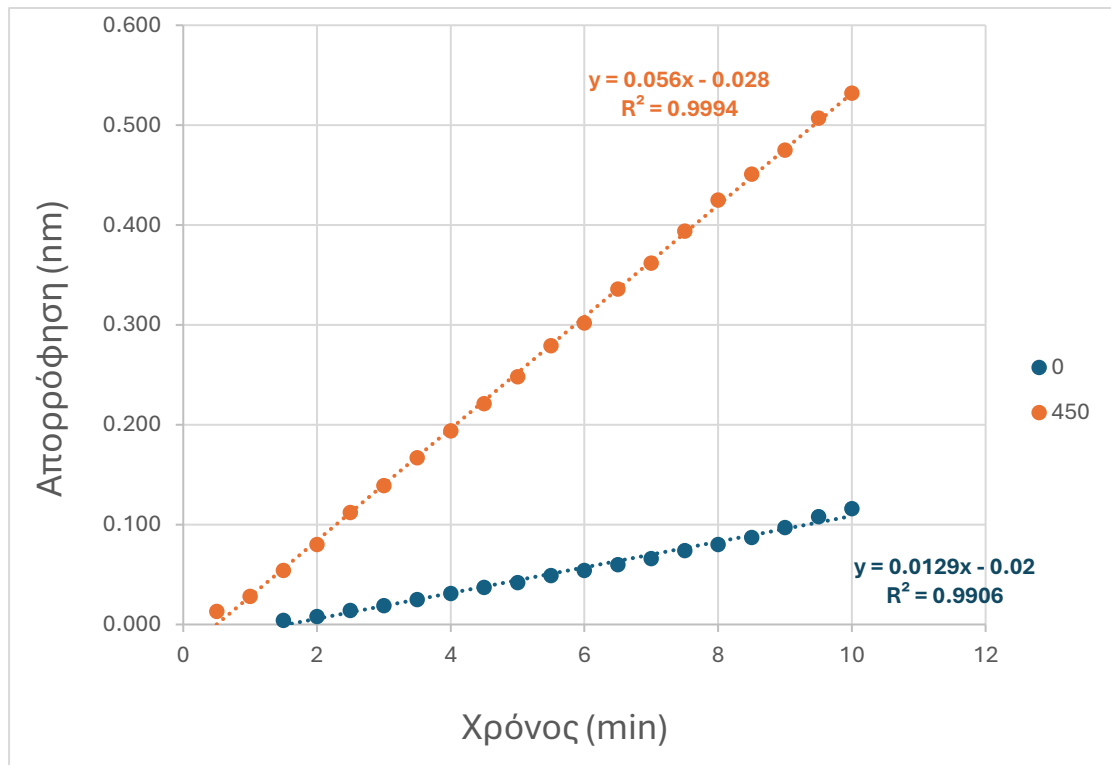
ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$CO_2(aq)$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
14	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	15	107.19	0.00	0.00	0.00
	30	263.62	0.01	0.00	0.00
	45	242.53	0.01	0.00	0.00
	60	767.29	0.07	0.00	0.00
	90	1808.13	0.22	0.00	0.00
	120	1307.67	0.32	0.00	0.00
	150	3570.66	1.09	0.00	0.00
	180	4573.84	2.21	0.00	0.00
	210	5666.32	2.74	0.00	0.00
	270	5383.60	3.28	0.00	0.00
	330	9029.79	10.98	0.01	0.01
	360	9894.95	19.07	0.02	0.02
	390	11565.41	22.29	0.03	0.03
	420	10987.64	33.57	0.04	0.04

	450	11345.42	34.66	0.05	0.05
--	-----	----------	-------	------	------

Πίνακας 79: Απόδοση πειράματος 14, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 100mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
14	98.24

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσει του χρόνου. Κάθε τιμή της απορρόφησης έχει υπολογιστεί αφαιρώντας από την ίδια, την τιμή του τυφλού. Ο στόχος δημιουργίας αυτού του διαγράμματος είναι για να βρεθεί ο συντελεστής της εξίσωσης (30) που ισοδυναμεί κάθε φορά με την κλίση της κάθε εξίσωσης ευθείας, για να υπολογιστεί μετέπειτα η ενεργότητα συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, κάθε εξίσωση ευθείας αντιπροσωπεύεται με βάση τον χρόνο που έγινε η δειγματοληψία, ο οποίος εμφανίζεται στο υπόμνημα του σχήματος. Στην προκειμένη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 2 χρόνους, στην αρχή και στο τέλος του πειράματος.



Σχήμα 25: Απορρόφηση της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσει χρόνου στο Πείραμα 14

5.2.3.3 Πείραμα 15

Πίνακας 80: Πείραμα 15, η αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00
25	840.86
55	1476.58
85	1647.25
115	2583.34
145	4049.67
205	3472.38
235	3321.38
265	4006.20
295	4471.53
325	4537.33
355	4613.99
385	4645.13
415	4884.46
450	5217.38

Πίνακας 81: Πείραμα 15, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

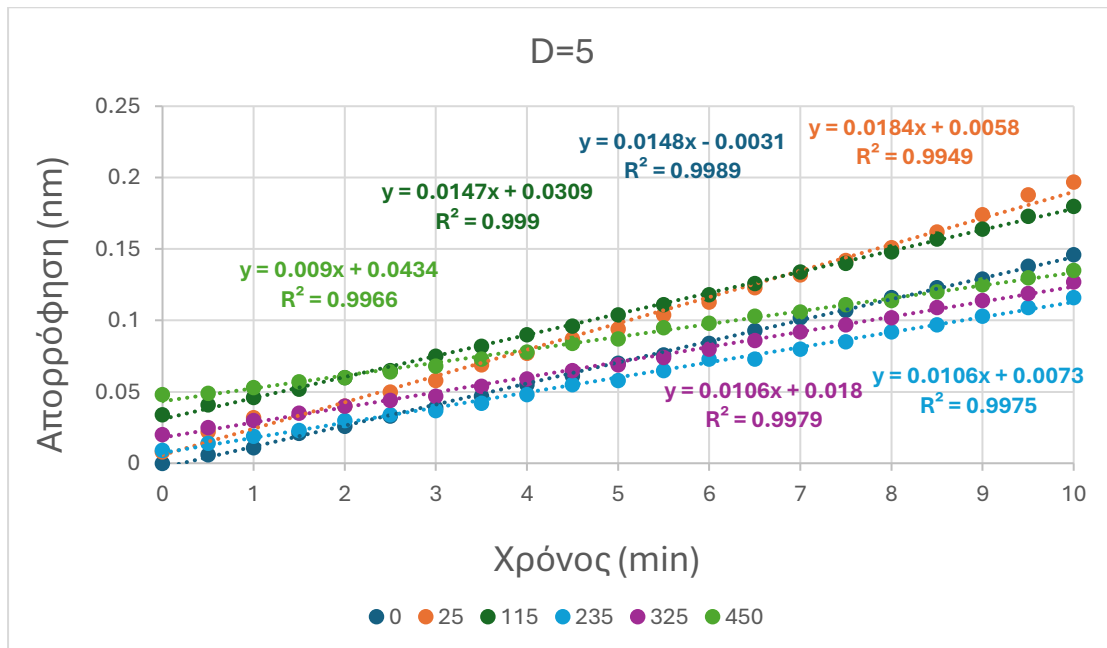
ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$CO_2(aq)$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
15	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	25	213.63	0.01	0.00	0.00
	55	660.48	0.04	0.00	0.00
	85	1198.04	0.15	0.00	0.00
	115	2210.51	0.34	0.00	0.00
	145	4453.54	1.08	0.00	0.00
	205	4593.76	1.77	0.00	0.00
	235	4850.60	2.35	0.00	0.00
	265	6066.90	2.94	0.00	0.00
	295	7760.00	5.96	0.01	0.01
	325	8091.76	6.21	0.01	0.01

	355	8861.82	8.56	0.01	0.01
	385	9499.55	11.55	0.02	0.02
	415	10680.39	16.35	0.02	0.02
	450	11372.77	17.41	0.02	0.02

Πίνακας 82: Απόδοση πειράματος 15, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με προσθήκη 50mg/L ενζύμου καρβονικής ανυδράσης με πληρωτικό υλικό, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
15	99.54

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσει του χρόνου. Κάθε τιμή της απορρόφησης έχει υπολογιστεί αφαιρώντας από την ίδια, την τιμή του τυφλού. Ο στόχος δημιουργίας αυτού του διαγράμματος είναι για να βρεθεί ο συντελεστής της εξίσωσης (30) που ισοδυναμεί κάθε φορά με την κλίση της κάθε εξίσωσης ευθείας, για να υπολογιστεί μετέπειτα η ενεργότητα συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, κάθε εξίσωση ευθείας αντιπροσωπεύεται με βάση τον χρόνο που έγινε η δειγματοληψία, ο οποίος εμφανίζεται στο υπόμνημα του σχήματος.



Σχήμα 26: Απορρόφηση της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσει χρόνου στο Πείραμα 15

5.2.3.4 Πείραμα 16

Πίνακας 83: Πείραμα 16, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
16	0	11.5 ± 0.0	6.17 ± 1.03	0.00 ± 0.00	201.18 ± 65.58	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	10.9 ± 0.1	6.73 ± 0.17	1462.50 ± 208.60	193.08 ± 1.87	1192.50 ± 130.81	270.00 ± 339.41
	60	10.6 ± 0.1	6.68 ± 0.01	3387.50 ± 1354.11	178.43 ± 22.31	2505.00 ± 1548.56	882.50 ± 194.45
	90	10.4 ± 0.1	6.92 ± 0.02	4877.50 ± 915.70	180.80 ± 14.21	3840.00 ± 1739.48	1037.50 ± 823.78
	120	10.2 ± 0.1	6.79 ± 0.11	5675.00 ± 516.19	200.50 ± 21.50	5107.50 ± 1375.32	1175.00
	150	10.0 ± 0.1	6.84 ± 0.03	6650.00 ± 431.34	223.50 ± 10.18	6165.00 ± 2276.88	1790.00
	180	9.9 ± 0.2	6.89 ± 0.06	8095.00 ± 1831.41	198.45 ± 21.57	8392.50 ± 1078.34	117.50 ± 166.17
	240	9.7 ± 0.1	6.82 ± 0.12	8195.00 ± 127.28	215.50 ± 21.21	9022.50 ± 300.52	0.00 ± 0.00
	270	9.6 ± 0.1	6.75 ± 0.03	9237.50 ± 1318.75	240.53 ± 14.39	10645.00 ± 530.33	0.00 ± 0.00
	300	9.4 ± 0.0	6.76 ± 0.03	11337.50 ± 639.93	229.75 ± 35.07	11675.00 ± 890.95	0.00 ± 0.00
	330	9.3 ± 0.1	6.69 ± 0.09	10505.00 ± 1187.94	280.70 ± 117.66	9567.50 ± 2534.98	1890.00
	360	9.3 ± 0.0	6.63 ± 0.13	12510.00 ± 1499.07	224.50 ± 14.42	12700.00 ± 629.33	425.00
	390	9.2 ± 0.0	6.53 ± 0.11	12430.00 ± 1329.36	206.73 ± 19.48	12832.50 ± 406.59	250.00

Πίνακας 84: Πείραμα 16, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	678.89 ± 65.60
60	1401.41 ± 838.58
90	2107.03 ± 916.67
120	2743.13 ± 666.35
150	3219.52 ± 1074.35
180	4276.99 ± 371.03
240	4516.63 ± 371.22
270	5141.99 ± 75.68
300	5486.17 ± 8.64
330	4467.50 ± 1468.85
360	5568.92 ± 308.09
390	5687.75 ± 360.76

Πίνακας 85: Πείραμα 16, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
16A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	271.93	0.01	0.00	0.00
	65	1449.72	0.18	0.00	0.00
	95	2618.84	0.50	0.00	0.00
	125	3822.12	1.17	0.00	0.00
	155	5662.68	2.74	0.00	0.00
	185	7408.01	5.68	0.01	0.01
	225	7417.83	7.17	0.01	0.01
	255	9586.54	11.66	0.02	0.02
	290	10993.08	16.83	0.02	0.02
	325	7220.73	17.52	0.02	0.02
	360	11999.00	23.13	0.03	0.03
	390	12184.69	29.57	0.04	0.04
16B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	277.83	0.02	0.00	0.00
	60	491.77	0.05	0.00	0.00
	90	1198.22	0.18	0.00	0.00
	120	2135.88	0.41	0.00	0.00
	150	2863.44	0.87	0.00	0.00
	180	5192.65	2.00	0.00	0.00
	240	7472.74	5.73	0.01	0.01
	270	8647.11	8.35	0.01	0.01
	300	9867.42	15.11	0.02	0.02
	330	10148.83	15.54	0.02	0.02
	360	11186.59	21.56	0.03	0.03
	390	11650.68	28.27	0.04	0.04

Πίνακας 86: Αποδόσεις πειράματος 16, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με πληρωτικό υλικό, με pH 11.5, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
16A	99.47
16B	98.44

5.2.3.5 Πείραμα 18

Πίνακας 87: Πείραμα 18, η αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00
45	746.91
60	691.69
90	2756.37
130	3434.33
160	3833.11
220	5370.21
250	5582.08
280	6403.09
310	6640.09
340	6419.18
370	6300.66
410	6637.18
450	7251.94

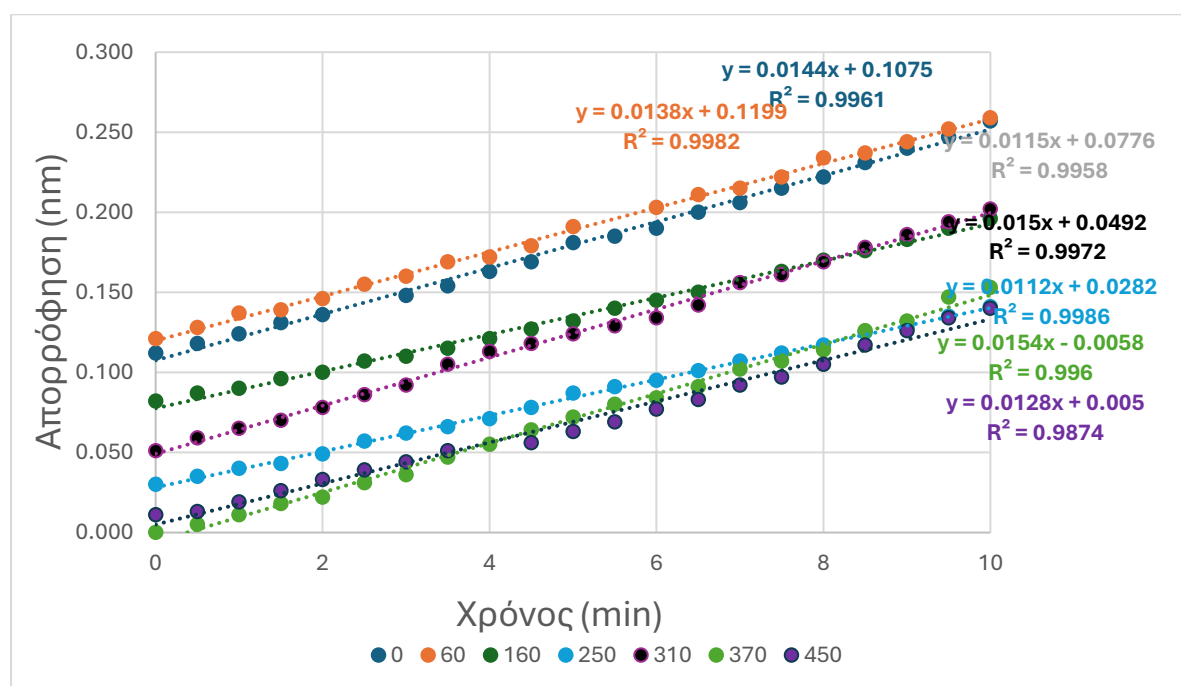
Πίνακας 88: Πείραμα 18, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $CO_2(aq)$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$CO_2(aq)$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
18	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	45	329.61	0.02	0.00	0.00
	60	359.63	0.03	0.00	0.00
	90	2311.51	0.35	0.00	0.00
	130	3636.24	0.88	0.00	0.00
	160	4937.44	1.90	0.00	0.00
	220	8094.69	4.93	0.01	0.01
	250	9022.31	6.92	0.01	0.01
	280	11101.48	10.73	0.01	0.01
	310	12556.50	19.23	0.02	0.02
	340	12471.63	19.10	0.02	0.02
	370	12925.51	24.92	0.03	0.03
	410	14320.72	34.75	0.05	0.05
	450	15864.76	48.47	0.06	0.06

Πίνακας 89: Απόδοση πειράματος 18, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα με προσθήκη ενζύμου καρβονικής 50mg/L με πληρωτικό υλικό, με pH 11.3, ροή εισόδου 0.1 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
18	99.61

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της απορρόφησης της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσει του χρόνου. Κάθε τιμή της απορρόφησης έχει υπολογιστεί αφαιρώντας από την ίδια, την τιμή του τυφλού. Ο στόχος δημιουργίας αυτού του διαγράμματος είναι για να βρεθεί ο συντελεστής της εξίσωσης (30) που ισοδυναμεί κάθε φορά με την κλίση της κάθε εξίσωσης ευθείας, για να υπολογιστεί μετέπειτα η ενεργότητα συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, κάθε εξίσωση ευθείας αντιπροσωπεύεται με βάση τον χρόνο που έγινε η δειγματοληψία, ο οποίος εμφανίζεται στο υπόμνημα του σχήματος.



Σχήμα 27: Απορρόφηση της παρα-νιτροφαινόλης στα 348nm συναρτήσει χρόνου στο Πείραμα 18

5.2.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης L/G σε διάλυμα K_2CO_3

Τα πειράματα 11, 13 και 16 έχουν αναφερθεί στις ενότητες 5.2.2.4, 5.2.3.1 και 5.2.3.4 αντίστοιχα, για αυτό τον λόγο δεν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και σε αυτή την ενότητα.

5.2.4.1 Πείραμα 17

Πίνακας 90: Πείραμα 17, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
17	0	12.1 ± 0.1	6.65 ± 0.27	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	11.0 ± 0.1	7.07 ± 0.06	1367.50 ± 420.73	0.00 ± 0.00	815.00 ± 0.00	552.50 ± 420.73
	70	10.8 ± 0.1	6.98 ± 0.01	1270.00	0.00 ± 0.00	1660.00 ± 572.76	15.00
	115	10.4 ± 0.1	6.39 ± 0.17	3972.50 ± 590.43	0.00 ± 0.00	3845.00 ± 438.41	127.50 ± 152.03
	145	10.3 ± 0.1	6.73 ± 0.00	4992.50 ± 208.60	0.00 ± 0.00	4325.00 ± 714.18	667.50 ± 922.77
	180	10.2 ± 0.1	6.68 ± 0.04	4142.50 ± 180.31	0.00 ± 0.00	5185.00 ± 509.12	0.00 ± 0.00
	210	10.0 ± 0.0	6.68 ± 0.08	5460.00 ± 1096.02	0.00 ± 0.00	6497.50 ± 399.52	0.00 ± 0.00
	240	10.0 ± 0.1	6.65 ± 0.21	5612.50 ± 1269.26	0.00 ± 0.00	6740.00 ± 445.48	0.00 ± 0.00
	300	9.8 ± 0.0	6.67 ± 0.00	6280.00 ± 3754.74	0.00 ± 0.00	8422.50 ± 809.64	0.00 ± 0.00
	330	9.7 ± 0.0	6.88 ± 0.11	6905.00 ± 1131.37	0.00 ± 0.00	7817.50 ± 1792.52	0.00 ± 0.00
	360	9.6 ± 0.0	6.66 ± 0.06	8775.00 ± 480.83	0.00 ± 0.00	9805.00 ± 197.99	0.00 ± 0.00
	390	9.5 ± 0.0	6.76 ± 0.03	10517.50 ± 456.08	0.00 ± 0.00	10987.50 ± 159.10	0.00 ± 0.00
	420	9.5 ± 0.0	6.66 ± 0.20	9440.00 ± 763.68	0.00 ± 0.00	11052.50 ± 434.87	0.00 ± 0.00
	450	9.4 ± 0.1	6.89 ± 0.21	10205.00 ± 650.54	0.00 ± 0.00	11932.50 ± 364.16	0.00 ± 0.00

Πίνακας 91: Πείραμα 17, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	457.92 ± 3.71
70	918.58 ± 320.28
115	2017.40 ± 151.66
145	2204.33 ± 260.38
180	2543.08 ± 122.87
210	3061.71 ± 11.49
240	3068.43 ± 3.44
300	3641.84 ± 80.94
330	3256.34 ± 470.01
360	3890.74 ± 389.55
390	4171.31 ± 467.99
420	3998.69 ± 279.51
450	4319.20 ± 578.69

Πίνακας 92: Πείραμα 17, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
17A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	40	172.47	0.01	0.00	0.00
	65	374.55	0.03	0.00	0.00
	95	992.25	0.10	0.00	0.00
	155	2146.21	0.41	0.00	0.00
	185	2770.20	0.67	0.00	0.00
	215	3485.79	1.06	0.00	0.00
	245	4614.17	1.77	0.00	0.00
	275	5138.29	2.49	0.00	0.00
	305	6937.75	4.23	0.01	0.01
	335	7351.36	5.64	0.01	0.01
	365	8137.72	7.86	0.01	0.01
	395	9460.40	11.51	0.01	0.01
	420	9882.31	12.02	0.02	0.02
	450	10156.34	12.35	0.02	0.02
17B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	118.04	0.00	0.00	0.00
	70	521.56	0.03	0.00	0.00
	115	1423.55	0.17	0.00	0.00
	145	1973.17	0.38	0.00	0.00
	180	2767.33	0.67	0.00	0.00
	210	4229.66	1.63	0.00	0.00
	240	4372.58	1.68	0.00	0.00
	300	6054.63	3.69	0.00	0.00
	330	5300.10	4.07	0.01	0.01
	360	8373.47	8.09	0.01	0.01
	390	9656.13	11.74	0.02	0.02
	420	9347.31	11.37	0.01	0.01
	450	11127.26	21.45	0.03	0.03

Πίνακας 93: Αποδόσεις πειράματος 17, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.25 L/min και αρχικό όγκο 600mL

Πείραμα	Απόδοση (%)
17A	35.40
17B	42.81

5.2.5 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μελέτης επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού

Το πείραμα 13, όπως αναφέρθηκε έχει παρουσιαστεί στην ενότητα 5.2.3.1, για αυτό το λόγο δεν αναφέρεται και σε αυτή την ενότητα.

5.2.5.1 Πείραμα 19

Πίνακας 94: Πείραμα 19, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
19	0	11.9 ± 0.0	6.71 ± 0.54	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	11.3 ± 0.1	6.87 ± 0.13	2800.00	0.00 ± 0.00	5.00	-
	60	10.8 ± 0.0	6.88 ± 0.18	2150.00 ± 2333.45	0.00 ± 0.00	1085.00 ± 586.90	3130.00
	90	10.6 ± 0.0	6.98 ± 0.12	3362.50 ± 2853.18	0.00 ± 0.00	1862.50 ± 943.99	4185.00
	120	10.5 ± 0.1	6.87 ± 0.14	4052.50 ± 3503.71	0.00 ± 0.00	2367.50 ± 1170.26	4990.00
	150	10.3 ± 0.1	6.70 ± 0.18	4385.00 ± 4016.37	0.00 ± 0.00	1537.50 ± 45.96	5720.00
	180	10.2 ± 0.1	6.68 ± 0.08	6185.00 ± 3344.62	0.00 ± 0.00	3705.00 ± 749.53	2480.00 ± 2595.08
	215	10.0 ± 0.1	6.59 ± 0.28	7385.00 ± 3387.04	0.00 ± 0.00	5510.00 ± 1286.93	1875.00 ± 2100.11
	270	9.9 ± 0.1	6.74 ± 0.08	8405.00 ± 3330.47	0.00 ± 0.00	6775.00 ± 2658.72	1630.00 ± 671.75
	300	9.8 ± 0.1	6.70 ± 0.08	7662.50 ± 4111.83	0.00 ± 0.00	6015.00 ± 3436.54	1647.50 ± 675.29
	335	9.7 ± 0.1	6.70 ± 0.01	8177.50 ± 2443.05	0.00 ± 0.00	5470.00 ± 1640.49	2707.50 ± 802.57
	360	9.6 ± 0.1	6.64 ± 0.03	11255.00 ± 4186.07	0.00 ± 0.00	6910.00 ± 1336.43	4345.00 ± 2849.64
	390	9.5 ± 0.1	6.74 ± 0.02	11030.00 ± 3797.16	0.00 ± 0.00	8362.50 ± 484.37	2667.50 ± 3312.80
	420	9.5	6.75	9315.00	0.00	8980.00	335.00

Πίνακας 95: Πείραμα 19, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	2.75
60	786.34
90	956.38 ± 486.01
120	1165.97 ± 576.81
150	748.77 ± 52.96
180	1602.37 ± 315.12

215	2278.38 ± 527.80
270	2579.38 ± 1129.05
300	2206.78 ± 1315.87
335	1862.24 ± 691.63
360	2115.54 ± 540.76
390	2460.17 ± 453.09
420	2421.81

Πίνακας 96: Πείραμα 19, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
19A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.59	0.00	0.00	0.00
	60	378.86	0.02	0.00	0.00
	90	882.39	0.09	0.00	0.00
	120	1286.63	0.16	0.00	0.00
	150	810.96	0.16	0.00	0.00
	180	1820.99	0.44	0.00	0.00
	215	3130.56	1.20	0.00	0.00
	240	2305.13	1.12	0.00	0.00
	270	3565.12	1.73	0.00	0.00
	300	2611.02	1.26	0.00	0.00
	335	3324.26	2.03	0.00	0.00
	360	4826.73	3.70	0.00	0.00
	390	6752.66	6.52	0.01	0.01
420	7811.90	9.50	0.01	0.01	
19B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	-	-	-	-
	60	169.22	0.01	0.00	0.00
	90	416.78	0.04	0.00	0.00
	120	707.00	0.11	0.00	0.00
	150	863.18	0.21	0.00	0.00
	180	2662.28	0.81	0.00	0.00
	210	4675.81	2.26	0.00	0.00
	270	6675.51	4.07	0.01	0.01
	300	6833.49	5.24	0.01	0.01
	330	5582.31	5.39	0.01	0.01
	365	6833.24	8.31	0.01	0.01
390	7776.90	11.91	0.02	0.02	

Πίνακας 97: Αποδόσεις πειράματος 19, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 11.9, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 300 RPM

Πείραμα	Απόδοση (%)
19A	58.73
19B	72.62

5.2.5.2 Πείραμα 2

Πίνακας 98: Πείραμα 2, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
2	0	12.1 ± 0.1	6.36 ± 0.29	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	11.2 ± 0.0	6.37 ± 0.01	707.50 ± 880.35	0.00 ± 0.00	345.00 ± 289.91	1190.00
	60	11.0 ± 0.1	7.03 ± 0.06	2017.50 ± 689.43	0.00 ± 0.00	1690.00 ± 1004.09	327.50 ± 314.66
	90	10.8 ± 0.1	7.00 ± 0.08	2152.50 ± 689.43	0.00 ± 0.00	1337.50 ± 173.24	815.00 ± 516.19
	120	10.6 ± 0.0	6.83 ± 0.06	2170.00 ± 685.89	0.00 ± 0.00	2512.50 ± 130.81	50.00
	180	10.5 ± 0.1	6.93 ± 0.32	3535.00 ± 890.95	0.00 ± 0.00	4170.00 ± 162.63	110.00
	210	10.3 ± 0.0	7.29 ± 0.83	4562.50 ± 654.07	0.00 ± 0.00	4722.50 ± 1255.11	265.00
	240	10.3 ± 0.1	6.90 ± 0.20	5467.50 ± 1226.83	0.00 ± 0.00	6010.00 ± 1555.63	0.00 ± 0.00
	270	10.2 ± 0.1	6.92 ± 0.11	5990.00 ± 127.28	0.00 ± 0.00	5550.00 ± 586.90	945.00
	300	10.1 ± 0.1	6.91 ± 0.06	5932.50 ± 965.20	0.00 ± 0.00	5160.00 ± 275.77	1650.00
	330	10.0 ± 0.1	6.66 ± 0.15	6245.00 ± 593.97	0.00 ± 0.00	5182.50 ± 2096.57	2125.00
	360	9.9 ± 0.0	6.84 ± 0.00	6387.50 ± 1021.77	0.00 ± 0.00	6222.50 ± 1665.24	2065.00
	390	9.9 ± 0.1	6.75 ± 0.16	7627.50 ± 81.32	0.00 ± 0.00	7360.00 ± 1393.00	1310.00
	420	9.9 ± 0.1	6.80 ± 0.06	7732.50 ± 463.15	0.00 ± 0.00	6932.50 ± 1198.55	1975.00

Πίνακας 99: Πείραμα 2, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	195.55 ± 164.86
60	931.23 ± 540.17
90	740.26 ± 104.58

120	1317.42 ± 78.23
180	2118.49 ± 49.66
210	2337.43 ± 569.91
240	2862.55 ± 687.48
270	2589.89 ± 295.16
300	2315.29 ± 188.61
330	2245.82 ± 941.62
360	2568.48 ± 788.23
390	2910.27 ± 677.93
420	2767.01 ± 588.69

Πίνακας 100: Πείραμα 2, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
2A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	65.22	0.00	0.00	0.00
	60	207.39	0.01	0.00	0.00
	90	306.88	0.02	0.00	0.00
	120	908.55	0.09	0.00	0.00
	180	1861.60	0.29	0.00	0.00
	210	1980.92	0.38	0.00	0.00
	240	2536.19	0.49	0.00	0.00
	270	3421.17	0.83	0.00	0.00
	300	3366.35	1.03	0.00	0.00
	330	4535.91	1.74	0.00	0.00
	360	5389.56	2.61	0.00	0.00
	390	6077.82	2.94	0.00	0.00
	420	5666.32	2.74	0.00	0.00
2B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	16.60	0.00	0.00	0.00
	60	421.79	0.02	0.00	0.00
	90	435.74	0.03	0.00	0.00
	120	844.02	0.08	0.00	0.00
	150	1725.58	0.21	0.00	0.00
	210	2897.77	0.56	0.00	0.00
	240	4077.87	0.99	0.00	0.00
	270	3228.05	0.99	0.00	0.00
	300	3378.96	1.30	0.00	0.00
	330	2694.78	1.30	0.00	0.00
	360	3674.37	1.78	0.00	0.00
	390	4916.97	3.00	0.00	0.00
	420	4693.30	2.86	0.00	0.00

Πίνακας 101: Αποδόσεις πειράματος 2, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, με pH 12.1, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 200 RPM

Πείραμα	Απόδοση (%)
2A	77.20
2B	57.01

5.2.5.3 Πείραμα 6

Πίνακας 102: Πείραμα 6, μέσος όρος των 2 επαναλήψεων και οι τυπικές αποκλίσεις για pH, DO, TC, TN, IC, TOC για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	pH	DO (mg/L)	Ολικός άνθρακας TC (mg/L)	Ολικό άζωτο TN (mg/L)	Ανόργανος άνθρακας IC (mg/L)	Οργανικός άνθρακας TOC(mg/L)
6	0	12.2 ± 0.3	6.56 ± 0.14	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	30	11.2 ± 0.1	6.58 ± 0.04	835.00	0.00 ± 0.00	950.00	0.00
	60	10.9 ± 0.1	6.61 ± 0.11	1435.00 ± 848.53	0.00 ± 0.00	1272.50 ± 1184.40	400.00
	90	10.6 ± 0.1	6.74 ± 0.15	5395.00	0.00 ± 0.00	3640.00	1755.00
	120	10.5 ± 0.1	6.88 ± 0.11	3555.00	0.00 ± 0.00	2660.00	895.00
	150	10.3 ± 0.0	6.90 ± 0.05	2695.00 ± 905.10	0.00 ± 0.00	2952.50 ± 420.73	340.00 ± 480.83
	180	10.2 ± 0.1	6.71 ± 0.03	5090.00 ± 905.10	0.00 ± 0.00	3772.50 ± 936.92	1317.50 ± 1842.01
	240	10.0 ± 0.0	6.62 ± 0.06	5495.00 ± 480.83	0.00 ± 0.00	5070.00 ± 1562.71	1870.00
	270	10.0 ± 0.1	6.53 ± 0.06	6292.50 ± 710.64	0.00 ± 0.00	5940.00 ± 2298.10	2480.00
	300	9.9 ± 0.0	6.60 ± 0.02	7545.00 ± 975.81	0.00 ± 0.00	7140.00 ± 1449.57	2120.00
	330	9.8 ± 0.0	6.56 ± 0.08	8445.00 ± 749.53	0.00 ± 0.00	8397.50 ± 894.49	1210.00
	360	9.8 ± 0.1	6.61 ± 0.02	8395.00 ± 1131.37	0.00 ± 0.00	9282.50 ± 1163.19	735.00

Πίνακας 103: Πείραμα 6, μέσος όρος 2 επαναλήψεων και η τυπική απόκλιση για την αθροιστική μάζα ανόργανου άνθρακα για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM

Χρόνος (min)	Αθροιστική μάζα IC (mg)
0	0.00 ± 0.00
30	543.49
60	1190.45
90	2010.27

120	1462.53
150	1409.15
180	1939.45 ± 476.38
240	2533.90 ± 774.66
270	2893.36 ± 1112.23
300	3377.07 ± 697.07
330	3855.03 ± 418.17
360	4268.61 ± 529.97

Πίνακας 104: Πείραμα 6, συγκεντρώσεις διαφόρων μορφών άνθρακα HCO_3^- , $\text{CO}_2(\text{aq})$, H_2CO_3 , CO_3^{2-} για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM

ΠΕΙΡΑΜΑ	Χρόνος (min)	HCO_3^- (mg/L)	$\text{CO}_2(\text{aq})$ (mg/L)	H_2CO_3	CO_3^{2-}
6A	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	137.59	0.00	0.00	0.00
	60	532.93	0.03	0.00	0.00
	90	1465.83	0.18	0.00	0.00
	120	1221.18	0.19	0.00	0.00
	150	1371.40	0.26	0.00	0.00
	180	1783.71	0.43	0.00	0.00
	240	2698.41	1.04	0.00	0.00
	270	3142.70	1.52	0.00	0.00
	300	4453.67	2.16	0.00	0.00
	330	5989.07	3.65	0.00	0.00
	360	6845.63	5.25	0.01	0.01
6B	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	-	-	-	-
	60	92.05	0.00	0.00	0.00
	90	-	-	-	-
	120	-	-	-	-
	150	1678.74	0.32	0.00	0.00
	210	2788.01	0.85	0.00	0.00
	240	4202.44	1.62	0.00	0.00
	270	5148.41	1.98	0.00	0.00
	300	5946.72	2.88	0.00	0.00
	330	6964.75	4.25	0.01	0.01
	360	7793.88	4.75	0.01	0.01

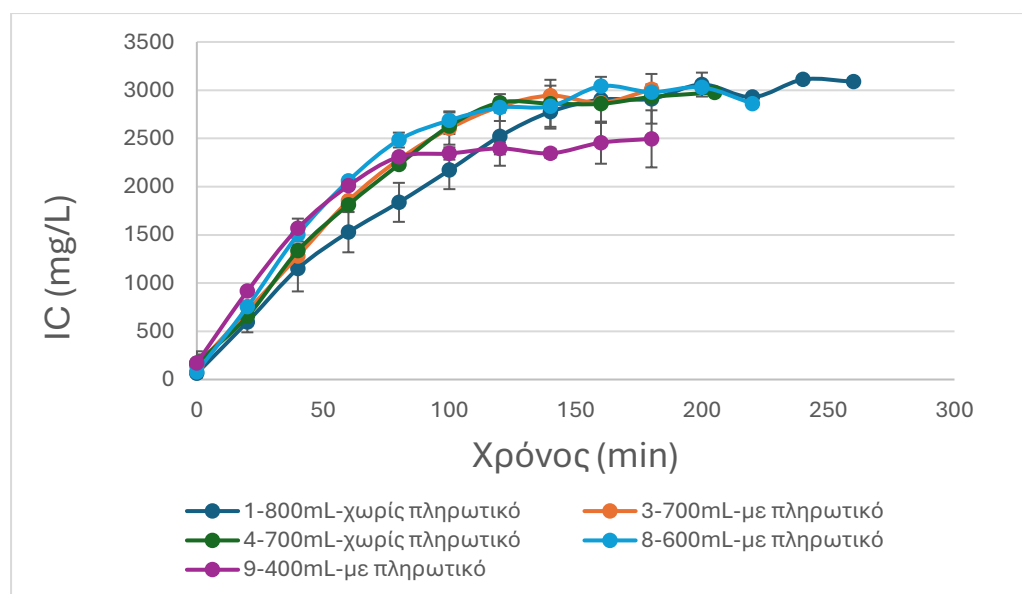
Πίνακας 105: Αποδόσεις πειράματος 6, για απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M με βάση απιονισμένο νερό με πληρωτικό υλικό, χωρίς την πάνω φυάλη, με pH 12.2, ροή εισόδου 0.1 L/min, αρχικό όγκο 600mL και ταχύτητα περιστροφής αντλίας στα 400 RPM

Πείραμα	Απόδοση (%)
6A	98.60
6B	99.20

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.3.1 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης λόγου L/G σε διάλυμα NH_3/NH_4Cl

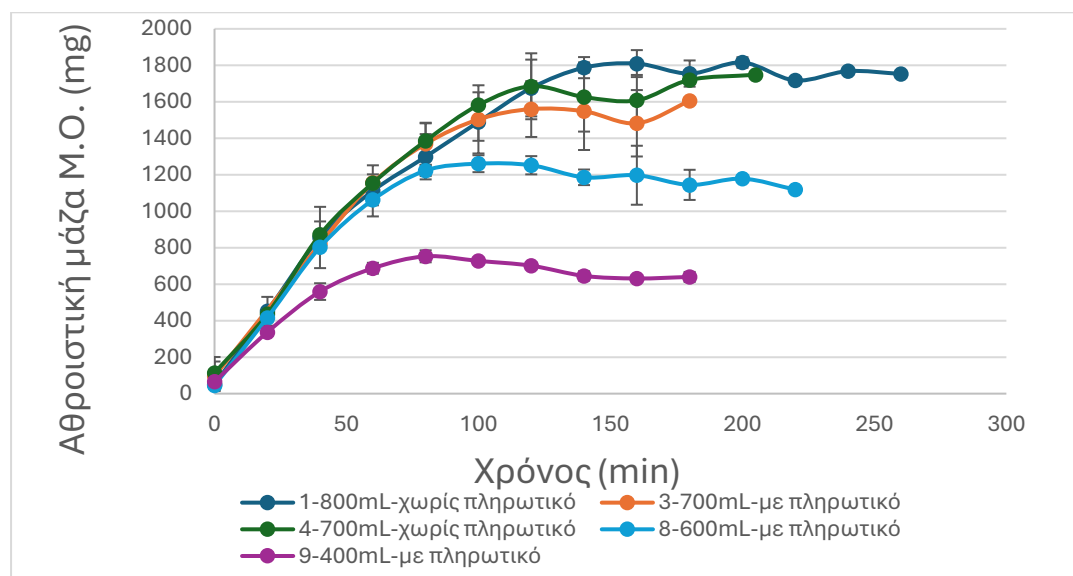
Σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9, του Μ.Ο. του ανόργανου άνθρακα ως προς το χρόνο διάρκειας του κάθε πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δημιουργείται πλατό και η συγκέντρωση του IC σταθεροποιείται. Το πείραμα τότε σταματάει, αφού θεωρείται ότι η συγκέντρωση δεσμευμένου ανόργανου άνθρακα έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της (βλ. Σχήμα 28).



Σχήμα 28: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9

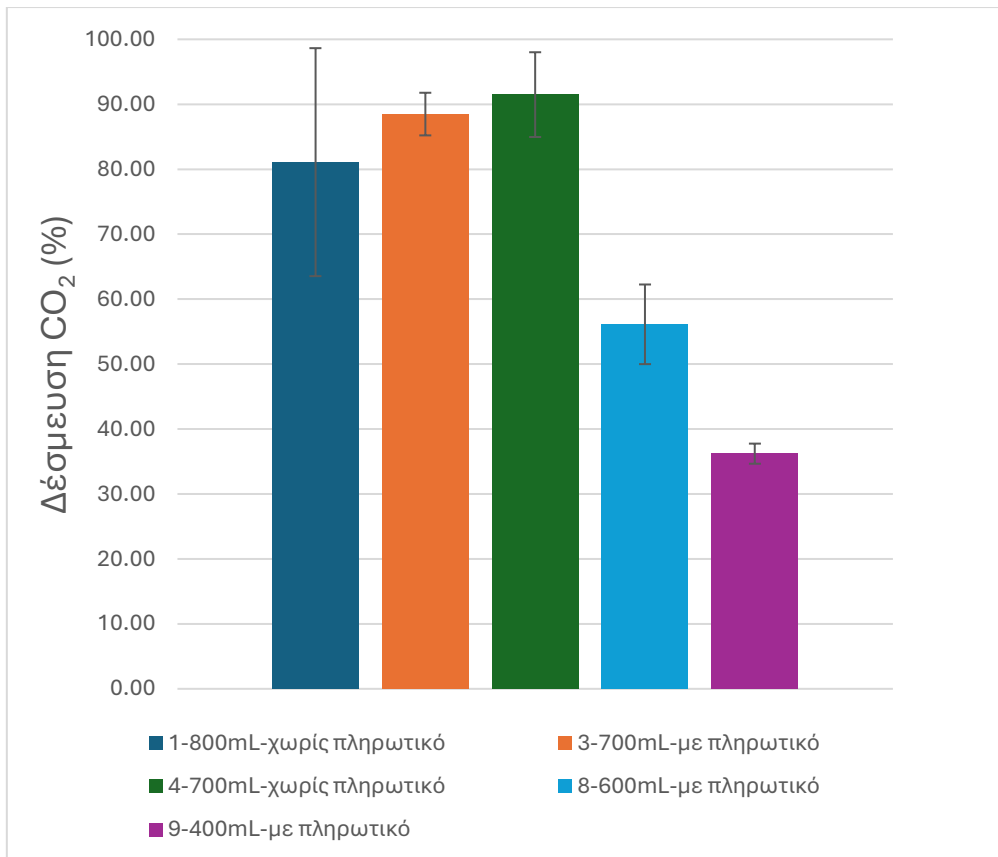
Επίσης, σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9, του Μ.Ο. της αθροιστικής μάζας ως προς το χρόνο διεξαγωγής του πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Η αθροιστική μάζα για κάθε μεμονωμένη επανάληψη αυξάνεται, ωστόσο επειδή

πρόκειται για μέσο όρο 2 επαναλήψεων φαίνονται στο διάγραμμα μερικές αυξομειώσεις (βλ. Σχήμα 29).



Σχήμα 29: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9

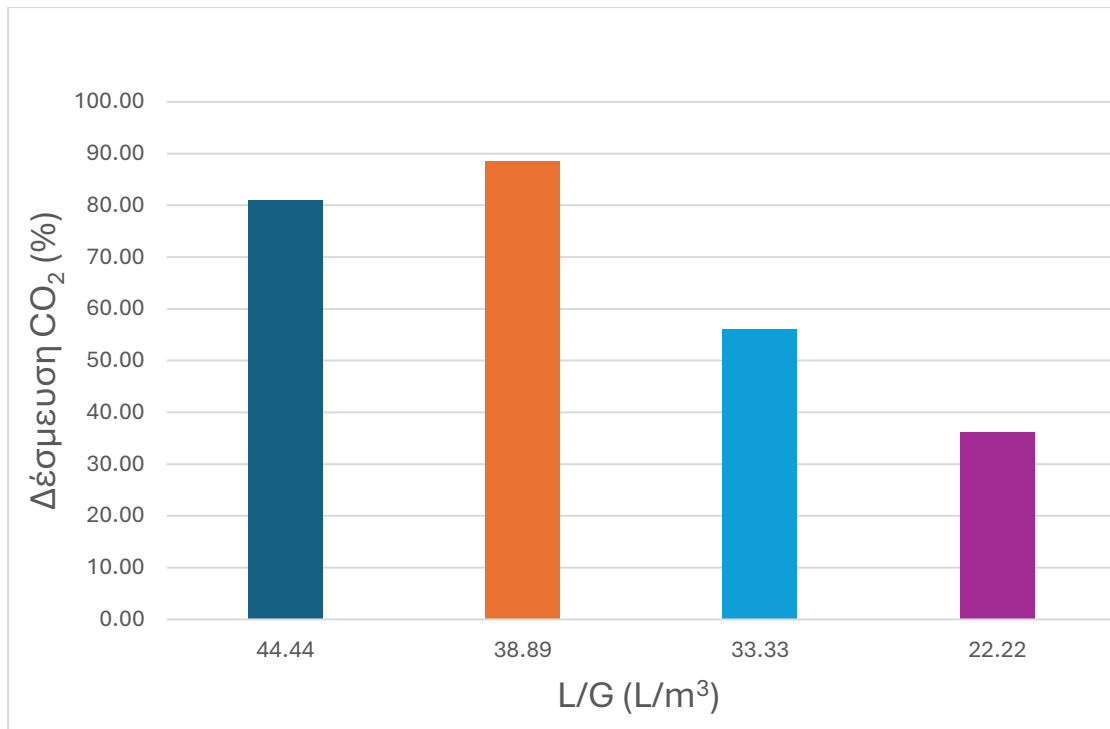
Στη συνέχεια, δημιουργείται το ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Σχήμα 30) του Μ.Ο. της απόδοσης των πειραμάτων 1, 3, 4, 8 και 9.



Σχήμα 30: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO₂ για τα πειράματα 1, 3, 4, 8 και 9

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι η χρήση του πληρωτικού υλικού δεν επηρεάζει την απόδοση σε μεγάλο βαθμό, αλλά ο παράγοντας που την επηρεάζει είναι ο όγκος του εκάστοτε διαλύματος, και κατ' επέκταση ο λόγος L/G.

Σε αυτή την κατηγορία πειραμάτων ο χρόνος παραμονής είναι ίσος, οπότε συγκρίνεται ο λόγος L/G. Η ροή εισόδου του αερίου είναι σταθερή και ίση με 0.1 L/min και για τα 5 πειράματα, οπότε τον λόγο L/G όπως έχει αναφερθεί τον επηρεάζει μόνο ο όγκος του διαλύματος απορρόφησης, εφόσον έχει θεωρηθεί σταθερός ο χρόνος πειράματος. Παρουσιάζονται όλα τα πειράματα, εκτός από το πείραμα 4, στο Σχήμα 31, για να γίνουν οι κατάλληλες συγκρίσεις.

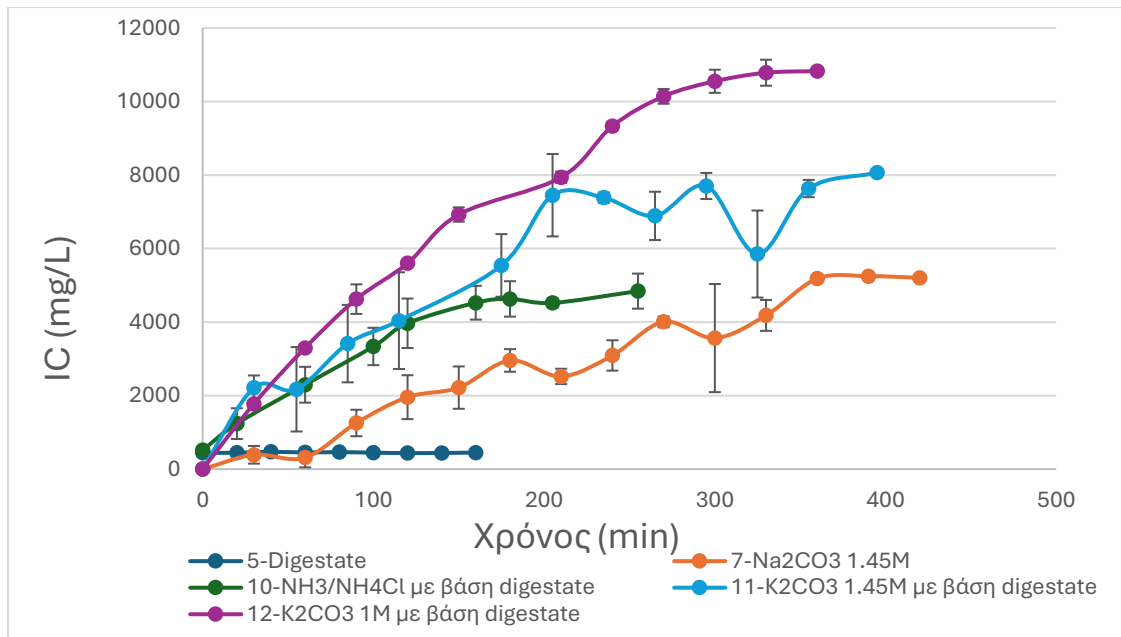


Σχήμα 31: Μέσος όρος αποδόσεων συναρτήσει του λόγου L/G για τα πειράματα 1, 3, 8 και 9

Διαπιστώνεται ότι στα αμμωνιακά διαλύματα, η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα είναι αποδοτικότερη όσο αυξάνεται ο λόγος L/G, με κορύφωση του λόγου όταν ο όγκος του απορροφητικού διαλύματος είναι ίσος με 700mL.

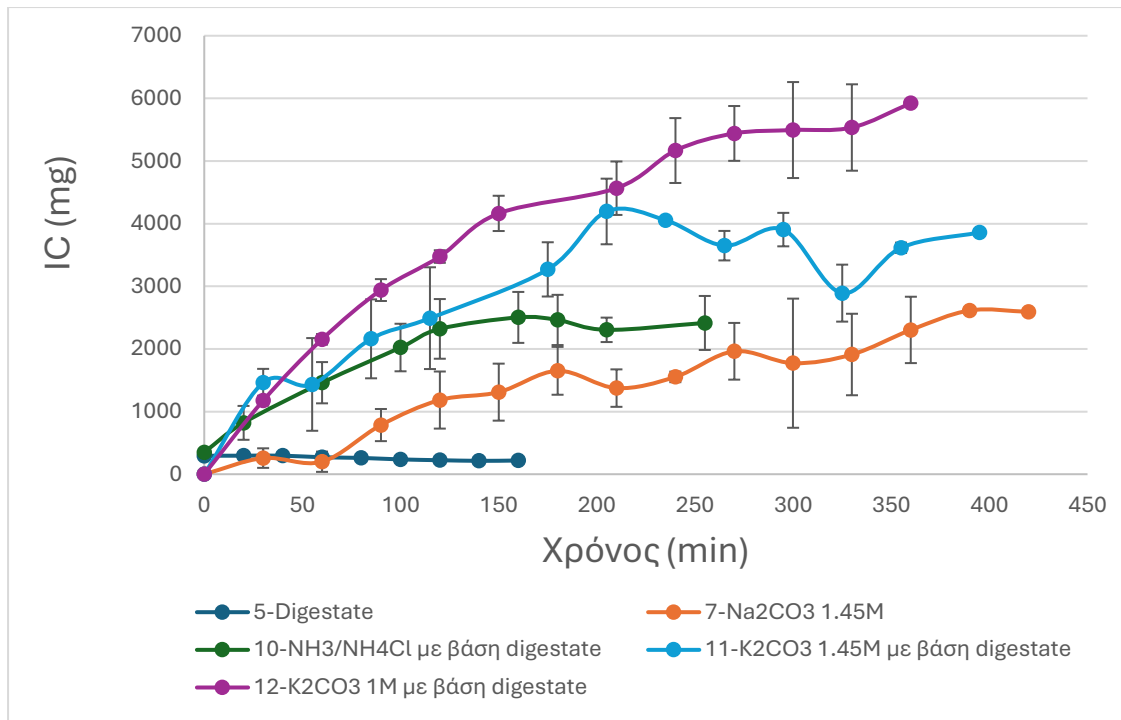
5.3.2 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης αναερόβιου χωνεύματος

Σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12, του Μ.Ο. του ανόργανου άνθρακα ως προς το χρόνο διάρκειας του κάθε πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δημιουργείται πλατό και η συγκέντρωση του ανόργανου άνθρακα IC σταθεροποιείται. Το πείραμα τότε σταματάει, αφού θεωρείται ότι η συγκέντρωση δεσμευμένου ανόργανου άνθρακα έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της (βλ. Σχήμα 32).



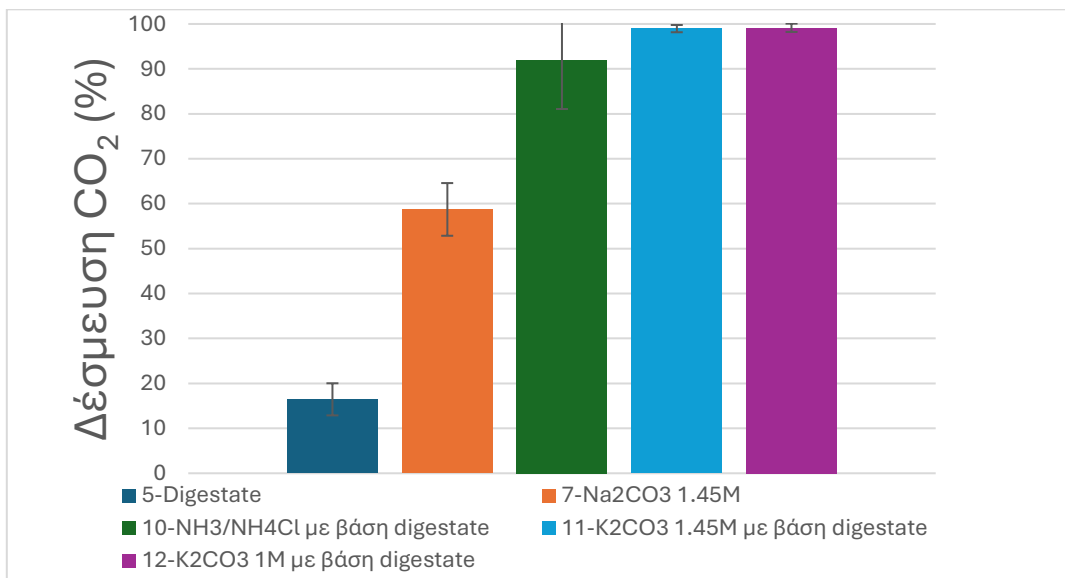
Σχήμα 32: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12

Επίσης, σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12, του Μ.Ο. της αθροιστικής μάζας ως προς το χρόνο διεξαγωγής του πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Η αθροιστική μάζα για κάθε μεμονωμένη επανάληψη αυξάνεται, ωστόσο επειδή πρόκειται για μέσο όρο 2 επαναλήψεων φαίνονται στο διάγραμμα μερικές αυξομειώσεις (βλ. Σχήμα 33).



Σχήμα 33: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12

Στη συνέχεια, δημιουργείται το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 34) του Μ.Ο. της απόδοσης δέσμευσης CO₂ των πειραμάτων 5, 7, 10, 11 και 12.



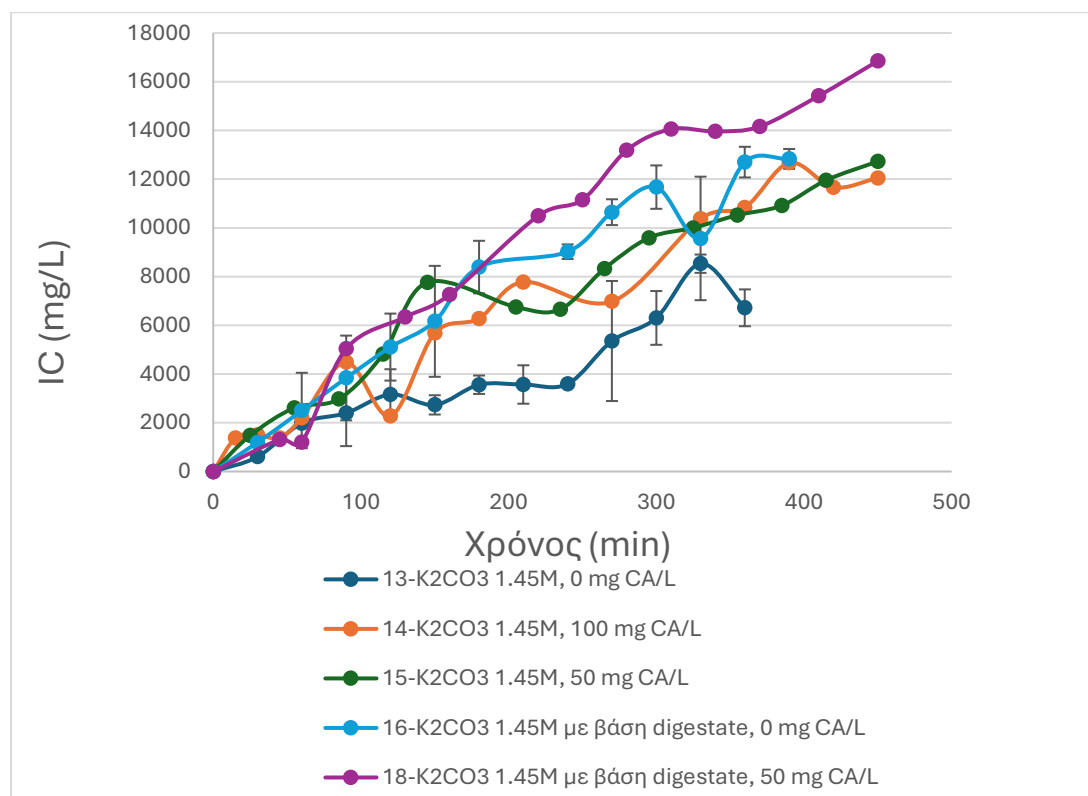
Σχήμα 34: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO₂ για τα πειράματα 5, 7, 10, 11 και 12

Είναι φανερό ότι η χρήση χωνεύματος ως βάση διαλύματος αυξάνει την απόδοση δέσμευσης CO₂ στα διαλύματα ανθρακικών σε σχέση με τα ίδια διαλύματα χωρίς χώνευμα. Ακόμη παρατηρείται ότι το αναερόβιο χώνευμα ως απορροφητικό διάλυμα δεν έχει τη δυνατότητα να δεσμεύσει το CO₂. Τέλος, σε σύγκριση με την

ενότητα 5.3.1, το πείραμα 3 σε σχέση με το πείραμα 10 παρουσιάζουν περίπου τις ίδιες αποδόσεις, με το 10 να είναι ελαφρώς πιο αποδοτικότερο από το 3. Επομένως, συμπεραίνεται ότι ακόμα και στα αμμωνιακά διαλύματα η χρήση του χωνεύματος ως βάση διαλύματος επηρεάζει θετικά την απόδοση.

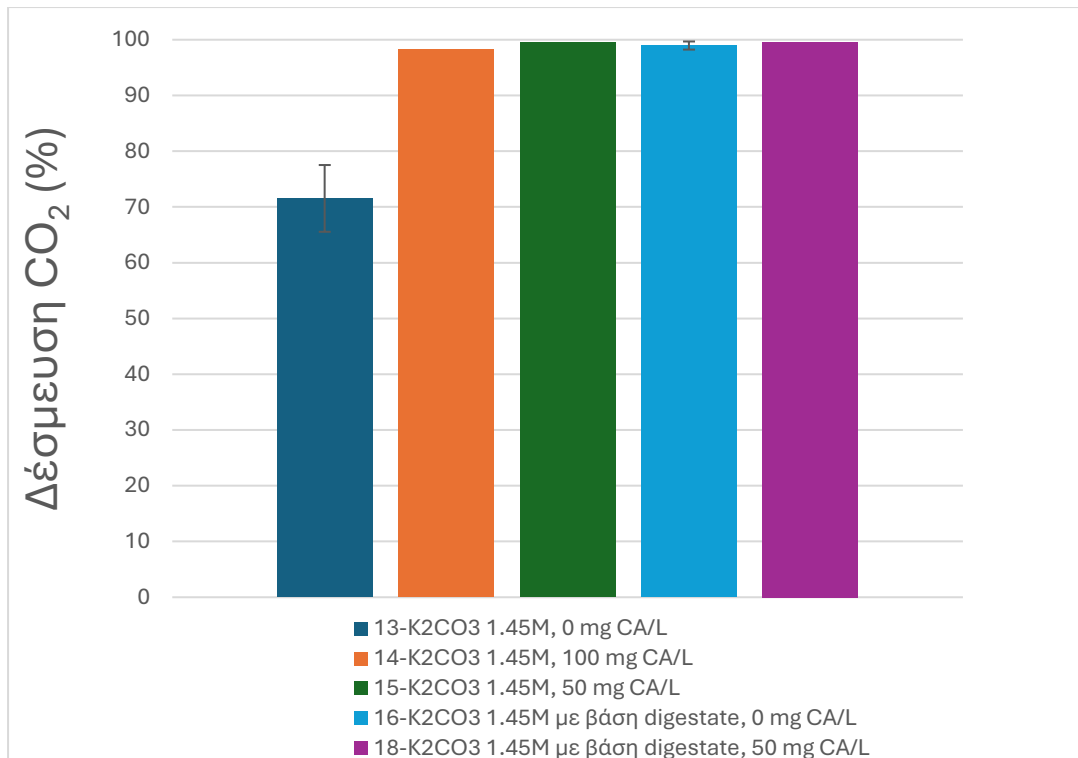
5.3.3 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης κατάλυσης με καρβονική ανυδράση

Σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18, του Μ.Ο. του ανόργανου άνθρακα ως προς το χρόνο διάρκειας του κάθε πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δημιουργείται πλατό και η συγκέντρωση του IC σταθεροποιείται. Το πείραμα τότε σταματάει, αφού θεωρείται ότι η συγκέντρωση δεσμευμένου ανόργανου άνθρακα έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της (βλ. Σχήμα 35).



Σχήμα 35: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18

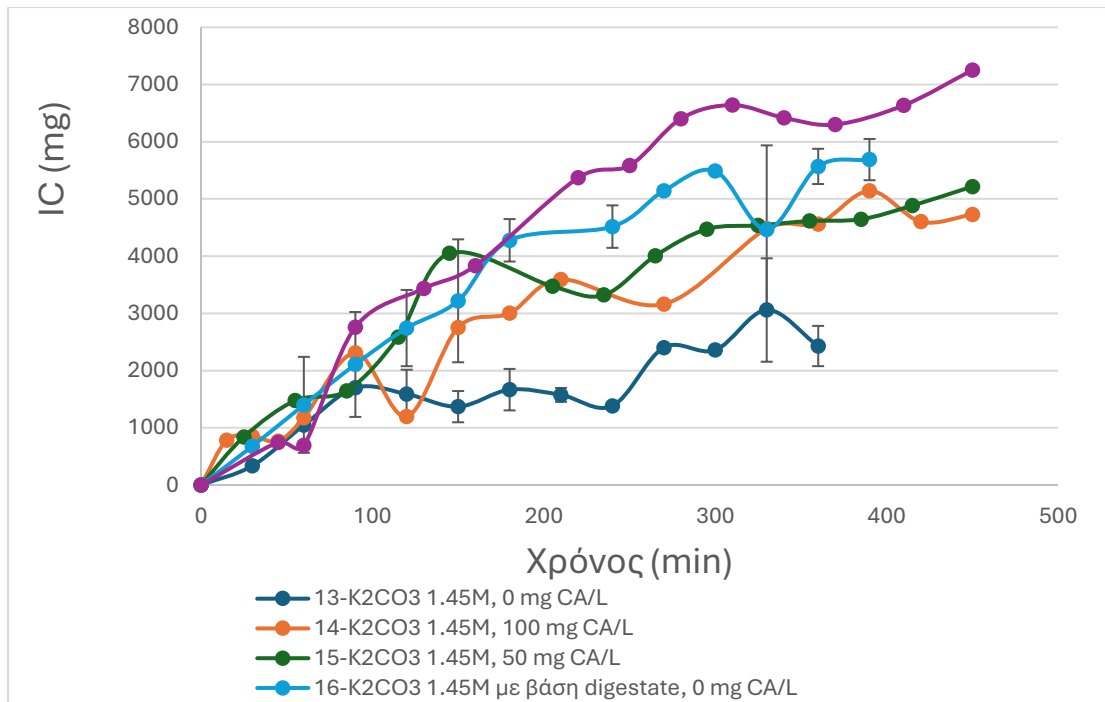
Στη συνέχεια, δημιουργείται το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 36) του Μ.Ο. της απόδοσης των πειραμάτων 13, 14, 15, 16 και 18.



Σχήμα 36: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO₂ για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18

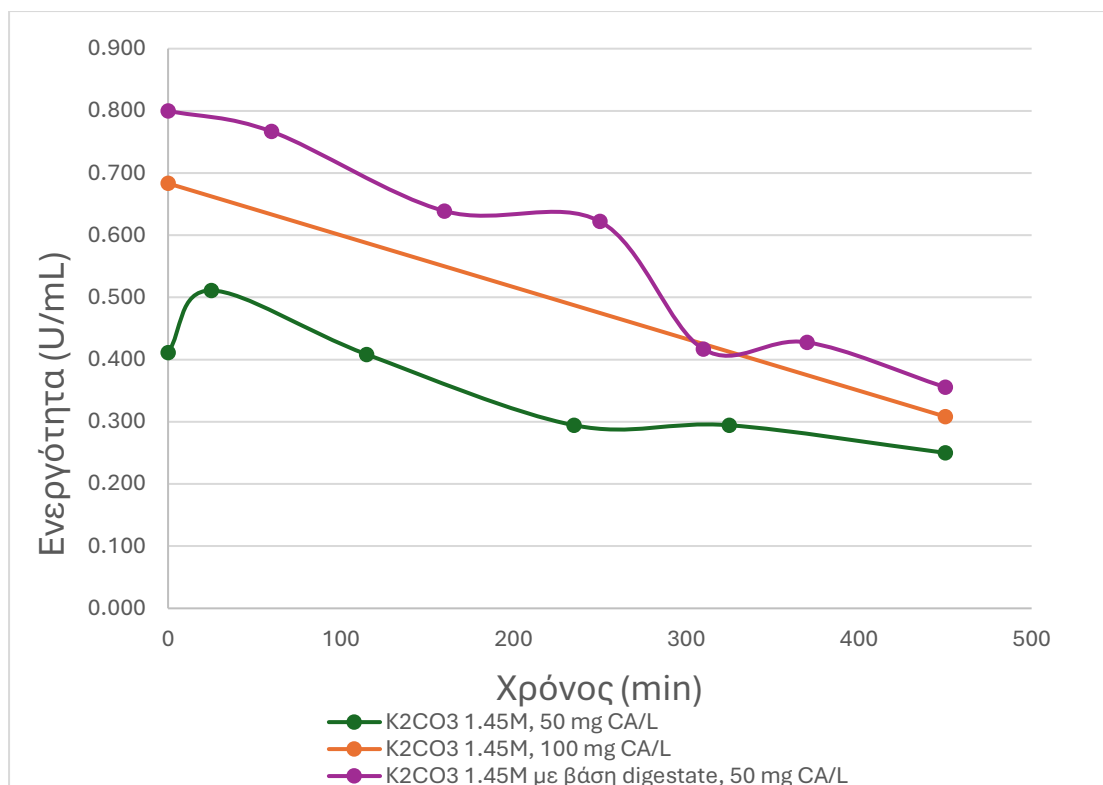
Για τα πειράματα με διάλυμα K₂CO₃ (1.45M), είναι σαφές ότι το ποσοστό δέσμευσης CO₂ μεγιστοποιείται με τη χρήση CA και στις δύο συγκεντρώσεις που εξετάστηκαν, 50mg/L και 100mg/L. Λόγω αυτού του αποτελέσματος και του υψηλού κόστους του ενζύμου, το CA χρησιμοποιήθηκε μόνο σε συγκέντρωση 50mg/L στο διάλυμα όπου το K₂CO₃ (1.45M) είναι διαλυμένο στο αναερόβιο χωνευμένο υπόλειμμα. Η τυπική απόκλιση δεν υπολογίστηκε για όλα τα πειράματα λόγω του υψηλού κόστους του ενζύμου και συνεπώς της δυσκολίας επανάληψης του πειράματος.

Δεδομένου ότι η απόδοση δέσμευσης άνθρακα είναι κοντά στο 100% στα περισσότερα πειράματα με χρήση CA, είναι χρήσιμο να υπολογιστεί η μάζα του CO₂ που απορροφάται ανά λεπτό, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του κινητικού ρυθμού αντίδρασης. Για το λόγο αυτό, η γραφική παράσταση της αθροιστικής μάζας άνθρακα σε σχέση με τον πειραματικό χρόνο απεικονίζεται για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18 (βλ. Σχήμα 37).



Σχήμα 37: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 13, 14, 15, 16 και 18

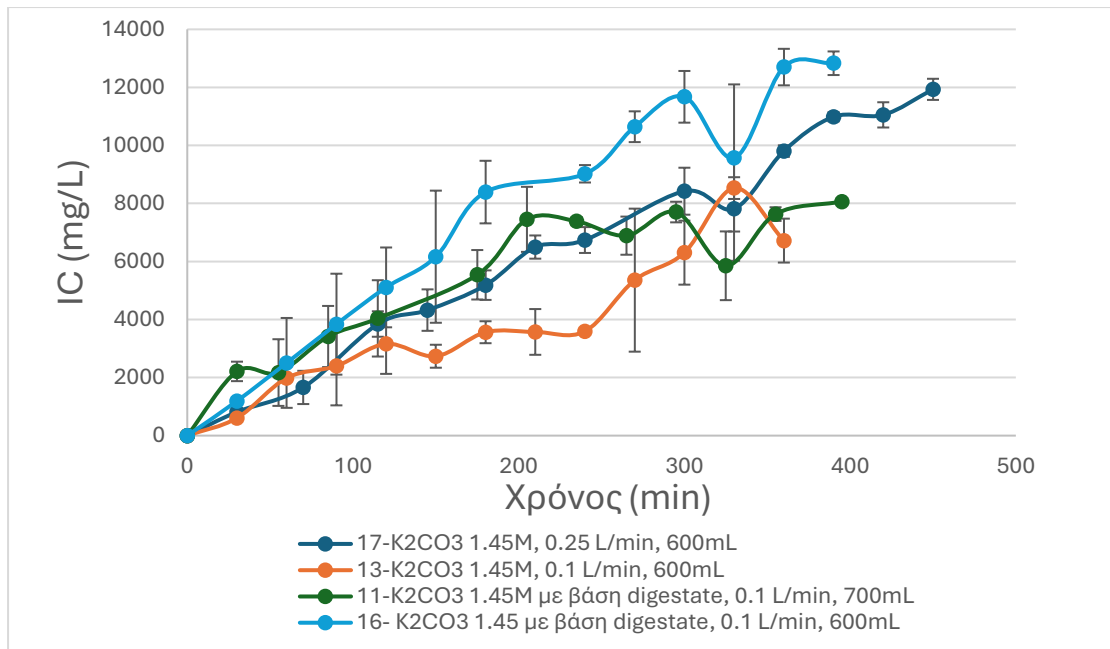
Από το Σχήμα 37, είναι προφανές ότι η χρήση της CA επιταχύνει σημαντικά το ρυθμό απορρόφησης CO₂ για το απορροφητικό διάλυμα K₂CO₃ 1.45M. Επιπλέον, η χρήση του χωνευμένου υπολείμματος αντί του νερού ως βάση του απορροφητικού διαλύματος βελτιώνει σημαντικά την απόδοση δέσμευσης του CO₂. Ο συνδυασμός τόσο του αναερόβιου χωνευμένου υπολείμματος όσο και του CA σε αυτή την πειραματική διάταξη παρέχει την υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερο ρυθμό στην κινητική της αντίδρασης. Προκειμένου να διερευνηθεί η σταθερότητα της CA κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και η προοπτική επαναχρησιμοποίησής του, η δραστηριότητα του ενζύμου μετρήθηκε με τη μέθοδο p-NPA. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 38, η ενεργότητα του ενζύμου μειώθηκε σχεδόν στο μισό σε όλα τα πειράματα. Συνεπώς, η CA μπορεί να απομονωθεί από το υπολειμματικό διάλυμα, να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Η ενεργότητα μετατράπηκε σε U/ml πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση 30 με τη συγκέντρωση του ενζύμου του καθενός πειράματος.



Σχήμα 38: Ενεργότητα συναρτήσει χρόνου για τα πειράματα 14, 15 και 18

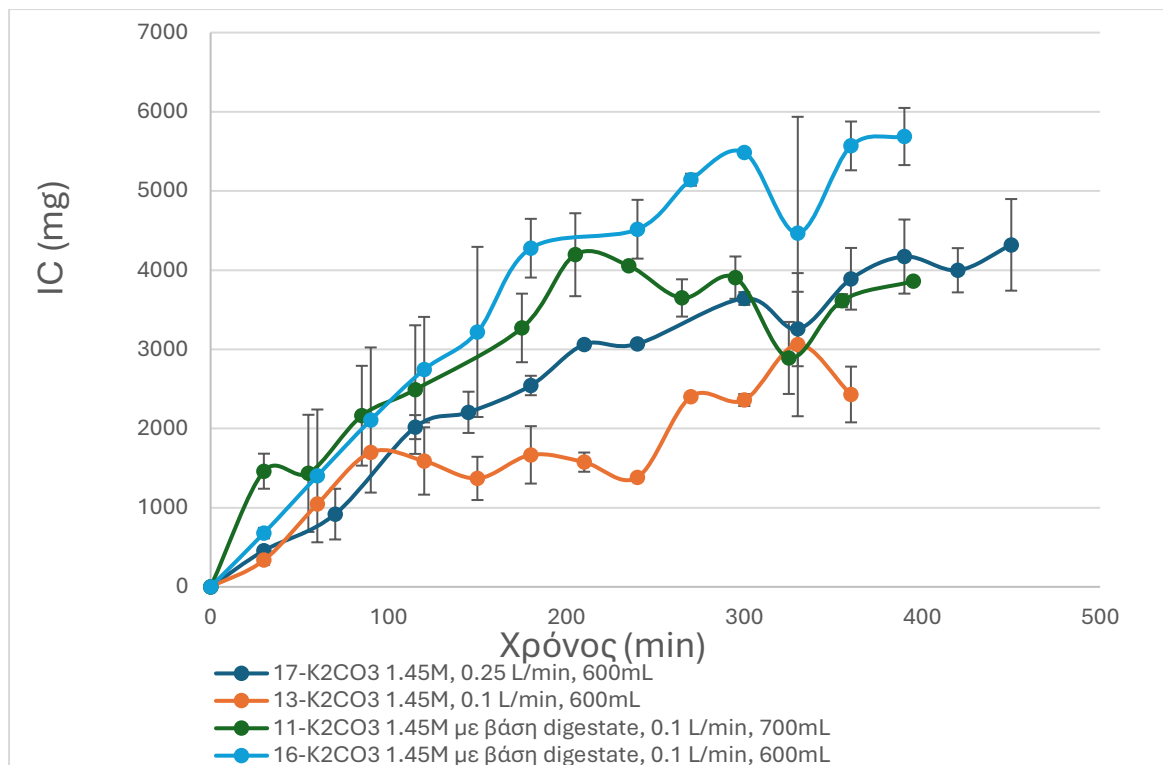
5.3.4 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης L/G σε διάλυμα K₂CO₃

Σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17, του Μ.Ο. του ανόργανου άνθρακα ως προς το χρόνο διάρκειας του κάθε πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δημιουργείται πλατό και η συγκέντρωση του IC σταθεροποιείται. Το πείραμα τότε σταματάει, αφού θεωρείται ότι η συγκέντρωση δεσμευμένου ανόργανου άνθρακα έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της (βλ. Σχήμα 39).



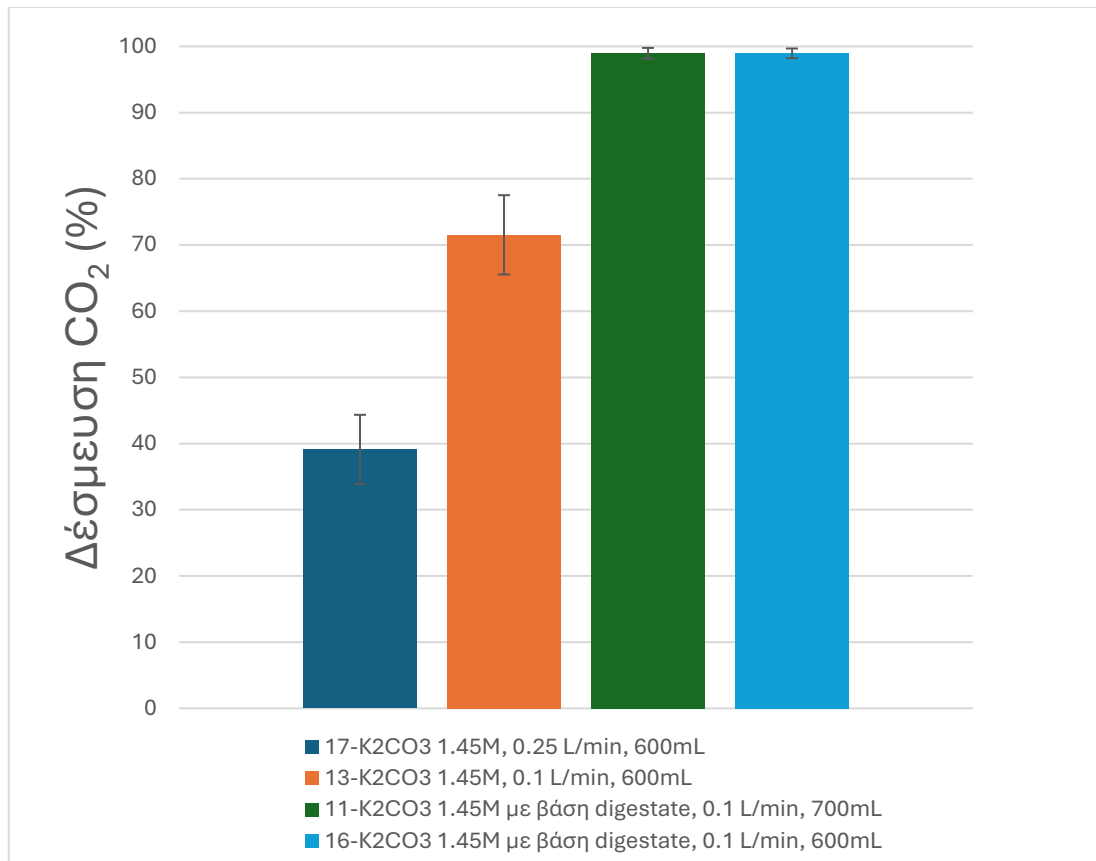
Σχήμα 39: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17

Επίσης, σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17, του Μ.Ο. της αθροιστικής μάζας ως προς το χρόνο διεξαγωγής του πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Η αθροιστική μάζα για κάθε μεμονωμένη επανάληψη αυξάνεται, ωστόσο επειδή πρόκειται για μέσο όρο 2 επαναλήψεων φαίνονται στο διάγραμμα μερικές αυξομειώσεις (βλ. Σχήμα 40).



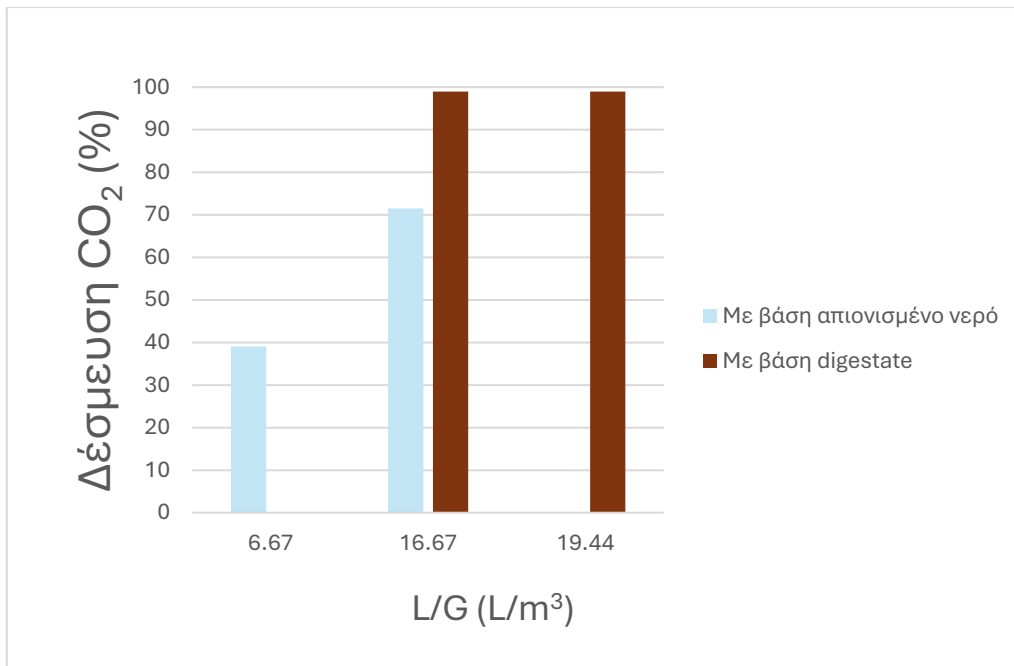
Σχήμα 40: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17

Στη συνέχεια, δημιουργείται το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 41) του Μ.Ο. της απόδοσης δέσμευσης CO₂ των πειραμάτων 11, 13, 16 και 17.



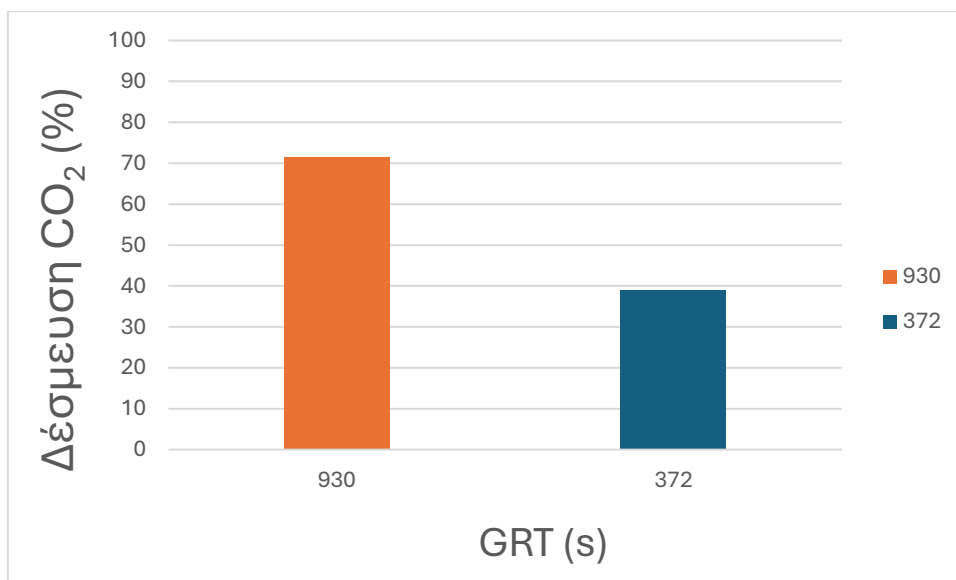
Σχήμα 41: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO₂ για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17

Από το Σχήμα 41, αποδεικνύεται ότι στα απορροφητικά διαλύματα K₂CO₃ 1.45M με βάση το χώνευμα σε σχέση με αυτά με βάση απιονισμένο νερό, η απόδοση είναι υψηλότερη. Ενώ από το παρακάτω, Σχήμα 42, προκύπτει ότι η απόδοση αυξάνεται συναρτήσει του λόγου L/G, όμως για τα διαλύματα με βάση το χώνευμα ο λόγος L/G δεν επηρεάζει την απόδοση.



Σχήμα 42: Μέσος όρος αποδόσεων δέσμευσης CO₂ συναρτήσει του λόγου L/G για τα πειράματα 11, 13, 16 και 17

Αξίζει να αναφερθεί ότι το 17 είναι το μόνο πείραμα με GRT ίσο με 372 s σε σχέση με όλα τα άλλα που έχουν GRT ίσο με 930 s. Επομένως, στο Σχήμα 43 πραγματοποιείται η σύγκριση του με το πείραμα 13, με το οποίο έχουν όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, κοινά.

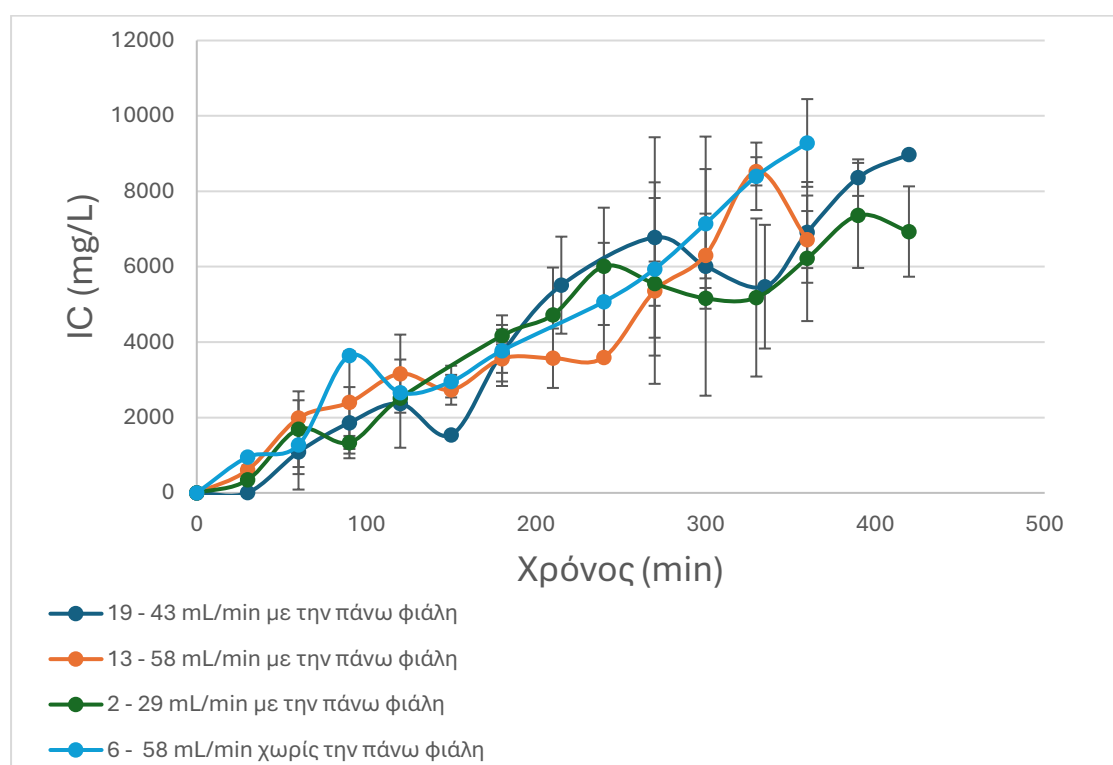


Σχήμα 43: Μέσος όρος αποδόσεων συναρτήσει του GRT για τα πειράματα 13 και 17

Είναι φανερό ότι όσο μειώνεται ο χρόνος παραμονής μειώνεται και η απόδοση.

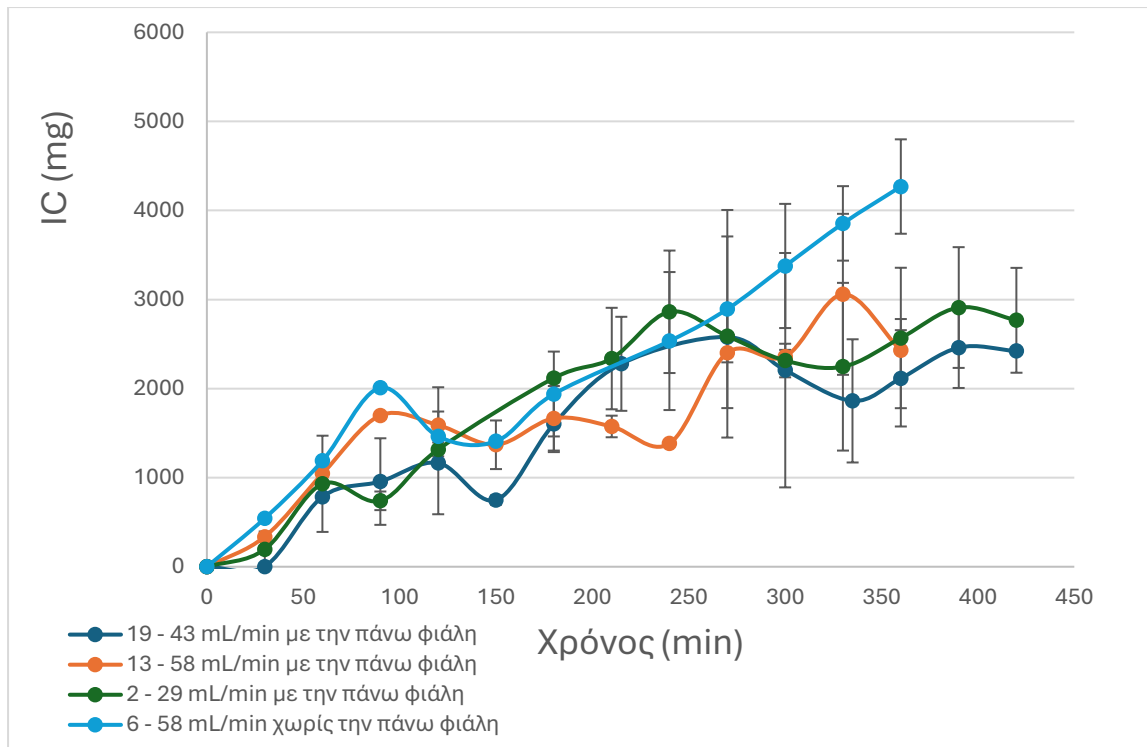
5.3.5 Συγκριτικά αποτελέσματα μελέτης επίδρασης ρυθμού ανακυκλοφορίας υγρού

Σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19, του Μ.Ο. του ανόργανου άνθρακα ως προς το χρόνο διάρκειας του κάθε πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δημιουργείται πλατό και η συγκέντρωση του IC σταθεροποιείται. Το πείραμα τότε σταματάει, αφού θεωρείται ότι η συγκέντρωση δεσμευμένου ανόργανου άνθρακα έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της (βλ. Σχήμα 44).



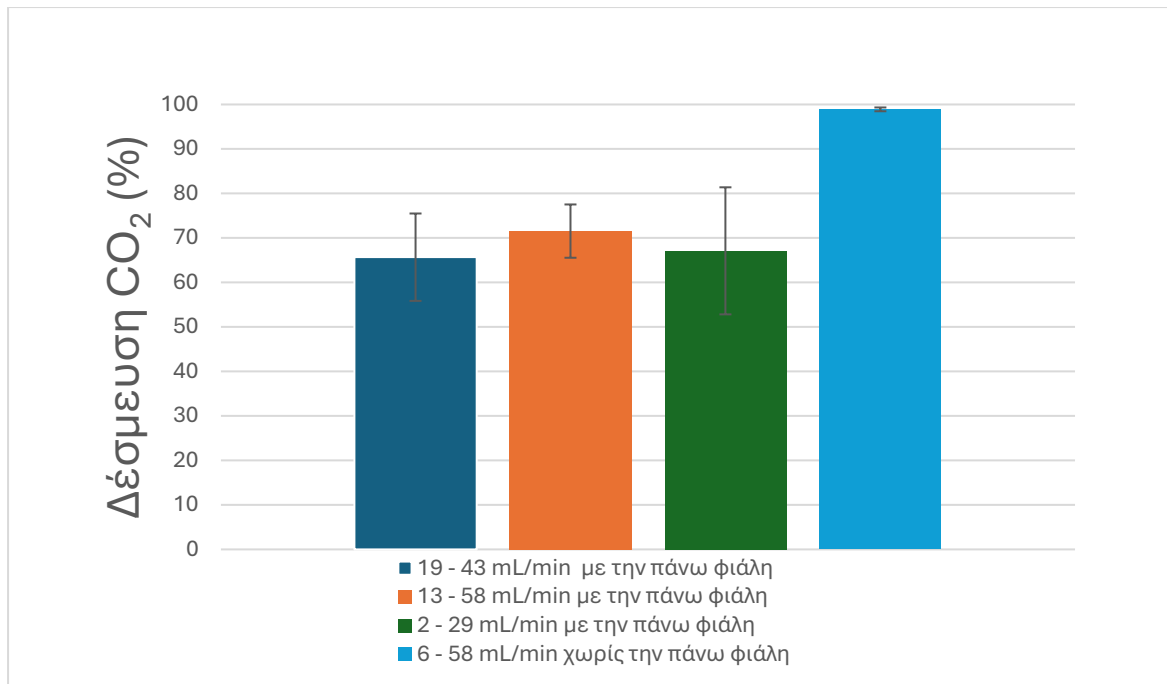
Σχήμα 44: Μέσος όρος συγκέντρωσης ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19

Επίσης, σχεδιάστηκε το διάγραμμα για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19, του Μ.Ο. της αθροιστικής μάζας IC ως προς το χρόνο διεξαγωγής του πειράματος, όπου φαίνεται και η τυπική απόκλιση των 2 μετρήσεων με τις κάθετες γραμμές σφαλμάτων. Η αθροιστική μάζα για κάθε μεμονωμένη επανάληψη αυξάνεται, ωστόσο επειδή πρόκειται για μέσο όρο 2 επαναλήψεων φαίνονται στο διάγραμμα μερικές αυξομειώσεις (βλ. Σχήμα 45).



Σχήμα 45: Μέσος όρος αθροιστικής μάζας ανόργανου άνθρακα και τυπικές αποκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19

Στη συνέχεια, δημιουργείται το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 46) του Μ.Ο. της απόδοσης δέσμησης CO₂ των πειραμάτων 2, 6, 13 και 19.



Σχήμα 46: Μέσος όρος αποδόσεων και τυπικές αποκλίσεις για τη δέσμευση CO₂ για τα πειράματα 2, 6, 13 και 19

Από το γράφημα, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά με την αλλαγή του του ρυθμού ανακυκλοφορίας του υγρού, αν και συνήθως η αύξηση του ρυθμού ροής του υγρού μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερα σταγονίδια. Παρόλα αυτά σε σύγκριση των πειραμάτων 13 και 6 που έχουν τον ίδιο ρυθμό ανακυκλοφορίας με τη μόνη διαφορά τους η χρήση ή μη της πάνω φιάλης, παρατηρείται ότι χωρίς την πάνω φιάλη επιτεύχθηκε μεγαλύτερη απόδοση, το οποίο είναι προφανές διότι χωρίς τη σφαιρική διάτρητη φιάλη, το μεγαλύτερο στόμιο παράγει σταγονίδια με μεγαλύτερη διάμετρο, επομένως λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής, αυξάνεται και ο ρυθμός της αντίδρασης δέσμευσης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συνολική μελέτη των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.3 :

- Στα διαλύματα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ η χρήση του πληρωτικού υλικού δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση.
- Ακόμη, στα διαλύματα $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα είναι αποδοτικότερη όσο αυξάνεται ο λόγος L/G, με την απόδοση δέσμευσης του CO_2 να φτάνει το 91.49% για λόγο L/G 38.89 ($\frac{\text{L}}{\text{m}^3}$), με κορύφωση του λόγου όταν ο όγκος του διαλύματος είναι ίσος με 700mL.
- Η απόδοση αυξάνεται συναρτήσει του λόγου L/G στα απορροφητικά διαλύματα K_2CO_3 1.45M με μέγιστη απόδοση 71.54% για L/G 16.67 ($\frac{\text{L}}{\text{m}^3}$). Όμως για τα διαλύματα με βάση το χώνευμα ο λόγος L/G δεν επηρεάζει την απόδοση και επίσης προέκυψε ότι όσο μειώνεται ο χρόνος παραμονής μειώνεται και η απόδοση.
- Ο ρυθμός ανακυκλοφορίας του υγρού δεν επηρεάζει την απόδοση στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, ενώ η χρήση ή μη της πάνω φιάλης την επηρεάζει. Παρατηρήθηκε ότι χωρίς την πάνω φιάλη επιτεύχθηκε μεγαλύτερη απόδοση.
- Παρατηρήθηκε ότι το αναερόβιο χώνευμα ως απορροφητικό διάλυμα δεν έχει τη δυνατότητα να δεσμεύσει το CO_2 με τις αποδόσεις να κυμαίνονται από 13.93% έως 18.98%.
- Διαπιστώθηκε ότι στα αμμωνιακά διαλύματα η χρήση του χωνεύματος ως βάση διαλύματος επηρεάζει θετικά την απόδοση με απόδοση δέσμευσης 92.02%.
- Αποδείχθηκε ότι στα απορροφητικά διαλύματα K_2CO_3 1.45M με βάση χώνευμα σε σχέση με αυτά με τα υδατικά διαλύματα, ότι η απόδοση είναι υψηλότερη με μέγιστη τιμή ίση με 99.16%.
- Για τα πειράματα με διάλυμα K_2CO_3 1.45M το ποσοστό δέσμευσης CO_2 μεγιστοποιείται με τη χρήση CA με βελτιωμένες αποδόσεις 99.54% και 98.24% όταν η συγκέντρωση του ενζύμου είναι 50mg/L και 100mg/L αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βρίσκονται στα άνω όρια των βιβλιογραφικών (Ochedi et al., 2021) για πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε παρόμοιες συνθήκες.
- Η χρήση της CA επιταχύνει σημαντικά το ρυθμό απορρόφησης CO_2 για το απορροφητικό διάλυμα K_2CO_3 1.45M.
- Επιπλέον, ο συνδυασμός τόσο του αναερόβιου χωνευμένου υπολείμματος όσο και της CA σε αυτή την πειραματική διάταξη παρέχει την υψηλότερη απόδοση (99.61%) και μεγαλύτερο ρυθμό στην κινητική της αντίδρασης.

- Συμπεραίνεται ότι η ενεργότητα του ενζύμου μειώθηκε σχεδόν στο μισό σε όλα τα πειράματα (από 0.4-0.8 U/mL σε 0.25-0.35 U/mL).

Κεφάλαιο 7: Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα

Βελτιστοποίηση χρήσης του ενζύμου καρβονικής ανυδράσης (CA):

- **Σταθεροποίηση και ακινητοποίηση ενζύμων:** Μια σημαντική πρόκληση είναι η σταθεροποίηση της καρβονικής ανυδράσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση και διάρκεια ζωής του ενζύμου σε βιομηχανικές εφαρμογές. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην ακινητοποίηση του ενζύμου σε διάφορους φορείς, ώστε να αυξηθεί η σταθερότητα του ενζύμου σε θερμοκρασιακές μεταβολές και άλλες συνθήκες της διαδικασίας.
- **Αναζήτηση νέων παραλλαγών του ενζύμου:** Υπάρχει ανάγκη για την ανακάλυψη ή δημιουργία νέων, πιο ανθεκτικών ή αποδοτικών παραλλαγών της καρβονικής ανυδράσης, μέσω μεθόδων όπως η πρωτεϊνική μηχανική. Αυτές οι παραλλαγές θα μπορούσαν να έχουν μεγαλύτερη σταθερότητα ή υψηλότερη καταλυτική ικανότητα.

Αξιοποίηση του χωνεύματος:

- **Χώνευμα ως βάση απορροφητικών διαλυμάτων:** Τα πειράματα έδειξαν ότι το χώνευμα μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της απορρόφησης CO₂ όταν χρησιμοποιείται ως βάση σε αμμωνιακά και ανθρακικά διαλύματα. Περαιτέρω έρευνες μπορούν να διερευνήσουν τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας του χωνεύματος (π.χ., pH, θερμοκρασία, σύνθεση) μπορούν να αυξήσουν την απόδοση του στη δέσμευση CO₂.
- **Περιβαλλοντική αξιολόγηση χωνεύματος:** Μελέτες μπορούν να εξετάσουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της χρήσης χωνεύματος ως απορροφητικού μέσου. Δεδομένου ότι είναι ένα υποπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης, η χρήση του συμβάλλει στην κυκλική οικονομία.
- **Βελτίωση της ποιότητας του χωνεύματος μέσω τεχνολογιών επεξεργασίας:** Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί σε νέες τεχνικές για τη βελτίωση της ποιότητας του χωνεύματος, όπως η απομάκρυνση προσμίξεων ή η βελτιστοποίηση του οργανικού του φορτίου, προκειμένου να καταστεί πιο αποδοτικό για τη δέσμευση CO₂.
- Τέλος, η αξιοποίηση υποπροϊόντων όπως το χώνευμα, θα μπορούσε να συντελέσει στόχο στην αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη δέσμευση αέριων εκπομπών σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Ανακλιμάκωση του συστήματος:

- **Πιλοτικές εγκαταστάσεις σε μεγαλύτερη κλίμακα:** Μια βασική πτυχή της ανακλιμάκωσης είναι η κατασκευή μεγαλύτερων αντιδραστήρων, ικανών να διαχειριστούν μεγαλύτερες ροές αερίου και απορροφητικού υγρού. Ο σχεδιασμός αυτών των αντιδραστήρων πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ενεργειακή απόδοση και το κόστος λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, πριν από την πλήρη βιομηχανική εφαρμογή, μπορούν να υλοποιηθούν πιλοτικά έργα μεσαίας κλίμακας σε συγκεκριμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Αυτά τα έργα θα επιτρέψουν τη δοκιμή και τη βελτίωση του συστήματος σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

Η ανακλιμάκωση του συστήματος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ευρεία εφαρμογή της δέσμευσης CO₂ και τη μείωση των βιομηχανικών εκπομπών. Η επιτυχία της απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών στρατηγικών.

Βιβλιογραφία

- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 06(03), 205–212. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>
- Arachchige, U., Yohan, R., Hansa, R. Y. D., Devasurendra, J. W., Maduwantha, M. I. P., Madhuwantha, G. A. L., & Ranaraja, D. M. C. O. (n.d.). *Post Combustion Carbon Dioxide Capture*. <https://www.researchgate.net/publication/344688709>
- Ban, Z. H., Keong, L. K., & Mohd Shariff, A. (2014). Physical Absorption of CO₂ Capture: A Review. *Advanced Materials Research*, 917, 134–143. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.917.134>
- Bao, L., & Trachtenberg, M. C. (2006). Facilitated transport of CO₂ across a liquid membrane: Comparing enzyme, amine, and alkaline. *Journal of Membrane Science*, 280(1–2), 330–334. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.01.036>
- Bhargava, akshey, & Bhargava, A. (2016). Wet Scrubbers-Design of Spray Tower to Control Air Pollutants. In *International Journal of Environmental Planning and Development* (Vol. 2). www.journalspub.com
- Bhattacharya, S., Schiavone, M., Chakrabarti, S., & Bhattacharya, S. K. (2003). CO₂ hydration by immobilized carbonic anhydrase. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 38(2), 111. <https://doi.org/10.1042/ba20030060>
- Bond, G. M., Stringer, J., Brandvold, D. K., Simsek, F. A., Medina, M.-G., & Egeland, G. (2001). Development of Integrated System for Biomimetic CO₂ Sequestration Using the Enzyme Carbonic Anhydrase. *Energy & Fuels*, 15(2), 309–316. <https://doi.org/10.1021/ef000246p>
- Bong, G. M., Stringer, J., Brandvold, D. K., Simsek, F. A., Medina, M. G., & Egeland, G. (2001). Development of integrated system for biomimetic CO₂ sequestration using the enzyme carbonic anhydrase. *Energy and Fuels*, 15(2), 309–316. <https://doi.org/10.1021/ef000246p>
- Bookin, D., Ebbing, D. D., & Gammon, S. D. (2009). *Complete Solutions Manual GENERAL CHEMISTRY NINTH EDITION Ebbing/Gammon*. <http://librosysolucionarios.net>
- Boron, W. F. (2010). Evaluating the role of carbonic anhydrases in the transport of HCO₃⁻-related species. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*, 1804(2), 410–421. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2009.10.021>
- Climate Change Connection. (2016, April 27). What about water vapour?. Connecting Manitobans to Climate Change Facts and Solutions. <https://climatechangeconnection.org/science/what-about-water-vapour/>
- Crovetto, R. (1991). Evaluation of Solubility Data of the System CO₂-H₂O from 273 K to the Critical Point of Water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 20(3), 575–589. <https://doi.org/10.1063/1.555905>
- de Oliveira Maciel, A., Christakopoulos, P., Rova, U., & Antonopoulou, I. (2022). Carbonic anhydrase to boost CO₂ sequestration: Improving carbon capture utilization and

- storage (CCUS). *Chemosphere*, 299, 134419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134419>
- Di Fiore, A., Capasso, C., De Luca, V., Monti, S. M., Carginale, V., Supuran, C. T., Scozzafava, A., Pedone, C., Rossi, M., & De Simone, G. (2013). X-ray structure of the first 'extremo- α -carbonic anhydrase', a dimeric enzyme from the thermophilic bacterium *Sulfurihydrogenibium yellowstonense* YO3AOP1. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography*, 69(6), 1150–1159. <https://doi.org/10.1107/S0907444913007208>
- Fradette, L., Lefebvre, S., & Carley, J. (2017). Demonstration Results of Enzyme-Accelerated CO₂ Capture. *Energy Procedia*, 114, 1100–1109. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1263>
- Frost, S. C., & McKenna, R. (Eds.). (2014). *Carbonic Anhydrase: Mechanism, Regulation, Links to Disease, and Industrial Applications* (Vol. 75). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7359-2>
- Gijzen, H. J. (2002). *Anaerobic digestion for sustainable development: a natural approach*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/45/10/321/424833/321.pdf>
- Goff, G. S., & Rochelle, G. T. (2004). Monoethanolamine degradation: O₂ mass transfer effects under CO₂ capture conditions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43(20), 6400–6408. <https://doi.org/10.1021/ie0400245>
- Guan, D., Zhao, J., Wang, Y., Fu, Z., Zhang, D., Zhang, H., Xie, J., Sun, Y., Zhu, J., & Wang, D. (2024). A critical review on sustainable management and resource utilization of digestate. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.029>
- Gunawardene, O. H. P., Gunathilake, C. A., Vikrant, K., & Amaraweera, S. M. (2022). Carbon Dioxide Capture through Physical and Chemical Adsorption Using Porous Carbon Materials: A Review. *Atmosphere*, 13(3), 397. <https://doi.org/10.3390/atmos13030397>
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- Kammerer, S., Borho, I., Jung, J., & Schmidt, M. S. (2023). Review: CO₂ capturing methods of the last two decades. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(7), 8087–8104. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04680-0>
- Kovačić, Đ., Lončarić, Z., Jović, J., Samac, D., Popović, B., & Tišma, M. (2022). Digestate Management and Processing Practices: A Review. *Applied Sciences*, 12(18), 9216. <https://doi.org/10.3390/app12189216>
- Kunze, A.-K., Dojchinov, G., Haritos, V. S., & Lutze, P. (2015). Reactive absorption of CO₂ into enzyme accelerated solvents: From laboratory to pilot scale. *Applied Energy*, 156, 676–685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.033>

- Lai, J. Y., Ngu, L. H., & Hashim, S. S. (2021). A review of CO₂ adsorbents performance for different carbon capture technology processes conditions. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 11(5), 1076–1117. <https://doi.org/10.1002/ghg.2112>
- Leimbrink, M., Tlatlik, S., Salmon, S., Kunze, A.-K., Limberg, T., Spitzer, R., Gottschalk, A., Górak, A., & Skiborowski, M. (2017). Pilot scale testing and modeling of enzymatic reactive absorption in packed columns for CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 62, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.04.010>
- Li, J. W., Cao, Y. C., Zhu, Y. Q., Xu, C., & Wang, L. X. (2019). System dynamic analysis of greenhouse effect based on carbon cycle and prediction of carbon emissions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 5067–5080. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_50675080
- Li, L., Fu, M., Zhao, Y., & Zhu, Y. (2012). Characterization of carbonic anhydrase II from *Chlorella vulgaris* in bio-CO₂ capture. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(9), 4227–4232. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1077-8>
- Logan, M., & Visvanathan, C. (2019). Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(1_suppl), 27–39. <https://doi.org/10.1177/0734242X18816793>
- Malini, K., Selvakumar, D., & Kumar, N. S. (2023). Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO₂ capture capacity – A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 67, 102318. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102318>
- Mariam Ahmad. (2023, February 22). Top 10: Leading Carbon Capture Companies. <https://energydigital.com/top10/top-10-leading-carbon-capture-companies>
- Matthews, M. L. (2023). Engineering photosynthesis, nature's carbon capture machine. *PLOS Biology*, 21(7), e3002183. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002183>
- Mitchell, J. F. B. (1989). The “Greenhouse” effect and climate change. *Reviews of Geophysics*, 27(1), 115–139. <https://doi.org/10.1029/RG027i001p00115>
- Mon, M. T., Tansuchat, R., & Yamaka, W. (2024). CCUS Technology and Carbon Emissions: Evidence from the United States. *Energies*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/en17071748>
- Ochedi, F. O., Yu, J., Yu, H., Liu, Y., & Hussain, A. (2021). Carbon dioxide capture using liquid absorption methods: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 1, pp. 77–109). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01093-8>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., & Abdelkareem, M. A. (2022). Large scale application of carbon capture to process industries – A review. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132300>

- Ores, J. da C., Amarante, M. C. A. De, Fernandes, S. S., & Kalil, S. J. (2016). Production of carbonic anhydrase by marine and freshwater microalgae. *Biocatalysis and Biotransformation*, *34*(2), 57–65. <https://doi.org/10.1080/10242422.2016.1227793>
- Ozdemir, E. (2009). Biomimetic CO₂ Sequestration: 1. Immobilization of Carbonic Anhydrase within Polyurethane Foam. *Energy & Fuels*, *23*(11), 5725–5730. <https://doi.org/10.1021/ef9005725>
- Pierre, A. C. (2012). Enzymatic Carbon Dioxide Capture. *ISRN Chemical Engineering*, *2012*, 1–22. <https://doi.org/10.5402/2012/753687>
- Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., & Simões, M. (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(5), 3043–3053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.055>
- Prabhu, C., Wanjari, S., Puri, A., Bhattacharya, A., Pujari, R., Yadav, R., Das, S., Labhsetwar, N., Sharma, A., Satyanarayanan, T., & Rayalu, S. (2011). Region-Specific Bacterial Carbonic Anhydrase for Biomimetic Sequestration of Carbon Dioxide. *Energy & Fuels*, *25*(3), 1327–1332. <https://doi.org/10.1021/ef101608r>
- Savile, C. K., & Lalonde, J. J. (2011). Biotechnology for the acceleration of carbon dioxide capture and sequestration. *Current Opinion in Biotechnology*, *22*(6), 818–823. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.06.006>
- Shekh, A. Y., Krishnamurthi, K., Mudliar, S. N., Yadav, R. R., Fulke, A. B., Devi, S. S., & Chakrabarti, T. (2012). Recent Advancements in Carbonic Anhydrase-Driven Processes for CO₂ Sequestration: Minireview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *42*(14), 1419–1440. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.556884>
- Shi, J., Jiang, Y., Jiang, Z., Wang, X., Wang, X., Zhang, S., Han, P., & Yang, C. (2015). Enzymatic conversion of carbon dioxide. *Chemical Society Reviews*, *44*(17), 5981–6000. <https://doi.org/10.1039/C5CS00182J>
- Simsek-Ege, F. A., Bond, G. M., & Stringer, J. (2002). Matrix molecular weight cut-off for encapsulation of carbonic anhydrase in polyelectrolyte beads. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, *13*(11), 1175–1187. <https://doi.org/10.1163/156856202320892948>
- Song, C., Liu, Q., Deng, S., Li, H., & Kitamura, Y. (2019). Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *101*, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.018>
- Stepanenko, V., Dovgal, V., Gura, D., Dyachenko, R., & Lipilin, D. (2024). Analysis of the current state of the issue of greenhouse gas emission monitoring. *E3S Web of Conferences*, *531*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453104004>
- Sun, H., Wu, C., Shen, B., Zhang, X., Zhang, Y., & Huang, J. (2018). Progress in the development and application of CaO-based adsorbents for CO₂ capture—a review. *Materials Today Sustainability*, *1–2*, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2018.08.001>

United Nations. (n.d.). Causes and effects of climate change. <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

United Nations Industrial Development Organisation. (2010, November). Carbon Capture and Storage in Industrial Applications. https://www.unido.org/sites/default/files/2010-12/synthesis_final_0.pdf

United Nations Industrial Development Organization. (2011). Carbon capture and storage in industrial applications. https://ccsknowledge.com/pub/Publications/2011Sep_IEA_UNIDO_CCS_In_Industrial_Applications_TechRoadmap.pdf

Unsworth, L. D., van der Oost, J., & Koutsopoulos, S. (2007). Hyperthermophilic enzymes – stability, activity and implementation strategies for high temperature applications. *The FEBS Journal*, 274(16), 4044–4056. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2007.05954.x>

Van Lier, J. B., Tilche, A., Ahring, B. K., Macarie, H., Moletta, R., Dohanyos, M., Pol, L. W. H., Lens, P., & Verstraete, W. (2001). *New perspectives in anaerobic digestion Chairman of the IWA Specialist Group on Anaerobic Digestion*. <http://www.iawq.org.uk/groups/stg01.htm>

Vaz, S., Rodrigues de Souza, A. P., & Lobo Baeta, B. E. (2022). Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>

Vinoba, M., Lim, K. S., Lee, S. H., Jeong, S. K., & Alagar, M. (2011). Immobilization of Human Carbonic Anhydrase on Gold Nanoparticles Assembled onto Amine/Thiol-Functionalized Mesoporous SBA-15 for Biomimetic Sequestration of CO₂. *Langmuir*, 27(10), 6227–6234. <https://doi.org/10.1021/la105029h>

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., & Ramshaw, C. (2011). Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1609–1624. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005>

Wanjari, S., Prabhu, C., Satyanarayana, T., Vinu, A., & Rayalu, S. (2012). Immobilization of carbonic anhydrase on mesoporous aluminosilicate for carbonation reaction. *Microporous and Mesoporous Materials*, 160, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.04.005>

Yadav, R., Joshi, M., Wanjari, S., Prabhu, C., Kotwal, S., Satyanarayanan, T., & Rayalu, S. (2012). Immobilization of Carbonic Anhydrase on Chitosan Stabilized Iron Nanoparticles for the Carbonation Reaction. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 5345–5356. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1284-4>

Yoshimoto, M., & Walde, P. (2018). Immobilized carbonic anhydrase: preparation, characteristics and biotechnological applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(10), 151. <https://doi.org/10.1007/s11274-018-2536-2>

Κώστας Νικολάου. Απόψεις και συναρτώμενες πολιτικές για την κλιματική κρίση. για την Περιβαλλοντική Εκπαίδευση. <https://shorturl.at/1tEDj>

Μπαραμπούτη, Έ.-Μ. (2006). *Αξιοποίηση του Co₂ του βιοαερίου, με προσθήκη CaO, στην λειτουργία ενός αναερόβιου χωνευτήρα τύπου UASB* [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών, Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας]. <https://doi.org/10.12681/eadd/16998>