



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία:

Συστήματα Δέσμευσης και Αποθήκευσης Διοξειδίου του Άνθρακα στα
Πλοία

Carbon Capture and Storage Systems on Vessels

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:

Άγγελος Α. Κανάκης,

ΑΜ: 18393063

Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Λιβανός

Αθήνα 2023



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

Συστήματα Δέσμευσης και Αποθήκευσης Διοξειδίου του Άνθρακα στα Πλοία

Συγγραφέας

Κανάκης Άγγελος (Α.Μ. 18393063)

Επιβλέπων Καθηγητής

Λιβανός Γεώργιος

Ημερομηνία Εξέτασης

28/09/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Σ. Δημητρέλλου

Λιβανός Γ.

Α. Χατζηαποστόλου

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Κανάκης Άγγελος** του **Αριστοδήμου**, με αριθμό μητρώου **18393063** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου»

Ο Δηλών



Άγγελος Α. Κανάκης

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Λιβανό Γεώργιο, που μου έδωσε την ευκαιρία να θίξω και να αναλύσω το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Ακόμη επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας και ιδίως στα μέλη της οικογένειάς μου για την υποστήριξη και την κατανόηση τους, η έλλειψη των οποίων θα δυσχέραινε την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η παγκόσμια κλιματική κρίση, έχει δημιουργήσει την επιτακτική ανάγκη για μείωση των επιπέδων ύπαρξης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, η οποία πηγάζει από τις εκπομπές αερίων των βιομηχανικών τομέων, συμπεριλαμβανομένων των θαλασσιών μεταφορών. Μιας που η ναυτιλιακή βιομηχανία ευθύνεται για το 2.5% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (*International Maritime Organization*) έχει ήδη θέσει τον στόχο, να μειωθούν οι ετήσιες εκπομπές τουλάχιστον κατά 70% έως το έτος 2040. Η παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνά τη χρήση των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, ως μια βιώσιμη λύση που μπορεί να εφαρμοστεί στα πλοία, για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, που προέρχονται από ναυτιλιακές δραστηριότητες. Παράλληλα, αναλύεται η μακροπρόθεσμη αποθήκευση και η επαναχρησιμοποίηση του δεσμευμένου προϊόντος, με σκοπό την αποφυγή της επανέκλυσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, γεγονός που θα οδηγήσει στον κορεσμό και την μείωση των ήδη υπάρχοντων επιπέδων. Επιπλέον πραγματοποιείται η τεχνικοοικονομική ανάλυση του εγχειρήματος τοποθέτησης ενός συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε κάποιο πλοίο, μαζί με τις προκλήσεις που συνεπάγονται και πρέπει να αντιμετωπιστούν, αλλά και με τα οικονομικά οφέλη που περιλαμβάνονται. Ακόμη, αναλύονται οι διαδικασίες αξιολόγησης ενός συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με τις πρακτικές που ακολουθεί ο Νορβηγικός – Γερμανικός Νηογνώμονας (*DNV-GL*), οι οποίες συντελούν το κανονιστικό πλαίσιο του εγχειρήματος. Τα συμπεράσματα της εργασίας, αναδεικνύουν την ικανότητα των συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, να διαδραματίσουν έναν καθοριστικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλιακή βιομηχανία, συμβάλλοντας κατά το μέγιστο στις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Η εργασία ολοκληρώνεται με προτάσεις για την επιτάχυνση της υιοθέτησης των τεχνολογιών δέσμευσης εκπομπών στις θαλάσσιες μεταφορές. Καταληκτικά, η διπλωματική εργασία χαρακτηρίζει τη χρήση των συστημάτων ως μια πολλά υποσχόμενη πορεία προς την επίτευξη ενός πιο υπεύθυνου και περιβαλλοντικά βιώσιμου ναυτιλιακού τομέα.

Abstract

The global climate crisis has created an urgent need for the reduction of the levels of greenhouse gases in the atmosphere, which stem from the emissions of industrial sectors, including maritime transportation. Since the shipping industry is responsible for the 2.5% of global dioxide emissions annually, the International Maritime Organization (IMO) has already set the goal to reduce annual emissions by at least 70% by the year 2040. This thesis explores the use of carbon capture and storage systems as a viable solution that can be applied to vessels, in order to reduce carbon dioxide emissions from shipping activities. At the same time, the long-term storage and reuse of the captured product is analyzed in order to avoid the re-release of carbon dioxide in the atmosphere, which leads to the reduction and saturation of the existing levels. In addition, a techno-economic analysis of the project of installing a carbon capture and storage system on a vessel is carried out, including the challenges that are involved and need to be addressed and along with the financial benefits that occur. Furthermore, the evaluation process of a carbon capture and storage system is described, according to the practices followed by the Norwegian – German Classification Society (DNV-GL), which compose the regulatory framework of the concept. The thesis' results highlight the ability of onboard carbon capture and storage systems to play a key role in reducing carbon dioxide emissions from the shipping industry, having a major contribution at the global efforts to address climate change. The thesis also contains proposals to accelerate the adoption of emission capture technologies in maritime transport. In conclusion, this thesis identifies the use of such systems as a promising path towards a more responsible and environmentally sustainable maritime industry.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	7
Abstract	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	12
1.1 Ιστορικό Υπόβαθρο:	12
1.2 Απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας:.....	13
1.3 Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα:	13
1.4 Στόχοι και Δομή της Διπλωματικής Εργασίας:	14
Κεφάλαιο 2: Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα	15
2.1 Υφιστάμενες Μεθοδολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα:.....	15
2.1.1 Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα πριν την καύση.....	15
2.1.2 Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με καύση Οξυγόνου-Καυσίμου	16
2.1.3 Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση	17
2.2 Τεχνολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα:	17
2.2.1 Απορρόφηση (<i>Absorption</i>).....	17
2.2.2 Προσρόφηση (<i>Adsorption</i>).....	25
2.2.3 Μεμβράνες (<i>Membranes</i>).....	30
2.2.4 Χημικός Κύκλος Βρόγχου (<i>Chemical Looping Cycle</i>)	36
2.2.5 Μικροφύκη (<i>Microalgae</i>)	36
2.3 Τεχνολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα Χαμηλής Θερμοκρασίας: ..37	
2.3.1 Κρυογονική Συσκευασμένης Κλίνης (<i>Cryogenic Packed Bed</i>).....	37
2.3.2 Κρυογονική Δέσμευση Άνθρακα με Εξωτερικό Ψυκτικό Βρόγχο (<i>External Cooling Loop Cryogenic Carbon Capture</i>).....	39
2.3.3 Απόθεση (<i>Anti-Sublimation – AnSU</i>).....	40
2.3.4 Κρυογονική Απόσταξη (<i>Cryogenic Distillation</i>)	42
2.3.5 Διαδικασία <i>CryoCell</i> [®] (<i>CryoCell</i> [®] Process)	43
2.3.6 Σύστημα Ψύξης <i>Stirling</i> (<i>Stirling Cooler System</i>)	43
2.3.7 Προηγμένη Κρυογονική Διεργασία Δέσμευσης Άνθρακα <i>A3C</i> (<i>Advanced Cryogenic Carbon Capture Process A3C</i>)	44
2.3.8 Άλλες Διαδικασίες	45
Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση και Μεταφορά Διοξειδίου του Άνθρακα	47
3.1 Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα:	47
3.1.1 Γεωλογική Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα (<i>Geological Storage</i>).....	47

3.1.2 Ωκεανική Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα.....	49
3.1.3 Ορυκτή Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα.....	50
3.1.4 Βιομηχανικές Χρήσεις	52
3.2 Μεταφορά Διοξειδίου του Άνθρακα:.....	53
3.2.1 Μεταφορά και Καθαρότητα Διοξειδίου του Άνθρακα	54
3.2.2 Φάσεις Μεταφοράς Διοξειδίου του Άνθρακα.....	56
Κεφάλαιο 4: Τεχνικοοικονομική Ανάλυση	58
4.1 Τεχνική Ανάλυση:.....	58
4.2 Οικονομική Ανάλυση:	59
4.2.1 Κεφαλαιουχική Δαπάνη (<i>CAPEX</i>).....	60
4.2.2 Λειτουργικά Έξοδα (<i>OPEX</i>)	61
4.2.3 Κόστος Μεταφοράς Άνθρακα.....	62
4.2.4 Κόστος Αποθήκευσης Άνθρακα	63
4.2.5 Δέσμευση και Χρήση Διοξειδίου του Άνθρακα	64
4.2.6 Οικονομικά Κίνητρα	64
Κεφάλαιο 5: Κανονιστικό Πλαίσιο [86].....	67
5.1 Φιλοσοφία και Αρχές Αξιολόγησης:	67
5.1.1 Φιλοσοφία	67
5.1.2 Αρχές.....	67
5.2 Διαδικασία Αξιολόγησης και Κύρια Βήματα:	68
5.3 Βάση Αξιολόγησης:	69
5.3.1 Μεθοδολογία.....	69
5.3.2 Περιγραφή και προδιαγραφή συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα	69
5.3.3 Απαιτήσεις.....	70
5.3.4 Κατάλογος Βασικών Παραμέτρων	71
5.4 Τεχνολογική Αξιολόγηση:	71
5.4.1 Μεθοδολογία.....	71
5.4.2 Τεχνολογική Ανάλυση συστημάτων δέσμευσης CO ₂	72
5.4.3 Κατάταξη Τεχνολογίας	73
5.4.4 Αναγνώριση Κύριων Προκλήσεων και Αβεβαιοτήτων	74
5.5 Αξιολόγηση Κινδύνων:.....	74
5.5.1 Μεθοδολογία Αξιολόγησης Κινδύνων.....	74
5.5.2 Ποιοτική Κατάταξη Πιθανοτήτων Αστοχιών	75

5.5.3 Ποιοτική Κατάταξη Συνεπειών.....	75
5.5.4 Προσδιορισμός Αποδεκτού Ρίσκου Συστημάτων Δέσμευσης CO ₂	76
5.5.5 Μεθοδολογίες Εντοπισμού Αστοχιών και Κατάταξης Κινδύνων.....	77
5.6 Ανάπτυξη Πλάνου Αξιολόγησης:	77
5.7 Εκτέλεση Πλάνου Αξιολόγησης:.....	78
5.8 Αξιολόγηση Επιδόσεων:	79
5.9 Βελτίωση Τεχνολογίας:	79
Συμπεράσματα	81
Προτάσεις	84
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	86

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

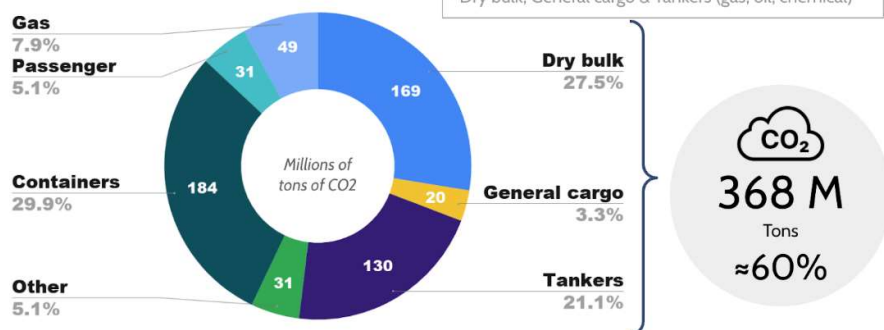
1.1 Ιστορικό Υπόβαθρο

Ο συσχετισμός της παραγωγής ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιφέρει, αποτελεί πηγή παγκόσμιας ανησυχίας. Αν και η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας, στρέφεται ολοένα και περισσότερο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής βασίζεται ακόμα σε καύση ορυκτών πόρων. [1] Τα αέρια του θερμοκηπίου, με σημαντικότερο το διοξείδιο του άνθρακα, που παράγονται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων, θεωρούνται οι κύριοι υπαίτιοι της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Σκοπός είναι να βρεθούν τρόποι να παράγεται η απαραίτητη ενέργεια, με συνετή χρήση των ορυκτών πόρων αλλά με όσο το δυνατόν μικρότερο αντίκτυπο ρύπανσης στο περιβάλλον.

Η μαζική αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, εμφανίστηκε κατά την 3^η βιομηχανική επανάσταση, περίπου το 1970. Σύμφωνα με την αναφορά της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία θα αυξηθεί περίπου κατά 1.9 [°C] ενώ η μέση στάθμη της θάλασσας θα αυξηθεί περίπου κατά 3.8 [m], εάν συνεχίσουν να υφίστανται 570 [ppm] διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, έως το έτος 2100. [2] Ο κλάδος που ευθύνεται σε μεγαλύτερο βαθμό για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, είναι η βιομηχανία παραγωγής ενέργειας. Κατόπιν, η βιομηχανία των κατασκευών καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση και συνεισφέρει το 26% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών (στοιχεία 2022), ενώ ο τομέας των μεταφορών, καταλαμβάνει την τρίτη θέση με 23%. [3] [4] [5]

Ο τομέας της ναυτιλίας, θεωρείται ένας από τους πιο ενεργειακά αποδοτικούς τομείς, συγκριτικά με τους υπόλοιπους τομείς της βιομηχανίας μεταφορών. Οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από ναυτιλιακές δραστηριότητες, καταλαμβάνουν μόλις το 2.5% των συνολικών εκπομπών. Ωστόσο, η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για μεταφορά φορτίων και η αύξηση του όγκου προϊόντων που μεταφέρονται εξαιτίας της οικονομικής ανάπτυξης, αναπόφευκτα θα οδηγήσει σε αύξηση των εκπομπών. Η αύξηση αυτή, στην περίπτωση που δεν ληφθούν άμεσα μέτρα αντιμετώπισης, υπολογίζεται να κυμανθεί μεταξύ 50% και 250%. [6] Το παγκόσμιο εμπόριο μέσω ναυτιλίας, αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, με την μεταφορά υγρών και χύδην φορτίων, να πραγματοποιείται κατά 50% εξολοκλήρου διαμέσου της ναυτιλίας. Η μεταφορά φορτίων χύδην, ευθύνεται για το 60% των εκπομπών της παγκόσμιας ναυτιλίας, με τις εκπομπές της να έχουν αυξηθεί κατά 9.3% από το 2015 έως το 2019. [7] Οι εκπομπές της ναυτιλίας αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξειδία του θείου (SO_x), οξειδία του αζώτου (NO_x) και ρυπογόνα μικροσωματίδια (*particles*). Καθώς περισσότερο από το 50% των εκπομπών της ναυτιλίας εκλύονται σε αποστάσεις μικρότερες των 400 χιλιομέτρων από τις ακτές, η ανθρώπινη υγεία και το ίδιο το περιβάλλον, βρίσκονται σε σημαντικό κίνδυνο μόλυνσης. [8]

World fleet CO2 emissions



Εικόνα 1 - Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για κάθε είδος πλοίου [7]

1.2 Απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας

Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές της ναυτιλίας, κατόπιν της συμφωνίας του Παρισιού, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (*International Maritime Organization*), έθεσε τον στόχο για μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, έως το έτος 2050. Πιο συγκεκριμένα, αρχικό στόχο αποτέλεσε η μείωση των παγκόσμιων εκπομπών της ναυτιλίας κατά 70% συγκριτικά με τις μετρήσεις του 2008, έως το έτος 2040. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος και να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που εμφανίζονται, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός ανακοίνωσε κάποιες βραχυπρόθεσμες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες πολιτικές. Στις βραχυπρόθεσμες (από το 2018 έως το 2023), περιλαμβάνονται η χρήση του δείκτη ενεργειακής απόδοσης κατά τη σχεδίαση ενός πλοίου (*Energy Efficiency Design Index - EEDI*), η εισήγηση κατευθυντήριων γραμμών για την σύσταση των ναυτιλιακών καυσίμων, η προτροπή της υιοθέτησης τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η έρευνα για ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών με μηδενικές εκπομπές. Οι μεσοπρόθεσμες πολιτικές (από το 2023 έως το 2030) περιλαμβάνουν την περαιτέρω ανάπτυξη των βραχυπρόθεσμων πολιτικών, με αυστηρότερη εφαρμογή του δείκτη ενεργειακής απόδοσης σχεδιασμού. Οι μακροπρόθεσμες πολιτικές (2030 και ύστερα), προβλέπουν την χρήση καυσίμων χωρίς άνθρακα καθώς και μηχανισμούς μείωσης των εκπομπών βασισμένων στην παγκόσμια αγορά. [9]

1.3 Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα

Υφίστανται διάφορες μέθοδοι και τεχνολογίες για την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από διάφορους τομείς παραγωγής. Διάφορες μελέτες ανά τα χρόνια, προτείνουν τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με την ταυτόχρονη αύξηση της απόδοσης κατά την ενεργειακή μετατροπή, τη χρήση καυσίμων χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα και την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, οι επιλογές αυτές δεν επαρκούν για να αντιμετωπίσουν μακροπρόθεσμα το πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. [10] Αντίθετα, οι τεχνολογίες δέσμευσης, αποθήκευσης και χρήσης του διοξειδίου του άνθρακα, μπορούν να παρέχουν μια βιώσιμη λύση στην μακροπρόθεσμη μείωση των επιπέδων του

διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, έως ότου γίνει η μετάβαση στην απόλυτη χρήση πράσινων/ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από ανθρωπογενείς βιομηχανικές διεργασίες και το οδηγούν προς μακροπρόθεσμη αποθήκευση ή βραχυπρόθεσμη επαναχρησιμοποίηση σε διάφορες χημικές εφαρμογές. [11] Η συγκεκριμένη τεχνολογική ιδέα, έχει ερευνηθεί, έχει εφαρμοστεί και έχει γίνει αποδεκτή, από πληθώρα ειδικών παγκοσμίως, ενώ τα συστήματα που την εφαρμόζουν, λειτουργούν με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και βέλτιστες επιδόσεις δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Γενικώς υφίσταται πληθώρα τέτοιων συστημάτων, αλλά η επιλογή της κατάλληλης μονάδας δέσμευσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις συνθήκες του διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται, οι οποίες περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση, τη θερμοκρασία, την πίεση, την ροή κ.α. [12] Ταυτόχρονα, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται και από τεχνικούς περιορισμούς, όπως της διαθεσιμότητας χώρου, της παροχής ενέργειας, του ποσοστού δέσμευσης κ.α.

1.4 Στόχοι και Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Οι κύριοι στόχοι της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αναπτύσσονται σε 5 κεφάλαια στα οποία:

1^ο Κεφάλαιο: Εκτελείται η λεπτομερής βιβλιογραφική αναφορά των κυριότερων μεθοδολογιών και τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, με την ανάλυση των συστημάτων και των διεργασιών που εκτελούν.

2^ο Κεφάλαιο: Εκτελείται η λεπτομερής βιβλιογραφική ανάλυση του εγχειρήματος της αποθήκευσης του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, με όλες τις μακροπρόθεσμες ή βραχυπρόθεσμες επιλογές αποθήκευσης και επαναχρησιμοποίησης.

3^ο Κεφάλαιο: Αναλύεται το εγχείρημα της μεταφοράς του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, με τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπισθούν και τις παραμέτρους που ορίζουν την τελική μορφή του προϊόντος προς μεταφορά.

4^ο Κεφάλαιο: Διενεργείται η τεχνικοοικονομική ανάλυση του εγχειρήματος τοποθέτησης και χρήσης ενός συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα σε υπάρχοντα ή νεότευκτα πλοία. Η τεχνική ανάλυση αφορά τις προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν κατά την εγκατάσταση του συστήματος. Η οικονομική ανάλυση, περιλαμβάνει την ανάλυση των δαπανών που επιφέρει η δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα αλλά και των οικονομικών οφελών που συνοδεύουν το εγχείρημα.

5^ο Κεφάλαιο: Αναλύεται η διαδικασία της αξιολόγησης ενός συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, η οποία αποτελεί το κανονιστικό πλαίσιο γύρω από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία αυτή πηγάζει ευθέως από τις πρακτικές αξιολόγησης των συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με τον Νορβηγικό – Γερμανικό Νηογνώμονα (DNV-GL).

Κεφάλαιο 2: Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιείται η θεωρητική προσέγγιση των μεθοδολογιών και τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, με γνώμονα ποικίλες βιβλιογραφικές έρευνες και υπαρκτές εφαρμογές.

2.1 Υφιστάμενες Μεθοδολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα:

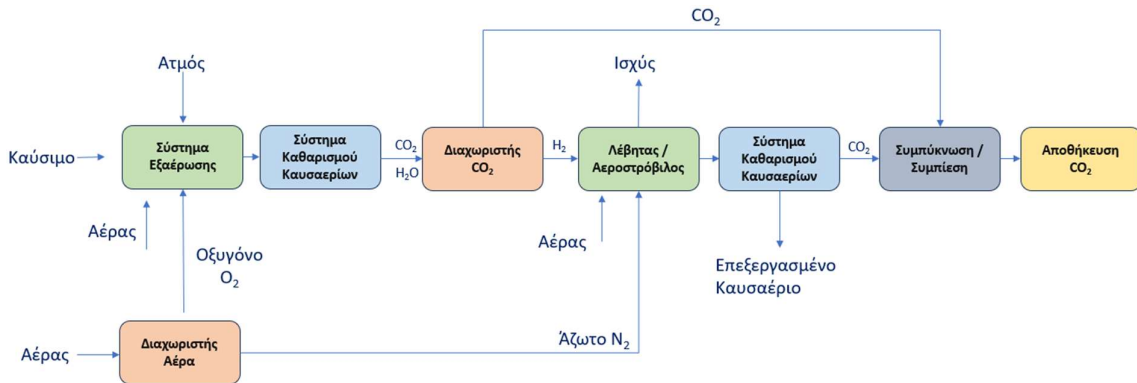
Οι τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα που υφίστανται σε εφαρμογή τη σημερινή εποχή, είναι καταναμημένες σε τρεις βασικές κατηγορίες μεθοδολογιών δέσμευσης:

- ❖ Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα πριν την καύση
- ❖ Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με καύση Οξυγόνου – Καυσίμου
- ❖ Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση

Η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας, εξαρτάται πρωτίστως από τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια, τις συνθήκες λειτουργίας των καυσαερίων και την πίεση στην οποία ευρίσκονται κατά τη ροή τους. Η μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση, είναι η καταλληλότερη για εφαρμογή στον τομέα της ναυτιλίας και στα υπάρχοντα πλοία, καθώς η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια μιας ναυτική μηχανής, κυμαίνεται μεταξύ 4% και 14% κατ' όγκο. Στην δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση, διαχωρίζεται διοξείδιο του άνθρακα υψηλής καθαρότητας από τα καυσαέρια, το οποίο δύναται να αξιοποιηθεί εμπορικώς και να πωληθεί σε πληθώρα εταιρειών και βιομηχανιών, από τον τομέα της εξόρυξης υδρογονανθράκων (για ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου), μέχρι τον τομέα επιστήμης και τεχνολογίας τροφίμων (για παραγωγή αναψυκτικών ροφημάτων). Παρακάτω, αναλύονται οι τρεις βασικές μεθοδολογίες δέσμευσης:

2.1.1 Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα πριν την καύση

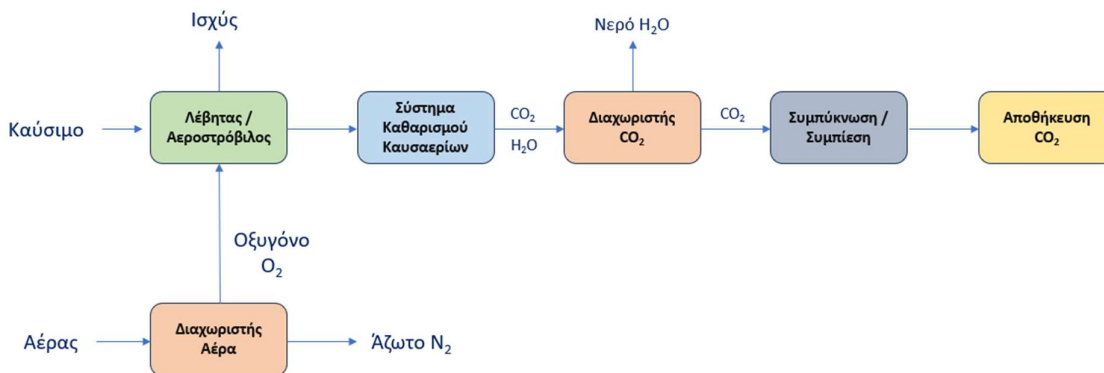
Η μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα πριν την καύση (*Pre-Fuel Combustion Carbon Capture Strategy*), εφαρμόζεται κυρίως κατά την αεριοποίηση του άνθρακα σε κύκλους αεριοποίησης. Σε αυτήν τη μέθοδο, η αντίδραση πραγματοποιείται μεταξύ του καυσίμου, του οξυγόνου (O_2) και του νερού (H_2O) από την οποία, ο άνθρακας που εμπεριέχεται στο καύσιμο, μετατρέπεται ταυτόχρονα σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και υδρογόνο (H_2). Κατόπιν, το μονοξείδιο του άνθρακα, ενώνεται με περίσσεια οξυγόνου και μετατρέπεται και αυτό σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οδηγώντας στον σχηματισμό διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) σε ποσοστό περίπου 20-40%, το οποίο στη συνέχεια δύναται να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί για περαιτέρω χρήση, μετά την αντίδραση διαχωρισμού νερού και αερίου. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόζεται εμπορικώς σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς καθώς ως μεθοδολογία δεν παράγει αέρια απορρίμματα αλλά αντίθετα παράγει νερό το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε άλλες διεργασίες παραγωγής και λειτουργίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων βιομηχανικών τομέων, αποτελούν οι βιομηχανίες παραγωγής μπαταριών, οι βιομηχανίες αεροδιαστημικής, η αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. [13]



Εικόνα 2 – Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας δέσμευσης διοξειδίου πριν την καύση

2.1.2 Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με καύση Οξυγόνου-Καυσίμου

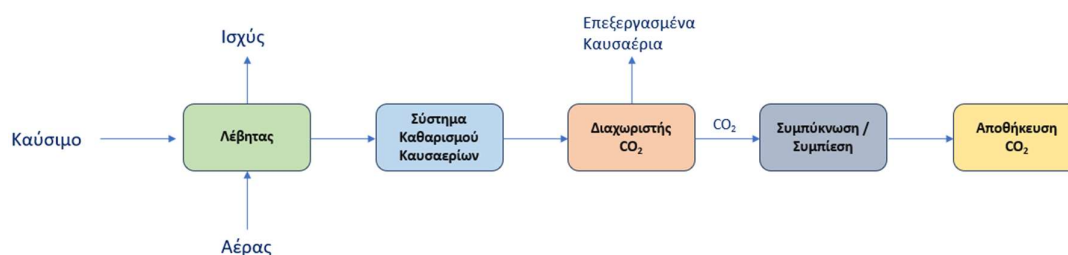
Στη μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με καύση οξυγόνου - καυσίμου (*Oxy-Fuel Combustion Carbon Capture Strategy*), η καύση πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου με οξυγόνο (O_2), με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια, να αγγίζει σε ποσοστό το 80% με 90%. Ταυτόχρονα, εξαιτίας του διαχωρισμού οξυγόνου – αζώτου πριν από την καύση, ελαχιστοποιείται η ύπαρξη οξειδίων του αζώτου (NO_x), τα οποία αποτελούν ρύπους. Ως αποτέλεσμα, διευκολύνονται οι διαδικασίες καθαρισμού του διοξειδίου του άνθρακα, συγκριτικά με τις άλλες μεθοδολογίες. Προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης και να αναφλεχθεί το μίγμα οξυγόνου - καυσίμου, πραγματοποιείται ανακυκλοφορία των καυσαερίων και όχι εκ νέου παροχή αέρα. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία συνδέεται συνήθως με την διαδικασία καύσης κονιοποιημένου άνθρακα. Ως μεθοδολογία προτιμάται εξαιτίας του χαμηλού κόστους του απαιτούμενου αρχικού επενδυτικού κεφαλαίου για την αγορά του απαραίτητου εξοπλισμού. [14]



Εικόνα 3 – Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας δέσμευσης διοξειδίου με καύση Οξυγόνου - Καυσίμου

2.1.3 Μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση

Στη μεθοδολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση (*Post-Fuel Combustion Carbon Capture Strategy*), η σύλληψη του διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιείται απευθείας από τα καυσαέρια κατά την εξαγωγή τους. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία, η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται μεταξύ 3% και 4% στα καύσιμα φυσικού αερίου και από 12% έως 15% στα καύσιμα άνθρακα. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία θεωρείται η πιο απλουστευμένη, συγκριτικά με τις υπόλοιπες και μπορεί να εφαρμοστεί σε ήδη υπάρχοντα πλοία με κάποια διαδικασία μετασκευής. Ακόμη, η αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια, μπορεί να επιτευχθεί είτε με ανακυκλοφορία των καυσαερίων στον κινητήρα, είτε με παροχή μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας και χρήση κατάλληλου εξοπλισμού. [15]



Εικόνα 4 – Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας δέσμευσης διοξειδίου μετά την καύση

2.2 Τεχνολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα:

Οι τεχνολογίες που αναλύονται παρακάτω, μπορούν να χαρακτηριστούν ως συμβατικές, καθώς πρόκειται για μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διάφορες εφαρμογές. Πραγματοποιούνται σε περιβαλλοντικές θερμοκρασίες και απαιτούν τη χρήση χημικών ουσιών, για τη πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων, ή συγκεκριμένων δομών, για τη φυσική κατακράτηση σωματιδίων, προκειμένου να επέλθει η επιθυμητή δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα. Παρακάτω, αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, με τα αντίστοιχα συστήματα που εκτελούν τις διεργασίες.

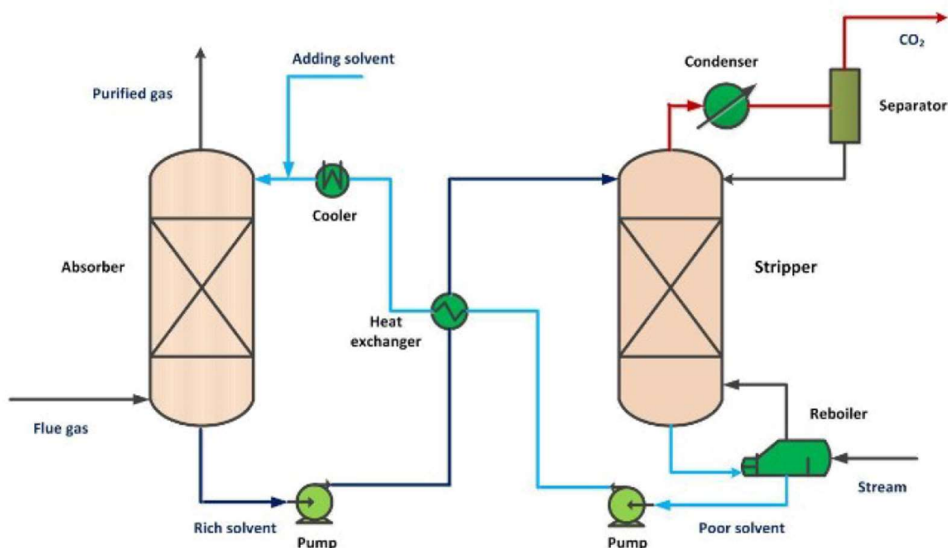
2.2.1 Απορρόφηση (*Absorption*)

Η τεχνολογία δέσμευσης με απορρόφηση (*absorption*), μπορεί να χωριστεί σε φυσική και χημική και περιλαμβάνει χρήση διαλυτών. Στη χημική απορρόφηση, χρησιμοποιούνται διαλύτες με βάση τις αμίνες (αζωτούχες οργανικές ενώσεις με δεσμό $-NR_2$), τα αμινοξέα, την αμμωνία, τα ιοντικά υγρά (*IL*) και τους υδατικούς διαλύτες πιπεραζίνης (*PZ*). [16] Στη φυσική απορρόφηση, γίνεται χρήση των διαλυτών σελεξόλη, ρεκτιζόλη και γλυκόλη. Ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιείται μέσω χημικής αντίδρασης με τα καυσαέρια. Αρχικά το διοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται από τον διαλύτη και στη συνέχεια απομακρύνεται από αυτόν κατά το στάδιο της αναγέννησης. Η χημική απορρόφηση, συγκριτικά με τη φυσική απορρόφηση, έχει υψηλότερη απόδοση και τις περισσότερες φορές χαμηλότερο κόστος, αν και κατά το στάδιο της αναγέννησης, απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα. [17]

Η περισσότερη ανεπτυγμένη τεχνολογία δέσμευσης με χημική απορρόφηση, η οποία είναι σε χρήση τη σημερινή εποχή, είναι εκείνη που χρησιμοποιεί υδατικούς διαλύτες με βάση τις αμίνες. Οι διαλύτες αυτοί, περιέχουν πρωτοταγείς, δευτεροταγείς ή τριτοταγείς δομές αμινών και τουλάχιστον μια υδροξειδική ομάδα (-OH). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η μονοαιθανολαμίνη (MEA), η διαιθυλαμίνη (DEA) και η μεθυλοαιθανολαμίνη (MDEA). [18] Παρακάτω αναλύονται οι βασικοί χημικοί διαλύτες και η αντίστοιχη διαδικασία απορρόφησης που χρησιμοποιούνται.

Μονοαιθανολαμίνη – (MEA)

Η μονοαιθανολαμίνη, αποτελεί τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο χημικό διαλύτη, σε αναλογία κατά βάρος 30%/70% με νερό, εξαιτίας του ταχύτατου ρυθμού αντίδρασης που παρουσιάζει με το διοξείδιο του άνθρακα. Πρόκειται για έναν αρκετά οικονομικό διαλύτη, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρούς αντιδραστήρες κατακόρυφης στήλης. [17] Τα κύρια εξαρτήματα που τελούν τη διαδικασία είναι η στήλη απορρόφησης και η στήλη απομάκρυνσης και φαίνονται στο διάγραμμα 2.1:



Διάγραμμα 1 – Διάταξη συστήματος μονοαιθανολαμίνης [17]

Στήλη Απορρόφησης (Absorber Column): Ο χημικός διαλύτης της μονοαιθανολαμίνης εισέρχεται στην κορυφή της στήλης απορρόφησης, ενώ τα καυσαέρια εισέρχονται από το κάτω μέρος της. Η αντίδραση συμβαίνει εντός της στήλης απορρόφησης και είναι τύπου ανάστροφης ροής, συνεπώς ο διαλύτης, εμπλουτισμένος με το διοξείδιο του άνθρακα, εξέρχεται από το κάτω μέρος της στήλης και εισέρχεται στη στήλη απομάκρυνσης με τη βοήθεια αντλίας. Το επεξεργασμένο μίγμα των καυσαερίων, από το οποίο έχει απομακρυνθεί το μεγαλύτερο μέρος διοξειδίου του άνθρακα, εξέρχεται από το πάνω μέρος της στήλης απορρόφησης. [17]

Στήλη Απομάκρυνσης (Stripper Column): Καθώς το μίγμα διαλύτη – διοξειδίου του άνθρακα εξέρχεται από τη στήλη απορρόφησης, τροφοδοτείται υπό πίεση στο άνω μέρος της στήλης απομάκρυνσης. Η διαδικασία της αναγέννησης του διαλύτη και της

απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα από αυτόν, απαιτεί αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεπώς κατά τη διαδρομή τροφοδοσίας της στήλης απομάκρυνσης, ένας εναλλάκτης θερμότητας, παρέχει περίσσεια θερμότητας στο μίγμα διαλύτη – διοξειδίου του άνθρακα, την οποία αντλεί από το θερμό επεξεργασμένο μίγμα που εξέρχεται από τη στήλη απομάκρυνσης. Το μίγμα αυτό, αποτελεί στην ουσία τον αρχικό διαλύτη, καθώς λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας, έχει απομακρυνθεί το διοξείδιο του άνθρακα από αυτόν. Το διοξείδιο του άνθρακα που απομακρύνεται, εξέρχεται από το πάνω μέρος της στήλης απομάκρυνσης και μέσω ενός συμπυκνωτή, καθαρίζεται από την ύπαρξη νερού και άλλης μορφής ρύπων, προτού μεταφερθεί προς αποθήκευση. [17] Το απαραίτητο θερμικό φορτίο της στήλης απομάκρυνσης έχει υπολογιστεί περίπου ίσο με 3.6 [GJ/tonCO₂]. [19]

Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger): Γίνεται εγκατάσταση ενός εναλλάκτη θερμότητας προκειμένου να μεταφέρεται η υψηλή θερμότητα από τον διαλύτη που έχει απομακρυνθεί το διοξείδιο του άνθρακα, προς το μίγμα διαλύτη – διοξειδίου του άνθρακα. [17]

Ψυγεία (Coolers): Παράλληλα, απαιτείται η εγκατάσταση ψυγείων, προκειμένου να ψύχεται ο θερμός διαλύτης αλλά και το μίγμα των καυσαερίων, προκειμένου να έρχονται στη θερμοκρασία λειτουργίας της στήλης απορρόφησης. [17] Ταυτόχρονα, μπορεί να γίνει εγκατάσταση ενός ψυγείου το οποίο θα αυξάνει την απορροφητική ικανότητα του διαλύτη. Αυτό δύναται να συμβαίνει καθώς η αντίδραση απορρόφησης είναι εξώθερμη, επομένως η απαγωγή θερμότητας στα κατώτερα επίπεδα της στήλης, θα αυξάνει την απορροφητική δυνατότητα του διαλύτη. [20] Ακόμη, για τις ανάγκες ψύξης του συστήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το θαλασσίνο νερό, γεγονός που δύναται να μειώσει τις απαιτήσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα. [17]

Συμπυκνωτής (Condenser): Ο συμπυκνωτής είναι απαραίτητος για την απομάκρυνση του νερού από το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς αυτό εξέρχεται από τη στήλη απομάκρυνσης. Το νερό που συγκαταείται, επαναφέρεται στη στήλη απομάκρυνσης με χρήση αντλίας. Ταυτόχρονα, δύναται να τοποθετηθεί ακόμη ένας συμπυκνωτής, υπεύθυνος για την απομάκρυνση του νερού από τα καυσαέρια. Ωστόσο, η τοποθέτηση αυτή μπορεί να αποφευχθεί, ελαττώνοντας τη θερμοκρασία των καυσαερίων στα ανώτερα επίπεδα της στήλης απορρόφησης, υγροποιώντας έτσι το νερό που εμπεριέχεται στα καυσαέρια και αποτρέποντάς το να εξέλθει από τη στήλη απορρόφησης. [21]

Λέβητας Αναβρασμού (Reboiler): Η παροχή θερμότητας στη στήλη απομάκρυνσης, γίνεται μέσω ενός λέβητα αναβρασμού, ο οποίος παρέχει ατμό με θερμοκρασία από 120 έως 140 [°C] και πίεση 2 έως 3 [bar]. Το νερό που συμπυκνώνεται στη στήλη απομάκρυνσης, εξέρχεται από το κάτω μέρος αυτής και εισέρχεται στον λέβητα αναβρασμού, όπου μέσω των καυστήρων μετατρέπεται εκ νέου σε ατμό και επαναχρησιμοποιείται στη διαδικασία της αναγέννησης του διαλύτη. Προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος του λέβητα αναβρασμού, δύναται να χρησιμοποιηθεί ένας συμπιεστής ισχύος ατμού (*Lean Vapor Compressor LVC*), όπου θα συμπιέζει τον συμπυκνωμένο ατμό φτάνοντάς τον σε υψηλότερες θερμοκρασίες, προτού επανεισυχθεί στη στήλη απομάκρυνσης. [19]

Αποσύνθεση Διαλύτη (Solvent Degradation): Η επαναληπτική χρήση του διαλύτη στη διαδικασία της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, οδηγεί στην αποσύνθεση αυτού. Ο ρυθμός αποσύνθεσης του διαλύτη μονοαιθανολαμίνης είναι περίπου ίσος με 2.2 κιλά ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται. Αυτή η αποσύνθεση οφείλεται σε θερμική αποσύνθεση, καρβαμικό πολυμερισμό και οξειδωτική αποσύνθεση. Η θερμική αποσύνθεση πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασίες άνω των 200 βαθμών κελσίου, συνεπώς, στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν προσεγγίζονται από τις στήλες απορρόφησης και απομάκρυνσης, αφού αυτές λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως 140 [°C]. Η οξειδωτική αποσύνθεση συμβαίνει εξαιτίας της ύπαρξης διαλυμένου οξυγόνου στον διαλύτη και μπορεί να αντιμετωπισθεί με την προσθήκη θειώδους νατρίου (Na_2SO_3) ή φορμαλδεΐδης (μεθανάλης CH_2O). [18] [22]

Παράλληλα, σε διαφορετική μελέτη αναγράφεται πως ο ρυθμός αποσύνθεσης του διαλύτη μονοαιθανολαμίνης κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 14.9 κιλά ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που απομακρύνεται, με ρύπους όπως «οξειδία θείου SO_x , οξειδία αζώτου NO_x , αλογονωμένες ενώσεις, υδρογονάνθρακες και λοιπές προσμίξεις» [23] να αντιδρούν με τη μονοαιθανολαμίνη και σχηματίζουν οξαζολιδίνη-2-1, ουρία μονοαιθανολαμίνης, *HEEDA*, *HEIA*». [23] Η θερμική αποσύνθεση συμβαίνει κυρίως στη στήλη απομάκρυνσης, εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί (120-140°C). Αντίθετα η οξειδωτική αποσύνθεση λαμβάνει χώρα στη στήλη απορρόφησης εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας των καυσαερίων σε οξυγόνο. [23]

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές, για τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που επικρατούν στα βασικά εξαρτήματα του συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση διαλύτη μονοαιθανολαμίνης (*MEA*).

Πίνακας 1 – Θερμοκρασία και πίεση στα κύρια εξαρτήματα συστήματος δέσμευσης μονοαιθανολαμίνης [19]

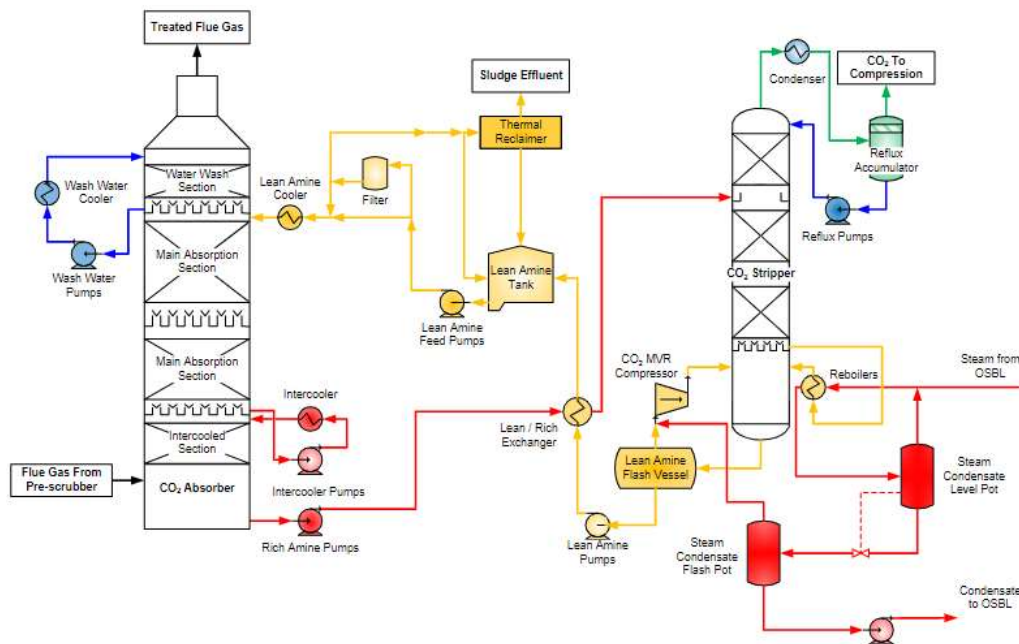
Δέσμευση με διαλύτη MEA	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση (bar)
Καυσαέρια	30	1
Στήλη Απορρόφησης	30	1
Εναλλάκτης Θερμότητας: Μίγμα διαλύτη – διοξειδίου του άνθρακα	Εισαγωγή: 40 Εξαγωγή: 110	1
Εναλλάκτης Θερμότητας: Μίγμα διαλύτη χωρίς διοξείδιο του άνθρακα	Εισαγωγή: 120 Εξαγωγή: 55	1
Στήλη Απομάκρυνσης	120	2
Διοξείδιο του άνθρακα προς συμπυκνωτή	30	2

Διαλύτης DC-103

Η θυγατρική εταιρεία της *SHELL*, ονόματι *CANSOLV*, ανέπτυξε ένα σύστημα για δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα μεγάλης κλίμακας, με χρήση του διαλύτη *DC-103*. Ο συγκεκριμένος διαλύτης, χρησιμοποιείται ως μίγμα 50% κατά βάρος *DC-103* και 50% κατά βάρος νερό. Συγκριτικά με τον διαλύτη μονοαιθανολαμίνης (*MEA*), ο διαλύτης *DC-103* απαιτεί μικρότερα ποσά θερμικής ενέργειας για αναγέννηση ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μικρότερος ρυθμός αποσύνθεσης με την απαιτούμενη θερμότητα να είναι περίπου 2.33 [GJ/tonCO₂]. [20]

Τα εξαρτήματα ενός συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα *CANSOLV* με χρήση διαλύτη *DC-103*, είναι παρόμοια με εκείνα του συστήματος διαλύτη *MEA*, καθώς περιλαμβάνεται μια στήλη απορρόφησης και μια στήλη απομάκρυνσης (όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2), με τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες που υφίστανται σε αυτές, να είναι παρόμοιες με εκείνες της διαδικασίας διαλύτη *MEA*. Ωστόσο, στο παρόν σύστημα προστίθενται ορισμένα εξαρτήματα όπως μια μονάδα θερμικής ανάκτησης (*Thermal Reclaimer Unit*), ένα τμήμα πλύσης με νερό, μια μονάδα μηχανικής επανασυμπίεσης ατμού (*Mechanical Vapor Recompression Unit - MVR*) και μια δεξαμενή (δοχείο) ισχυρής αμίνης. [20] Τα συγκεκριμένα εξαρτήματα δύναται να χρησιμοποιηθούν για βελτιστοποίηση, σε συστήματα διαδικασίας με διαλύτη *MEA*. [19] [23]

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα 2.2, το οποίο περιλαμβάνει τα κύρια εξαρτήματα ενός συστήματος *CANSOLV*, τα οποία και θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Διάγραμμα 2 - Διάταξη συστήματος *Cansolv* [20]

Μονάδα Θερμικής Ανάκτησης (TRU): Η συγκεκριμένη μονάδα τελεί μια διαδικασία απόσταξης υπό κενό, όπου ιοντικά και μη ιοντικά προϊόντα αποσύνθεσης, απομακρύνονται μέσω χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Το μίγμα αμίνης *DC-103* και

νερού φτάνει σε σημείο βρασμού και απομακρύνονται, ενώ η αποσυνθεμένη αμίνη DC-103 με λοιπούς ρύπους, συλλέγονται στον πυθμένα της μονάδας, μέσω μιας διαδικασίας εφαρμογής δεσμίδων (*semi-batch*). [20] Οι συγκεκριμένοι ρύποι, δημιουργούνται κατά την αποσύνθεση του διαλύτη DC-103 και συνήθως είναι ρύποι διοξειδίου του θείου (SO₂). [24]

Τμήμα Πλύσης Νερού (*Water Wash*): Το τμήμα πλύσης με νερό, βρίσκεται στο άνω μέρος της στήλης απορρόφησης και συμβάλει στη κατακράτηση των πτητικών ενώσεων και των αμινών που απορροφώνται από τα καυσαέρια. Κατόπιν της πλύσης, αλλά και της απορρόφησης του διοξειδίου, τα καυσαέρια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα όντας πλέον επεξεργασμένα. [20]

Μονάδα Μηχανικής Επανασυμπίεσης Ατμού (*Mechanical Vapor Recompression*): Η συγκεκριμένη μονάδα, περιλαμβάνει έναν λέβητα αναβρασμού (*Reboiler*) και παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για τη διαδικασία της αναγέννησης του διαλύτη, στη στήλη απομάκρυνσης. Ως μονάδα, αντιστοιχεί στον συμπιεστή ισχύος ατμού (*Lean Vapor Compressor LVC*) των συστημάτων διαδικασίας διαλύτη MEA, όπου σκοπός του είναι να συμπιέζει τον συμπυκνωμένο ατμό σε υψηλότερες θερμοκρασίες, προτού επανεισαχθεί στη στήλη απομάκρυνσης. Η ενσωμάτωση μιας μονάδας μηχανικής επανασυμπίεσης ατμού (*MVR*), οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ατμού κατά 33%. Σε συνεργασία με την αξιοποίηση του συμπυκνώματος από τον αναβραστήρα, επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης ατμού κατά 38%, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απαιτήσεις θερμικής ενέργειας. [20] Χωρίς τη χρήση μονάδας *MVR*, οι ενεργειακές απαιτήσεις της απομάκρυνσης αυξάνονται από 2.33 [GJ/tonCO₂] σε περίπου 3.10 [GJ/tonCO₂]. [25]

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές, για τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που επικρατούν στα βασικά εξαρτήματα του συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα *CANSOLV* με χρήση διαλύτη DC-103.

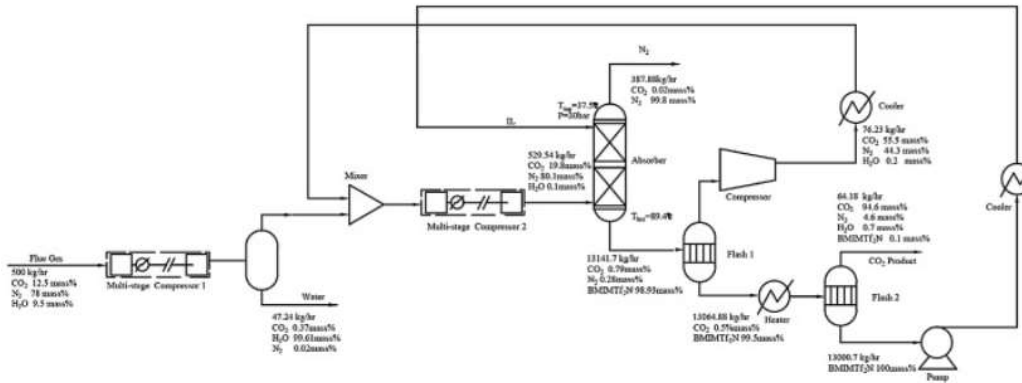
Πίνακας 2 Θερμοκρασία και πίεση στα κύρια εξαρτήματα συστήματος δέσμευσης *Cansolv* [20]

Δέσμευση με διαλύτη DC-103	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση (bar)
Καυσαέρια	45	1
Στήλη Απορρόφησης	40	1
Εναλλάκτης Θερμότητας: Μίγμα διαλύτη – διοξειδίου του άνθρακα	Εισαγωγή: 40 Εξαγωγή: 115	1
Εναλλάκτης Θερμότητας: Μίγμα διαλύτη χωρίς διοξείδιο του άνθρακα	Εισαγωγή: 120 Εξαγωγή: 55	1
Στήλη Απομάκρυνσης	120	2
Διοξείδιο του άνθρακα προς συμπυκνωτή	30	2

Ιοντικά Υγρά

Τα ιοντικά υγρά, μπορούν να αποτελέσουν μια αποτελεσματική εναλλακτική επιλογή έναντι των διαλυτών μονοαιθανολαμίνης, καθώς παρουσιάζουν χαμηλή πτητικότητα, επαρκείς διαλυτικές ικανότητες και μεγάλη αντοχή σε θερμική αποσύνθεση. Σπουδαιότερο πλεονέκτημά τους, αποτελεί η σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση των δαπανών, γεγονός που τα καθιστά αρκετά υποσχόμενα σε τεχνολογίες συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, υπαρκτές εφαρμογές με χρήση ως διαλύτη το ιοντικό υγρό *bmim*[*Tf₂N*] (1-βουτυλο-3-μεθυλιμιδαζόλιο δις-τριφθορομεθανοσουλφονυλ) [26], επετεύχθη συνολική μείωση της θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής κατανάλωσης κατά 30% συγκριτικά με τυπικές διεργασίες διαλύτη μονοαιθανολαμίνης. [27] Παράλληλα, τα συστήματα δέσμευσης που χρησιμοποιούν ιοντικά υγρά, προσφέρουν τη δυνατότητα της ανακύκλωσης ενώ δύναται να σχεδιαστούν με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε να προσφέρουν τη βέλτιστη απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα. Ταυτόχρονα, ως διαλύτες έχουν υψηλό εύρος υγρής φάσης, ενώ ως επί το πλείστον είναι μη εύφλεκτα. Κυριότερο μειονέκτημα των συγκεκριμένων διαλυτών, αποτελεί το υψηλό ιξώδες, το οποίο κατά την απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να γίνει έως και 200 φορές πιο υψηλό από εκείνο του νερού. Ωστόσο το συγκεκριμένο πρόβλημα δύναται να διορθωθεί με τη προσθήκη ειδικών αιθέρων ή ιμιδαζολικών ανιόντων, όπου οδηγούν στη μείωση του ιξώδους σε ποσοστό έως και 43%. Επιπλέον, ως διαλύτες είναι πιο ακριβοί, ενώ εκκρεμούν επιπρόσθετες έρευνες που αφορούν τυχόν περιβαλλοντικές επιπτώσεις, έλεγχο της τοξικότητας και της συμπεριφοράς τους έναντι στη διάβρωση. [28]

Η διαδικασία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση ιοντικών υγρών, λαμβάνει μέρος στα αντίστοιχα εξαρτήματα των συστημάτων με χρήση διαλύτη μονοαιθανολαμίνης. Μοναδική διαφορά αποτελεί η ύπαρξη δύο συστήματα *Flash*, αντί για στήλη απομάκρυνσης, στους οποίους γίνεται η αναγέννηση του διαλύτη ιοντικού υγρού. Στη στήλη απορρόφησης, το καυσαέριο που αποτελείται κυρίως από άζωτο, απελευθερώνεται από το άνω μέρος της, ενώ ο διαλύτης, πλούσιος σε διοξείδιο του άνθρακα, εξέρχεται από το κάτω μέρος της στήλης και αντλείται υπό πίεση στο σύστημα *Flash-1*. Εκεί, το αέριο μίγμα, που αποτελείται από άζωτο (N_2), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και υδρατμούς, διαχωρίζεται από τον διαλύτη, ο οποίος είναι πλούσιος σε διοξείδιο του άνθρακα. Το αέριο μίγμα οδηγείται εκ νέου στη στήλη απορρόφησης, ενώ ο διαλύτης εισέρχεται στο σύστημα *Flash-2*. Εκεί λαμβάνει μέρος ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο συλλέγεται, από τον διαλύτη, ο οποίος ανακυκλώνεται για τον επόμενο κύκλο απορρόφησης. Ακόμη, γίνεται χρήση δύο πολυβάθμιων συμπιεστών, οι οποίοι αυξάνουν την πίεση των καυσαερίων πριν την είσοδό τους στη στήλη απορρόφησης. Μετά το πρώτο στάδιο συμπίεσης, γίνεται διαχωρισμός του νερού από τα καυσαέρια, με χρήση ειδικού διαχωριστή υγρού – αερίου. Τέλος γίνεται ψύξη και συμπίεση τόσο των αερίων που εξέρχονται από τους τομείς *Flash-1* και *Flash-2* όσο και του αναγεννημένου διαλύτη, πριν τη εκ νέου διοχέτευσή τους στη στήλη απορρόφησης, για την εκτέλεση ενός νέου κύκλου διεργασίας. [27]

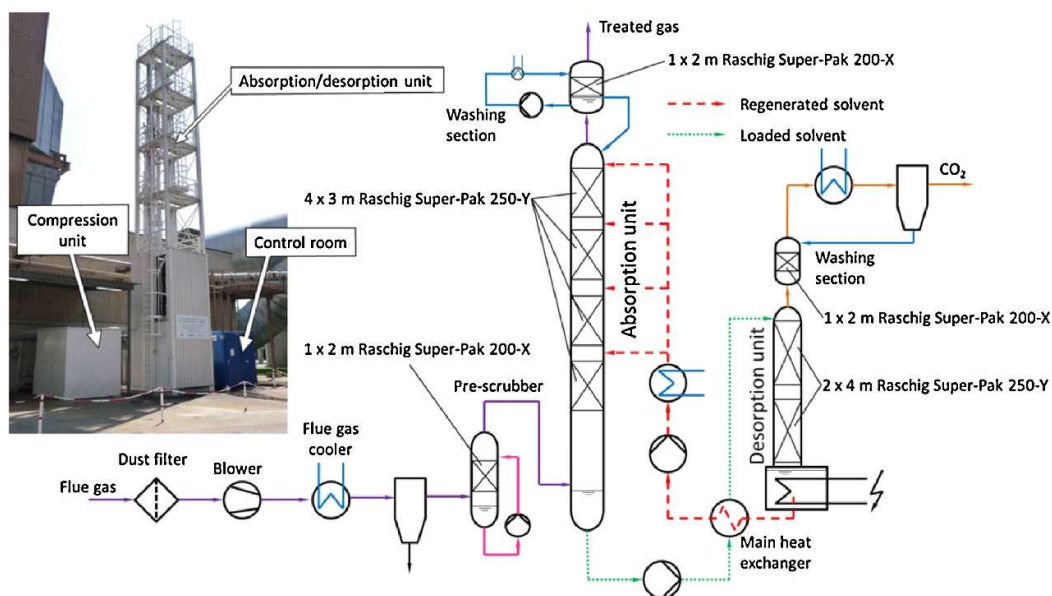


Διάγραμμα 3 – Διάταξη συστήματος ιοντικών υγρών [27]

Πιπεραζίνη - (PZ)

Η πιπεραζίνη (*Piperazine – PZ*), αποτελεί μια πολυκυκλική αμίνη, η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί είτε μεμονωμένα είτε ως ουσία σε μείγμα διαλυτών η οποία ενισχύει και επιταχύνει τον ρυθμό της αντίδρασης. Συγκριτικά με τον διαλύτη μονοαιθανολαμίνης, η πιπεραζίνη πλεονεκτεί καθώς παρουσιάζει διπλάσια απορροφητική ισχύ, πολύ χαμηλότερη θερμική αποσύνθεση καθώς και υψηλότερη θερμική ευστάθεια ακόμη και σε θερμοκρασίες που αγγίζουν τους 150 βαθμούς Κελσίου (°C). Το γεγονός αυτό, οφείλεται στην έλλειψη αλκοολικής ομάδας της πιπεραζίνης, το οποίο την καθιστά περισσότερο ανεκτική σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Παρόλα αυτά, επειδή το κόστος της πιπεραζίνης κυμαίνεται περίπου στα 6\$ ανά κιλό διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται, (συνκριτικά με τα 2\$/kgCO₂ της μονοαιθανολαμίνης), είναι αναγκαίο να ρυθμίζεται κατάλληλα η αποσύνθεση του διαλύτη, προκειμένου να μην καθίσταται το κόστος χρήσης της μη βιώσιμο. [29]

Στο άρθρο [29], ελέγχθηκαν οι συνθήκες λειτουργίας τριών πιλοτικών μονάδων, οι οποίες χρησιμοποιούσαν διαλύτη πιπεραζίνης, σε συγκέντρωση 37.6% κατά βάρος (wt-%), με το υπόλοιπο 62.4% να είναι νερό. Οι συγκεκριμένες πιλοτικές μονάδες, ήταν σχεδιασμένες έτσι ώστε τα καυσαέρια να προκύπτουν από καύση γαιανθράκων και φυσικού αερίου. Τα καυσαέρια δέχονταν μια προεργασία, διάγραμμα της οποίας φαίνεται παρακάτω, η οποία περιλάμβανε φίλτρο σκόνης, φουσητήρα, ψύκτη, στήλη διαχωρισμού και σύστημα προκαθαρισμού. Αρχικά από τα καυσαέρια απομακρυνόταν η ύπαρξη θείου, προτού περάσουν από το φίλτρο σκόνης, στο οποίο συγκρατούνταν μικροσωματίδια. Κατόπιν, ο φουσητήρας αύξανε την πίεση και την ταχύτητα ροής των καυσαερίων, προκειμένου να εκκινηθεί η διαδικασία της δέσμευσης, όμοια με εκείνη των συστημάτων που χρησιμοποιούν διαλύτη μονοαιθανολαμίνης. Η απαιτούμενη ισχύς της διαδικασίας αναγέννησης του διαλύτη, βρέθηκε ίση με 3.17 GJ/ton CO₂. Ωστόσο η ταχύτητα ροής του διαλύτη πιπεραζίνης ήταν περίπου 20% μικρότερη από εκείνη του διαλύτη μονοαιθανολαμίνης, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερες ενεργειακές ανάγκες άντλησης και ψύξης. [29]



Διάγραμμα 4 – Λιάταξη συστήματος Πιπεραζίνης [29]

2.2.2 Προσρόφηση (Adsorption)

Προσρόφηση καλείται η επιφανειακή διείσδυση υγρού ή αερίου, σε στερεό. [30] Κατά τη διαδικασία αυτή, τα μόρια του ρευστού (καυσαέρια), προσκολλώνται στην επιφάνεια του στερεού προσροφητικού υλικού. Τα υλικά αυτά, παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα προσρόφησης, μηχανική και θερμική σταθερότητα, καθώς και την ιδιότητα υψηλής επιλεκτικότητας. [16] Ως διαδικασία διαφέρει από εκείνη της απορρόφησης, καθώς τα απορροφητικά μέσα απορροφούν μόρια ουσίας σε ολόκληρη την ύλη τους, ενώ τα προσροφητικά μέσα, προσκολλούν μόρια, μόνο στην επιφάνειά τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, παρέχει μεγάλο εύρος επιλογών και σε συνδυασμό με τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθίσταται ιδιαίτερα ελκυστική ως μεθοδολογία για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση. Χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες, τη χημική (*chemical*) και τη φυσική (*physical*) προσρόφηση.

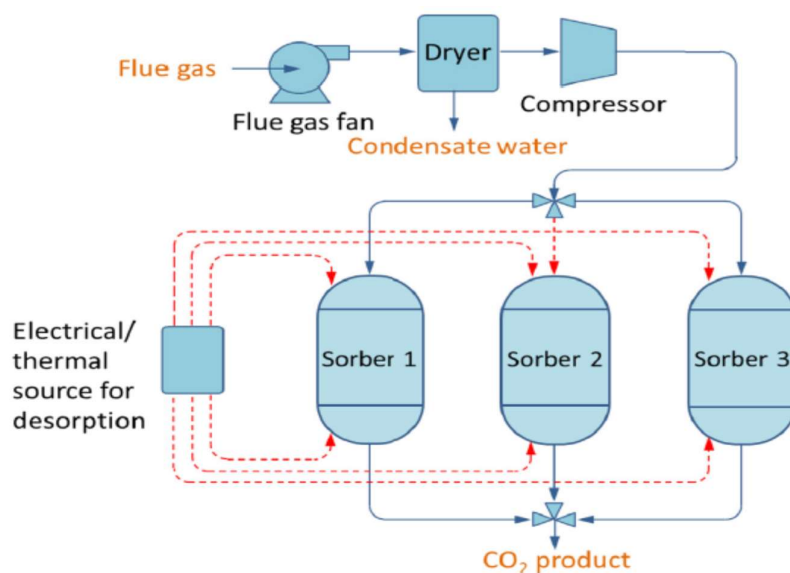
Χημική Προσρόφηση

Στη χημική προσρόφηση, λαμβάνουν μέρος χημικά προσροφητικά, τα οποία δύναται να είναι οξείδια μετάλλων, ενώσεις αλκαλίων και υδροταλκίτες. Στις ενώσεις αλκαλίων ανήκουν τα πυριτικά και ζirkονικά άλατα λιθίου, ενώ οι υδροταλκίτες είναι υλικά με πολυεπίπεδες δομές θετικώς φορτισμένων κατιόντων και αρνητικώς φορτισμένων ανιόντων. [16] Από τα βασικότερα οξείδια μετάλλων που χρησιμοποιούνται είναι το οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και το οξείδιο του μαγνησίου (MgO). Ειδικότερα το οξείδιο του ασβεστίου αποτελεί κατάλληλη επιλογή, καθώς η πρώτη ύλη (ασβεστόλιθος) υπάρχει σε αφθονία και με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Κατά την αντίδραση, η οποία καλείται ενανθράκωση, ένα mol οξειδίου μετάλλου, αντιδρά με ένα mol διοξειδίου του άνθρακα και μετατρέπεται σε οξείδιο ανθρακικού άλατος. Η αντίδραση αυτή, λαμβάνει μέρος σε αντιδραστήρα ενανθράκωσης στην θερμοκρασία των 20°C. Η αντίστροφη αντίδραση, η οποία καλείται πύρωση και αναγεννά το οξείδιο του ασβεστίου, πραγματοποιείται στους

περίπου 850°C. [16] Βασικό μειονέκτημα των χημικών προσροφητικών είναι η υψηλή ενεργειακή ισχύς που απαιτείται για την αναγέννηση και το υψηλό ενεργειακό κόστος που συνεπάγεται. Η χρήση νανοϋλικών δύναται να βελτιώσει την απόδοση της διαδικασίας, μειώνοντας την απαιτούμενη ενεργειακή ισχύ για την αναγέννηση. Ωστόσο η χρήση αυτή συνοδεύεται από το αυξημένο κόστος των συγκεκριμένων υλικών, το οποίο ενδεχομένως να καθιστά το εγχείρημα οικονομικώς μη βιώσιμο. [16]

Φυσική Προσρόφηση

Η φυσική προσρόφηση, απαιτεί μικρότερα ποσά ενέργειας συγκριτικά με τη χημική προσρόφηση, καθώς κατά την αντίδραση των ουσιών, δεν δημιουργούνται χημικοί δεσμοί. Ωστόσο, παρουσιάζει χειρότερη επιλεκτικότητα διοξειδίου του άνθρακα και αζώτου (CO_2/N_2). [31] Οι βασικές προσροφητικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στη φυσική προσρόφηση, είναι οι ζεόλιθοι (*zeolites*), τα μεταλλικά οργανικά πλαίσια (*Metal Organic Frameworks – MOF*) και διάφορα ανθρακικά υλικά. Τα δύο τελευταία, παρουσιάζουν υψηλότερες δυνατότητες προσρόφησης διοξειδίου του άνθρακα ωστόσο απαιτούν υψηλότερες πιέσεις κατά την διεργασία, η οποία κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά, οι ζεόλιθοι, αν και παρουσιάζουν μικρότερες δυνατότητες προσρόφησης διοξειδίου του άνθρακα, απαιτούν πολύ χαμηλότερες συνθήκες πίεσης αλλά ταυτόχρονα υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διεργασία. [18] Γενικότερα, η ύπαρξη ρύπων στα καυσαέρια, όπως οξείδια του θείου (SO_x) και οξείδια του αζώτου (NO_x), καθώς και η ύπαρξη νερού (H_2O), δυσχεραίνει τη διαδικασία της προσρόφησης. Προκειμένου να αποφευχθεί η ύπαρξη αυτή, γίνεται ειδική προεργασία στα καυσαέρια. [16]



Διάγραμμα 5 – Διάταξη συστήματος φυσικής προσρόφησης [16]

Στο παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται η γενική διάταξη των κύριων μελών που απαρτίζουν ένα σύστημα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση προσρόφησης. Κατά τη λειτουργία του συστήματος, το σύστημα ξήρανσης (*dryer*), απομακρύνει την πιθανή ύπαρξη νερού από τα καυσαέρια (*flue gas*), πριν αυτά τροφοδοτηθούν στον συμπιεστή

(compressor), ο οποίος ανεβάζει την πίεσή τους, πριν εισαχθούν στους θαλάμους (chambers – Sorber 1,2,3). Ο πρώτος θάλαμος λειτουργεί ως τροφοδοσία και ο δεύτερος θάλαμος έχει τον ρόλο της μονάδας προσρόφησης, με το προσροφητικό υλικό. Ο τρίτος θάλαμος, λειτουργεί ως εφεδρικός θάλαμος, προκειμένου να καλύψει τυχόν προβλήματα των άλλων δύο, με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί δίχως βλάβες. [31]

Κύκλοι Αναγέννησης

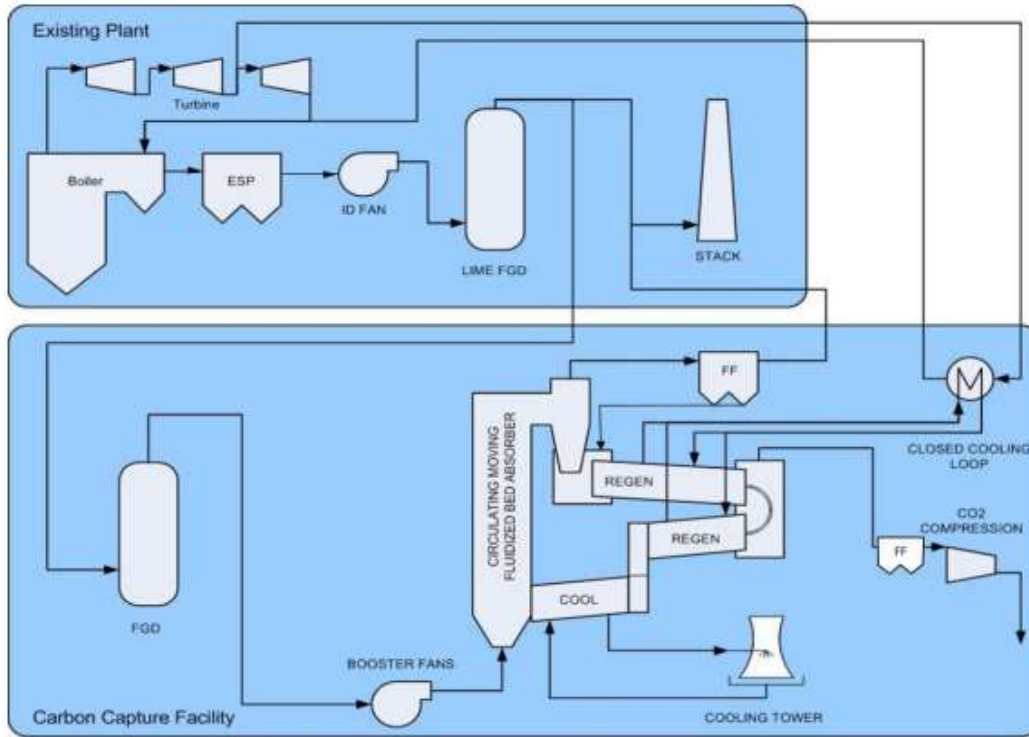
Ο περιορισμός της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, έγκειται στην επάρκεια και αποτελεσματικότητα της αναγέννησης της προσροφητικής ουσίας. Κατά τη διαδικασία της προσρόφησης, τα καυσαέρια εισέρχονται σε έναν αντιδραστήρα μορφής συσκευασμένης κλίνης (packed bed) και προσροφούνται από την προσροφητική ουσία. Η προσροφητική ουσία, συγκρατεί το διοξείδιο του άνθρακα, με αποτέλεσμα να γίνεται κορεσμένη και να χρήζει αναγέννησης. Το προσροφητικό υλικό, αναγεννάται διαμέσου της θερμοκρασίας, της πίεσης, καθώς και των κινητήριων δυνάμεων κενού ή εναλλασσόμενης ηλεκτρικής τάσης. [31] Συνεπώς, η διαδικασία αναγέννησης της προσροφητικής ουσίας, μπορεί να πραγματοποιηθεί με πέντε διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι εφαρμόζονται εξίσου και στις δύο κύριες κατηγορίες προσρόφησης. Οι κατηγορίες αυτές είναι: [16]

- Προσρόφηση Ταλαντευόμενης Θερμοκρασίας (*Temperature Swing Adsorption - TSA*)
- Προσρόφηση Ταλαντευόμενης Πίεσης (*Pressure Swing Adsorption - PSA*)
- Προσρόφηση Ταλάντευσης υπό Κενό (*Vacuum Swing Adsorption - VSA*)
- Προσρόφηση Ηλεκτρικής Ταλάντευσης (*Electric Swing Adsorption - ESA*)
- Προσρόφηση Ταλάντευσης υπό Κενό/Πίεση και Θερμοκρασία (*Vacuum/Pressure and Temperature Swing Adsorption – VTSA/PTSA*)

Προσρόφηση Ταλαντευόμενης Θερμοκρασίας (*Temperature Swing Adsorption - TSA*):

Η προσρόφηση ταλαντευόμενης θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται κυρίως σε μονάδες διαχωρισμού αέρα, όπου ίχνη διοξειδίου του άνθρακα και νερού διαχωρίζονται από τον αέρα, καθώς και στη διεργασία αφυδάτωσης του φυσικού αερίου. Πολλά προσροφητικά, όπως ο ζεόλιθος 13X, που χρησιμοποιείται συχνά σε τέτοιες εφαρμογές, προσροφούν μεγάλες ποσότητες νερού, γεγονός που μειώνει σημαντικά τη χωρητικότητα προσρόφησης διοξειδίου του άνθρακα, με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η ξήρανση των καυσαερίων πριν τη διαδικασία της προσρόφησης. Η διαδικασία της ξήρανσης, προσθέτει στη διεργασία επιπλέον κατανόηση θερμικής ενέργειας, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 2-3 GJ ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται. Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται νέες προσροφητικές ουσίες προκειμένου να ελαττωθεί η απαιτούμενη θερμική ενέργεια. Για τη βελτίωση της απόδοσης της διαδικασίας, γίνεται χρήση συσκευασμένων κλινών (packed beds), οι οποίες περιλαμβάνουν προσροφητικές ουσίες, με μοναδικό μειονέκτημα την αύξηση του απαιτούμενου χρόνου για την ολοκλήρωση της διεργασίας. [32] Οι κύκλοι διεργασίας κατά την προσρόφηση ταλαντευόμενης θερμοκρασίας, περιλαμβάνουν την προσρόφηση, την εκκένωση, την αναγέννηση και την ψύξη. Ταυτόχρονα, γίνεται χρήση ρευστοποιημένων κλινών

(fluidized beds), οι οποίες ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις ενέργειας να μειώνονται θεωρητικά στα 2.1GJ ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα, ενώ μια ρεαλιστική τιμή υπαρκτής εφαρμογής, κυμαίνεται γύρω στα 3.2GJ θερμικής ενέργειας ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται. [33]



Διάγραμμα 6 – Διάταξη συστήματος προσρόφησης με ταλαντευόμενη θερμοκρασία [32]

Στο παραπάνω διάγραμμα ροής της διαδικασίας προσρόφησης με ταλαντευόμενη θερμοκρασία, φαίνεται ένα πιλοτικό σύστημα ισχύος 1kW, το οποίο μελετήθηκε στο άρθρο [34]. Η μονάδα προσρόφησης, είναι τύπου ρευστοποιημένης κλίνης, ενώ γίνεται χρήση περιστροφικών κλιβάνων (*rotary kilns*) για την αναγέννηση των προσροφητικών. Οι περιστροφικοί κλίβανοι χρησιμοποιούνται τόσο για τη θέρμανση όσο και για τη ψύξη του προσροφητικού υλικού. Η θέρμανση του νερού παρέχεται από τα καυσαέρια της μηχανής, ενώ η ψύξη λαμβάνει μέρος σε ειδικό πύργο ψύξης (*cooling tower*). Πριν από την είσοδο των καυσαερίων στη μονάδα προσρόφησης, γίνεται αποθείωση σε ειδικό σύστημα αποθείωσης καυσαερίων (*Flue Gas Desulphurization System – FGD*), στο οποίο απομακρύνονται οι ρύποι (SO_x , NO_x). Το διοξείδιο του άνθρακα προσροφάται στο προσροφητικό υλικό, το οποίο καθώς ανέρχεται στη μονάδα προσρόφησης, διαχωρίζεται από τα επεξεργασμένα καυσαέρια, στην κορυφή της στήλης (όπως στο διάγραμμα 6). Τα καυσαέρια εξέρχονται από την καμινάδα και το προσροφητικό που περιέχει το διοξείδιο του άνθρακα μεταφέρεται στο τμήμα αναγέννησης. Κατά το στάδιο της αναγέννησης, οι περιστροφικοί κλίβανοι θερμαίνουν το προσροφητικό υλικό με αποτέλεσμα να απομακρύνεται το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο μεταφέρεται προς συμπίεση και πιθανή υγροποίηση. Το αναγεννημένο προσροφητικό υλικό, μεταφέρεται εκ νέου στους

περιστροφικούς κλιβάνους για ψύξη και εν συνεχείαν ανατροφοδοτείται στη μονάδα προσρόφησης για την εκ νέου εκτέλεση ενός ακόμη κύκλου. [34]

Ζεόλιθος 13X (13X: μοριακό κόσκινο με πόρους ομοιόμορφου μεγέθους 9nm). Μόρια με διάμετρο μικρότερη από 9nm, θα απορροφηθούν από τον ζεόλιθο 13X, ενώ μεγαλύτερα θα εξαιρεθούν. [35] [36] [37]

Προσρόφηση Εναλλασσόμενης Πίεσης / Εναλλασσόμενου Κενού Αέρος (Pressure / Vacuum Swing Adsorption – PSA / VSA):

Οι συγκεκριμένες μεθοδολογίες κυκλικής αναγέννησης έχουν αναπτυχθεί αρκετά χρόνια και με χρήση Ζεόλιθου ως προσροφητικό, το διοξείδιο του άνθρακα που δεσμεύεται, φτάνει σε καθαρότητα ως και 95%. Η προσρόφηση υπό κενό, προτιμάται περισσότερο από εκείνη της πίεσης, με την υποπίεση να κυμαίνεται σε τιμές περίπου ίσες με 10 [Kpa] (δηλαδή ένα δέκατο της ατμοσφαιρικής πίεσης). Ωστόσο, οι ενεργειακές απαιτήσεις του λέβητα για τον αναβρασμό, έχει αναφερθεί πως κυμαίνονται μεταξύ 1.3 – 3 [GJ] ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται (σε ηλεκτρικό φορτίο ή 4.5 – 9 [GJ/tonCO₂] σε θερμικό φορτίο), οι οποίες είναι αρκετά υψηλότερες σε σχέση με τις συμβατικές διεργασίες με αμίνη, των οποίων οι ενεργειακές απαιτήσεις κυμαίνονται μεταξύ 2 – 4 [GJ/tonCO₂] θερμικού φορτίου. [33]

Προσρόφηση Εναλλασσόμενου Ηλεκτρισμού (Electric Swing Adsorption - ESA):

Η μεθοδολογία προσρόφησης με χρήση εναλλασσόμενου ηλεκτρισμού, είναι αντίστοιχη με εκείνη της προσρόφησης με εναλλασσόμενη θερμοκρασία, καθώς και οι δύο χρησιμοποιούν τη θερμότητα για την επίτευξη του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο πρόσληψης θερμότητας, όπου στην προσρόφηση με εναλλασσόμενο ηλεκτρισμό, γίνεται χρήση του νόμου Τζάουλ (*Joule heating effect*), ενώ στην προσρόφηση εναλλασσόμενης θερμοκρασίας, γίνεται χρήση θερμών αερίων, όπως για παράδειγμα του ατμού. Ο κύκλος αναγέννησης της συγκεκριμένης μεθοδολογίας μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους φάσεις. Αρχικά τα καυσαέρια εισάγονται σε μια ειδική στήλη, έως ότου σε αυτή να εντοπισθεί η ύπαρξη διοξειδίου του άνθρακα. Κατόπιν, η ροή του καυσαερίου αλλάζει σε ροή ενός αδρανούς αερίου και εν συνεχείαν εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα προκειμένου να θερμανθεί η στήλη. Όταν η θερμοκρασία εσωτερικά της στήλης φτάσει την επιθυμητή τιμή (συνήθως 150°C), η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος διακόπτεται, ενώ η ροή του αδρανούς αερίου συνεχίζει, έως ότου να μην ανιχνεύεται ύπαρξη διοξειδίου του άνθρακα στην εξαγωγή του αερίου από τη στήλη. [38]

Προσρόφηση Εναλλασσόμενης Πίεσης / Εναλλασσόμενου Κενού Αέρος και Θερμοκρασίας (Vacuum/Pressure and Temperature Swing Adsorption – VTSA/PTSA):

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, στην ουσία κάνει ταυτόχρονη χρήση των μεθοδολογιών προσρόφησης υπό κενό / πίεσης και της προσρόφησης εναλλασσόμενης θερμοκρασίας. Ο λόγος που επιλέγεται αυτή η υβριδική μορφή, είναι πως ο συνδυασμός των διαφορετικών

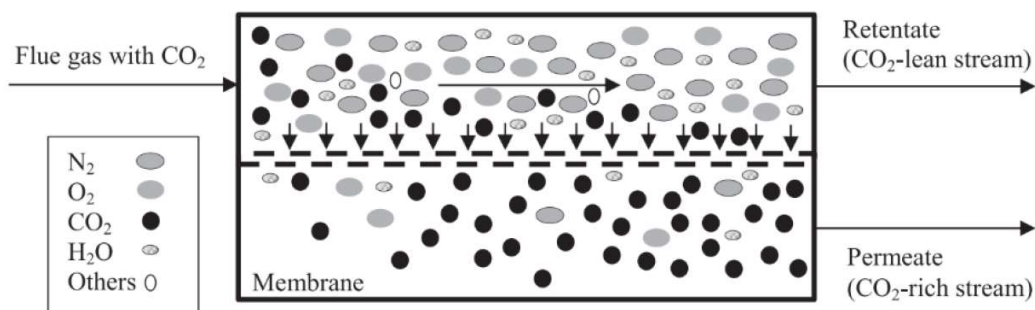
διαδικασιών αναγέννησης του προσροφητικού υλικού, αυξάνει σημαντικά το ποσοστό δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα αλλά και της καθαρότητας αυτού. [31]

2.2.3 Μεμβράνες (Membranes)

Μια σχετικά νέα τεχνολογία στον τομέα της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, αποτελούν οι μεμβράνες διαχωρισμού. Η συγκεκριμένη τεχνολογία, αν και παρέχει χαμηλή καθαρότητα διοξειδίου του άνθρακα, είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλή καθαρότητα, όπως στη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από καυσαέρια, στα οποία παρατηρείται χαμηλή συγκέντρωση διοξειδίου. Το κύριο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί η ανάγκη για μεμβράνες υψηλής εκλεκτικότητας και διαπερατότητας, προκειμένου να δεσμεύεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς, οι έρευνες σήμερα έχουν επικεντρωθεί στην εύρεση και ανάπτυξη νέων υλικών για την κατασκευή των μεμβρανών, που θα επιλύουν το συγκεκριμένο μειονέκτημα. [39]

Η διαδικασία διαχωρισμού με μεμβράνες, γίνεται με χρήση ημιδιαπερατού φράγματος μεμβράνης. Η μια πλευρά του φράγματος, είναι εκείνη στην οποία ρέει το καυσαέριο και ονομάζεται πλευρά κατακράτησης (*retentate*). Τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα, μαζί με μερικά μόρια αζώτου (N_2), οξυγόνου (O_2) και νερού (H_2O), κατά την ροή του καυσαερίου, διαπερνούν το φράγμα από την πλευρά κατακράτησης, στην πλευρά διήθησης (*permeate*). Με αυτόν τον τρόπο, η μια ροή στο φράγμα μεμβράνης είναι πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα, ενώ εκείνη του καυσαερίου είναι φτωχή. Ως αποτέλεσμα, έχει επέλθει ο ζητούμενος διαχωρισμός. [40]

Μερικά προβλήματα της σχεδίασης των συστημάτων μεμβρανών που πρέπει να αντιμετωπισθούν, είναι η χαμηλή πίεση και οι υψηλές ροές των καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγάλες ογκομετρικές ροές και η περαιτέρω ανάγκη για διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα από το άζωτο, οδηγεί σε χρήση μεμβρανών μεγάλης αντοχής και υψηλής διαπερατότητας και εκλεκτικότητας. Ως αποτέλεσμα, σε συνεργασία με την υψηλή ενεργειακή κατανάλωση του εξοπλισμού συμπίεσης, αυξάνεται σημαντικά το κόστος χρήσης συστημάτων μεμβρανών. [41]



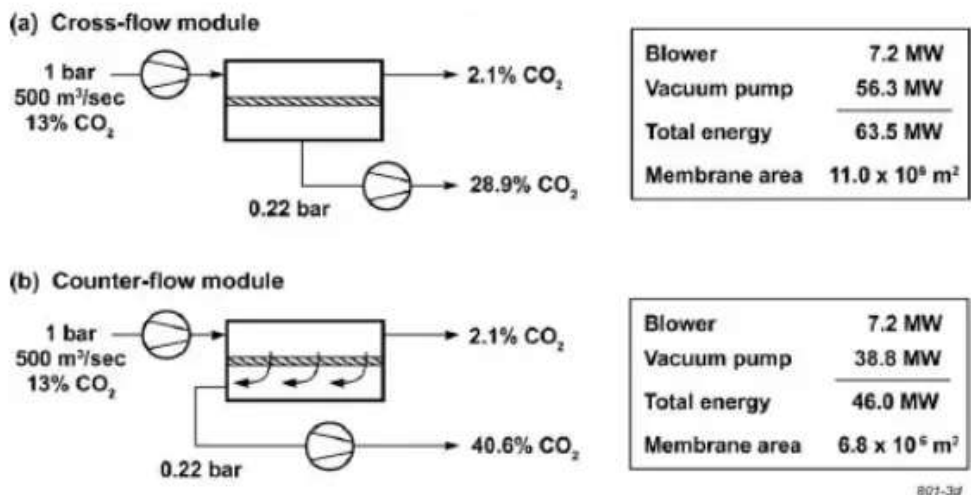
Διάγραμμα 7 – Τεχνολογία Διαχωρισμού με Χρήση Μεμβρανών [40]

Σχεδίαση Συστημάτων Δέσμευσης Μεμβρανών

Κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος διαχωρισμού με χρήση μεμβρανών, κύριος στόχος είναι η κατά το δυνατόν ελάττωση της επιφάνειας της μεμβράνης, προκειμένου να μειωθεί το κόστος της αγοράς και της συντήρησης. Το βασικότερο όμως στοιχείο στη σχεδίαση συστημάτων διαχωρισμού με μεμβράνες, αποτελεί ο λόγος πίεσης (*pressure ratio*), διότι η συμπίεση είναι εκείνη που δημιουργεί τη ροή από την πλευρά κατακράτησης (*retentate*), στην πλευρά διήθησης (*permeate*), με αποτέλεσμα να επέρχεται ο διαχωρισμός. Μια εναλλακτική επιλογή για τη δημιουργία της κινητήριας δύναμης του διαχωρισμού, είναι η εφαρμογή υποπίεσης (με κενό αέρος - *vacuum*) στην πλευρά διήθησης. Πιο αναλυτικά, η πίεση στα μόρια διοξειδίου του άνθρακα στην πλευρά κατακράτησης, πρέπει να είναι υψηλότερη από εκείνη της πλευράς διήθησης προκειμένου να δημιουργηθεί η επιθυμητή ροή. Ένας οικονομικά βέλτιστος λόγος πίεσης που συναντάται στις περισσότερες εφαρμογές είναι 1 προς 5, ενώ μεγαλύτεροι λόγοι πίεσης οδηγούν σε πιο ενεργειακά κοστοβόρο εξοπλισμό συμπίεσης (ή υποπίεσης). Με ένα λόγο συμπίεσης 1 προς 5, δηλαδή 1 [bar] στην πλευρά διήθησης και 5 [bar] στην πλευρά κατακράτησης, επιτυγχάνεται δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα περιεκτικότητας έως 50%, ακόμη και με μεμβράνες υψηλής εκλεκτικότητας. [41]

Τα πλεονεκτήματα του εξοπλισμού συμπίεσης, έναντι του εξοπλισμού υποπίεσης (υπό κενό αέρος), είναι η ανάγκη για μικρότερης έκτασης μεμβράνες, ενώ το κόστος του εξοπλισμού συμπίεσης είναι σχεδόν 30% μικρότερο από εκείνο του εξοπλισμού υποπίεσης. Μειονέκτημα του εξοπλισμού συμπίεσης, αποτελεί η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, η οποία αγγίζει το 20% της ενεργειακής κατανάλωσης ολόκληρης της εγκατάστασης, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη πίεση των 5 [bar]. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλή συγκέντρωση μορίων αζώτου (N_2) από τα καυσαέρια στην πλευρά διήθησης λόγω της συμπίεσης. Αντίθετα, με χρήση υποπίεσης στην πλευρά της διήθησης, δύναται να επιτευχθεί υψηλότερη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, σε μικρότερους όγκους, καθώς αναρροφάται μικρότερη ποσότητα αζώτου και ως αποτέλεσμα το τελικό προϊόν της δέσμευσης, χρειάζεται λιγότερη επεξεργασία. [41]

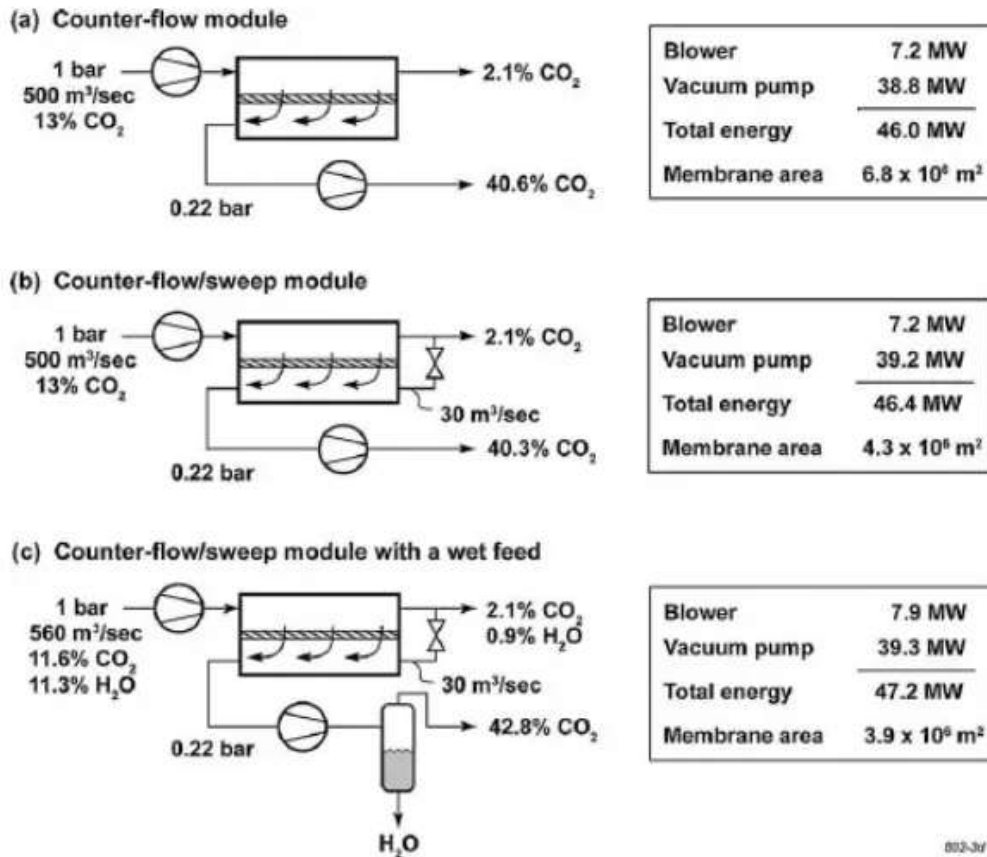
Ένα ακόμη ζήτημα στη σχεδίαση ενός συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση μεμβρανών, είναι η κατάλληλη επιλογή της ροής διαχωρισμού. Πιο συγκεκριμένα, δύναται να υπάρξει η διασταυρούμενη ροή (*crossflow*) και η ανάστροφη ροή (*counterflow*). Έρευνες σε υπαρκτά συστήματα έχουν δείξει πως η ανάστροφη ροή αποδίδει καλύτερα στο εγχείρημα της δέσμευσης, αυξάνοντας τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην πλευρά της διήθησης (*permeate*) σε περίπου 40%, έναντι του 30% που εμφανίζουν οι μονάδες με διασταυρούμενη ροή. Ακόμη, οι μονάδες με ανάστροφη ροή, παρουσιάζουν μειωμένη επιφάνεια μεμβράνης κατά 38% συγκριτικά με τις μεμβράνες σε μονάδες διασταυρούμενης ροής, ενώ η ολική απαιτούμενη ενέργεια που καταναλώνεται, είναι επίσης κατά 18% μειωμένη. [41]



Διάγραμμα 8 – Διαφορές μεταξύ διασταυρούμενης και ανάστροφης ροής σε μονάδες διαχωρισμού με μεμβράνες [41]

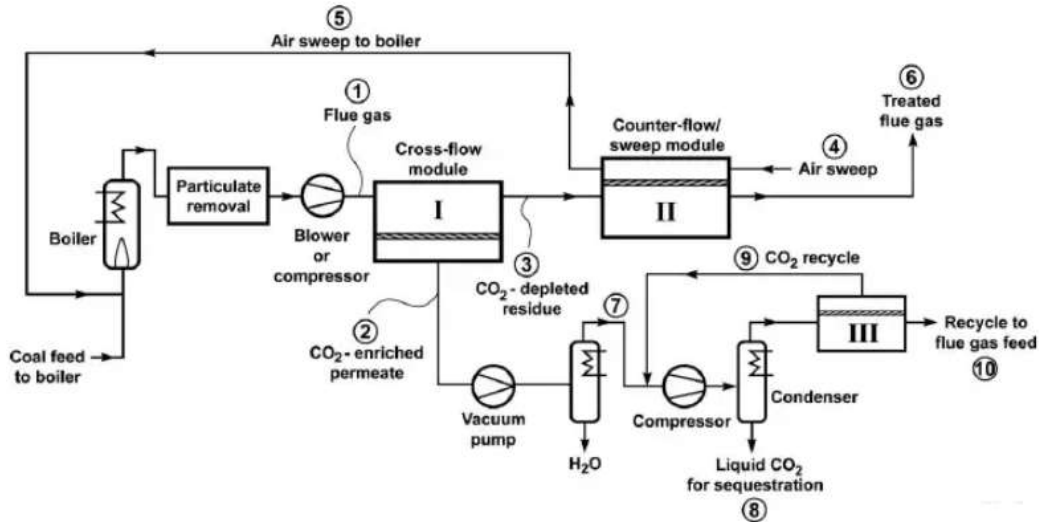
Η επιφάνεια της μεμβράνης, δύναται να μειωθεί περαιτέρω, με χρήση ειδικών μονάδων σάρωσης (*sweep modules*), οι οποίες συγκρατούν ένα μικρό ποσοστό του αερίου που κινείται στην πλευρά κατακράτησης και το ανακατευθύνουν με μειωμένη πίεση στην πλευρά διήθησης. Η συγκεκριμένη προσθήκη, όχι μόνο αυξάνει το συνολικό ποσοστό συγκέντρωσης διοξειδίου αλλά ελαττώνει την απαιτούμενη επιφάνεια μεμβράνης έως και 40%. Αυτό συμβαίνει καθώς το αέριο στην έξοδο της πλευράς κατακράτησης περιέχει ένα εναπομείναν ποσό διοξειδίου του άνθρακα της τάξεως του 3%, το οποίο όταν προστεθεί στην πλευρά διήθησης, δημιουργεί επιπλέονσα διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών, γεγονός που ωθεί περισσότερα μόρια διοξειδίου του άνθρακα να διαπεράσουν το φράγμα και να μετακινηθούν στην πλευρά της διήθησης. Ως αποτέλεσμα, για να επιτευχθεί η ίδια μέγιστη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, απαιτείται μικρότερη έκταση μεμβρανών. [41]

Παράλληλα, καθώς δύναται να υπάρχουν υδρατμοί στα καυσαέρια, μπορεί να γίνει προσθήκη μιας μονάδας υγρής τροφοδοσίας (*wet feed*) στο σύστημα δέσμευσης, η οποία οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας μεμβράνης κατά 10%. Αυτό συμβαίνει καθώς οι υδρατμοί έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα από τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα. Ως αποτέλεσμα, οι υδρατμοί θα αυξήσουν περαιτέρω τη διαπερατότητα του αερίου διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο είναι πιο αραιό, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερη επιφάνεια μεμβρανών για να επιτευχθεί η επιθυμητή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα κατά τη δέσμευση. [41]



Διάγραμμα 9 – Εφαρμογή μονάδος σάρωσης και υγρής τροφοδοσίας σε μονάδα ανάστροφης ροής [41]

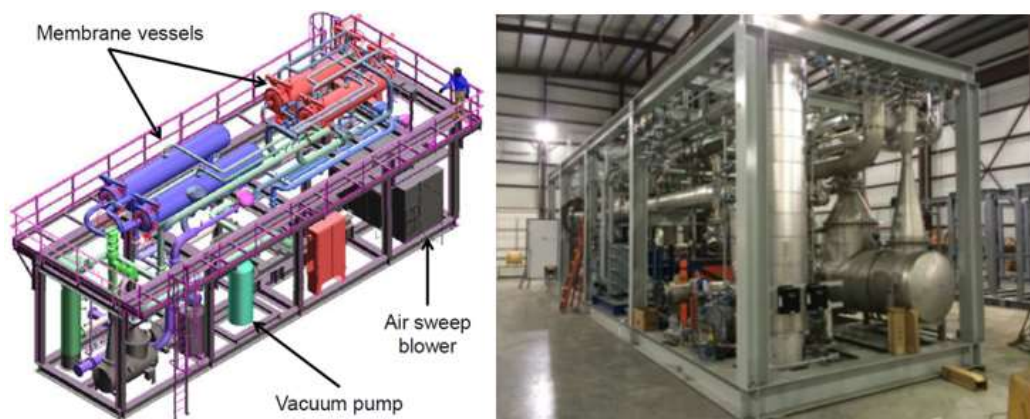
Ένας ακόμη τρόπος να αυξηθεί η συνολική συγκέντρωση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, είναι η επανεκτέλεση της διαδικασίας με χρήση διάταξης ανάστροφης ροής – μονάδας σάρωσης δύο βημάτων (*two-step counterflow – sweep module*). Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10, το καυσαέριο που εξέρχεται από τη μονάδα μεμβράνης του βήματος I, περιλαμβάνει διοξείδιο του άνθρακα το οποίο έχει μειωθεί σε ποσοστό 7%, από περίπου 12%. Στο δεύτερο βήμα, γίνεται εκ νέου χρήση συστήματος ανάστροφης ροής και μονάδας σάρωσης, με αποτέλεσμα το αέριο που εξέρχεται να περιλαμβάνει διοξείδιο του άνθρακα σε ποσοστό μόλις 1.8%. Για την εκτέλεση όλης της διεργασίας, γίνεται χρήση αντλιών, οι οποίες δημιουργούν το απαιτούμενο εύρος πίεσης. Με χρήση της διάταξης του Διαγράμματος 10, η συνολική δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, αγγίζει σε ποσοστό το 90%. [41]



Διάγραμμα 10 – Διαδικασία διαχωρισμού δύο βημάτων με χρήση μεμβρανών [41]

Υλικά Μεμβρανών

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν οι μεμβράνες βάσει των δομικών υλικών τους είναι οι πολυμερείς μεμβράνες (*polymer membranes*), οι μικροπορώδεις μεμβράνες οργανικών πολυμερών (*Microporous Organic Polymer membranes – MOP*), οι μεμβράνες φορέα σταθερής θέσης (*Fixed Site Carrier membranes – FSC*), οι μεμβράνες μικτής μήτρας (*Mixed Matrix Membranes – MMM*), οι μεμβράνες μοριακού κόσκινου άνθρακα (*Carbon Molecular Sieve Membranes – CMSM*) και οι ανόργανες μεμβράνες (*inorganic membranes*). Οι μεμβράνες κατά τη διεργασία διαχωρισμού δέχονται ιδιαίτερα υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, που μπορεί να φτάσουν έως 10 [bar] πίεσης και 400 [°C]. Ταυτόχρονα εκτίθενται σε διαβρωτικούς ρύπους, όπως σε μονοξειδία Θείου και Αζώτου (SO_x , NO_x). Συνεπώς οι σημαντικότερες ιδιότητες που πρέπει να διαθέτει μια μεμβράνη, είναι η θερμική και χημική ευστάθεια, η υψηλή απόδοση μοριακού διαχωρισμού καθώς και το χαμηλό κόστος. Τα παραπάνω είδη μεμβρανών, δεν παρουσιάζουν την ίδια απόδοση, αλλά εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ιδανικότερος τύπος μεμβράνης για εφαρμογές διαχωρισμού αερίων (καυσαερίων) είναι οι μεμβράνες μοριακού κόσκινου άνθρακα (*Carbon Molecular Sieve Membranes – CMSM*). Οι ανόργανες μεμβράνες, αν και παρουσιάζουν τις ιδανικότερες ιδιότητες για διεργασίες διαχωρισμού, είναι ιδιαίτερα ακριβές. Διάφορες εταιρείες έχουν αναπτύξει τα δικά τους είδη μεμβρανών, τα οποία εξετάζονται σε πιλοτικές εφαρμογές με αρκετά υποσχόμενα αποτελέσματα, ωστόσο χρειάζεται περαιτέρω έρευνα και πρόοδος προκειμένου να μειωθεί το κόστος τους και να γίνουν ανταγωνιστικές με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες αμινών. [42]



Εικόνα 5 – Παλέτα Εξοπλισμού Μονάδας Διαχωρισμού με Μεμβράνες [43]

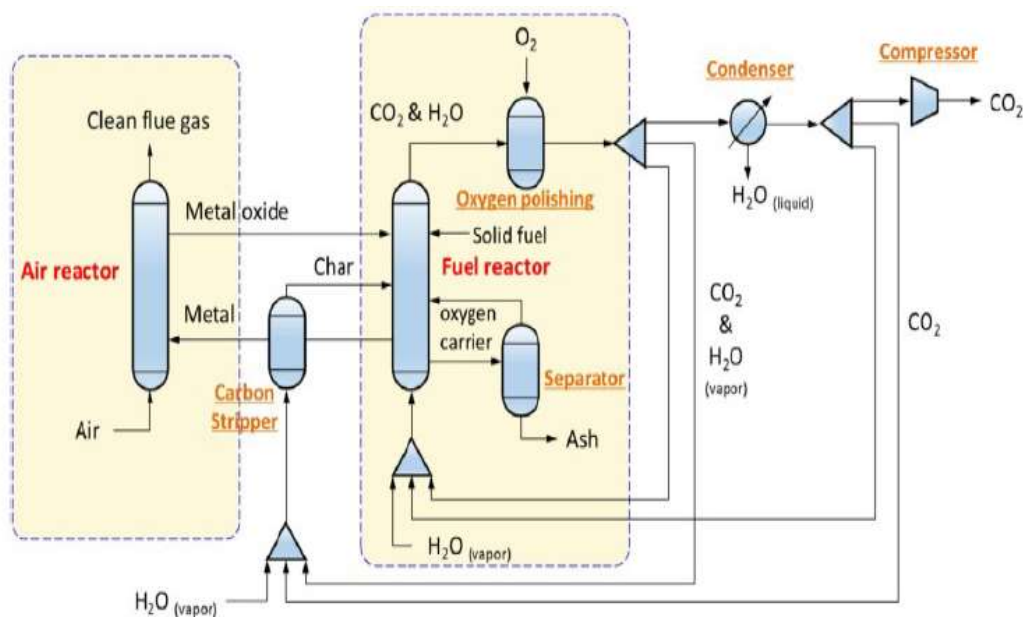
Βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση μεμβρανών, έναντι των συστημάτων απορρόφησης/προσρόφησης, είναι η έλλειψη στηλών απορρόφησης/απομάκρυνσης. Τα συστήματα μεμβρανών, είναι κατασκευασμένα σε συμπαγείς δομές – παλέτες (*skids*), όπου οι μονάδες μεμβρανών τοποθετούνται οριζοντίως στην κορυφή της δομής, ενώ ο απαραίτητος υπόλοιπος εξοπλισμός τοποθετείται από κάτω. Ως αποτέλεσμα, ο απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης μειώνεται δραστικά, καθιστώντας τα συστήματα μεμβρανών ιδανικά για εφαρμογές σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο εμβαδόν αλλά και ύψος, όπως για παράδειγμα ένα πλοίο.



Εικόνα 6 – Χορική Σύγκριση Συστημάτων Διαχωρισμού με Μεμβράνες και με Απορρόφηση [43]

2.2.4 Χημικός Κύκλος Βρόχου (Chemical Looping Cycle)

Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία η καύση που πραγματοποιείται, έχει ενδιάμεσες αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση μετάλλων, όπως χαλκός, νικέλιο, κοβάλτιο και σίδηρος, των οποίων τα οξείδια είναι καλοί φορείς οξυγόνου. Η συγκεκριμένη διεργασία περιλαμβάνει έναν αντιδραστήρα αέρα και έναν αντιδραστήρα καυσίμου. Κατά την τροφοδοσία καυσίμου σε αέρια φάση, το μέταλλο που χρησιμοποιείται στον αντιδραστήρα αέρα οξειδώνεται, ενώ ταυτόχρονα στην πλευρά του αντιδραστήρα καυσίμου, ανάγεται. Ως αποτέλεσμα της ταυτόχρονης αντίδρασης, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμοί. Με συμπύκνωση των υδρατμών και απομάκρυνση του νερού, το εναπομένον διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να δεσμευθεί και να αποθηκευτεί για οποιαδήποτε επιθυμητή χρήση. Ωστόσο, βασικό μειονεκτήματα της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί η αργή κινητική της συγκεκριμένης ταυτόχρονης αντίδρασης. [44]



Διάγραμμα 11 – Λιάταξη διεργασίας χημικού κύκλου βρόχου [44]

2.2.5 Μικροφύκη (Microalgae)

Πέρα από τις φυσικές και χημικές τεχνολογίες που έχουν ανακαλυφθεί ανά τα χρόνια, για την δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, υφίστανται και βιολογικές μέθοδοι. Πιο συγκεκριμένα, δύναται να γίνει χρήση φυτών, φυκιών, άλγης και βακτηριδίων, για την απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια. Η δέσμευση λαμβάνει χώρα εξαιτίας των βιολογικών διαδικασιών των συγκεκριμένων οργανισμών, όπως η φωτοσύνθεση. Ως διαδικασία, αν και ιδιαίτερα υποανάπτυκτη, είναι αρκετά δημοφιλής εξαιτίας του υψηλού ρυθμού αντίδρασης της φωτοσύνθεσης και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία με μικροφύκη, η οποία δείχνει να έχει αρκετά υψηλότερη απόδοση στη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα, σε σχέση με τα υπόλοιπα χερσαία φυτά. [45]

2.3 Τεχνολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα Χαμηλής Θερμοκρασίας:

Οι τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες τελούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες, συχνά αναφέρονται ως κρυογονικές τεχνολογίες. Κρυογονική καλείται μια διαδικασία η οποία εκτελείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 120 βαθμών *Kelvin* [K] και δύναται να επηρεάσει την ύλη, σύμφωνα με το Διεθνές Λεξικό Ψύξης (*International Dictionary of Refrigeration*), του Διεθνούς Ινστιτούτου Ψύξης (*International Institute of Refrigeration - IIR*). [46] Ωστόσο, στην περίπτωση της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, δεν προσεγγίζονται τόσο χαμηλές θερμοκρασίες, συνεπώς με την κρυογονική αναφερόμαστε σε τεχνολογίες δέσμευσης χαμηλής θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, βασίζεται κυρίως στην αλλαγή φάσης, όπου με κατάλληλη συμπίκνωση ή απόθεση, επιτυγχάνεται η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα σε υγρή ή στερεή φάση. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα αυτά εκτελούν τη διαδικασία φυσικού διαχωρισμού, κάνοντας χρήση των σημείων βρασμού και των ιδιοτήτων απόθεσης των στοιχείων που περιλαμβάνονται στα αέρια. [47] Με χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, επιτυγχάνεται δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, με καθαρότητα που αγγίζει σε ποσοστό το 99%. Παράλληλα, αποφεύγεται η χρήση χημικών προσροφητικών (η οποία συναντάται στις τεχνολογίες που αναφέραμε προηγουμένως), ενώ το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα υψηλής καθαρότητας, όντας σε στέρεα φάση, έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από την υγρή και αέρια φάση, όπου σε συνεργασία με τη συμπαγή μορφή του, καθίσταται βέλτιστο για την μεταφορά και την αποθήκευσή του. Τα κύρια οφέλη των τεχνολογιών κρυογονικής δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, είναι εξαγωγή ενός τελικού προϊόντος υψηλής καθαρότητας, χωρίς να γίνεται χρήση τοξικών χημικών ουσιών, που δεν χρήζει περαιτέρω επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ενεργειακό κόστος, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει χαμηλό κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης. Ωστόσο υφίστανται διάφορα προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου τα συγκεκριμένα συστήματα να επιλέγονται σε περισσότερες εφαρμογές. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση που συνοδεύει τις αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού, καθώς και η ύπαρξη διαφόρων προσμίξεων στα καυσαέρια που δυσχεραίνει τις διεργασίες. Όμως, εξαιτίας της υψηλής ανάκτησης διοξειδίου του άνθρακα και της υψηλής καθαρότητας του τελικού προϊόντος, εξετάζονται ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, οι οποίες μάλιστα πολλές φορές είναι και υβριδικές, δηλαδή συνδυάζουν την κρυογονική με τις υπόλοιπες συμβατικές τεχνολογίες που αναπτύξαμε παραπάνω. Μερικά παραδείγματα αυτών είναι η κρυογονική απορρόφηση, η κρυογονική προσρόφηση, οι κρυογονικές μεμβράνες κ.α. [48] Παρακάτω, θα αναλυθούν οι κυριότερες τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα χαμηλής θερμοκρασίας, με τα αντίστοιχα συστήματα που εκτελούν τις διεργασίες.

2.3.1 Κρυογονική Συσκευασμένης Κλίνης (*Cryogenic Packed Bed*)

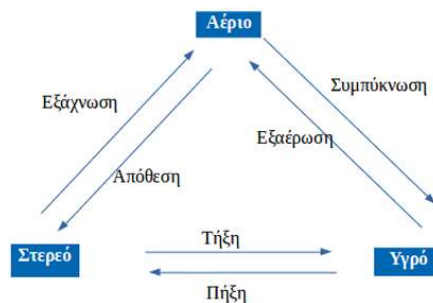
Η κρυογονική τεχνολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση συσκευασμένων κλινών (*packed beds*), λειτουργεί με δομές μονολιθικού χάλυβα και περιλαμβάνει τρεις διαδοχικές διεργασίες, την ψύξη, τη δέσμευση και την ανάκτηση. Πιο συγκεκριμένα, συσκευασμένη κλίνη αποτελεί ένας κοίλος σωλήνας, ο οποίος γεμίζεται ή κατασκευάζεται εσωτερικά με μικρά αντικείμενα ή δομές (βλ. Εικόνα 7) που παρέχουν καταλυτικές

ιδιότητες για διεργασίες διαχωρισμού, απορρόφησης ή/και απόσταξης μεταξύ διαφορετικών φάσεων μιας χημικής ή παρόμοιας διαδικασίας. [49]



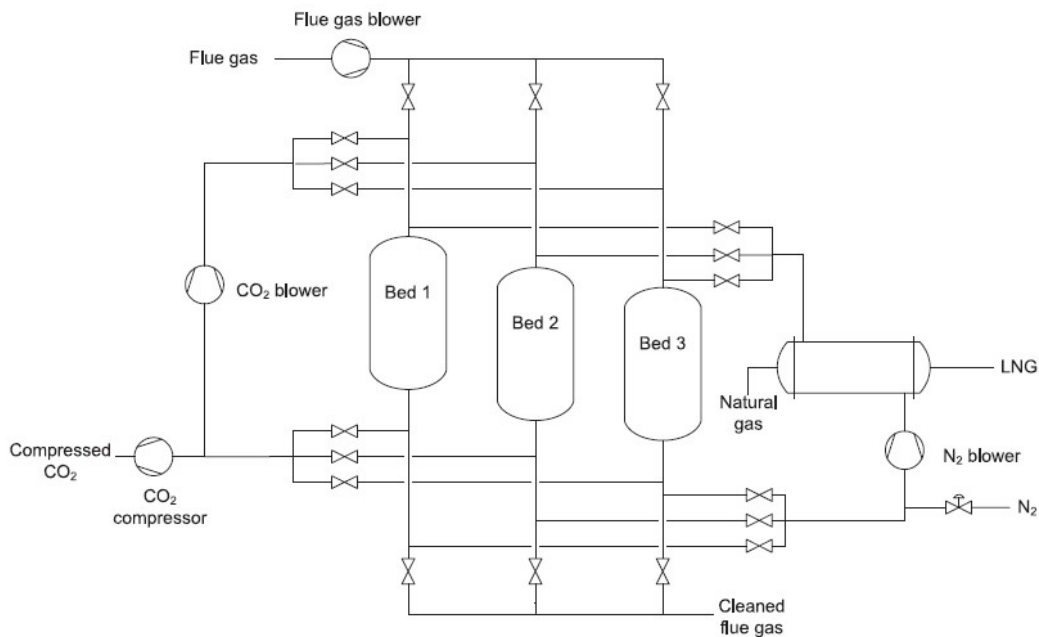
Εικόνα 7 – Υλικά εντός των κλινών (Raschig rings - Structured packing) [49]

Κατά την εκκίνηση της διεργασίας, οι κλίνες ψύχονται στους -120 [°C] προτού εισέλθουν σε αυτές τα θερμά καυσαέρια, τα οποία ενώ ψύχονται, θερμαίνουν το υλικό που βρίσκεται εντός των κλινών, με αποτέλεσμα να δημιουργείται συμπύκνωση νερού, έως ότου να επέλθει η θερμοκρασία ισορροπίας. Κατόπιν της συμπύκνωσης του εναπομείναντος νερού, τα καυσαέρια ψύχονται περαιτέρω, έως ότου ξεκινήσει η απόθεση του διοξειδίου του άνθρακα στην επιφάνεια των κλινών και επέλθει η θερμοκρασία ισορροπίας του. Σε εκείνο το χρονικό σημείο, προκύπτει η αργή σχετική κίνηση των μετώπων του συμπυκνωμένου νερού και του αποθεμένου διοξειδίου του άνθρακα, η οποία ωστόσο εξαλείφεται από τα εισερχόμενα θερμά καυσαέρια, τα οποία θερμαίνουν την εισαγωγή της κλίνης και από τη μια πλευρά οδηγούν το κινούμενο μέτωπο του συμπυκνωμένου νερού σε εξάτμιση, ενώ από την άλλη το κινούμενο μέτωπο του αποθεμένου διοξειδίου του άνθρακα οδηγείται σε εξάχνωση. Όταν εντοπισθεί η ύπαρξη διοξειδίου του άνθρακα στην έξοδο της κλίνης, η διεργασία περνά στο στάδιο ανάκτησης, όπου δημιουργείται μια ανακυκλώμενη ροή διοξειδίου του άνθρακα, η οποία εισέρχεται στην κλίνη, στην θερμοκρασία εισαγωγής. Τότε, το υφιστάμενο διοξείδιο του άνθρακα αρχίζει την απόθεση, με κίνηση προς την εξαγωγή της κλίνης, εξαιτίας της διαφοράς πίεσης μεταξύ των σταδίων δέσμευσης και ανάκτησης της διαδικασίας. Ως αποτέλεσμα, συγκεντρώνεται καθαρό διοξείδιο του άνθρακα, στην έξοδο της κλίνης, από το οποίο αφαιρούνται ανεπιθύμητες προσμίξεις. Προκειμένου η διεργασία να έχει συνεχή λειτουργία, είναι απαραίτητη η παράλληλη εκτέλεση όλων των παραπάνω σταδίων. [50]



Εικόνα 8 - Καταστάσεις της ύλης και μεταβολές [51]

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, είναι πως επιτυγχάνεται ο ταυτόχρονος διαχωρισμός του νερού και του διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια, εξαιτίας των διαφορετικών σημείων δρόσου και εξάχνωσης που παρουσιάζουν. Ταυτόχρονα, δεν παρουσιάζονται ζητήματα πτώσης πίεσης ή απόφραξης στα διάφορα μέρη του εξοπλισμού. Ακόμη, αποφεύγεται η χρήση χημικού απορροφητικού υλικού, καθώς το ποσό της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο υλικό εσωτερικά των κλινών υπό μορφή ψύξης, βοηθά στην εκτίμηση της ποσότητας του συσσωρευμένου διοξειδίου του άνθρακα. Το κόστος της συγκεκριμένης τεχνολογίας, εξαρτάται κυρίως από τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια και από την αρχική θερμοκρασία των κλινών. Με περαιτέρω πτώση της αρχικής θερμοκρασίας, αποθηκεύεται περισσότερη ενέργεια υπό μορφή ψύξης στο υλικό εντός των κλινών, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εναπόθεση διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα όγκου της κάθε κλίνης και τελικά το σύστημα να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά. Ωστόσο, για να επιτευχθεί η πτώση της θερμοκρασίας, θα πρέπει να δαπανηθεί περισσότερη ενέργεια, γεγονός που αυξάνει το κόστος λειτουργίας. [52]

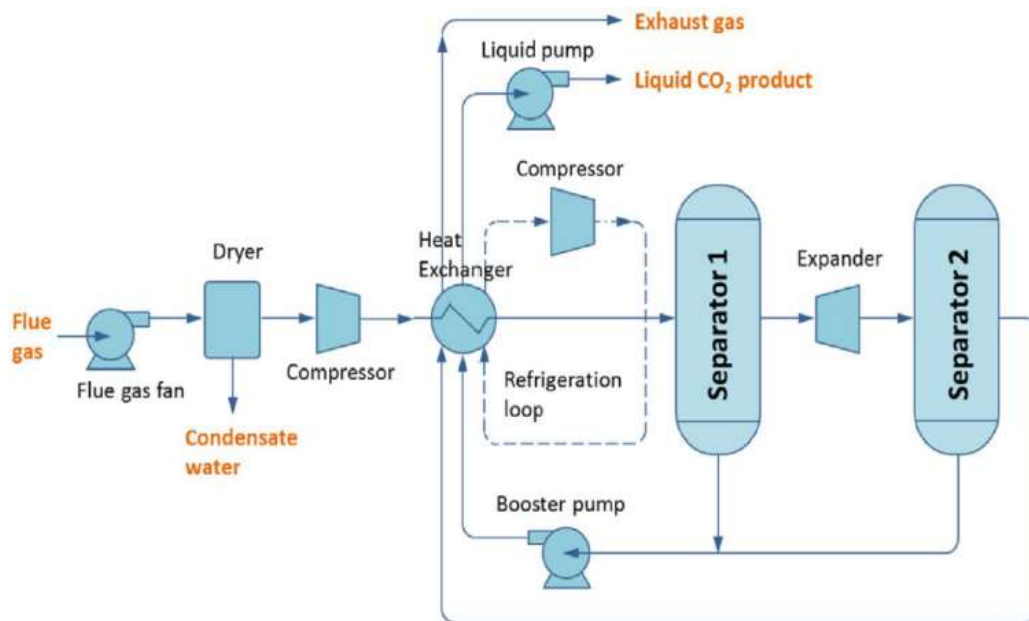


Διάγραμμα 12 – Διάταξη συστήματος κρυογονικής δέσμωσης με χρήση συσκευασμένων κλινών [50]

2.3.2 Κρυογονική Δέσμωση Άνθρακα με Εξωτερικό Ψυκτικό Βρόγχο (External Cooling Loop Cryogenic Carbon Capture)

Η κρυογονική τεχνολογία δέσμωσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση εξωτερικού ψυκτικού βρόγχου (*External Cooling Loop Cryogenic Carbon Capture – ECLCCC*) δημιουργήθηκε στην προσπάθεια να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας της μεθοδολογίας δέσμωσης διοξειδίου του άνθρακα υπό χαμηλή θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση ψυκτικών βρόγχων ή εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την περίσσεια ψυκτικής ενέργειας που παράγουν άλλες πηγές στη μονάδα παραγωγής

ηλεκτρισμού/έργου (π.χ. συστήματα ψύξης κύριας μηχανής πλοίου). Αρχικά, τα καυσαέρια εισέρχονται σε σύστημα επεξεργασίας όπου ξηραίνονται και ψύχονται. Στη συνέχεια συμπιέζονται και ψύχονται περαιτέρω έως ότου φτάσουν οριακά πάνω από τη θερμοκρασία απόθεσης του διοξειδίου του άνθρακα (μεταβολή από αέρια σε στερεή φάση). Σε εκείνο το σημείο, ψύχονται περαιτέρω σε συγκεκριμένη θερμοκρασία με σκοπό να δεσμευθεί ένα επιθυμητό ποσό διοξειδίου του άνθρακα σε στερεή φάση, ενώ ταυτόχρονα μέρος των καυσαερίων συμπιέζεται και εισέρχεται σε έναν βρόγχο ψύξης με χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας (βλ. διάγραμμα 13). Ως αποτέλεσμα, ο βρόγχος ψύχει το υπόλοιπο μέρος των καυσαερίων, με αποτέλεσμα το διοξείδιο του άνθρακα να αλλάζει σε υγρή φάση, όπου και εξάγεται από το σύστημα με χρήση αντλίας. Το υπόλοιπο μέρος των καυσαερίων, που αποτελείται πλέον κατά κύριο λόγο από άζωτο (N_2), απελευθερώνεται από το σύστημα. Ως διαδικασία, ο ψυκτικός βρόγχος διαθέτει διττή λειτουργία. Αφενός διαχειρίζεται την απώλεια ενέργειας κατά τη διεργασία του συστήματος και αφετέρου αναγεννά το ψυκτικό μέσο κατά τη διάρκεια χαμηλών απαιτήσεων λειτουργίας. Η συνεχής μεταβολή στη θερμοκρασία των καυσαερίων, διαμέσου της λειτουργίας του βρόγχου, είναι εκείνη που εξοικονομεί τα απαραίτητα ποσά ενέργειας και καθιστά τη διεργασία ενεργειακά βέλτιστη. [53]



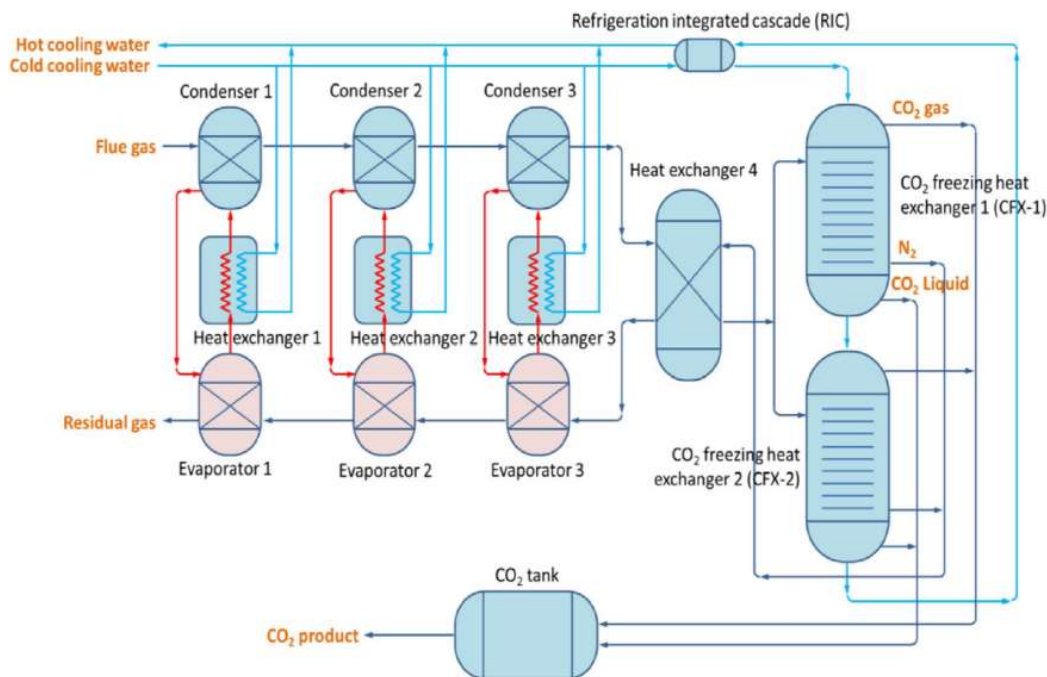
Διάγραμμα 13 – Διάταξη συστήματος κρυογονικής δέσμευσης με χρήση εξωτερικού ψυκτικού βρόγχου [53]

2.3.3 Απόθεση (Anti-Sublimation - AnSU)

Επρόκειτο για μια τεχνολογία που εισήχθη από τον καθηγητή *Denis Clodic* και αποτελείται από πέντε κύρια υποσυστήματα που τελούν διαφορετικές λειτουργίες κατά την εκτέλεση της διεργασίας. Αρχικά τα θερμά καυσαέρια διέρχονται από τρεις διαφορετικές μονάδες συμπύκνωσης σε σειρά, προκειμένου να ψυχθούν, ενώ τα ψυχρά καυσαέρια από τα οποία έχει αφαιρεθεί το διοξείδιο του άνθρακα, διέρχονται από τρεις μονάδες εξάτμισης προκειμένου να αναθερμανθούν και να ακολουθήσουν ξανά τη

διαδικασία. Το επόμενο απαραίτητο υποσύστημα αποτελούν οι εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι τοποθετούνται μεταξύ των εξόδων των μονάδων συμπύκνωσης και εξάτμισης, με σκοπό να ανακτάται η θερμότητα των καυσαερίων, προτού αυτά περάσουν στην μονάδα κατάψυξης. Η συγκεκριμένη μονάδα αποτελεί ξεχωριστό υποσύστημα και είναι ένας ενσωματωμένος καταρράκτης ψύξης (*Refrigerator Integrated Cascade*), που λειτουργεί ως καταψύκτης χαμηλής θερμοκρασίας, προκειμένου να επιτυγχάνονται οι χαμηλές θερμοκρασίες της κρυογονικής. Ακόμη, ως επιπλέον υποσύστημα εγκαθίστανται εναλλάκτες θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, οι οποίοι τελούν τη διαδικασία της απόψυξης, προκειμένου να δεσμεύεται το τελικό προϊόν διοξειδίου του άνθρακα σε υγρή και αέρια φάση. Το προϊόν αυτό, δέχεται περαιτέρω επεξεργασία, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται έως και 99.9% καθαρότητα διοξειδίου του άνθρακα. [54]

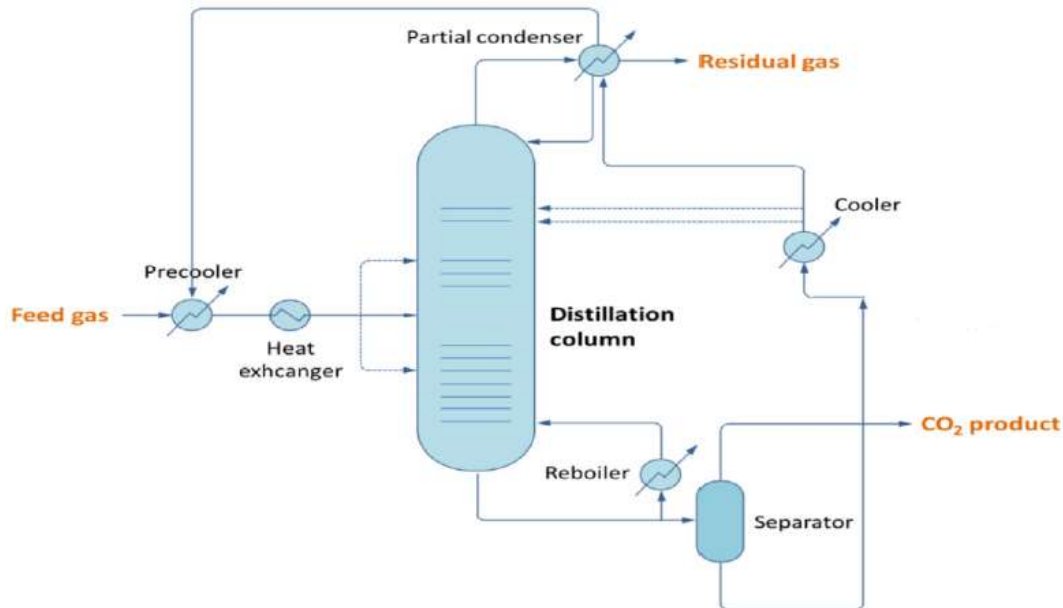
Όλη η διεργασία, ως τεχνολογία, παρουσιάζει αρκετά υψηλότερη απόδοση από οποιαδήποτε διεργασία απορρόφησης με αμίνη, ειδικά όταν εφαρμόζεται ως μετασκευή σε υφιστάμενους σταθμούς παραγωγής ενέργειας/έργου. Το κυριότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαδικασίας, πέραν της υψηλής καθαρότητας του τελικού προϊόντος, αποτελεί το γεγονός πως το ψυκτικό μέσο προκύπτει από την απόψυξη του διοξειδίου του άνθρακα στους διάφορους εναλλάκτες θερμότητας. Ωστόσο, για να διατηρείται υψηλή η απόδοση του συστήματος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επιλεγθούν καλής ποιότητας υλικά για τους εναλλάκτες θερμότητας προκειμένου να αποφεύγεται η απόφραξη αυτών και η αύξηση της πίεσης που επιφέρει. [55]



Διάγραμμα 14 - Διάταξη συστήματος απόθεσης και υποσυστημάτων [54]

2.3.4 Κρυογονική Απόσταξη (Cryogenic Distillation)

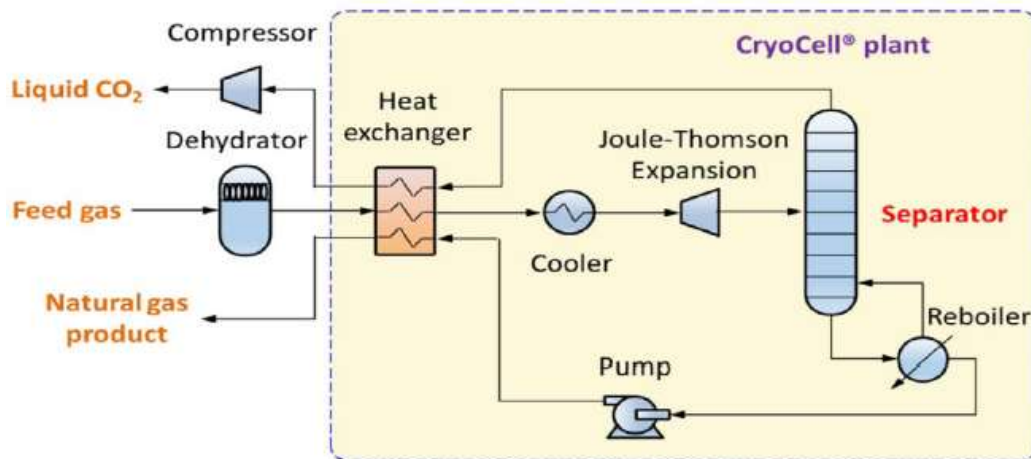
Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ιδιαίτερος γνωστή καθώς χρησιμοποιείται κατά τις διεργασίες διαχωρισμού για τον καθαρισμό του υγροποιημένου φυσικού αερίου (*Liquefied Natural Gas - LNG*) και δύναται να χρησιμοποιηθεί για δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά, τα καυσαέρια αρχικά διέρχονται από ψύκτη και στη συνέχεια από εναλλάκτη θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας προκειμένου να φτάσουν σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Κατόπιν τροφοδοτούνται σε μια στήλη απόσταξης η οποία είναι κατασκευασμένη εσωτερικά με δίσκους που φέρουν υλικά διαχωρισμού (*packing materials*) όπως εκείνα της τεχνολογίας συσκευασμένων κλινών που αναλύθηκε παραπάνω. Το προϊόν ατμού που συλλέγεται κατόπιν της επεξεργασίας στη στήλη, χωρίζεται σε δύο μέρη. Το κάτω μέρος αποτελεί το συμπυκνωμένο διοξείδιο του άνθρακα και συλλέγεται από το κάτω μέρος της στήλης απόσταξης. Το άνω μέρος περιλαμβάνει το υπόλοιπο αέριο μίγμα, το οποίο αφότου συλλεχθεί και δεχθεί επεξεργασία από συμπυκνωτή μικροσωματιδίων, απελευθερώνεται. Ένα μικρό ποσοστό από το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα, ανακυκλώνεται στο σύστημα με χρήση του λέβητα αναβρασμού, για την παροχή του ατμού εξάτμισης, ενώ το υπόλοιπο μέρος του διοξειδίου του άνθρακα προχωρά για περαιτέρω επεξεργασία η οποία θα επιφέρει υψηλό ποσοστό καθαρότητας διοξειδίου του άνθρακα στο τελικό προϊόν. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα της αποθήκευσης ενέργειας ταυτόχρονα με την απομάκρυνση ρύπων. Ωστόσο παρουσιάζει υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού. Συνεπώς προτιμάται κυρίως για βιομηχανική χρήση. [56]



Διάγραμμα 15 - Διάταξη συστήματος κρυογονικής απόσταξης [56]

2.3.5 Διαδικασία CryoCell® (CryoCell® Process)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία, εφευρέθηκε από την εταιρεία *Cool Energy Ltd* και είναι αρκετά πλεονεκτική καθώς δεν απαιτεί σύστημα θέρμανσης για τη διεργασία, ενώ είναι κατάλληλη για εγκαταστάσεις με συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα άνω του 20%. Αρχικά τα καυσαέρια διέρχονται από αφυγραντήρα προκειμένου να αφαιρεθεί η ύπαρξη νερού. Κατόπιν, τα ξηρά καυσαέρια περνούν σε εναλλάκτη θερμότητας και στη συνέχεια σε ψύκτη προκειμένου να ελαττωθεί η θερμοκρασία τους έως τη θερμοκρασία πήξης του διοξειδίου του άνθρακα. Ακόμη, διέρχονται και από βαλβίδα διαστολής *Joule – Thomson* (*Joule – Thomson Expansion Valve*), η οποία ψύχει το συμπιεσμένο αέριο. Πιο συγκεκριμένα, η ταχεία διαστολή ενός συμπιεσμένου αερίου, οδηγεί και στην ταχεία ψύξη αυτού, το οποίο επιτυγχάνεται με τη συγκεκριμένη βαλβίδα. [57] Κατόπιν αυτών των διαδικασιών, το αέριο εισέρχεται στον κρυογονικό διαχωριστή, από την βάση του οποίου συλλέγεται το τελικό προϊόν σε στέρεη φάση, το οποίο δύναται να θερμανθεί από λέβητα, προκειμένου να μεταβληθεί σε υγρή μορφή. [58]

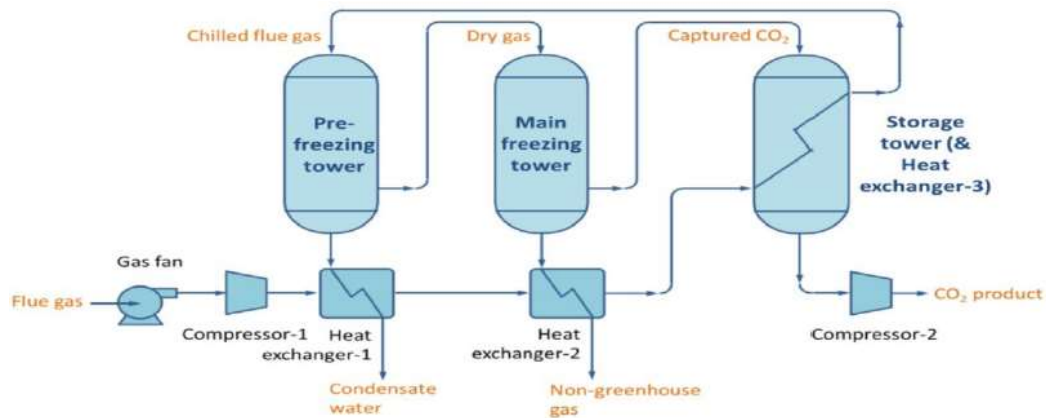


Διάγραμμα 16 - Διάταξη συστήματος κρυογονικής διεργασίας CryoCell® [58]

2.3.6 Σύστημα Ψύξης Stirling (Stirling Cooler System)

Ένα σύστημα ψύξης *Stirling* αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τον πύργο πρόψυξης (*pre-freezing tower*), τον κύριο πύργο ψύξης (*main freezing tower*) και τον πύργο αποθήκευσης (*storage tower*). Η ψύξη επιτυγχάνεται με έναν ψύκτη *Stirling* χωρίς πιστόνια (*piston-free Stirling Cooler*). [59] Πιο συγκεκριμένα, ο ψύκτης *Stirling*, αποτελεί ένα κρυογονικό ψυγείο υψηλής απόδοσης, όπου το αέριο εκτελεί έναν θερμοδυναμικό κύκλο *Stirling*, ο οποίος αποτελείται από δύο ισόχωρες και δύο ισοθερμικές μεταβολές. [60] [61] Αρχικά τα καυσαέρια υπόκεινται σε διεργασία συμπύκνωσης στον πύργο πρόψυξης, προκειμένου να αφαιρεθεί η παρουσία νερού. Κατόπιν, τα ξηρά καυσαέρια περνούν στον κύριο πύργο ψύξης, όπου η θερμοκρασία τους μειώνεται έως ότου φτάσει στη θερμοκρασία απόθεσης του διοξειδίου του άνθρακα. Καταληκτικά, το διοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται σε στέρεη φάση στον πύργο αποθήκευσης, ενώ το εναπομένον αέριο επιστρέφει στην αρχή της διαδικασίας. Στην έξοδο κάθε πύργου, υπάρχει από ένας εναλλάκτης θερμότητας, υπεύθυνος για την αποβολή του δεσμευμένου νερού (πύργος

πρόψυξης), των επεξεργασμένων καυσαερίων (κύριος πύργος ψύξης) και του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα (πύργος αποθήκευσης), αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο σύστημα, δεν χρήζει αναγέννησης του ψυκτικού μέσου, ενώ δεν παρουσιάζει προβλήματα διαφοράς πίεσης όπως στις υπόλοιπες τεχνολογίες. Αν και πρόκειται για μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, εξαιτίας του μικρού μεγέθους και της υψηλής αξιοπιστίας και απόδοσης που παρουσιάζει, έχει εφαρμοστεί κυρίως σε εργαστηριακή κλίμακα. [59]

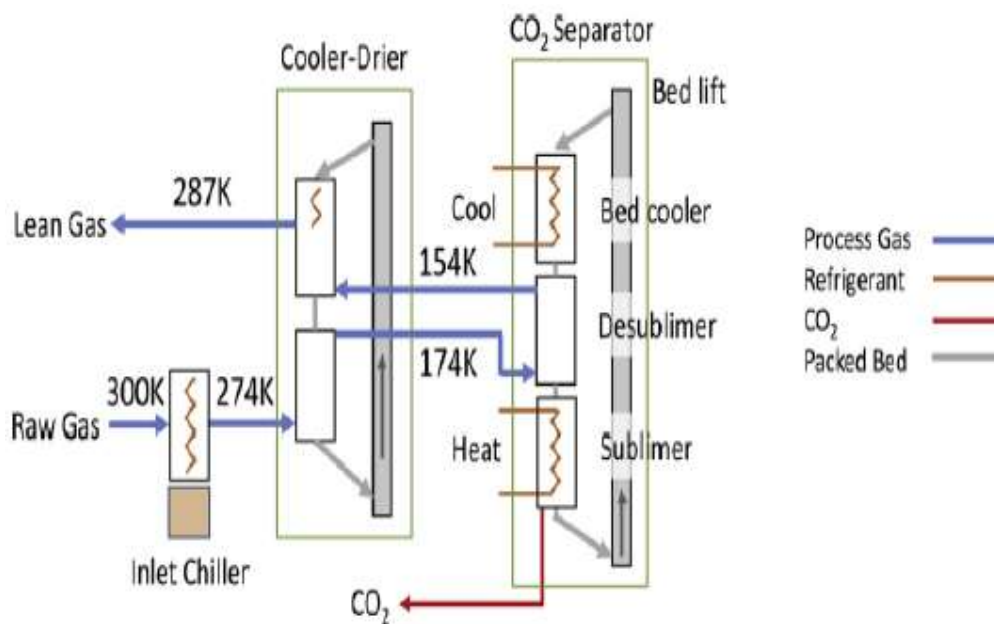


Διάγραμμα 17 – Διάταξη συστήματος ψύξης *Stirling* [59]

2.3.7 Προηγμένη Κρυογονική Διεργασία Δέσμευσης Άνθρακα *A3C* (*Advanced Cryogenic Carbon Capture Process A3C*)

Πρόκειται για μια πρόσφατα ανεπτυγμένη τεχνολογία χαμηλού κόστους για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, που συνδυάζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μειωμένο μέγεθος εξοπλισμού. Το αποτέλεσμα της διεργασίας, είναι ένα προϊόν διοξειδίου του άνθρακα υψηλής καθαρότητας, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για μεταφορά και αποθήκευση, ενώ δεν γίνεται χρήση χημικών σε κανένα στάδιο της διεργασίας. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιείται μια κινούμενη κλίνη με μεταλλικά σφαιρίδια (*metallic beads*), η οποία λειτουργεί και ως επιφάνεια για τη δέσμευση πάγου. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η χρήση πολλαπλών κλινών, με αποτέλεσμα να μειώνεται το μέγεθος του εξοπλισμού, με την ταυτόχρονα χρήση ελάχιστης ενέργειας. Η κλίνη γεμίζεται με μεταλλικά σφαιρίδια διαμέτρου από 2 έως 5 [mm]. Ως διεργασία εκτελείται σε δύο κύρια βήματα: το βήμα ψύξης – ξήρανσης και το βήμα διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά, το ακατέργαστο αέριο διέρχεται από ψύκτη ο οποίος ελαττώνει τη θερμοκρασία του στους 274 [°K] ($\approx 0^\circ\text{C}$). Ως αποτέλεσμα, το νερό που περιλαμβάνεται στο αέριο συμπυκνώνεται και αποβάλλεται υπό τη μορφή πάγου. Κατόπιν, το αέριο ψύχεται περαιτέρω μέχρι τη θερμοκρασία των 174 [°K], προκειμένου να απομακρυνθούν όλα τα υπολείμματα νερού και μεταφέρεται στο βήμα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Ταυτόχρονα, η κινούμενη κλίνη απομακρύνεται από τη ροή του ακατέργαστου αερίου, θερμαίνεται ελαφρώς για να λιώσει ο πάγος στην επιφάνειά της και μετατοπίζεται στο άλλο τμήμα, στο οποίο εξέρχεται το επεξεργασμένο αέριο, ως προϊόν της διαδικασίας απόθεσης. Εκεί, η κινούμενη κλίνη ψύχεται και ξηραίνεται από τη ροή

του επεξεργασμένου αερίου και μετά επιστρέφει στην αρχική της θέση. Στο άλλο βήμα, δηλαδή εκείνο της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα, το ξηρό αέριο περνά στη μονάδα απόθεσης, όπου σχηματίζεται διοξείδιο του άνθρακα σε στερεή φάση, το οποίο δεσμεύεται από τα σφαιρίδια στην επιφάνεια της κλίνης. Το παγωμένο διοξείδιο του άνθρακα μεταφέρεται από τη κλίνη και περνά σε εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό να θερμανθεί και να συλλεχθεί σε υγρή φάση. [62] Οικονομοτεχνικές αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για τη συγκεκριμένη τεχνολογία, έχουν δείξει βελτιστοποιημένες ενεργειακές απαιτήσεις συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες δέσμευσης με χρήση αμινών. Ωστόσο, καθώς πρόκειται για μια αρκετά πρώιμη τεχνολογία, χρήζει περισσότερης έρευνας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα. [63]



Διάγραμμα 18 – Διάταξη συστήματος A3C [62]

2.3.8 Άλλες Διαδικασίες

Υφίστανται και άλλες τεχνολογίες κρυογονικής οι οποίες δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα αλλά εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, η κρυογονική δέσμευση άνθρακα με συμπίεση καυσαερίων (*Carbon Capture with Compressed Flue Gas – CCC-CFG*), χρησιμοποιεί ένα σύστημα που συμπιέζει τα καυσαέρια σε πίεση μεταξύ 5 και 7 [bar], προτού εισέλθουν στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου διογκώνονται και λόγω απόθεσης παραδίδουν το διοξείδιο του άνθρακα σε στερεή φάση. Η συγκεκριμένη τεχνολογία, χρησιμοποιεί το σύστημα ξήρανσης για την απομάκρυνση του νερού από τα καυσαέρια, ενώ χρησιμοποιεί εναλλάκτη θερμότητας για την απόθεση του διοξειδίου του άνθρακα. [64] Μια άλλη τεχνολογία κρυογονικής, ονομάζεται Ζώνη Ελεγχόμενης Κατάψυξης (*Controlled Freezing Zone - CFZ*) και χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση προσμίξεων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και υδρόθειου (H₂S) από το φυσικό αέριο. Η ύπαρξη θείου (S) στο φυσικό αέριο, κυμαίνεται από 20% έως 70%, ανάλογα την γεωγραφική περιοχή άντλησης. [65] Το συγκεκριμένο

σύστημα αποτελείται από τρεις τομείς: το ανώτερο τμήμα απόσταξης, τη ζώνη ελεγχόμενης κατάψυξης και το κατώτερο τμήμα απόσταξης. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει παρουσιαστεί με μεγάλη επιτυχία από την εταιρεία *ExxonMobil Upstream Research* που εδρεύει στο *Wyoming* των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. [66]

Στον παρακάτω πίνακα, συγκρίνονται τα βασικά στοιχεία των διαφόρων τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα χαμηλής θερμοκρασίας που αναλύθηκαν παραπάνω:

Πίνακας 3 – Σύγκριση Τεχνολογιών Κρυογονικής Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα

Κρυογονική Διαδικασία	Πηγές Αερίου	Ποσοστό Ανάκτησης CO₂	Πηγές Ψυχρής Ενέργειας	Κύρια Φάση Τελικού Προϊόντος
Κρυογονικό Συσκευασμένο Κρεβάτι	Καύση Άνθρακα	έως 99%	LNG	Υγρή
Απόθεση	Καύση Άνθρακα	έως 90%	LNG	Υγρή
Κρυογονική Απόσταξη	Εξαρτάται από τη διεργασία	Ποικίλει ανάλογα τη διεργασία	Συμπιεστής Ψύκτης	Υγρή
Διαδικασία CryoCell	Ακατέργαστο Φυσικό Αέριο	έως 95%	Ψύκτης	Υγρή
Σύστημα Ψύξης Stirling	Καύση Άνθρακα	έως 85%	Ψύκτης Stirling	Στερεή
A3C	Ακατέργαστο Φυσικό Αέριο	έως 99.9%	Ψύκτης	Υγρή
CCC-ECL	Ακατέργαστο Φυσικό Αέριο	έως 95.6%	Συμπιεστής Ψύκτης	Υγρή

Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση και Μεταφορά Διοξειδίου του Άνθρακα

Στο παρόν κεφάλαιο, αναλύεται το εγχείρημα της μεταφοράς και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο έχει δεσμευθεί από τις διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα, έχει μακροπρόθεσμη διάρκεια και στοχεύει στην ελάττωση των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. [67] Από την άλλη πλευρά, η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση συγγέεται με τη μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα από το σημείο της δέσμευσης, στο σημείο της αποθήκευσης. Συνεπώς κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκεται το δεσμευμένο τελικό προϊόν. [68]

3.1 Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα:

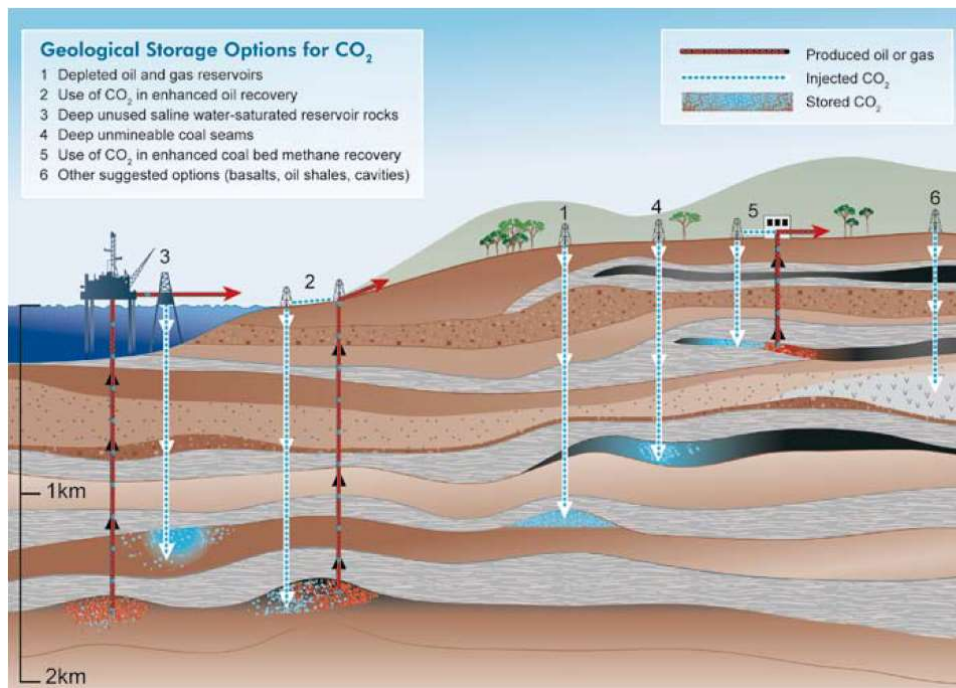
Η αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα, έχει μακροπρόθεσμο χαρακτήρα και στοχεύει στη μείωση των επιπτώσεων της ύπαρξης ελεύθερου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. [67] Χωρίζεται στις παρακάτω επιμέρους κατηγορίες:

- ❖ Γεωλογική Αποθήκευση (*Geological Storage*)
- ❖ Ωκεανική Αποθήκευση (*Ocean Storage*)
- ❖ Ορυκτή Ενανθράκωση (*Mineral Carbonation*)
- ❖ Βιομηχανικές Χρήσεις (*Industrial Uses*)

3.1.1 Γεωλογική Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα (*Geological Storage*)

Η γεωλογική αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα, είναι η μόνη μακροπρόθεσμη μεθοδολογία αποθήκευσης που χρησιμοποιείται εμπορικά τη σημερινή εποχή. Αποτελείται από δύο κύριες επιλογές. Η πρώτη περιλαμβάνει τη διοχέτευση του διοξειδίου του άνθρακα σε αλατούχους υδροφορείς (*saline aquifers*) στο υπέδαφος, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει την έγχυση σε ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα, η δεύτερη επιλογή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε άδειους ταμιευτήρες, όσο και σε ενεργούς ταμιευτήρες, για την ενισχυμένη (δευτερογενής) ανάκτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου (*Enhanced Oil Recovery – Enhanced Gas Recovery*). [67] Η δευτερογενής εξόρυξη, οδηγεί σε περαιτέρω εκμετάλλευση των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, σε ποσοστό ανάκτησης που αγγίζει το 40%, γεγονός που παρέχει περισσότερα οικονομικά κίνητρα για τη γεωλογική αποθήκευση. [69] Παράλληλα, οι τεχνολογίες για την ανάλυση και την παρακολούθηση του υπεδάφους, έχουν αναπτυχθεί επαρκώς ενώ ο κίνδυνος διαρροής διοξειδίου του άνθρακα από τους ταμιευτήρες είναι ελάχιστος, καθώς οι ίδιοι διαθέτουν στεγανοποιητικό κάλυμμα από πετρώματα, το οποίο έχει αποδειχθεί διαχρονικά ανθεκτικό και προφυλάσσει τη διαρροή τόσο του πετρελαίου όσο και λοιπών αερίων. Ωστόσο, πρέπει να ελεγχθεί και η μακροπρόθεσμη χημική αλληλεπίδραση του διοξειδίου του άνθρακα και των υπολοίπων αερίων στο εσωτερικό των ταμιευτήρων, καθώς και η διάβρωση που έχουν δεχτεί τα στεγανοποιητικά πετρώματα από τη χρόνια αλληλεπίδρασή τους με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Επιπρόσθετα, την ίδια ανοχή με τους ταμιευτήρες πρέπει να παρουσιάζουν τα στεγανοποιητικά πετρώματα στους αλατούχους υδροφορείς, προκειμένου να πραγματοποιείται η έγχυση και ο εγκλεισμός του διοξειδίου του άνθρακα σε αυτούς. [67]

Οι ταμειυτήρες ενεργών ή άδειων κοιτασμάτων, παρουσιάζουν χωρητικότητα αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα που κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 1200 [Gtn], ενώ η χωρητικότητα των αλατούχων υδροφορέων δύναται να φτάσει μέχρι και τους 20000 [Gtn]. Η αποθήκευση 1500 [Gtn] διοξειδίου του άνθρακα, έως το έτος 2100, είναι ικανή να μειώσει τη παρουσία διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα στο επίπεδο των 450 [ppm]. [67] Τα σημεία γεωλογικής αποθήκευσης, μπορεί να είναι είτε χερσαία είτε παράκτια, με τα χερσαία σημεία να παρουσιάζουν χαμηλή αποδοχή από το κοινό. Πέρα από τους ταμειυτήρες κοιτασμάτων και τους αλατούχους υδροφορείς, ως αποθηκευτικοί χώροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα κοιτάσματα άνθρακα. Πιο αναλυτικά, το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να εγχυθεί σε ανθρακικές φλέβες για την ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου από ανθρακικά στρώματα (*Coal Bed Methane – CBM*). [70] Στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται οι διαθέσιμες επιλογές για γεωλογική αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα:



Εικόνα 9 - Επιλογές γεωλογικής αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα [70]

Ο χρόνος συγκράτησης που παρουσιάζει ένας άδειος ταμειυτήρας πετρελαίου ή φυσικού αερίου, στις περισσότερες περιπτώσεις ξεπερνά τα 10 εκατομμύρια χρόνια, γεγονός που οδηγεί σε έναν ρυθμό διαρροών μικρότερο του 10^{-7} ετησίως, που συμβαίνει σε ιζηματογενείς λεκάνες. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα αποθήκευσης φυσικού αερίου που έχουν κατασκευαστεί, παρουσιάζουν ρυθμό διαρροών μεθανίου που κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-4} ετησίως. Παράλληλα, μελέτες εκτίμησης κινδύνου σε εγκαταλελειμμένα κοιτάσματα, παρουσιάζουν ρυθμό διαρροών μεταξύ 10^{-7} και 10^{-5} ετησίως. Ταυτόχρονα, στις περιοχές δευτερογενούς εξόρυξης, οι μετρήσεις των επιφανειακών διαρροών διοξειδίου του άνθρακα, έχουν βρεθεί σχεδόν μηδενικές. Τέλος, οι προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ανοιχτά κοιτάσματα, αναφέρουν ρυθμό έκλυσης έως και 10^{-2} ετησίως. [70]

3.1.2 Ωκεανική Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα

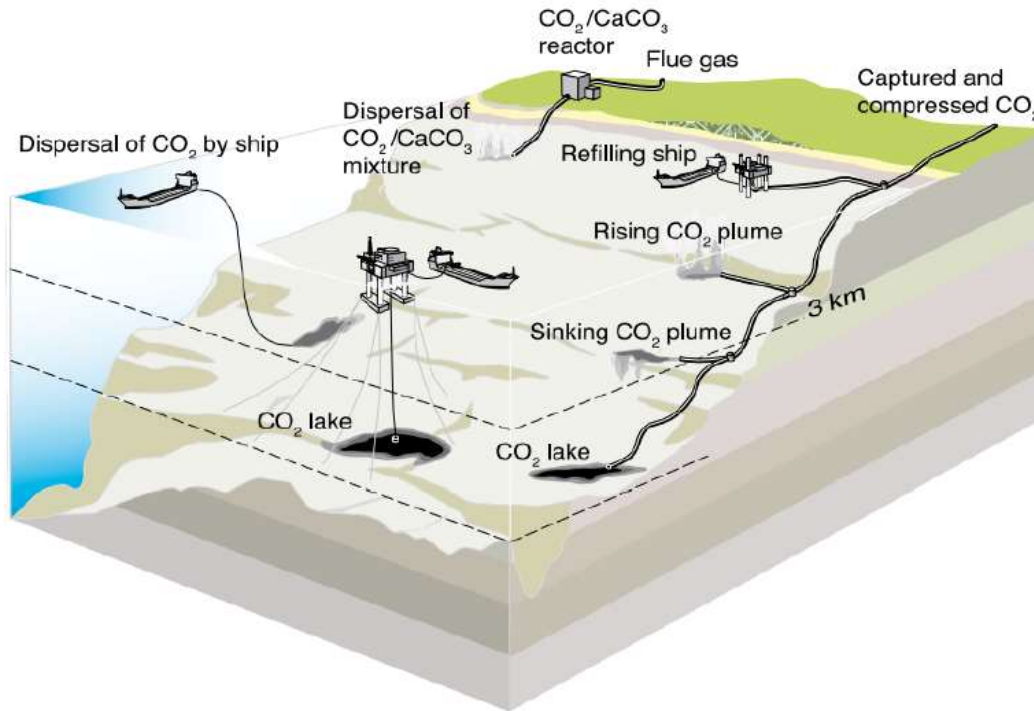
Η αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα στον ωκεανό, παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες αξιοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, καθώς ο πλανήτης καλύπτεται κατά 70% από νερό, με ωκεανούς που αγγίζουν σε βάθος τα 3800 μέτρα, δεν υφίσταται κάποιο ουσιαστικό όριο στην ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που δύναται να αποθηκευτεί. Η έκχυση διοξειδίου του άνθρακα στα βάθη των ωκεανών, είναι σε θέση να μειώσει ριζικά την παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μακροπρόθεσμα. Το διοξείδιο του άνθρακα που διοχετεύεται στον ωκεανό σε μεγάλο βάθος, χρειάζεται εκατομμύρια χρόνια ώστε να φτάσει σε σημείο ισορροπίας με την ατμόσφαιρα και δηλαδή να απελευθερωθεί ξανά πίσω σε αυτή. [71]

Ζήτημα στη συγκεκριμένη μεθοδολογία αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, είναι ο χρόνος κατακράτησης του διοξειδίου του άνθρακα στον ωκεανό, διότι αυτός είναι που καθιστά το εγχείρημα εφικτό ή όχι. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήσεις και μαθηματικά μοντέλα δείχνουν πως το διοξείδιο του άνθρακα που εκχύνεται στον ωκεανό, απομονώνεται από την ατμόσφαιρα για εκατοντάδες χρόνια. Ο σημαντικότερος παράγοντας της κατακράτησης, είναι το βάθος, καθώς με βαθύτερη έκχυση επιτυγχάνεται μεγαλύτερη χρονική διάρκεια κατακράτησης. Προκειμένου να παραταθεί ο χρόνος κατακράτησης, προτείνεται ο σχηματισμός υδριτών διοξειδίου του άνθρακα (*CO₂ Hydrates*) και η δημιουργία λιμνών υγρού διοξειδίου του άνθρακα, στον πυθμένα των ωκεανών. [71]

Από την άλλη πλευρά, έχουν παρατηρηθεί επιβλαβείς επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή εξαιτίας των αυξημένων επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα. Πιο αναλυτικά, οι βασικότερες επιπτώσεις που έχουν παρατηρηθεί σε θαλάσσιους οργανισμούς είναι χαμηλά επίπεδα ασβεστίου, υπογεννητικότητα, μειωμένος ρυθμός ανάπτυξης, προβλήματα στην παροχή και κυκλοφορία του οξυγόνου, προβλήματα κινητικότητας καθώς και αυξημένη θνησιμότητα. Ωστόσο, οι επιπτώσεις είναι άμεσα εξαρτώμενες της απόστασης από το σημείο της έκχυσης. Στα σημεία που λιμνάζει το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και στο κάθε σημείο έκχυσης, αναμένεται άμεση θνησιμότητα, ενώ οι μικρές αυξήσεις των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα στον ωκεανό, οδηγούν σε χρόνιες επιπτώσεις, αλλά όχι άμεσο θάνατο, ως αποτέλεσμα της μείωσης του pH (ενεργός οξύτητα). [71]

Η μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα προς αποθήκευση στον ωκεανό, πραγματοποιείται με χρήση πλοίων ή αγωγών. Η δημιουργία λιμνών διοξειδίου του άνθρακα, εκτελείται με αγωγούς ή υπεράκτιες εξέδρες, που διοχετεύουν το διοξείδιο του άνθρακα στο πυθμένα της θάλασσας μέσω σωληνώσεων. Οι λίμνες αυτές πρέπει να δημιουργούνται σε βάθος μεγαλύτερο των 3000 μέτρων, καθώς κάτω από αυτό το βάθος, το υγρό διοξείδιο του άνθρακα είναι πυκνότερο από το θαλασσινό νερό. Μια ακόμη δυνατότητα αποτελεί η απευθείας διοχέτευση του διοξειδίου του άνθρακα στον ωκεανό, όπου και διαλύεται. Όμως η συγκεκριμένη επιλογή ακυρώνει το εγχείρημα της δέσμευσης, αποθήκευσης και χρήσης του διοξειδίου (*Carbon Capture and Storage – Carbon Capture and Utilization*), καθώς ενεργοποιείται η φυσική διαδικασία που προσπαθεί να εξισορροπήσει τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα που βρίσκονται στην

ατμόσφαιρα ή διαλυμένα στον ωκεανό. Από την άλλη πλευρά, τα πλοία μπορούν είτε να αποδεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα κατά τη διάρκεια του πλου, διαμέσου ενός ρυμουλκούμενου σωλήνα που φέρουν, είτε να το ξεφορτώνουν στις ειδικές εξέδρες. Τέλος, προς ωκεανική αποθήκευση προορίζονται και τα ανθρακικά άλατα, τα οποία αποτελούν μέθοδο αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα και θα αναλυθούν σε επόμενο υποκεφάλαιο. [71] Στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται οι διάφορες επιλογές ωκεανικής αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα:



Εικόνα 10 - Επιλογές ωκεανικής αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα [71]

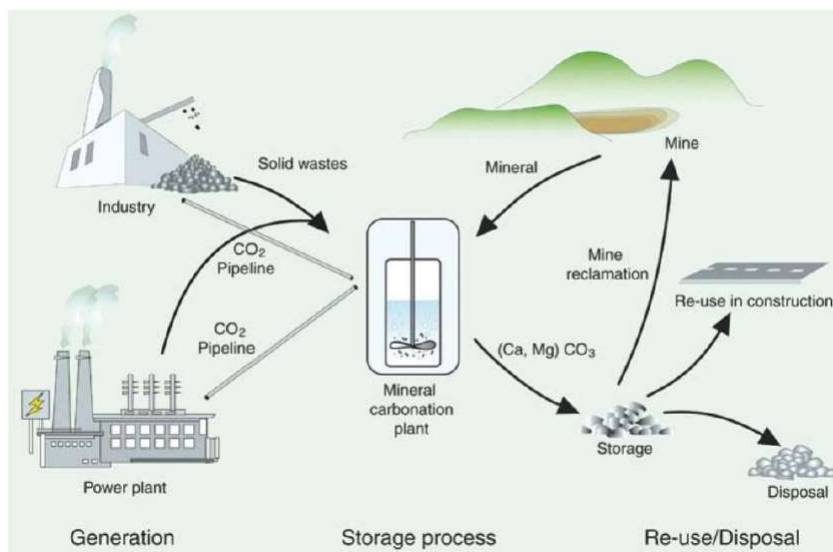
3.1.3 Ορυκτή Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα

Η αντίδραση που πραγματοποιείται μεταξύ διοξειδίου του άνθρακα και των οξειδίων μετάλλων, οδηγεί στον σχηματισμό ανθρακικών αλάτων ($-CO_3^{-2}$). Για παράδειγμα, τα οξείδια του ασβεστίου (Ca) και του μαγνησίου (Mg) χρησιμοποιούνται ευρέως για ορυκτή ενανθράκωση. Η αντίδραση ενανθράκωσης, είναι μια εξώθερμη αντίδραση, η οποία ευδοκιμεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ όταν πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες, καλείται πύρωση. Ως αντίδραση, πραγματοποιείται αυθόρμητα στη φύση, στη θερμοκρασία των 25 [°C], αλλά σε πολύ αργούς ρυθμούς. Αντίθετα, η αντίδραση πύρωσης πραγματοποιείται στους 300 [°C] για τα οξείδια του μαγνησίου και στους 900 [°C] για τα οξείδια του ασβεστίου, σε αρκετά ταχείς ρυθμούς. Προκειμένου να γίνει η ορυκτή αποθήκευση ανταγωνιστική, έναντι των υπολοίπων μεθοδολογιών αποθήκευσης, πρέπει να αυξηθεί ο ρυθμός της αντίδρασης ενανθράκωσης. Τα καταλληλότερα ορυκτά για να αποτελέσουν την πρώτη ύλη για την αντίδραση ενανθράκωσης, είναι τα πυριτικά πετρώματα και τα αλκαλικά βιομηχανικά κατάλοιπα. Αντίθετα, τα οξείδια των μετάλλων του καλίου και του νατρίου είναι λιγότερο κατάλληλα, καθώς τα ανθρακικά προϊόντα που εξάγουν είναι υδατοδιαλυτά. Για την αποθήκευση ενός τόνου διοξειδίου του άνθρακα,

απαιτείται μεταξύ 1.6 – 3.7 τόνοι ορυκτής πρώτης ύλης, ανάλογα με την περιεκτικότητα των οξειδίων. Πιο συγκεκριμένα, η υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξείδια μαγνησίου ή ασβεστίου, οδηγεί σε μικρότερη ανάγκη πρώτης ύλης, καθώς περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να αντιδράσει με τα ορυκτά ανά μονάδα μάζας. [72]

Οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του εγχειρήματος της ενανθράκωσης σε μεγάλη κλίμακα, είναι η εκτεταμένη εκχέρσωση της γης για την εξόρυξη των παραπάνω πετρωμάτων, η ποιότητα του αέρα γύρω από τα ορυχεία καθώς και η απόρριψη των απόβλητων προϊόντων. Προς αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων της εκχέρσωσης, δύναται να επανατοποθετείται το έδαφος που αφαιρείται κατά την εκσκαφή, με σκοπό να μειωθεί η αποσάθρωση. Ακόμη, τα απόβλητα προϊόντα που παράγονται κατά το εγχείρημα, χρήζουν άμεσης επεξεργασίας, γεγονός που αυξάνει το κόστος των διεργασιών εξόρυξης. [72]

Για την εκτέλεση της διαδικασίας της ενανθράκωσης στην πράξη, το διοξείδιο του άνθρακα θα πρέπει να μεταφέρεται στην τοποθεσία εξόρυξης ή στα σημεία συγκέντρωσης βιομηχανικών καταλοίπων, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται τα στερεά ανθρακικά προϊόντα. Τα προϊόντα αυτά, δηλαδή τα ανθρακικά άλατα ασβεστίου και/ή μαγνησίου, μπορούν να σταλθούν προς αποθήκευση, να χρησιμοποιηθούν στην βιομηχανία των κατασκευών ή να πωληθούν για άλλους σκοπούς. Η πώληση των προϊόντων εξαρτάται από το κόστος της μεταφοράς τους, ως στερεά υλικά. Τα ανθρακικά άλατα μαγνησίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ενισχυτικά εδάφους, με τις τιμές τους να αγγίζουν τα 300 [\$/ton]. Με το πέρας των διεργασιών εξόρυξης, το ορυχείο επαναγεμίζεται με υλικά για την αποκατάσταση της γης, ενώ το έδαφος που αφαιρέθηκε επανατοποθετείται προκειμένου να ανακτηθεί η βλάστηση στη μάζα που αφαιρέθηκε, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συγκεκριμένης ανθρωπογενούς δραστηριότητας. [72] Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται η διαδικασία ανθρακοποίησης ορυκτών και οι επιλογές επαναχρησιμοποίησής τους:



Εικόνα 11 – Διαδικασία ορυκτής αποθήκευσης [72]

3.1.4 Βιομηχανικές Χρήσεις

Το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα, δύναται να αποθηκευτεί υπό τη μορφή πρώτης ύλης, για χρήση στους τομείς της χημείας και των πολυμερών. Πιο συγκεκριμένα, η αποθήκευση επέρχεται διαμέσου της παραγωγής χημικών ουσιών και καυσίμων που περιέχουν άνθρακα. Συνεπώς πρόκειται για το εγχείρημα της δέσμευσης και χρήσης διοξειδίου του άνθρακα (*Carbon Capture and Utilization - CCU*). Προκειμένου όμως να καθοριστεί η δυνατότητα αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα και η αντίστοιχη χρονική διάρκεια κατακράτησης, πρέπει να προσδιοριστεί ο κύκλος ζωής του προϊόντος που παράγεται. Αν το προϊόν αυτό ανακυκλώνεται, τότε η ύπαρξη διοξειδίου του άνθρακα θα παραμένει σταθερή. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο χρόνος κατακράτησης διοξειδίου του άνθρακα που προσφέρει το συγκεκριμένο εγχείρημα, είναι αρκετά μικρός ώστε να συγκριθεί άμεσα με τις μακροπρόθεσμες μεθοδολογίες αποθήκευσης, οι οποίες δύναται να μετριάσουν αισθητά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση όμως, αποτελεί επιλογή αποθήκευσης, η οποία διαθέτει και οικονομικά κίνητρα. [72]

Πιο αναλυτικά, το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ουρίας, στα συστήματα ψύξης, στη συσκευασία τροφίμων, στα ανθρακούχα ροφήματα, στους πυροσβεστήρες, στη φυτοκομία (θερμοκήπια) καθώς και στην παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου. Ακόμη, στις χημικές ουσίες που μπορούν να παραχθούν από το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα, ανήκουν οι πολυουρεθάνες και τα πολυκαρβονικά (θερμοπλαστικά πολυμερή - PC). Ταυτόχρονα, από το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα μπορούν να παραχθούν καύσιμα όπως η βενζίνη και η μεθανόλη, με την παροχή προστιθέμενης ενέργειας. Ωστόσο, καίριας σημασίας είναι η πηγή από την οποία θα ληφθεί η προστιθέμενη ενέργεια, καθώς αν η πηγή αυτή είναι τα ορυκτά καύσιμα, τότε θα εκλύεται περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από αυτό που θα ανακυκλώνεται για την μετατροπή σε καύσιμο. Συνεπώς, προκειμένου να είναι βιώσιμο το εγχείρημα της αποθήκευσης και χρήσης διοξειδίου για την παραγωγή καυσίμων, η προστιθέμενη ενέργεια θα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Ταυτόχρονα, είναι δυνατή η παραγωγή υδρογόνου (H_2), κατά την ηλεκτρόλυση του διοξειδίου του άνθρακα και τη μετατροπή του σε καύσιμο. Η διαδικασία αυτή θα εξάγει ένα ακόμη προϊόν, με χρήση της ήδη υπάρχουσας υποδομής και του διοξειδίου του άνθρακα που έχει δεσμευτεί. Σε κάθε περίπτωση όμως, πρέπει να σημειωθεί πως η ένωση του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου, για τη δημιουργία ενός συνθετικού καυσίμου, δεν θα οδηγήσει σε ένα ανανεώσιμο καύσιμο ή σε ένα καύσιμο μηδενικών εκπομπών, αλλά θα εξοικονομηθεί μέρος του διοξειδίου του άνθρακα, μειώνοντας βραχυπρόθεσμα την ύπαρξή του, συγκριτικά με άλλες διαδικασίες. [72]

Το δυναμικό της παγκόσμιας αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε βιομηχανικές χρήσεις, αγγίζει μόλις το 0.5% της συνολικής ετήσιας εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα των βιομηχανικών δραστηριοτήτων. [72] Ωστόσο, πρόκειται για μια νέα αγορά, η οποία αναπτύσσεται ταχύτατα, με τη ζήτηση να αυξάνεται εκθετικά στις επόμενες δεκαετίες. Η ζήτηση για αγορά μεθανόλης αναμένεται να δεκαπλασιαστεί έως το έτος 2030, ενώ η ζήτηση για αγορά ουρίας έχει ήδη τριπλασιαστεί συγκριτικά με δεδομένα από το έτος

2005. [73] Παρά τις εκτιμώμενες αυξήσεις της αγοράς στη ζήτηση διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες προσφέρουν σπουδαία οικονομικά κίνητρα, το παγκόσμιο δυναμικό αποθήκευσης σε χημικά προϊόντα δεν αναμένεται να ξεπεράσει το 2% της παγκόσμιας ετήσιας εκπομπής. Συνεπώς η αποθήκευση σε βιομηχανικές χρήσεις δεν θα διαδραματίσει μεγάλο ρόλο στο εγχείρημα μετριασμού των ατμοσφαιρικών επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα, σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες επιλογές της γεωλογικής, ωκεανικής και ορυκτής αποθήκευσης. [72]

Η αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα σε βιομηχανικές χρήσεις, αποτελεί βιώσιμη επιλογή, με τη διάρκεια κατακράτησης να κυμαίνεται από μέρες έως αιώνες, ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής, αξιοποίησης και ανακύκλωσης των παραγόμενων προϊόντων. Ωστόσο μερικά από τα προϊόντα αυτά, όπως η μεθανόλη, συνήθως προορίζονται για καύση, γεγονός που θα επανελευθερώσει το δεσμευμένο διοξείδιο πίσω στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς θα πρέπει το ποσό του διοξειδίου του άνθρακα που ανακυκλώνεται, να είναι μεγαλύτερο από αυτό που επανεκλύεται στην ατμόσφαιρα. [72] Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι κύριες βιομηχανικές χρήσεις και η αντίστοιχη ετήσια ζήτηση της αγοράς:

Πίνακας 4 – Βιομηχανικές Χρήσεις [72] [73]

Βιομηχανική Χρήση	Ετήσια Ζήτηση [Mtn/έτος]	Χρήση CO ₂ [MtnCO ₂]	Πηγή CO ₂	Διάρκεια Κατακράτησης
Ουρία	90 [72] 300 [73]	65	Βιομηχανική	Έως 6 μήνες
Μεθανόλη	24 [72] 280 [73]	8	Βιομηχανική	Έως 6 μήνες
Πολυουρεθάνες - Πολυκαρβονικά	10	10	Βιομηχανική, Φυσική	Δεκαετίες έως αιώνες
Τεχνολογικές Χρήσεις	10	10	Βιομηχανική, Φυσική	Μέρες έως έτη
Βιομηχανία Τροφίμων	8	8	Βιομηχανική, Φυσική	Μήνες έως έτη

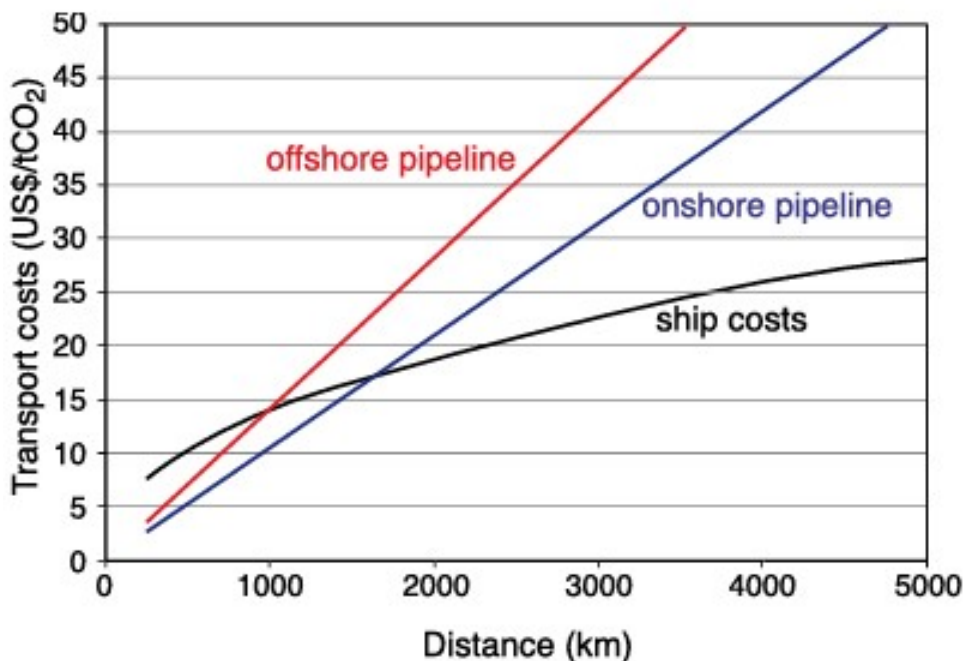
3.2 Μεταφορά Διοξειδίου του Άνθρακα:

Η μεταφορά διοξειδίου του άνθρακα, αποτελεί τη βραχυπρόθεσμη αποθήκευσή του, από το σημείο της δέσμευσης στο σημείο της μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα πρέπει να βρίσκεται στην κατάλληλη φάση κατά τη μεταφορά του. Η εναλλαγή των φάσεων, απαιτεί ενέργεια, με σκοπό να επιλέγεται η κατάλληλη διαμόρφωση, για την εκάστοτε επιλογή αποθήκευσης. Ακόμη, αν και τα μέσα μεταφοράς του διοξειδίου του άνθρακα ποικίλουν, εξαρτώνται άμεσα από την καθαρότητα του τελικού

δεσμευμένου προϊόντος. Παρακάτω, αναλύεται το εγχείρημα της μεταφοράς και οι παράγοντες που το επηρεάζουν.

3.2.1 Μεταφορά και Καθαρότητα Διοξειδίου του Άνθρακα

Η μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα, ενώνει τη περιοχή παραγωγής και δέσμευσης, με την περιοχή της αποθήκευσης. Τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς είναι χερσαίοι αγωγοί, υπεράκτιοι αγωγοί και πλοία. Η επιλογή του κατάλληλου μέσου μεταφοράς, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απόσταση που πρέπει να διανύσει το προϊόν έως το σημείο της αποθήκευσης. Για μικρές αποστάσεις, δηλαδή μικρότερες της τάξεως των 1000 χιλιομέτρων, η μεταφορά μέσω αγωγών είναι οικονομικότερη, συγκριτικά με τη λύση της ναυτιλίας. Αντίθετα, όταν οι αποστάσεις μεταφοράς αυξάνονται, το κόστος χρήσης των πλοίων ως μεταφορικό μέσο γίνεται αισθητά μικρότερο από τη μεταφορά με αγωγούς. Αυτό συμβαίνει καθώς το κόστος των εγκαταστάσεων των αγωγών, αυξάνει γραμμικά με την απόσταση που διανύουν. Επιπρόσθετα, η χερσαία μεταφορά είναι φθηνότερη από την υπεράκτια, καθώς η υποθαλάσσια κατασκευή αγωγών είναι περισσότερο κοστοβόρα εξαιτίας του εξειδικευμένου εξοπλισμού που απαιτείται και της πρόσθετες τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζει. [68]



Διάγραμμα 19 – Κόστος μεταφοράς διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της απόστασης, με χρήση χερσαίων/υπεράκτιων αγωγών και πλοίων [68]

Προκειμένου το διοξείδιο του άνθρακα να μεταφερθεί μέσω αγωγών, πρέπει να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό περιεκτικότητας, μέσα στο τελικό προϊόν της δέσμευσης. Πιο συγκεκριμένα, το τελικό προϊόν, πρέπει να έχει συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, μεγαλύτερη του 95.5% κατά όγκο. [74] Συνεπώς, οι τεχνολογίες δέσμευσης με μονοαιθανολαμίνη (MEA), διαλύτη CANSOLV και οι διεργασίες άλλων αμινών, που προσφέρουν καθαρότητα διοξειδίου του άνθρακα μεγαλύτερη του 98% κατά βάρος, κρίνονται ιδανικές για μεταφορά του τελικού προϊόντος με αγωγούς. Ωστόσο, κατά το

στάδιο της συμπύκνωσης, μετά το στάδιο της απομάκρυνσης, θα πρέπει να αφαιρείται όλο το ποσοστό νερού, διότι η ύπαρξή του δυσχεραίνει τη μεταφορά του τελικού προϊόντος. [74] Γενικότερα, επειδή το τελικό προϊόν δέσμευσης που προκύπτει από δέσμευση μετά την καύση, έχει υψηλή περιεκτικότητα διοξειδίου του άνθρακα, οι υπόλοιπες προσμίξεις (ακαθαρσίες – ρύποι) συχνά δεν λαμβάνονται υπόψιν. [75] Ωστόσο, στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται τα όρια περιεκτικότητας διαφόρων ουσιών, προκειμένου να τηρούνται τα όρια ασφαλείας, τοξικότητας, ανοχής της υποδομής και απόδοσης της μεταφοράς των αγωγών:

Πίνακας 5 – Όρια περιεκτικότητας ουσιών για μεταφορά προϊόντων διαμέσου αγωγών [74] [76]

Ουσία	Ποσό	Μονάδα Μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	> 95.5	Vol%
Νερό (H_2O)	Έως 100	PPM
Οξειδία του Θείου (SO_x)	< 100	PPM
Οξειδία του Αζώτου (NO_x)	< 100	PPM
Υδρόθειο (H_2S)	Έως 100	PPM
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	< 900	PPM
Άζωτο (N_2), Οξυγόνο (O_2), Αργό (Ar), Υδρογόνο (H_2), Μεθάνιο (CH_4),	< 2	Vol%

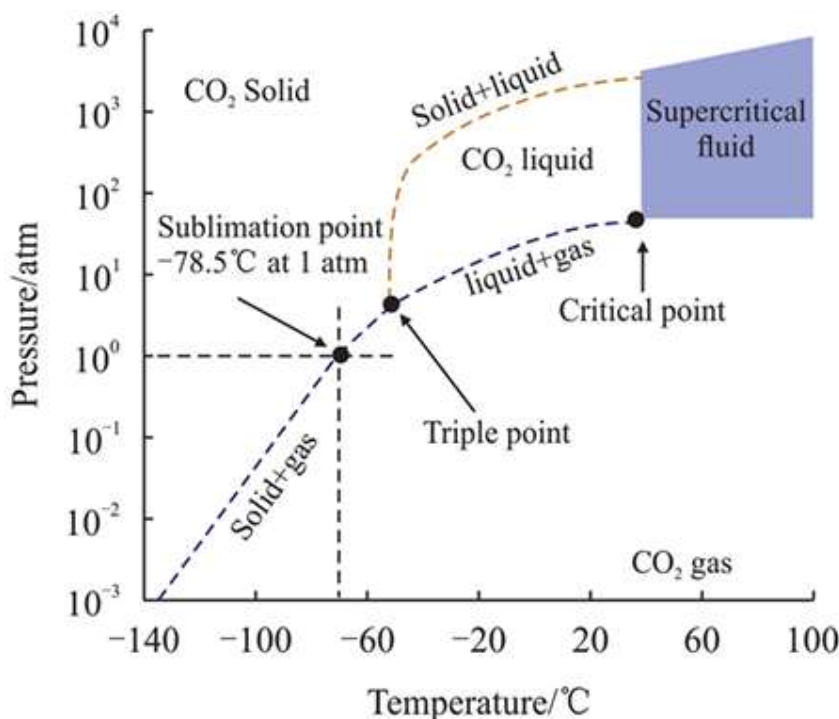
Για να πραγματοποιηθεί η μεταφορά μέσω αγωγών, το διοξείδιο του άνθρακα πρέπει να συμπιεστεί. Υπάρχουν τρεις βασικές επιλογές συμπίεσης: η φυγοκεντρική συμπίεση, η συμπίεση υπερηχητικού κρουστικού κύματος και η συμπίεση με υγροποίηση και άντληση. Στην πρώτη επιλογή, οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές που χρησιμοποιούνται, έχουν λόγο συμπίεσης από 1.7 έως 2.0 προς 1. Στην δεύτερη επιλογή, οι συμπιεστές κρουστικού κύματος, μπορούν να φτάσουν λόγο συμπίεσης έως και 12 προς 1 και απαιτούν λιγότερα στάδια για να φτάσουν τις υψηλές αυτές πιέσεις. Οι συγκεκριμένοι συμπιεστές, καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και έχουν μικρότερο κόστος αγοράς σε σχέση με τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Η τρίτη και τελευταία επιλογή, παρέχει τη δυνατότητα ελάττωσης του κόστους της διεργασίας συμπίεσης, καθώς η αύξηση της πίεσης με αντλίες υγρού, απαιτεί μικρότερα ποσά ενέργειας, ενώ οι αντλίες που χρησιμοποιούνται είναι φθηνότερες συγκριτικά με τους συμπιεστές αερίων. [75]

Το διοξείδιο του άνθρακα σε ατμοσφαιρική πίεση, καταλαμβάνει μεγάλο όγκο, συνεπώς προτιμάται η μεταφορά του σε υπερκρίσιμη φάση διαμέσου αγωγών. Για να αυξηθεί περαιτέρω η πυκνότητά του, δύναται να υγροποιηθεί ή και να στερεοποιηθεί, ωστόσο αυτό επιφέρει αύξηση στο ενεργειακό κόστος για την ψύξη. Συνεπώς, η μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα σε στερεή μορφή, είναι η πιο κοστοβόρα και συνήθως δεν προτιμάται. Αντίθετα, η υγροποίηση του διοξειδίου του άνθρακα είναι εκείνη που

επιλέγεται συνήθως για τη μεταφορά του μέσω της ναυτιλίας. Αυτό συμβαίνει καθώς η τεχνολογία της υγροποίησης είναι επαρκώς ανεπτυγμένη και ήδη εδραιωμένη, από τις μεταφορές υγροποιημένου πετρελαίου και φυσικού αερίου (*LPG - LNG*). Συνεπώς υφίστανται ήδη οι απαιτούμενες γνώσεις για τη δημιουργία και εφαρμογή ενός δικτύου μεταφοράς δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα. [77]

3.2.2 Φάσεις Μεταφοράς Διοξειδίου του Άνθρακα

Το προϊόν της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, ανάλογα με την θερμοκρασία και την πίεση στην οποία βρίσκεται, λαμβάνει μια από τις κύριες φάσεις: υπερκρίσιμη, στερεή, υγρή και αέρια. Η μεταβολή της φάσης του διοξειδίου του άνθρακα, συχνά απαιτεί ενέργεια. Ωστόσο, η επιλογή της κατάλληλης φάσης είναι καίριας σημασίας, για την βέλτιστη μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα από τον τόπο της δέσμευσης, στον τόπο της αποθήκευσης. Η Εικόνα 12, περιλαμβάνει το διάγραμμα φάσης του διοξειδίου του άνθρακα ανάλογα με την θερμοκρασία και την πίεση που υφίστανται. [78]



Εικόνα 12 – Διάγραμμα φάσης του διοξειδίου του άνθρακα [78]

Υπερκρίσιμη Φάση (*Supercritical Phase*)

Όταν το διοξείδιο του άνθρακα συμπιεστεί περισσότερο από 73 [bar] (κρίσιμη πίεση) και θερμανθεί περισσότερο από 31.1 [°C] (κρίσιμη θερμοκρασία), τότε περνά στην υπερκρίσιμη φάση και αποτελεί πλέον υπερκρίσιμο υγρό. Η συγκεκριμένη φάση είναι η καταλληλότερη για τη μεταφορά μέσω αγωγών, καθώς τότε το διοξείδιο του άνθρακα είναι πυκνότερο από την αέρια φάση του. Συνήθως, τα συστήματα αγωγών λειτουργούν με πιέσεις άνω των 96 [bar] καθώς με χαμηλότερες πιέσεις, μπορεί να οδηγήσουν στην ύπαρξη διασπαστικής ροής, η οποία πρέπει να αποφεύγεται για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. [68]

Στερεή Φάση (Solid Phase)

Η στερεή φάση, αποτελεί την πυκνότερη φάση διοξειδίου του άνθρακα. Το σημείο εξάχνωσης για πίεση μιας ατμόσφαιρας (1 [atm]), βρίσκεται στους -78.4 [°C] και αποτελεί το σημείο στο οποίο το αέριο διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί να μεταβεί απευθείας στην αέρια φάση (και αντίστροφα), δηλαδή να αποτελέσει ξηρό πάγο. Ακόμη, υφίσταται και το τριπλό σημείο, το οποίο βρίσκεται σε πίεση 5.2 [bar] και θερμοκρασία -56.4 [°C]. Στο σημείο αυτό, το διοξείδιο του άνθρακα διαθέτει φάση, η οποία μπορεί να αλλάζει συνεχώς μεταξύ στερεής, υγρής και αέριας. [68]

Υγρή Φάση (Liquid Phase)

Η υγρή φάση, είναι πυκνότερη της αέριας και της υπερκρίσιμης. Υφίσταται σε πιέσεις μεταξύ 6 και 15 [bar] καθώς και σε θερμοκρασίες μεταξύ -55 και -30 [°C]. Είναι η προτιμότερη φάση για την μεταφορά με χρήση πλοίων, ενώ δεν προτιμάται για μεταφορά μέσω αγωγών. Πιο αναλυτικά, για την μεταφορά με αγωγούς απαιτούνται συστήματα ψύξης, τα οποία παρουσιάζουν τεχνικές δυσκολίες και υψηλό κόστος, μεγαλύτερο από τη μεταφορά σε υπερκρίσιμη φάση, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς. Για να επιτευχθεί η υγροποίηση, ασκούνται πιέσεις και θερμοκρασίες πάνω από τη γραμμή του τριπλού σημείου του διαγράμματος των φάσεων, έως και το κρίσιμο σημείο. [68]

Αέρια Φάση (Gaseous Phase)

Η αέρια φάση, αποτελεί την λιγότερη πυκνή φάση από τις υπόλοιπες. Ως αποτέλεσμα, ο απαιτούμενος όγκος είναι ο περιοριστικός παράγοντας της μεταφοράς, αλλά οι ενεργειακές ανάγκες για τη συμπίεση και τη ψύξη, είναι ιδιαίτερα χαμηλές συγκριτικά με τις υπόλοιπες φάσεις. Σε κάθε περίπτωση, δεν επιλέγεται για τη μεταφορά μεγάλων όγκων, διότι το κόστος της μεταφοράς αυξάνεται αρκετά. [68]

Κεφάλαιο 4: Τεχνικοοικονομική Ανάλυση

Στη συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιείται μια αρχική εισαγωγή στην υλοποίηση της τεχνικής και οικονομικής ανάλυσης, για το εγχείρημα τοποθέτησης συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, με γνώμονα την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Σκοπός της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης, είναι να ελεγχθεί η κατάλληλη εφαρμογή τέτοιων συστημάτων, προκειμένου να δεσμεύεται διοξείδιο του άνθρακα από τα καυσαέρια που παράγουν οι κύριες μηχανές στους διάφορους τύπους πλοίων. Πέραν του εγχειρήματος της δέσμευσης, στην ανάλυση λαμβάνουν μέρος η μεταφορά και η αποθήκευση του τελικού προϊόντος, καθώς αυτές ελλοχεύουν επιπλέον έξοδα αλλά και οικονομικά κίνητρα, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

4.1 Τεχνική Ανάλυση:

Η τεχνική ανάλυση, αποτελεί την σημαντικότερη μέθοδο για την εκτίμηση της δυνατότητας εφαρμογής και χρήσης ενός συστήματος ή τεχνολογίας, σε εμπορικό επίπεδο. Χρησιμοποιείται στην έρευνα και ανάπτυξη εφαρμογών προκειμένου να οριστούν οι καίριες παράμετροι της εκάστοτε τεχνολογίας που πρόκειται να εφαρμοστεί. Συνήθως εκτελείται κατά τα πρώιμα στάδια της σύλληψης και του σχεδιασμού ενός έργου, συνεπώς τα αποτελέσματα που εξάγει είναι απαραίτητοι παράγοντες που ορίζουν τη λειτουργικότητα του εγχειρήματος. Ταυτόχρονα, η τεχνική ανάλυση θα πρέπει να επαληθεύει και να επιβεβαιώνει πως η τεχνολογία ή το σύστημα που βρίσκεται υπό μελέτη, θα λειτουργεί σε ένα αρκετά αποτελεσματικό και αποδοτικό επίπεδο.

Οι διαφορετικοί τύποι πλοίων που συναντώνται στη ναυτιλία, χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες οι οποίες φαίνονται παρακάτω, με μερικά παραδείγματα κάθε κατηγορίας: [79]

- ❖ Εμπορικά Πλοία (*Merchant Vessels*):
 - Πλοία Φορτίου Χύδην (*Bulk Carriers*)
 - Δεξαμενόπλοια (*Tanker Vessels*)
 - Φορτηγά Πλοία (*Cargo Vessels*)
 - Πλοία Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων (*Container Vessels*)
 - Πλοία Μεταφοράς Υγροποιημένων Υδρογονανθράκων (*LNG - LPG Carriers*)
 - Πλοία *RoRo* (Roll-on/Roll-off) / Πλοία *PCTC* (*Pure Car/Truck Carriers*)

- ❖ Επιβατηγά Πλοία (*Passenger Vessels*):
 - Κρουαζιερόπλοια (*Cruise Ships*)
 - Θαλαμηγοί (*Yachts*)
 - Πορθμεία (*Ferry Boats*)

- ❖ Πλωτές και Παράκτιες Κατασκευές (*Offshore Vessels and Structures*):
 - Πλωτές Εξέδρες Εξόρυξης Υδρογονανθράκων (*Mobile Offshore Drilling Units*)
 - Πλοία Εξόρυξης Υδρογονανθράκων (*Drill-Ships, FPSO Platforms*)
 - Ενδίδουσες Κατασκευές Εξόρυξης Υδρογονανθράκων (*Compliant Structures*)

- ❖ Πλοία Ειδικού Σκοπού (*Special Purpose Vessels*):
 - Αλιευτικά (*Fishing Vessels*)

- Πυροσβεστικά (*Firefighting Vessels*)
- Φρεγάτες (*Navy Vessels*)
- Υποβρύχια (*Submarines*)
- Ρυμουλκά (*Tugboats – Towboats*)

Κατά την εκτέλεση μιας τεχνικής ανάλυσης, η οποία θα καθορίσει τη δυνατότητα υλοποίησης του εγχειρήματος, πρέπει να εξεταστούν ενδελεχώς οι παρακάτω τομείς:

- Η ύπαρξη επαρκούς διαθέσιμου χώρου στο σκάφος για την εγκατάσταση του συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα.
- Η ικανότητα του σκάφους να αντέξει το προστιθέμενο βάρος του συστήματος.
- Ο αντίκτυπος της εγκατάστασης του συστήματος (μεταφορά βαρών, μετατόπιση κέντρου βάρους κ.α.).
- Οι απαιτήσεις παροχών (παροχή ενέργειας, ηλεκτρισμού, ψυκτικού υγρού κ.α.) στο σύστημα κατά την εκκίνηση και τη λειτουργία του επί του πλοίου.
- Η χωρητικότητα των δεξαμενών αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα του συστήματος καθώς και ο χώρος που αυτές καταλαμβάνουν.
- Η επίδραση των δονήσεων επί του συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, εξαιτίας της συνεχούς κίνησης του πλοίου.

Οι παραπάνω τομείς, αποτελούν μερικούς από τους τομείς που εξετάζονται κατά την εκπόνηση μιας τεχνικής ανάλυσης, ενώ διαφέρουν για κάθε είδος πλοίου αλλά και για κάθε σύστημα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα που εξετάζεται. Η κατάλληλη επιλογή του τύπου πλοίου και του αντίστοιχου συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, είναι εκείνη που καθιστά το εγχείρημα υλοποιήσιμο αλλά και οικονομικά βιώσιμο.

4.2 Οικονομική Ανάλυση:

Η οικονομική ανάλυση, αποτελεί μια απαραίτητη παράμετρο που αναδεικνύει την πιθανότητα πρακτικής εφαρμογής μιας τεχνολογίας. Στο εγχείρημα της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με τις διάφορες τεχνολογικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν παραπάνω, η οικονομική ανάλυση εκτελείται με την εύρεση του κόστους του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα (*Cost of Captured CO₂ – CCCO₂*). Το κόστος αυτό, προκύπτει από τον υπολογισμό της κεφαλαιουχικής δαπάνης (*Capital Expenditure – CAPEX*) και των λειτουργικών εξόδων (*Operational Expenditure – OPEX*). Κατόπιν υπολογίζεται το συνολικό ετήσιο κόστος (*Total Annual Cost - TAC*), από το άθροισμα της ετήσιας κεφαλαιουχικής δαπάνης (*Annual Capital Expenditure – ACAPEX*), των μεταβλητών λειτουργικών εξόδων (*Variable Operational Expenditures – VOPEX*) και των σταθερών λειτουργικών εξόδων (*Fixed Operational Expenditures – FOPEX*). Το άθροισμα αυτό, αν διαιρεθεί με το ετήσιο συνολικό ποσό διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται, δίνει το ζητούμενο κόστος του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις: [80]

Ετήσιο Συνολικό Κόστος:

$$TAC = ACAPEX + VOPEX + FOPEX \quad (\text{Εξίσωση 1}) [80]$$

Κόστος Δεσμευμένου Διοξειδίου του Άνθρακα:

$$CCCO_2 = \frac{TAC}{\text{Annually Captured } CO_2} \quad (\text{Εξίσωση 2}) [80]$$

4.2.1 Κεφαλαιουχική Δαπάνη (CAPEX)

Η κεφαλαιουχική δαπάνη, υπολογίζεται από το κόστος του εξοπλισμού του συστήματος. Πιο αναλυτικά, εκτιμώνται οι συνολικές άμεσες δαπάνες του συστήματος (*Total Direct Plant Costs – TDPC*) και οι συνολικές έμμεσες δαπάνες του συστήματος (*Total Indirect Plant Costs – TIPC*). Οι εκτιμήσεις που χρησιμοποιούνται πηγάζουν από το άρθρο «*European Best Practice Guidelines for Assessment of CO₂ Capture Technology*» της πηγής [81]. Οι συνολικές άμεσες δαπάνες του συστήματος, περιλαμβάνουν τα κόστη του εξοπλισμού που εκτελεί τη διεργασία, της εγκατάστασης, των οργάνων ελέγχου και χειρισμού, των σωληνώσεων, του ηλεκτρικού εξοπλισμού και υλικών, καθώς και το κόστος εργασίας των τεχνικών. Οι συνολικές έμμεσες δαπάνες του συστήματος, περιλαμβάνουν τις δαπάνες από τις βελτιώσεις του ναυπηγείου (*yard improvements*), των εγκαταστάσεων παροχής υπηρεσιών (*service facilities*), της μηχανολογίας και επίβλεψης (*engineering and supervision*) καθώς και τις δαπάνες των κατασκευών (*buildings*). [80] Στον παρακάτω πίνακα, η τιμή του συνολικού κόστους συμβολίζεται με το γράμμα «Κ», η τιμή των άμεσων δαπανών με το γράμμα «Α», ενώ των έμμεσων δαπανών με το γράμμα «Ε».

Πίνακας 6 – Συνολικές Άμεσες Δαπάνες Συστήματος

Άμεσα Κόστη	Ποσοστό των Συνολικών Δαπανών	Τιμή
Συνολικό Κόστος Εξοπλισμού	100.0%	Κ
Εγκατάσταση	50.0%	0.5 * Κ
Όργανα χειρισμού και Ελέγχου	9.0%	0.09 * Κ
Σωληνώσεις	20.0%	0.2 * Κ
Ηλεκτρικός Εξοπλισμός και Υλικά	12.0%	0.12 * Κ
Εργασία Τεχνικών	11.0%	0.11 * Κ
Συνολικές Άμεσες Δαπάνες Συστήματος – (TDPC)	202%	A = 2.02 * Κ

Πίνακας 7 – Συνολικές Έμμεσες Δαπάνες Συστήματος

Έμμεσα Κόστη	Ποσοστό των Συνολικών Έμμεσων Δαπανών	Τιμή
Βελτιώσεις Ναυπηγείου	1.5%	0.015 * Α
Εγκαταστάσεις Παροχής Υπηρεσιών	2.0%	0.02 * Α
Μηχανολογία και Επίβλεψη	6.5%	0.065 * Α
Κατασκευές	4.0%	0.04 * Α
Συνολικές Έμμεσες Δαπάνες Συστήματος	14.0%	E = 0.14 * Α

Οι Συνολικές Κεφαλαιουχικές Δαπάνες (*Total_CAPEX*), προκύπτουν από το άθροισμα των Συνολικών Άμεσων Δαπανών Συστήματος «Α» και των Συνολικών Έμμεσων Δαπανών Συστήματος «Ε». Βάσει αυτών, δύναται να υπολογιστεί η Ετήσια Συνολική Κεφαλαιουχική Δαπάνη (*ACAPEX*) ως:

$$ACAPEX = CRF * Total_CAPEX \text{ (Εξίσωση 3) [80]},$$

όπου *CRF* ο συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (*Capital Recovery Factor*), ο οποίος υπολογίζεται ως:

$$CRF = \frac{i*(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \text{ (Εξίσωση 4) [80]},$$

Όπου *n*, ο αριθμός των χρόνων λειτουργίας και *i* το επιτόκιο.

Όταν έχει αποφασιστεί η συνολική κεφαλαιουχική δαπάνη (*CAPEX*), το ετήσιο συνολικό κόστος μπορεί να προσεγγιστεί με τη βοήθεια του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου. Η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής ενός συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, είναι τα 25 έτη, ενώ το επιτόκιο θεωρείται ίσο με 8%. [80]

4.2.2 Λειτουργικά Έξοδα (*OPEX*)

Τα λειτουργικά έξοδα χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τα σταθερά και τα μεταβλητά. Τα σταθερά λειτουργικά έξοδα (*Fixed Operational Expenditures – FOPEX*), περιλαμβάνουν μακροπρόθεσμες συμφωνίες παροχής υπηρεσιών, έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, γενικά έξοδα, καθώς και άλλα έξοδα που σχετίζονται με το σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, ανεξαρτήτου της λειτουργίας του. [80] Από την άλλη πλευρά, τα μεταβλητά λειτουργικά έξοδα (*Variable Operating Expenditures – VOPEX*), λαμβάνουν υπόψιν τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Πιο αναλυτικά, περιλαμβάνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος, την κατανάλωση καυσίμου, την κατανάλωση και φθορά των υλικών (όπως του διαλύτη), τα οποία εξαρτώνται από τη διάρκεια και την ένταση λειτουργίας του συστήματος. Οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, συμπεριλαμβάνονται στις ανάγκες παροχής ηλεκτρικής ισχύος, οι οποίες καλύπτονται από τις ανάγκες παροχής καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να επέλθει μόνο με αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, από τις εγκατεστημένες ηλεκτρομηχανές επί του πλοίου. Οι ανάγκες θέρμανσης για την αναγέννηση του διαλύτη, παρέχονται από λέβητες, οι οποίοι επίσης λειτουργούν με πετρέλαιο ή αέριο, συνεπώς βασίζονται στην κατανάλωση καυσίμου. Ως αποτέλεσμα, για να υπολογιστούν τα μεταβλητά λειτουργικά έξοδα, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι τιμές των καταναλισκόμενων υλικών, όπως του καυσίμου και του διαλύτη. [80] Παρακάτω φαίνονται οι εξισώσεις υπολογισμού των σταθερών (*Fixed*) και μεταβλητών (*Variable*) λειτουργικών εξόδων:

Σταθερά Λειτουργικά Έξοδα (*FOPEX*):

$$FOPEX = 0.03 * Total_CAPEX \text{ (Εξίσωση 5) [80]}$$

Μεταβλητά Λειτουργικά Έξοδα (VOPEX):

$$VOPEX = \frac{Fuel_{consumption}[kg]}{h} * \frac{Fuel_{price}}{kg} + \frac{Solvent_{degradation}[kg]}{h} * \frac{Solvent_{price}}{kg} \text{ (Εξίσωση 6) [80]}$$

4.2.3 Κόστος Μεταφοράς Άνθρακα

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μεταφορά του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα από το σημείο της δέσμευσης στο σημείο της αποθήκευσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με χρήση αγωγών, είτε μέσω πλοίων. Η κάθε επιλογή ενδείκνυται για συγκεκριμένες αποστάσεις που πρέπει να διανυθούν, καθώς αυτές ορίζουν και το κόστος της μεταφοράς. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας, σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές, θεωρούμε πως η μέγιστη απόσταση που πρέπει να διανυθεί από το σημείο της εκφόρτωσης του πλοίου, έως το σημείο της αποθήκευσης, είναι κατά μέγιστο 1000 χιλιόμετρα. [68]

Στο άρθρο [82] εξετάστηκε η μεταφορά διοξειδίου του άνθρακα σε περιοχές της Σκανδιναβίας, για αποστάσεις που κυμαίνονται από 180 έως 1900 χιλιόμετρα. Καίριος παράγοντας στο εγχείρημα της μεταφοράς πέραν της απόστασης, αποτελεί ο όγκος προϊόντος που μεταφέρεται. Όπως είναι λογικό, η μεταφορά από μικρές πηγές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, είναι σε θέση να αυξήσει το κόστος μεταφοράς, όπως ακριβώς και η μεταφορά μεγάλων αποστάσεων. Για παράδειγμα, οι αποστάσεις που εξετάστηκαν (*Preem-Gassum*, *Rautaruukki-Faludden* και *Hvidovre-Gassum*), μαρτυρούν τον αντίκτυπο της απόστασης στο κόστος της μεταφοράς. Οι μικρότερες αποστάσεις, ενδείκνυται για μεταφορά μέσω αγωγών, ενώ για μεγάλες αποστάσεις, άνω των 1000 χιλιομέτρων, η μεταφορά μέσω πλοίων είναι αισθητά φθηνότερη. Ο όγκος του διοξειδίου του άνθρακα που μεταφέρεται, επηρεάζει το κόστος μεταφοράς, καθώς η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων προϊόντος ετησίως, δύναται να μειώσει το κόστος μεταφοράς με χρήση αγωγών. Από την άλλη πλευρά, το κόστος μεταφοράς μέσω πλοίων, αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της απόστασης. [82] Όπως συμπεραίνεται από το άρθρο [82], για την μεταφορά μικρών ποσοτήτων δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, ενδείκνυται η επιλογή των πλοίων, καθώς είναι οικονομικότερη από τη χρήση των αγωγών. [82] Στον παρακάτω πίνακα, αναγράφονται τα κόστη μεταφοράς του διοξειδίου του άνθρακα στις διάφορες αποστάσεις και τους αντίστοιχους μεταφερόμενους όγκους:

Πίνακας 8 – Κόστη μεταφοράς στις διάφορες αποστάσεις και όγκους [82][67]

Μεταφορά	Όγκος Μεταφοράς [Mtpa]	Κόστος [\$/tonCO2]		
		Υπεράκτιοι Αγωγοί	Χερσαίοι Αγωγοί	Πλοία
Απόσταση 1000 [km]	6	15	10	15
Preem-Gassum, 165 [km]	5	4.7		-
Rautaruukki-Faludden, 1070 [km]	1 έως 20	-		16.5 - 26
Hvidovre-Gassum, 420 [km]	2.5 έως 4	11.8		15.3

Η μονάδα μέτρησης [*Mtpa*] περιγράφει τον όγκο προϊόντος που μεταφέρεται και αντιστοιχεί σε εκατομμύρια τόνους ανά έτος (*Millions of tons per Anum*).

4.2.4 Κόστος Αποθήκευσης Άνθρακα

Όπως αναγράφηκε στο κεφάλαιο 3, οι επιλογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα είναι η γεωλογική αποθήκευση, η ωκεανική αποθήκευση και η ορυκτή αποθήκευση με ενανθράκωση. Τα κόστη γεωλογικής αποθήκευσης αφορούν τη χρήση αλατούχων υδροφορέων και τη χρήση εξαντλημένων ή εγκαταλελειμμένων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, τόσο στη στεριά όσο και στη θάλασσα. [70] Η ωκεανική αποθήκευση απαιτεί τη χρήση υπεράκτιων εξεδρών, πλοίων μεταφοράς αλλά και συστημάτων σωληνώσεων σε βάθη που αγγίζουν τα 3000 μέτρα. [71] Η ορυκτή αποθήκευση μέσω ενανθράκωσης, αν και αποτελεί την πιο ακριβή επιλογή, εξαιτίας της ενεργειακώς κοστοβόρας διαδικασίας της ενανθράκωσης, το κόστος της μπορεί να μειωθεί, αφού οι διεργασίες ενανθράκωσης εκτελούνται απευθείας με τα καυσάερια, συνεπώς εξοικονομούνται οι ενεργειακές απαιτήσεις του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα. [72] Η επιλογή της γεωλογικής αποθήκευσης δείχνει να είναι η πιο βιώσιμη, ειδικά όταν πρόκειται για χερσαία γεωλογική αποθήκευση. Η αποθήκευση στον ωκεανό, αν και ιδιαίτερα αμφιλεγόμενη μέθοδος, μπορεί να ανταγωνιστεί την υπεράκτια γεωλογική αποθήκευση. Αυτό συμβαίνει καθώς ορισμένες συνθήκες εξαιτίας της θέσης της παράκτιας γεωλογικής αποθήκευσης, μπορούν να αυξήσουν δραστικά το κόστος του εγχειρήματος, καθιστώντας την ωκεανική αποθήκευση αρκετά φθηνότερη λύση. Στους παρακάτω πίνακες, αναγράφονται τα κόστη της γεωλογικής αποθήκευσης, της ωκεανικής αποθήκευσης και της αποθήκευσης μέσω ορυκτής ενανθράκωσης, για διαφορετικές συνθήκες: [70][70] [72]

Πίνακας 9 – Κόστη Γεωλογικής Αποθήκευσης [69]

Γεωλογική Αποθήκευση	Κόστος [\$/tonCO ₂]	
	Χερσαία	Υπεράκτια
Αλατούχοι Υδροφορείς	0.2 έως 6.2	0.5 έως 30.2
Εξαντλημένα Κοιτάσματα	0.5 έως 12.2	-
Εγκαταλλελημένα Κοιτάσματα	1.2 έως 3.8	3.8 έως 8.1

Πίνακας 10 – Κόστη Ωκεανικής Αποθήκευσης [70]

Ωκεανική Αποθήκευση	Κόστος [\$/tonCO ₂]	
	Απόσταση έως 100 km	Απόσταση έως 500 km
Υπεράκτιες Εξέδρες (3000 μέτρα βάθος)	11.9	13.2
Πλοία κατά την πλευση (2000 έως 2500 μέτρα βάθος)	14.2	15.7
Αγωγοί (3000 μέτρα βάθος)	6.2	31.1

Πίνακας 11 - Κόστη Ορυκτής Αποθήκευσης [71]

Ορυκτή Αποθήκευση	Κόστος [\$/tonCO ₂]	
	Χαμηλή	Υψηλή
Ενανθράκωση (Φυσική Πυριτική Ολιβίνη)	50	100
Ενανθράκωση (Βολοστονίτης)	64	-

4.2.5 Δέσμευση και Χρήση Διοξειδίου του Άνθρακα

Το εγχείρημα της δέσμευσης και χρήσης διοξειδίου του άνθρακα (*Carbon Capture and Utilization*), αποτελεί την τέταρτη κατηγορία αποθήκευσης και στοχεύει στην βιομηχανική αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα για την παραγωγή χημικών, πλαστικών και καυσίμων, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι ετήσιες βιομηχανικές ανάγκες για χρήση διοξειδίου του άνθρακα, κυμαίνονται μεταξύ 100 και 150 εκατομμυρίων τόνων, γεγονός που παρέχει ιδιαίτερα οικονομικά κίνητρα για την πώληση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα στις διάφορες βιομηχανίες, όπως για παράδειγμα σε βιομηχανίες παραγωγής μεθανόλης και ουρίας. Παράλληλα, το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να πωληθεί σε εταιρείες εξόρυξης υδρογονανθράκων, για δευτερογενή εξόρυξη (*EOR/EGR*). Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5 και 30 [\$/tonCO₂], ανάλογα με την περιοχή της εξόρυξης και του εκάστοτε κοιτάσματος. [70]

4.2.6 Οικονομικά Κίνητρα

Το εγχείρημα της δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (*Carbon Capture and Storage*), πέρα από τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει, συνοδεύεται και από αρκετά οικονομικά κίνητρα, τόσο για την χερσαία εκτέλεση του εγχειρήματος, όσο και για την υπεράκτια.

Κίνητρα Χερσαίας Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα:

Προκειμένου να προωθηθεί η κατασκευή και χρήση συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φορολογικές πιστώσεις και κρατική στήριξη και μέριμνα, με σκοπό να μετριαστούν οι επενδυτικοί κίνδυνοι ενός τέτοιου εγχειρήματος. Ακόμη μπορούν να δημιουργηθούν κατάλληλα συστήματα διαπίστευσης και συμβάσεις για διαφορά (*Contracts For Difference*) για τα προϊόντα που έχουν απαλλαγθεί από το διοξείδιο του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, ήδη από το 2008 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, χρησιμοποιούνται φορολογικές πιστώσεις (45Q), για την χρηματοδότηση σταθμών παραγωγής ισχύος, για κάθε τόνο διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται και αποθηκεύεται ή επαναχρησιμοποιείται. Η χρηματοδότηση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 35\$ και 50\$ ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα που αποθηκεύεται μακροπρόθεσμα. Επιπρόσθετα, τα ρίσκα διασταυρούμενης αλυσίδας (*cross-chain risks*) για νέες υποδομές δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία περιλαμβάνουν την πιθανότητα διπλών δαπανών, παραβίασης δεδομένων και απώλειας κεφαλαίων, μπορούν να καλυφθούν από κρατικές επιχορηγήσεις. Για παράδειγμα, το έργο κρατικό *Northern Lights* στη Νορβηγία, παρέχει μετριασμό του κινδύνου της ανάπτυξης εταιρειών καθώς οι υποδομές αναπτύσσονται με χρηματοδότηση από την κυβέρνηση. Ταυτόχρονα, οι οικονομίες κλίμακας που αναπτύσσονται οδηγούν σε μικρότερο ρίσκο,

φθηνότερη μεταφορά και αποθήκευση, ενώ ολοένα και περισσότερες εταιρίες εισέρχονται στη συγκεκριμένη αγορά. Παράλληλα, τα συστήματα διαπίστευσης αποσκοπούν στην στήριξη των προϊόντων που έχουν απαnthρακοποιηθεί, με συστήματα πιστοποίησης. Το πλαίσιο των Πράσινων Δημοσίων Προμηθειών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (*Green Public Procurement*), μπορεί να προωθήσει την αγορά απαnthρακοποιημένων προϊόντων, σε επίπεδο δημόσιας αγοραστικής δύναμης και να προωθήσει την ανάπτυξη της απαnthρακοποίησης εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα σύστημα πιστοποίησης για τους αγοραστές, ώστε να επιλέγουν αγνά ή απαnthρακοποιημένα προϊόντα, δημιουργώντας έτσι ένα εθελοντικό μηχανισμό που οδηγεί στην περαιτέρω απαnthρακοποίηση των βιομηχανιών. Τέλος, οι συμβάσεις για διαφορά (*Contracts For Difference - CFD*), δύναται να αξιοποιηθούν από τις εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μέσω αυτών τους παρέχεται η διαφορά στο κόστος κάλυψης της αγοράς ενός συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο εισάγεται στη διεργασία παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Συνεπώς η δημόσια οικονομική στήριξη δημιουργεί κίνητρα για επενδύσεις στα συστήματα δέσμευσης στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς επιπλέον κόστος. Το συγκεκριμένο εγχείρημα είναι καίριας σημασίας, καθώς παρέχει στο δίκτυο ενέργειας την κατάλληλη ελαστικότητα κατά την είσοδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αγορά της παραγωγής ηλεκτρισμού. [83]

Υπεράκτια - Πλωτή Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα:

Για τη ναυτιλία δεν υφίστανται ακόμη κανονισμοί εμπορίας εκπομπών (*Emission Trading Schemes*). Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης των πλοίων (*Energy Efficiency Design Index - EEDI*), έχει εισαχθεί από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (*International Maritime Organization - IMO*), με σκοπό να προωθηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων και ταυτόχρονα να μειωθεί η ρύπανση που επιφέρουν. Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι απαραίτητος σε όλα τα νεότευκτα πλοία προκειμένου να εγκριθεί η κατασκευή και η λειτουργία τους. Προκύπτει ως το πηλίκο των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ενός πλοίου (CO_2 emissions), προς το έργο μεταφοράς που επιτελεί (*transport work*). Η 3^η φάση (*Phase 3*) του δείκτη *EEDI*, βρίσκεται σε ισχύ από τον Απρίλιο του 2022 και έκτοτε απαιτείται από:

- τα δεξαμενόπλοια άνω των 20000 [DWT]
- τα πλοία γενικού φορτίου άνω των 15000 [DWT]
- τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου άνω των 100000 [DWT]
- τα φορτηγά εμπορευματοκιβωτίων από 10000 έως 200000 [DWT]

να είναι από 30 έως 50% ενεργειακά πιο αποδοτικά από την καθιερωμένη γραμμή αναφοράς (*Established Reference Line – Baseline*) η οποία έχει δημιουργηθεί από ιστορικά στοιχεία εκπομπών. Παράλληλα, η 3^η φάση θα έχει και δεύτερη επανάληψη, η οποία αναμένεται να εφαρμοστεί έως το 2025, όπου και άλλοι τύποι πλοίων, θα αντιμετωπίσουν ολοένα και αυστηρότερες απαιτήσεις για τον δείκτη *EEDI*. [84]

Επιπρόσθετα, από την περίοδο μεταξύ 2005 και 2010, προτάθηκαν από τα μέλη του Διεθνή Οργανισμού Ναυτιλίας, κάποιοι μηχανισμοί που βασίζονται στην αγορά (*Market Based Mechanisms - MBM*), των οποίων η εφαρμογή αναβλήθηκε, εξαιτίας του δυνητικών

επιπτώσεων που θα επέφεραν. Οι μηχανισμοί που είχαν προταθεί, ήταν για παράδειγμα παγκόσμια συστήματα εμπορίας εκπομπών, διεθνή επενδυτικά ταμεία (*funds*) καθώς και συστήματα εμπορίας πιστώσεων (*credit trading systems*). Ακόμη προτάθηκαν συστήματα αποδοτικότητας για τα πλοία, όπως ακριβώς ο δείκτης *EEDI*, ο οποίος τέθηκε για πρώτη φορά σε υποχρεωτική ισχύ το 2011 και έκτοτε χρησιμοποιείται αυστηρώς για τη μείωση των εκπομπών της ναυτιλιακής δραστηριότητας και τη αποφυγή της ρύπανσης. [85] [86]

Κεφάλαιο 5: Κανονιστικό Πλαίσιο

Η εισήγηση μιας νέας τεχνολογίας, ακολουθείται από αβεβαιότητες και ρίσκα για τους κατασκευαστές, τους χειριστές και τους τελικούς χρήστες της. Συνεπώς θα πρέπει να συνταχθεί ένα κανονιστικό πλαίσιο, το οποίο θα ακολουθείται πιστά και θα αξιολογεί την τεχνολογική εφαρμογή και επίδοση, αναγνωρίζοντας και αναλύοντας τους κινδύνους που ελλοχεύουν η ανάπτυξη, η παραγωγή και η εφαρμογή της τεχνολογίας. Η διαδικασία της αξιολόγησης, οδηγεί σε πλήρη αναγνώριση όλων των παραμέτρων που αφορούν τη νέα τεχνολογία, με αποτέλεσμα να μπορούν να εκτιμηθούν οι επιδόσεις της κατά την πρακτική της εφαρμογή. Ως αποτέλεσμα, η γνώση των σημείων που υστερεί η τεχνολογία, ή που αποτελούν κίνδυνο κατά την πρακτική της εφαρμογή, μπορεί να οδηγήσει τόσο στην αντιμετώπιση περιπτώσεων αστοχιών, όσο και στη γενικότερη βελτίωση της ιδέας γύρω από την συγκεκριμένη τεχνολογία.

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο, έχει βασιστεί στις κατευθυντήριες γραμμές που προτείνει και ακολουθεί ο Νορβηγικός – Γερμανικός Νηογνώμονας (*DNV-GL*) για τη διαδικασία αξιολόγησης των τεχνολογιών και των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα. [87]

5.1 Φιλοσοφία και Αρχές Αξιολόγησης:

5.1.1 Φιλοσοφία

Η φιλοσοφία γύρω από τη διαδικασία της αξιολόγησης, στηρίζεται στους παρακάτω τομείς:

- Στη συστηματική προσέγγιση με βάση τους πιθανούς κινδύνους.
- Στον εντοπισμό των πιθανών απειλών ή περιπτώσεων αστοχίας της τεχνολογίας.
- Στην περαιτέρω διερεύνηση των τομέων της τεχνολογίας που διαθέτουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα.
- Στο γεγονός πως το επίπεδο της αξιολόγησης θα πρέπει να είναι ανάλογο με την αβεβαιότητα που συνδέεται με την τεχνολογία.
- Στη χρήση αναλύσεων και πειραμάτων, όπου είναι εφικτό, για την τεκμηρίωση των προδιαγραφών και την πρόβλεψη των επιδόσεων.
- Στα συστήματα διασφάλισης ποιότητας και ελέγχου ποιότητας, τα οποία είναι αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας αξιολόγησης, κατά την κατασκευή, συναρμολόγηση, εγκατάσταση, λειτουργία, τροποποίηση, επισκευή και χρήση του συστήματος της τεχνολογίας.

5.1.2 Αρχές

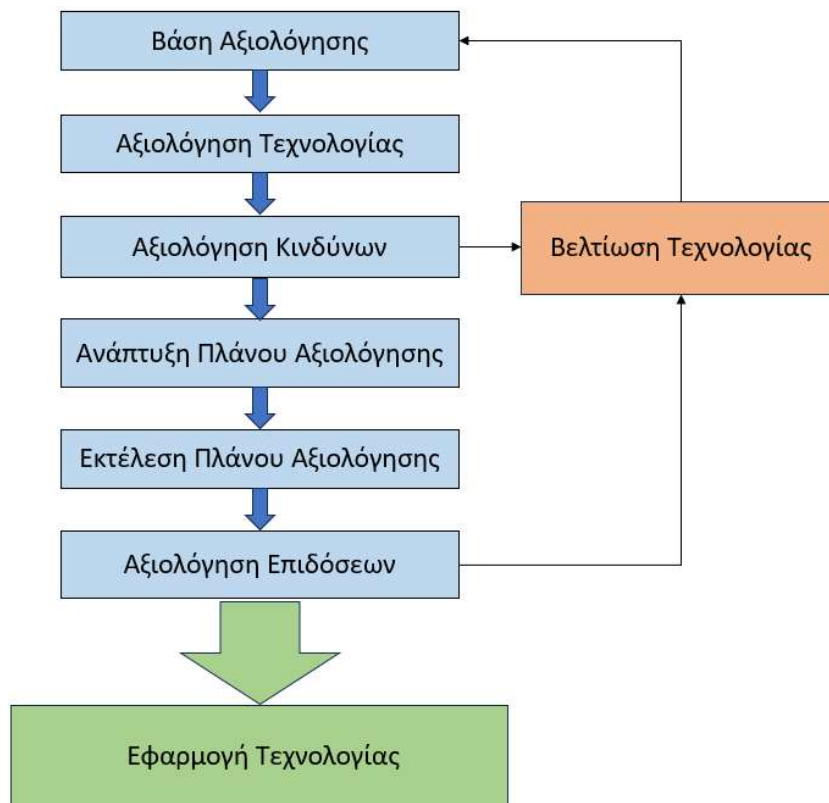
Οι παρακάτω αρχές, θα πρέπει να ορίζουν την διαδικασία της αξιολόγησης:

- Οι προδιαγραφές και οι απαιτήσεις πρέπει να ορίζονται με σαφήνεια, να ποσοτικοποιούνται και να τεκμηριώνονται.
- Για την τεχνολογία πρέπει να διενεργείται αυστηρός προσδιορισμός των περιπτώσεων δυνητικής αστοχίας.

- Το περιθώριο επιδόσεων καθορίζεται με βάση αναγνωρισμένες μεθόδους και πρότυπα ή με τον συνδυασμό όλων των αβεβαιοτήτων που χρησιμοποιούνται στα δεδομένα, τη λειτουργία, τους υπολογισμούς και τις δοκιμές της τεχνολογίας.
- Οι προσπάθειες αξιολόγησης κάθε περίπτωσης αστοχίας της τεχνολογίας, πρέπει να ανιχνεύονται και να καταγράφονται, σύμφωνα με το καθορισμένο περιθώριο επιδόσεων.
- Όταν χρησιμοποιείται η εμπειρία ως απόδειξη κάλυψης των προδιαγραφών, τότε επαρκή αποδεικτικά στοιχεία πρέπει να συγκεντρώνονται και να επικυρώνονται.
- Οι περιορισμοί των υλικών και λειτουργικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις (π.χ. όρια διαρροής, συντελεστές τριβής, συντελεστές θερμικής διαστολής κα.), πρέπει να προσδιορίζονται μέσω δοκιμών, ενώ επαληθεύονται μέσω αναγνωρισμένης βιβλιογραφίας ή κρίσης εμπειρογνομόνων.

5.2 Διαδικασία Αξιολόγησης και Κύρια Βήματα:

Η διαδικασία της αξιολόγησης εκτελείται σε μια σειρά βημάτων, η αυστηρότητα των οποίων κρίνεται από το μέγεθος της αβεβαιότητας της τεχνολογίας και της πιθανότητας ύπαρξης αστοχιών. Το κάθε βήμα, εξάγει μια σειρά αποτελεσμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για το επόμενο βήμα. Συνεπώς η διαδικασία της αξιολόγησης έχει επαναληπτικό χαρακτήρα, καθώς κατά την εκπόνησή της, ενδεχομένως να προκύψουν βελτιώσεις και αλλαγές, που θα ενισχύσουν την έκβαση της αξιολόγησης. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται τα βήματα της διαδικασίας αξιολόγησης:



Εικόνα 13 – Βασικά βήματα διαδικασίας αξιολόγησης μιας τεχνολογίας

5.3 Βάση Αξιολόγησης:

Σκοπός της βάσης αξιολόγησης, αποτελεί ο ορισμός των προσδοκιών της τεχνολογίας, κατά την απουσία σχετικών οδηγιών και διαδικασιών. Πρόκειται για ένα έγγραφο, που ορίζει τον τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία και περιλαμβάνει τα κριτήρια αποδοχής της ως ένα πλήρως αξιολογημένο προϊόν. Ταυτόχρονα, προσδιορίζει τις προσδοκώμενες επιδόσεις της τεχνολογίας, καθώς και τη συμπεριφορά της καθ' όλη τη διάρκεια χρήσης της.

5.3.1 Μεθοδολογία

Η τεχνολογία πρέπει να περιγράφεται με πληρότητα και σαφήνεια, με χρήση κειμένων, εκτεταμένων υπολογισμών, σχεδίων και άλλων σχετικών εγγράφων. Είναι πολύ σημαντικό, να ορίζονται σαφώς τα όρια της τεχνολογίας και οι σχετικές διεπαφές της. Οι προδιαγραφές της τεχνολογίας πρέπει να προσδιορίζουν όλες τις πτυχές της και τις αντίστοιχες παραμέτρους. Η βάση της διαδικασίας αξιολόγησης, πρέπει να περιλαμβάνει:

- i. Περιγραφή και προδιαγραφή του συστήματος, με το διαθέσιμο επίπεδο λεπτομερειών, για κάθε φάση της ανάπτυξής του. Πιο αναλυτικά θα πρέπει να περιλαμβάνει κατ' ελάχιστο:
 - Περιγραφή της τεχνολογίας που πρόκειται να αξιολογηθεί, συμπεριλαμβανομένων των ορίων λειτουργίας και των οριακών συνθηκών.
 - Λειτουργικούς περιορισμούς και κύρια δεδομένα.
 - Απαιτήσεις του συστήματος διεπαφής.
 - Βασικές απαιτήσεις.
 - Απαιτήσεις ασφαλείας, υγείας και περιβάλλοντος (*Safety, Health and Environment*).
 - Στόχους αξιοπιστίας.
 - Κύριες αρχές της τεχνολογίας (σχεδιασμός, κατασκευή λειτουργία, συντήρηση και παροπλισμός).
 - Κύριες αρχές για τη διασφάλιση της ποιότητας
 - Κατάλογο με τις παραδοχές και τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται κατά τη διαδικασία αξιολόγησης.
- ii. Εκτενή και πλήρη περιγραφή των λειτουργικών απαιτήσεων.

5.3.2 Περιγραφή και προδιαγραφή συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα

Επειδή δεν υφίστανται συγκεκριμένα τυποποιημένα πρότυπα με τις πληροφορίες που απαιτούνται για τη δημιουργία μιας εμπορικής μονάδας χημικής διεργασίας και επειδή στη ζητούμενη τεχνολογία δεν δύναται να εφαρμοστούν πλήρως οι γενικές διατάξεις αξιολόγησης των μηχανικών, χημικών ή θερμικών διαδικασιών, μια γενική καθοδήγηση αποτελεί πως η περιγραφή και η προδιαγραφή της βάσης αξιολόγησης, θα πρέπει να ακολουθούν τα πρότυπα που εφαρμόζονται στην ιδέα της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή μιας εμπορικής μονάδας χημικής επεξεργασίας θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- Περιγραφή του έργου.
- Περιγραφή της διεργασίας.
- Την δομή της εμπορικής μονάδας.
- Ισοζύγιο των υλικών και της θερμότητας.
- Φύλλο ροής της διεργασίας.
- Διαγράμματα οργάνων και σωληνώσεων.
- Προδιαγραφές οργάνων και σωληνώσεων.
- Σχέδιο δομής.
- Σχέδια και προδιαγραφές βασικού εξοπλισμού.
- Ασφάλεια διεργασίας.
- Απαιτήσεις παροχών.

Η κλιμάκωση της διαδικασίας θα πρέπει να ξεκινά και να προσεγγίζεται από το πρώτο στάδιο της περιγραφής της νέας τεχνολογίας, δηλαδή από την γνώση του πώς πιστεύεται ότι θα μοιάζει η εμπορική μονάδα χημικής επεξεργασίας. Κατά την εξέλιξη του συστήματος, από την σύλληψη της ιδέας μέχρι τον εμπορικό σχεδιασμό, υπάρχει μια συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ των σχεδιαστικών και οικονομικών μελετών και του πειραματικού προγραμματισμού (σε εργαστήριο, πιλοτική μονάδα, ή μακέτα). Η κλιμάκωση της διεργασίας σπανίως αποτελεί μια απλή και ευθεία πορεία, αλλά αντίθετα, είναι ένας συνδυασμός θεωρητικών μοντέλων, απαραίτητων συσχετίσεων και εμπειρικών επιλογών.

5.3.3 Απαιτήσεις

Για την επιτυχή λειτουργία της εμπορικής μονάδας επεξεργασίας, πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Είναι ζωτικής σημασίας, να κατανοηθούν πλήρως οι απαιτήσεις και οι επιπτώσεις που αυτές επιφέρουν, ενώ θα πρέπει να συμφωνηθούν, από όλους τους συμμετέχοντες του έργου. Στον παρακάτω πίνακα, αναγράφονται ορισμένα παραδείγματα λειτουργικών απαιτήσεων για τις μεθοδολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα:

Πίνακας 12 – Παραδείγματα σημείων λειτουργικών απαιτήσεων των μεθοδολογιών δέσμευσης CO₂

Μεθοδολογία Δέσμευσης			
	Πριν την καύση	Μετά την καύση	Καύση Οξυγόνου - Καυσίμου
Διεργασία	Ενεργειακή Επάρκεια	Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂	Ενεργειακή Επάρκεια
	Παραγωγή Ενέργειας	Καθαρότητα CO ₂	Παραγωγή Ενέργειας
	Διαρροή CO ₂	Κατανάλωση Ενέργειας	Διαρροή CO ₂
	Καθαρότητα CO ₂	Εκπομπές	Καθαρότητα CO ₂
Υποδιεργασία	Μετατροπή Αναμορφωτή	Ποιότητα Ατμού	Παροχή ενέργειας στους στροβίλους
	Παροχή ενέργειας στους στροβίλους	Κατανάλωση Διαλύτη	Παραγωγή Ατμού
	Αραίωση H ₂	Προσθήκη Αναστολέα	Καθαρότητα Οξυγόνου
Εξαρτήματα	Απόδοση Καταλύτη	Αντίσταση Έναντι Διάβρωσης του υλικού απορρόφησης	Ψύξη Διαστολέα
	Θερμοκρασία Ανάφλεξης	Φόρτωση CO ₂	Επιλογή Υλικών Στροβίλου
	Οπισθοδρόμηση Ανάφλεξης	Κατανάλωση Λέβητα Στήλης Απομάκρυνσης	Θερμοκρασία Ανάφλεξης
	Αυτανάφλεξη	Κατανάλωση Φυσητήρα	Οπισθοδρόμηση Ανάφλεξης
	Εκπομπές Nox	Καυσαερίων	Αυτανάφλεξη

Οι λειτουργικές απαιτήσεις, είναι σε θέση να περιγράψουν τους σκοπούς της τεχνολογίας. Οι απαιτήσεις αυτές θα πρέπει:

- Να καθορίζουν με σαφήνεια τι πρέπει να κάνει η τεχνολογία.
- Να είναι μετρήσιμες.
- Να καθορίζονται όσο το δυνατόν νωρίτερα και να επικαιροποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας αξιολόγησης.

5.3.4 Κατάλογος Βασικών Παραμέτρων

Σκοπός του καταλόγου βασικών παραμέτρων, είναι η καταγραφή των καίριων παραμέτρων που διέπουν την τεχνολογία. Σε αυτόν συνοψίζονται τα μεγέθη των φορτίων, των χωρητικότητων καθώς και των λοιπών λειτουργικών παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται πως οι σχετικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για τη διεξαγωγή αναλύσεων και ελέγχων, χρησιμοποιούνται ορθά και επικαιροποιούνται με πιθανές αλλαγές, κατά την πορεία εκτέλεσης της διαδικασίας αξιολόγησης. Ο συγκεκριμένος κατάλογος, θα πρέπει να περιλαμβάνει παραμέτρους αναγνώρισης αστοχιών, καθώς και τα όρια των συγκεκριμένων παραμέτρων. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αξιολόγησης, ο κατάλογος των βασικών παραμέτρων, θα αποτελεί τον φάκελο αξιολόγησης της τεχνολογίας και θα καθορίζει τα όρια εντός των οποίων η τεχνολογία θα θεωρείται εγκεκριμένη και θα δύναται να χρησιμοποιηθεί.

5.4 Τεχνολογική Αξιολόγηση:

Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της τεχνολογίας, πρέπει να κατανεμηθεί σε διαχειρίσιμα στοιχεία, με σκοπό να διαχωριστούν εκείνα που χρήζουν ειδικής διαχείρισης, καθώς αποτελούν πτυχές νέων τεχνολογιών και συνοδεύονται από προκλήσεις και αβεβαιότητες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση, πηγάζουν από τη βάση της τεχνολογίας, ενώ τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι μια λίστα με στοιχεία από ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, καθώς και οι κύριες προκλήσεις και αβεβαιότητες που συνοδεύουν τη νέα τεχνολογία.

5.4.1 Μεθοδολογία

Η τεχνολογική αξιολόγηση περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Ανάλυση της τεχνολογίας σε διαχειρίσιμα στοιχεία
- Αξιολόγηση των στοιχείων της τεχνολογίας ως προς την καινοτομία.
- Προσδιορισμός των κύριων προκλήσεων και αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις πτυχές της νέας τεχνολογίας.

Η παραπάνω ανάλυση, επιτυγχάνεται με τη διαίρεση της τεχνολογίας σε έναν ή περισσότερους τύπους στοιχείων από τους παρακάτω:

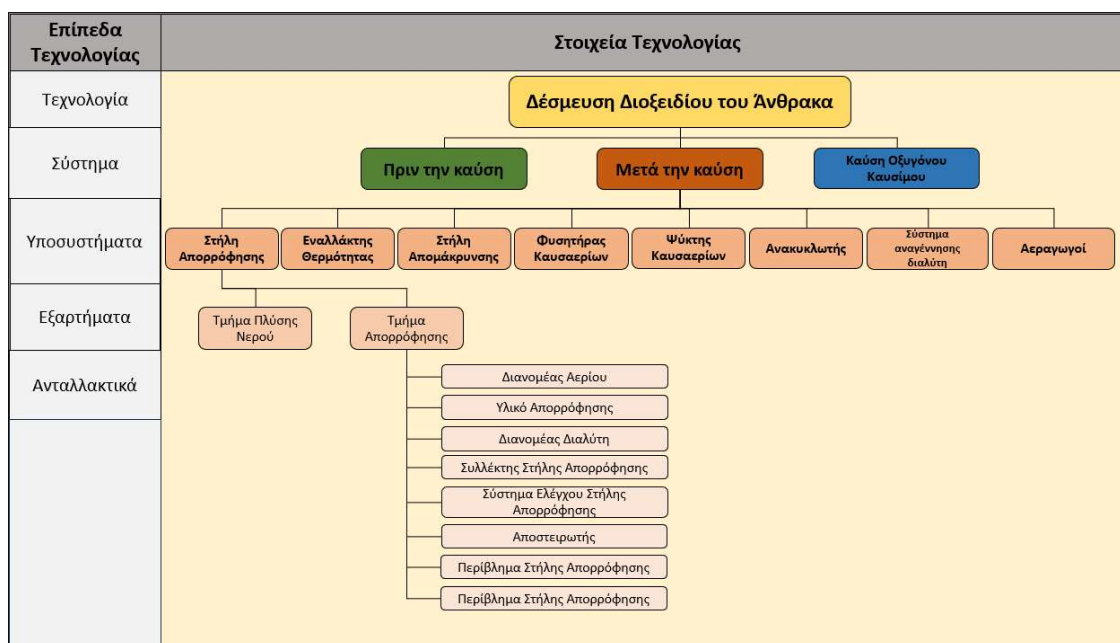
- Υποσυστήματα και εξαρτήματα με συγκεκριμένες λειτουργίες.
- Λειτουργικές μονάδες διεργασιών.
- Ακολουθίες διεργασιών.
- Φάσεις εκτέλεσης του έργου με βάση τις διαδικασίες κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας.

Ο βαθμός καινοτομίας της τεχνολογίας, καθορίζεται με ταξινόμηση των στοιχείων της τεχνολογίας αναφορικά με το πεδίο εφαρμογής και την τεχνολογική ωριμότητα και γνώση. Τα στοιχεία που ταξινομούνται ως νέα τεχνολογία, υπόκεινται σε περαιτέρω αξιολόγηση.

Για πολύπλοκα συστήματα, όπως εκείνα της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, συνιστάται ο προσδιορισμός των κύριων προκλήσεων και αβεβαιοτήτων, με διενέργεια ενός υψηλού επιπέδου ελέγχου αναγνώρισης κινδύνων (*HAZID – Hazard Identification*).

5.4.2 Τεχνολογική Ανάλυση συστημάτων δέσμευσης CO₂

Η ανάλυση για την τεχνολογική αξιολόγηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαίρεση των υποσυστημάτων και των εξαρτημάτων που εκτελούν συγκεκριμένες διεργασίες, σε ένα διάγραμμα ροής διεργασιών (*Process Flow Diagram – PFD*) όπως φαίνεται παρακάτω:

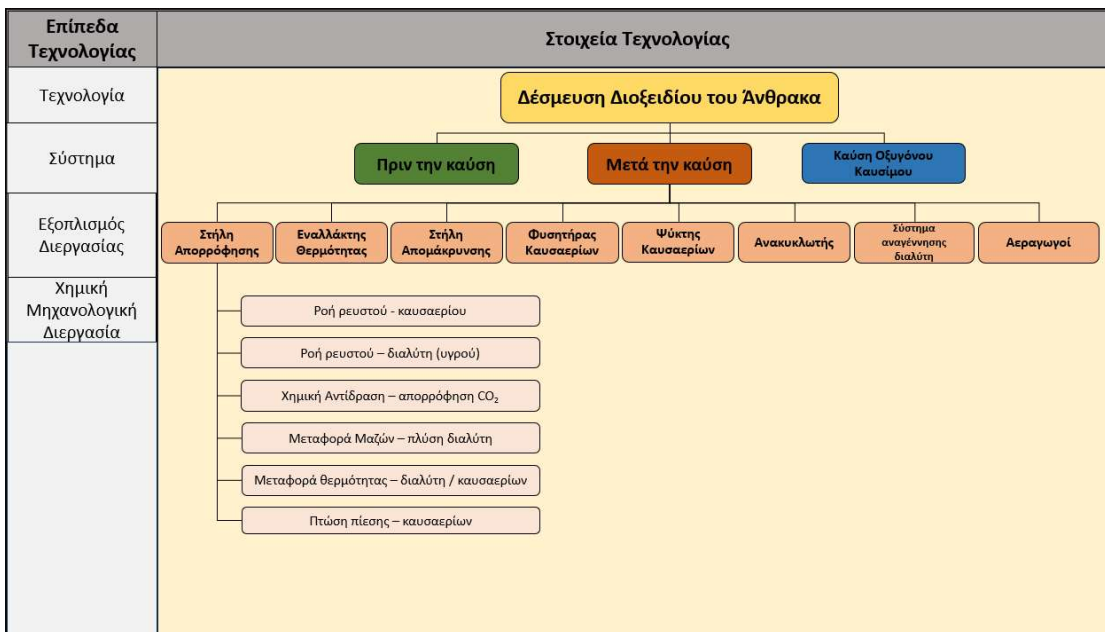


Εικόνα 14 - Διάγραμμα ροής με υποσυστήματα και εξαρτήματα

Μια εναλλακτική ή συμπληρωματική διαίρεση για την ανάλυση της τεχνολογικής αξιολόγησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με ανάλυση των υποσυστημάτων και των εξαρτημάτων που εκτελούν συγκεκριμένες διεργασίες και στη συνέχεια με υποδιαίρεση των διεργασιών που εκτελεί η κάθε μονάδα. Η λειτουργία κάθε μονάδας αποτελείται από μια σειρά παράλληλα εκτελεσμένων διεργασιών. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να χωριστούν ως:

- Διεργασίες ροής ρευστών, όπως μεταφορά ρευστών, φιλτράρισμα, υγροποίηση στερεών κ.α.
- Διεργασίες μεταφορά θερμότητας, όπως εξάτμιση, συμπύκνωση κ.α.
- Διεργασίες μεταφοράς μαζών, όπως απορρόφηση, απόσταξη, εκχύλιση, προσρόφηση, ζήρανση κ.α.
- Διεργασίες μεταβολής πίεσης, όπως συμπίεση, διαστολή κ.α.
- Θερμοδυναμικές διεργασίες, όπως υγροποίηση αερίων, ψύξη κ.α.
- Μηχανικές διεργασίες, όπως μεταφορά στερεών, θραύση, κονιοποίηση, κοσκίνισμα κ.α.
- Χημικές αντιδράσεις, όπως καύση, οξείδωση, ισομερισμός κ.α.

Για παράδειγμα, στις τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια, με χρήση αμινών, η απορρόφηση, η εναλλαγή θερμότητας, η απομάκρυνση και η συμπίεση, αποτελούν παραδείγματα διεργασιών. Παρακάτω, φαίνεται το διάγραμμα ροής με ανάλυση ως προς τις διεργασίες που εκτελεί κάθε μονάδα:



Εικόνα 15 - Διάγραμμα ροής με υποσυστήματα και διεργασίες

Συμπληρωματικά στις παραπάνω επιλογές ανάλυσης, δύναται να συνταχθεί ανάλυση σε ακολουθίες διεργασιών, η οποία θα αναδεικνύει νέες πτυχές που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση των ακολουθιών ή των κύκλων που εκτελούνται κατά τη διεργασία της δέσμευσης. Η ανάλυση αυτή, είναι ζωτικής σημασίας στις τεχνολογίες δέσμευσης που εκτελούνται σε ενσωματωμένους κύκλους (πχ χημικός κύκλος βρόγχου), ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτενέστερη μελέτη της αλληλεπίδρασης του συστήματος παραγωγής ενέργειας και του συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία αποτελούν ξεχωριστές μονάδες στις μεθοδολογίες δέσμευσης μετά την καύση.

5.4.3 Κατάταξη Τεχνολογίας

Κάθε νέα τεχνολογία, συνήθως πηγάζει από υπάρχουσες αποδεδειγμένες τεχνολογίες, με μόλις μερικά στοιχεία της να θεωρούνται εντελώς νέα. Στα στοιχεία αυτά, έγκεινται οι αβεβαιότητες της τεχνολογίας. Προκειμένου να αναγνωριστούν τα συγκεκριμένα σημεία και να αντιμετωπιστούν με μεγαλύτερη προσοχή, πρέπει να γίνει μια βαθμονομημένη κατάταξη της γνώσης της εκάστοτε τεχνολογίας και των πεδίων εφαρμογής της, με γνώμονα τις αβεβαιότητες που την διέπουν. Η κατανομή γίνεται ως:

Πίνακας 13 – Κατάταξη Ωριμότητας Τεχνολογίας

Πεδίο Εφαρμογής	Ωριμότητα Τεχνολογίας		
	Αποδεδειγμένη	Περιορισμένο ιστορικό	Νέα ή μη αποδεδειγμένη
Γνωστό	1	2	3
Περιορισμένης Γνώσης	2	3	4
Νέο	3	4	4

Όταν μια τεχνολογία κατατάσσεται στην 1^η κατηγορία, θεωρείται ως αποδεδειγμένη χωρίς νέες τεχνικές αβεβαιότητες και με αποδεδειγμένες μεθόδους για την πιστοποίηση, τις δοκιμές, τους υπολογισμούς και την ανάλυση των επιδόσεών της. Τα στοιχεία που εμπίπτουν στη συγκεκριμένη κατηγορία, αποτελούν τα σημαντικότερα για τη συνολική ανάλυση και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τα στάδια του μηχανολογικού σχεδιασμού.

Οι τεχνολογίες που κατατάσσονται στις υπόλοιπες κατηγορίες, έχουν αυξανόμενο βαθμό τεχνικής αβεβαιότητας. Τα στοιχεία που εμπίπτουν στις συγκεκριμένες κατηγορίες, πρέπει να αξιολογούνται εκτενέστερα, ανάλογα με την κατάταξη που προκύπτει από τον συνδυασμό της γνώσης της τεχνολογίας και της γνώσης του πεδίου που επρόκειτο να εφαρμοστεί.

5.4.4 Αναγνώριση Κύριων Προκλήσεων και Αβεβαιοτήτων

Κατόπιν της κατάταξης της τεχνολογίας, δύναται να προσδιοριστούν οι κύριες προκλήσεις και αβεβαιότητες. Για πολύπλοκα συστήματα όπως αυτά της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, συνίσταται η εκτέλεση ελέγχου αναγνώρισης κινδύνων (*HAZID*). Ο συγκεκριμένος έλεγχος, αποτελεί το ιδανικότερο μέσο για την καλύτερη κατανόηση ενός συστήματος σε πρώιμο στάδιο και για την αναγνώριση των στοιχείων που απαιτούν εκτενέστερη ανάλυση και τεκμηρίωση, πριν από τον προσδιορισμό των τρόπων αστοχίας και την κατάταξη των κινδύνων που ελλοχεύει η εκάστοτε τεχνολογία.

5.5 Αξιολόγηση Κινδύνων:

Στόχος του συγκεκριμένου βήματος, είναι να αναγνωριστούν όλοι οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την εφαρμογή της τεχνολογίας, δηλαδή οι ανησυχίες για πιθανές αστοχίες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι τα αποτελέσματα της βάσης της τεχνολογίας καθώς και τα στοιχεία που ανήκουν στη λίστα που αναπτύχθηκε με τα στοιχεία νέων τεχνολογιών, στην τεχνική αξιολόγηση. Ως αποτέλεσμα, παράγεται ένα μητρώο με πιθανούς τρόπους αστοχίας, οι οποίοι δύναται να αποτελέσουν κίνδυνο. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφερθεί, πως είναι αδύνατον να αναπτυχθεί ένα επαρκές πλάνο αξιολόγησης, αν δεν έχουν αναγνωριστεί και κατανοηθεί όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι που συνοδεύουν την εφαρμογή της τεχνολογίας.

5.5.1 Μεθοδολογία Αξιολόγησης Κινδύνων

Η αξιολόγηση κινδύνων θα πρέπει να περιλαμβάνει τα παρακάτω καίρια βήματα:

- Ποιοτικό ορισμό διαφόρων κατηγοριών πιθανότητας αστοχιών και κατάταξη της σοβαρότητας των συνεπειών τους. Το βήμα αυτό πραγματοποιείται πριν από τον προσδιορισμό των τρόπων αστοχίας.
- Καθορισμός των αποδεκτών κινδύνων με τη δημιουργία ενός πίνακα κινδύνων που περιλαμβάνει πλήρως αποδεκτούς συνδυασμούς (χαμηλός κίνδυνος), μη αποδεκτούς συνδυασμούς (υψηλός κίνδυνος) και ενδιάμεσους συνδυασμούς (μέσος κίνδυνος), των πιθανοτήτων αστοχίας και των συνεπειών.
- Προσδιορισμός όλων των πιθανών τρόπων αστοχίας και κατάταξη των κινδύνων.
- Κατάταξη κάθε τρόπου αστοχίας ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης και τις συνέπειες που επιφέρει, σύμφωνα με προηγούμενες αναφορές και την κρίση των εμπειρογνομόνων.
- Αποθήκευση των πληροφοριών για κάθε τρόπο αστοχίας, σε ένα μητρώο τρόπων αστοχίας.

Για πολύπλοκα συστήματα όπως αυτά της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, η διαδικασία εντοπισμού τρόπων αστοχίας και κατάταξης των κινδύνων συνιστάται να διεξάγεται ως εργαστήριο, με τη συμμετοχή ομάδας εμπειρογνομόνων, οι οποίοι διαθέτουν τις απαραίτητες γνώσεις και επαρκή εμπειρία.

5.5.2 Ποιοτική Κατάταξη Πιθανοτήτων Αστοχιών

Η κατάταξη των πιθανοτήτων εμφάνισης αστοχιών, γίνεται με βάση τη συχνότητα εμφάνισης από στοιχεία που αστοχούν κάθε χρόνο έως και εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα να αστοχούν 1 φορά κάθε 10000 χρόνια (πχ οι συνήθεις χαλύβδινες κατασκευές). Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κατάταξη των πιθανοτήτων αναφορικά με μια αστοχία κάθε 10000 χρόνια, 1000 χρόνια, 100 χρόνια, 10 χρόνια και ετησίως:

Πίνακας 14 - Παράδειγμα Κατάταξης Πιθανοτήτων Αστοχιών

A/A	Πιθανότητα	Περιγραφή	Ενδεικτικό Ετήσιο Ποσοστό Αστοχιών
1	Πολύ μικρή	Αμελητέα συχνότητα γεγονότος	1.00E-04
2	Μικρή	Γεγονός που δεν είναι ιδιαίτερα πιθανό να συμβεί	1.00E-03
3	Μέση	Το γεγονός αναμένεται να συμβεί αλλά σπανίως	1.00E-02
4	Υψηλή	Ένα ή περισσότερα γεγονότα αναμένονται να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος	1.00E-01
5	Πολύ υψηλή	Ένα ή περισσότερα γεγονότα αναμένονται να συμβούν ετησίως	1.00E+00

5.5.3 Ποιοτική Κατάταξη Συνεπειών

Όπως και με την κατάταξη των πιθανοτήτων, πρέπει να καταγραφεί και η κατάταξη των συνεπειών, με χρήση της κρίσης εμπειρογνομόνων και προηγούμενης εμπειρίας. Οι κατηγορίες περιλαμβάνουν συνδυασμό διαφόρων συνεπειών και αντιπροσωπεύουν επιπτώσεις σε τρεις βασικούς τομείς: τους τραυματισμούς προσώπων, την ρύπανση και την παραγωγή. Σε κάθε επίπεδο κατάταξης, ανήκουν επιπτώσεις παρόμοιας σοβαρότητας. Για παράδειγμα ένας σοβαρός τραυματισμός, μια μέτρια ρύπανση και μια διήμερη διακοπή παραγωγής, μπορούν να θεωρηθούν ως εξίσου σοβαρές συνέπειες μιας αστοχίας. Για μια συγκεκριμένη αστοχία, η επίπτωση που βαθμολογείται με την υψηλότερη κατηγορία, χαρακτηρίζει την τελική κατηγορία σοβαρότητας της αστοχίας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ένα παράδειγμα της κατάταξης της σοβαρότητας των επιπτώσεων μιας αστοχίας.

Οι αριθμοί χρησιμοποιούνται για επεξηγηματικούς σκοπούς και δεν αποτελούν ακριβείς ποσοτικές κατευθυντήριες γραμμές.

Πίνακας 15 - Παράδειγμα Κατάταξης Συνεπειών

Συνέπειες σε:				
A/A	Πιθανότητα	Τραυματισμός	Μόλυνση	Παραγωγή
1	Πολύ μικρή	Κανένας ή επιφανειακοί τραυματισμοί	Καμία Επίπτωση	Καμία Επίπτωση
2	Μικρή	Ελαφρύς τραυματισμός, απουσία μερικών ημερών	Ήσσονος σημασίας συνέπειες	Σχετική μείωση
3	Μέση	Σοβαρός τραυματισμός, μακροπρόθεσμη απουσία	Μέτριες συνέπειες	Διακοπή έως 2 ημέρες
4	Υψηλή	Μοναδική απώλεια ή μόνιμη αναπηρία	Αξιοσημείωτες συνέπειες	Διακοπή έως 2 εβδομάδες
5	Πολύ υψηλή	Πολλαπλές απώλειες	Σοβαρές συνέπειες	Διακοπή έως 2 μήνες

5.5.4 Προσδιορισμός Αποδεκτού Ρίσκου Συστημάτων Δέσμευσης CO₂

Ο συνδυασμός των συνεπειών μιας αστοχίας και της πιθανότητας εμφάνισής της, δημιουργεί το ρίσκο ύπαρξης της αστοχίας. Τα επίπεδα ρίσκου, κυμαίνονται από πολύ μικρό έως πολύ μεγάλο και αναδεικνύουν την αποδοχή της πιθανότητας ύπαρξης αστοχίας. Στην ουσία το ρίσκο αποτελεί την ισορροπία μεταξύ των κινδύνων που υφίστανται και των πλεονεκτημάτων που κερδίζονται με την ύπαρξή του.

Πίνακας 16 - Παράδειγμα Πίνακα Κατάταξης Ρίσκου

Πιθανότητα	Συνέπειες				
	1 - Πολύ Μικρές	2 - Μικρές	3 - Μεσαίες	4 - Μεγάλες	5 - Πολύ Μεγάλες
5 - Πολύ Μεγάλη	Μικρό Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο	Μεγάλο Ρίσκο	Μεγάλο Ρίσκο	Μεγάλο Ρίσκο
4 - Μεγάλη	Μικρό Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο	Μεγάλο Ρίσκο	Μεγάλο Ρίσκο
3 - Μέση	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο	Μεγάλο Ρίσκο
2 - Μικρή	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο	Μεσαίο Ρίσκο
1 - Πολύ Μικρή	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο	Μικρό Ρίσκο

Οι συνέπειες των αστοχιών των συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: στις συνέπειες προσώπων (τραυματισμοί) και στις λειτουργικές συνέπειες (μόλυνση, προβλήματα παραγωγής). Οι συνέπειες του προσώπων, ορίζονται σύμφωνα με τα κριτήρια αποδοχής που έχουν θεσπιστεί και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, σε αντίστοιχους κλάδους και εγκαταστάσεις διεργασιών. Οι λειτουργικές συνέπειες σχετίζονται άμεσα με τις απαιτήσεις και τις επιδόσεις της τεχνολογίας. Για παράδειγμα, η μείωση της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, αποτελεί συνέπεια κάποιας αστοχίας, η οποία επηρεάζει το ποσοστό της δέσμευσης, το οποίο έχει προσδιοριστεί στη βάση της τεχνολογίας. Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται παραδείγματα με την πιθανότητα ύπαρξης λειτουργικών συνεπειών, για τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με χρήση αμιμών:

Πίνακας 17 - Παράδειγμα Πίνακα Λειτουργικών Συνεπειών

Πιθανότητα	Συνέπειες σε:			
	Εκπομπές	Ποσοστό Δέσμευσης	Κατανάλωση Ενέργειας	Παράγοντας Αξιοπιστίας
1 - Πολύ Μικρή	Καμία Επίπτωση	Καμία Επίπτωση	Καμία Επίπτωση	Καμία Επίπτωση
2 - Μικρή	Μικρή Αύξηση	Μικρή Μείωση	Μικρή Αύξηση	Μικρή Μείωση
3 - Μέση	Σημαντική Αύξηση	Σημαντική Μείωση	Σημαντική Αύξηση	Σημαντική Μείωση
4 - Μεγάλη	Μεγάλη Αύξηση	Μεγάλη Μείωση	Μεγάλη Αύξηση	Μεγάλη Μείωση
5 - Πολύ Μεγάλη	Σοβαρή Αύξηση	Σοβαρή Μείωση	Σοβαρή Αύξηση	Σοβαρή Μείωση

5.5.5 Μεθοδολογίες Εντοπισμού Αστοχιών και Κατάταξης Κινδύνων

Υφίστανται διάφορες τεχνικές αναγνώρισης κινδύνων και τρόπων αστοχιών μιας τεχνολογίας, που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της τεχνολογίας που εξετάζεται. Η λίστα με τα νέα στοιχεία που προσδιορίστηκαν στην τεχνική αξιολόγηση, αποτελούν δεδομένα για τη δημιουργία του μητρώου αστοχιών. Η δημιουργία του συγκεκριμένου μητρώου μπορεί να εκτελεσθεί με τις παρακάτω μεθοδολογίες, οι οποίες συνοδεύονται από τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και προκλήσεις - μειονεκτήματα:

Πίνακας 18 - Μεθοδολογίες Εντοπισμού Αστοχιών και Κατάταξης Κινδύνων

Μεθοδολογία	Πλεονεκτήματα	Προκλήσεις - Μειονεκτήματα
Failure mode, effect and criticality analysis (FMECA)	Εξαιρετικά συστηματική και εύκολη στην εφαρμογή.	Δεν εντοπίζονται πάντα οι συνδυασμοί αστοχιών.
Hazard and operability study (HAZOP)	Εξαιρετικά συστηματικό εργαλείο που επιτρέπει τον εντοπισμό των πιο αδιανόητων περιστατικών.	Κατανάλωση πόρων. Απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων. Απαιτείται έμπειρος διαμεσολαβητής.
Fault tree analysis (FTA)	Ενδελεχής διερεύνηση εντοπισμένων περιστατικών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομερειών. Μπορεί να αποτελέσει ισχυρό εργαλείο κατά την περιγραφή των αστοχιών και των αιτιών.	Μπορεί να μην εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό περιστατικών. Χρειάζεται πολύ χρόνο για να δημιουργηθεί. Δεν ενδείκνυται για την λεπτομερή μοντελοποίηση όλων των συστημάτων.
Structured what-if checklist (SWIFT)	Εφαρμόζεται ακόμη και αν δεν είναι διαθέσιμος ο λεπτομερής σχεδιασμός.	Απαιτείται έμπειρος διαμεσολαβητής και σωστοί επανέλεγχοι.
Operational problem analysis (OPERA)	Δίνεται έμφαση στις διεπαφές του προϊόντος.	Δίνεται έμφαση στα τεχνικά προβλήματα και τα ανθρώπινα λάθη, χωρίς ωστόσο να αναλύονται οι αιτίες γύρω από αυτά.

5.6 Ανάπτυξη Πλάνου Αξιολόγησης:

Με την ανάπτυξη ενός πλάνου αξιολόγησης, επιτυγχάνεται η αντιμετώπιση των αναγνωρισμένων κινδύνων αστοχίας και η διασφάλιση των περιθωρίων απόδοσης. Το πλάνο αποτελεί ένα σχέδιο τεχνολογικής αξιολόγησης, στο οποίο θα εκτελούνται συγκεκριμένες δραστηριότητες αξιολόγησης. Αυτές οι δραστηριότητες θα δημιουργήσουν τα αποδεικτικά στοιχεία για την ορθή αποφυγή ή αντιμετώπιση των αστοχιών, προκειμένου να διατηρούνται οι επιθυμητές επιδόσεις.

Η αξιολόγηση επιτυγχάνεται με την παροχή εγγράφων που αποδεικνύουν πως κάθε ειδική απαίτηση έχει εκπληρωθεί σύμφωνα με τα καθορισμένα κριτήρια αποδοχής. Ταυτόχρονα, προσδιορίζονται οι πιθανότητες αστοχίας και οι συνέπειες αυτών, στο επίπεδο αυστηρότητας που είναι συμβατό με την αντίστοιχη φάση ανάπτυξης του έργου. Για κάθε αστοχία, πρέπει να προσδιορίζεται εάν οι μηχανισμοί αντιμετώπισής τους, μπορούν να

προσομοιωθούν με αναγνωρισμένες ή γενικά αποδεκτές μεθόδους. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αναγνωρισμένες μέθοδοι, η ορθότητά τους θα πρέπει να αξιολογείται.

Για την αξιολόγηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω μεθοδολογίες:

- Αποφυγή αστοχιών με χρήση λειτουργικών διαδικασιών ή δικλείδων ασφαλείας.
- Παλαιότερη τεκμηριωμένη εμπειρία με παρόμοιο εξοπλισμό και συνθήκες εργασίας.
- Αναλυτικές μέθοδοι όπως εγχειρίδια, εμπειρικοί συσχετισμοί και μαθηματικοί τύποι.
- Αριθμητικές μέθοδοι, όπως μοντέλα προσομοίωσης διεργασιών, μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (*FEM*), *CFD* κ.α.
- Πειραματικές μέθοδοι όπως εργαστηριακές δοκιμές, μελέτες κλιμάκωσης με χρήση πιλοτικών εγκαταστάσεων κ.α.

Οι μέθοδοι που αναγράφονται παραπάνω, και ιδιαίτερα ο συνδυασμός τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να οριστούν οι πιθανότητες αστοχιών, οι αντίστοιχες συνέπειες και το περιθώριο επιδόσεων της τεχνολογίας.

Οι επιλεγμένες μέθοδοι αξιολόγησης, αναλύονται περαιτέρω και αναγράφονται στο πλάνο αξιολόγησης της τεχνολογίας (*Technology Qualification Plan - TQP*). Παράλληλα, δύναται να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση κόστους-οφέλους, προκειμένου να αξιολογηθεί ο εναπομένον βαθμός αβεβαιότητας κατόπιν της διενέργειας της τεχνολογικής αξιολόγησης.

Κατόπιν της ολοκλήρωσης των διαδικασιών αξιολόγησης, η τεχνολογία θα πρέπει να πληροί τις απαραίτητες προϋποθέσεις και τα κριτήρια αποδοχής που τέθηκαν στη βάση της αξιολόγησης.

5.7 Εκτέλεση Πλάνου Αξιολόγησης:

Η εκτέλεση του πλάνου αξιολόγησης της τεχνολογίας, αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο τμήμα της διαδικασίας αξιολόγησης και είναι το πιο χρονοβόρο. Συνεπώς είναι κρίσιμης σημασίας οι δραστηριότητες της αξιολόγησης να επιλέγονται και να οργανώνονται σωστά, προκειμένου να αντλούνται οι απαραίτητες πληροφορίες αστοχιών με βέλτιστο τρόπο και να αποφεύγεται η δαπάνη πόρων για δοκιμές και ελέγχους που δεν εξάγουν σωστά ή χρήσιμα αποτελέσματα.

Η εκτέλεση του πλάνου αξιολόγησης αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Διενέργεια των δραστηριοτήτων αξιολόγησης που προβλέπονται στο πλάνο αξιολόγησης.
- Συλλογή και τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων.
- Διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας των αποτελεσμάτων.
- Προσδιορισμός του περιθωρίου επιδόσεων, σε κάθε πιθανή αστοχία.

Η διενέργεια των δραστηριοτήτων αξιολόγησης, εξάγει τα αποτελέσματα που απαιτούνται για την πιστοποίηση της τεχνολογίας. Με τα αποτελέσματα αυτά, δύναται να προσδιοριστεί

το περιθώριο των επιδόσεων της τεχνολογίας, σε περιπτώσεις αστοχίας. Τα αποτελέσματα που εξάγονται, διαθέτουν επίπεδο ακρίβειας ανάλογο με την φάση ανάπτυξης της τεχνολογίας και η ποιότητά τους θα πρέπει επίσης να αξιολογείται.

Γενικότερα, κάποιο άτομο εκτός του έργου, θα πρέπει να είναι σε θέση να καταλαβαίνει ποιες περιπτώσεις αστοχίας έχουν εντοπιστεί και πώς έχουν αντιμετωπισθεί (δοκιμές, αναλύσεις, εμπειρία), τι στοιχεία έχουν χρησιμοποιηθεί (εκθέσεις δοκιμών και αναλύσεων) και πόσο ικανοποιητικές είναι (επαρκές περιθώριο επίδοσης). Ως αποτέλεσμα, στα μελλοντικά έργα θα μπορεί να εκτιμηθεί το πεδίο της αξιολόγησης και ο βαθμός επιτυχίας της εφαρμογής στις ειδικές απαιτήσεις του έργου.

5.8 Αξιολόγηση Επιδόσεων:

Η αξιολόγηση των επιδόσεων, χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί το γεγονός πως πληρούνται οι επιδόσεις, οι λειτουργικές απαιτήσεις και ο στόχος της αξιοπιστίας, που επιλέχθηκαν στη βάση της αξιολόγησης. Ως βήμα, διενεργείται για την ποσοτικοποίηση της συνολικής επίδοσης της τεχνολογίας και για να συγκριθεί με τα προκαθορισμένα περιθώρια επιδόσεων που αναφέρθηκαν στη βάση της αξιολόγησης. Εάν δεν επιτευχθεί η τελική έγκριση και αποδοχή της τεχνολογίας, διατυπώνονται συστάσεις για σχεδιαστικές βελτιώσεις ή περαιτέρω διαδικασίες αξιολόγησης.

Η αξιολόγηση των επιδόσεων εκτελείται στα παρακάτω βήματα:

- Επιβεβαίωση πως οι δραστηριότητες αξιολόγησης έχουν πραγματοποιηθεί και πως τα κριτήρια αποδοχής πληρούνται, σύμφωνα με τη βάση της τεχνολογίας. Ταυτόχρονα διενεργείται ανάλυση κενών, προκειμένου να επιβεβαιωθεί πως οι εντοπισμένες αστοχίες έχουν αντιμετωπιστεί επαρκώς.
- Αξιολόγηση του περιθωρίου επιδόσεων, για κάθε πιθανό τρόπο αστοχίας.

5.9 Βελτίωση Τεχνολογίας:

Τελευταίο βήμα της διαδικασίας αξιολόγησης, είναι η βελτίωση της τεχνολογίας, μέσω της εφαρμογής πιθανών βελτιώσεων που έχουν βρεθεί κατά τη διαδικασία αναγνώρισης και αντιμετώπισης αστοχιών, τη διαδικασία κατάταξης των κινδύνων και την αξιολόγηση των επιδόσεων. Όλες οι βελτιώσεις θα πρέπει να έχουν κάποιο όφελος στο κόστος ή την ασφάλεια της διεργασίας. Κατά την εκτέλεση των αλλαγών βελτίωσης, θα πρέπει να επιβεβαιώνεται πως οι αλλαγές θα:

- αφαιρούν την πιθανότητα εμφάνισης κάποιας αστοχίας.
- μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης ή τον αντίκτυπο των επιπτώσεων μιας αστοχίας σε κάποιο επιθυμητό βαθμό.
- μειώνουν το συνολικό κόστος, χωρίς να εισάγουν νέες πιθανές αστοχίες.

Οι βελτιώσεις απαιτούν την επικαιροποίηση όλων των προηγούμενων εκτελεσμένων βημάτων της αξιολόγησης. Η επικαιροποίηση αυτή, δύναται να κυμαίνεται από την

περιορισμένη επικαιροποίηση ορισμένων παραμέτρων ή δεδομένων έως την πλήρη αναμόρφωση όλων των εγγράφων. Για αυτόν τον λόγο, η ιχνηλασιμότητα της διαδικασίας αξιολόγησης και των εγγράφων της, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτέλεση βελτιώσεων και την εφαρμογή επικαιροποιήσεων και αντικατοπτρίζει τη συνολική διαδικασία της αξιολόγησης.

Συμπεράσματα

Κατόπιν όσων αναφέρθηκαν, συμπεραίνεται πως τα συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, μπορούν να παρέχουν μια βιώσιμη και καθοριστική λύση στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τις ναυτιλιακές δραστηριότητες, συμβάλλοντας κατά το μέγιστο στις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος μέσα από μια πληθώρα τεχνολογιών και μονάδων που εκτελούν τις διεργασίες δέσμευσης, αποτελεί ένα καίριας σημασίας τεχνικό ζήτημα, το οποίο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και συνοδεύεται από προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Τα πλοία, όντας κατασκευές περιορισμένου χώρου και με προκαθορισμένες λειτουργίες σε ένα αρκετά απαιτητικό περιβάλλον, δυσχεραίνουν την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας δέσμευσης. Κατόπιν της έρευνας που πραγματοποιήθηκε, η τεχνολογία δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση με χρήση συστημάτων μεμβρανών, φαίνεται να είναι από τις πιο πλεονεκτικές για εφαρμογή σε πλοία, καθώς τα συστήματα δέσμευσης μεμβρανών, είναι κατασκευασμένα σε συμπαγείς δομές – παλέτες (*skids*), με αποτέλεσμα ο ζητούμενος χώρος εγκατάστασης να μειώνεται δραστικά. Αν και ως τεχνολογία παρουσιάζουν χαμηλή περιεκτικότητα τελικού προϊόντος, της τάξεως του 50%, είναι εφικτό με την επιλογή κατάλληλων διατάξεων, η περιεκτικότητα να φτάσει το 90%. Ο ιδανικότερος τύπος μεμβράνης για εφαρμογές διαχωρισμού καυσαερίων, όπως εκείνες που εκτελούνται στα πλοία, είναι οι μεμβράνες μοριακού κόσκινου άνθρακα (*Carbon Molecular Sieve Membranes – CMSM*), που παρουσιάζουν υψηλή χημική και θερμική ευστάθεια, υψηλή απόδοση διαχωρισμού καθώς και χαμηλό κόστος αγοράς.

Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογίες κρυογονικής δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα είναι αρκετά υποσχόμενες για τοποθέτηση σε πλοία. Πιο συγκεκριμένα, ως διεργασίες εξάγουν ένα τελικό προϊόν με περιεκτικότητα που αγγίζει το 99%, χωρίς να γίνεται χρήση τοξικών χημικών ουσιών, που δεν χρήζει περαιτέρω επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ενεργειακό κόστος, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει χαμηλό κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης. Παράλληλα το μέγεθος των συγκεκριμένων συστημάτων είναι πρακτικό και κατάλληλο για τοποθέτηση σε πλοία. Ωστόσο, τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζουν ως τεχνολογίες είναι η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση που συνοδεύει τις αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού, καθώς και η ύπαρξη διαφόρων προσμίξεων στα καυσαέρια που δυσχεραίνει τις διεργασίες. Όμως, η ατελής έρευνα που πραγματοποιείται στον συγκεκριμένο τομέα, έχει οδηγήσει στη δημιουργία διατάξεων και τεχνολογιών που παρουσιάζουν χαμηλότερο ενεργειακό κόστος, ακόμη και από τις συμβατικές τεχνολογίες δέσμευσης.

Συνεπώς το καταλληλότερο σύστημα που προτείνεται για τοποθέτηση σε πλοία, είναι εκείνο που αποτελεί μια υβριδική μορφή μεταξύ των συμβατικών και των κρυογονικών τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα όπως η κρυογονική απορρόφηση, η κρυογονική προσρόφηση και οι κρυογονικές μεμβράνες.

Το εγχείρημα της αποθήκευσης του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα είναι εξίσου σημαντικό, καθώς αποτελεί τον αρωγό στην επίτευξη του στόχου της απανθρακοποίησης. Η αποθήκευση 1500 [Gtn] διοξειδίου του άνθρακα, είναι ικανή να μειώσει αισθητά τη παρουσία διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η αποθήκευση στον ωκεανό δεν αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή, καθώς αν και υφίσταται απεριόριστη χωρητικότητα, παρουσιάζει αρκετές επιβλαβείς επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αντίθετα, η γεωλογική αποθήκευση σε χερσαίους ή υπεράκτιους ταμιευτήρες, φαίνεται να είναι η ιδανικότερη επιλογή αποθήκευσης, καθώς πέρα από τη μεγάλη διαθέσιμη χωρητικότητα και τον υψηλό χρόνο κατακράτησης, το δεσμευμένο προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα και για την ενισχυμένη (δευτερογενή) εξόρυξη υδρογονανθράκων (*EOR/EGR*).

Η επιλογή του κατάλληλου τρόπου μεταφοράς του τελικού προϊόντος, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απόσταση που πρέπει να διανύσει το προϊόν έως το σημείο της αποθήκευσης. Ωστόσο, καθώς η δέσμευση πραγματοποιείται επί του πλοίου, η μεταφορά γίνεται από αυτό, μέχρι τα σημεία εκφόρτωσης, τα οποία δύναται να είναι υπεράκτιες πλατφόρμες ή χερσαίες μονάδες.

Η φάση του τελικού προϊόντος της δέσμευσης, είναι καίριας σημασίας για τη μεταφορά του. Στα πλοία, η τεχνολογία της υγροποίησης είναι επαρκώς ανεπτυγμένη και ήδη εδραιωμένη, από τις μεταφορές υγροποιημένου πετρελαίου και φυσικού αερίου (LPG - LNG). Συνεπώς η μεταφορά σε υγρή φάση είναι η καταλληλότερη επιλογή για τα πλοία, ενώ υφίστανται ήδη οι απαιτούμενες γνώσεις για τη δημιουργία και εφαρμογή ενός δικτύου μεταφοράς δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα.

Το εγχείρημα της δέσμευσης, αποθήκευσης και χρήσης διοξειδίου του άνθρακα, πέρα από σπουδαία περιβαλλοντολογικά οφέλη, συνοδεύεται και από αρκετά οικονομικά κίνητρα. Οι ετήσιες βιομηχανικές ανάγκες για χρήση διοξειδίου του άνθρακα, μεγαλώνουν εκθετικά, γεγονός που αυξάνει τη ζήτηση για πώληση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα στις διάφορες βιομηχανίες, δημιουργώντας και αναπτύσσοντας έτσι μια νέα αγορά με μεγάλο περιθώριο κέρδους. Ακόμη, η αγορά και εγκατάσταση ενός συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, στηρίζεται τόσο από κρατικές όσο και από ευρωπαϊκές επιχορηγήσεις, γεγονός που μειώνει το κόστος και το ρίσκο της επένδυσης για ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο έχει εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τα 25 χρόνια.

Γενικότερα, οι επιχειρηματικές ευκαιρίες και η ανάπτυξη προκύπτουν συχνά μέσω της εφαρμογής νέων τεχνολογιών. Η αξιολόγηση των τεχνολογιών και η διαχείριση των κινδύνων που ελλοχεύει η εφαρμογή τους, αυξάνει το επίπεδο εμπιστοσύνης και συνεπώς τη δυνατότητα κέρδους. Για πολύπλοκα συστήματα, όπως εκείνα της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, συνιστάται ο προσδιορισμός των κύριων προκλήσεων και αβεβαιοτήτων καθώς είναι αδύνατον να αναπτυχθεί ένα επαρκές πλάνο αξιολόγησης, αν δεν έχουν αναγνωριστεί και κατανοηθεί όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι που συνοδεύουν την εφαρμογή της τεχνολογίας. Γενικότερα, για την εκτέλεση της διαδικασίας αξιολόγησης, ένα άτομο εκτός του έργου, θα πρέπει να είναι σε θέση να καταλαβαίνει ποιες περιπτώσεις αστοχίας έχουν εντοπιστεί και πώς έχουν αντιμετωπισθεί, τι στοιχεία έχουν χρησιμοποιηθεί και σε πόσο ικανοποιητικό βαθμό. Ταυτόχρονα η ιχνηλασιμότητα της διαδικασίας αξιολόγησης και των

εγγράφων της, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία βελτιώσεων και την εφαρμογή επικαιροποιήσεων, ενώ αποτελεί τον καθρέπτη της συνολικής διαδικασίας αξιολόγησης. Ως αποτέλεσμα, σε μελλοντικά αντίστοιχα έργα θα μπορεί άμεσα να εκτιμηθεί το πεδίο της αξιολόγησης της τεχνολογίας και ο βαθμός επιτυχίας της εφαρμογής της, ενώ θα διευκολύνει και θα επισπεύσει τις διαδικασίες αξιολόγησης νέων τεχνολογιών, που θα σχετίζονται ή θα πηγάζουν από αυτήν.

Εν κατακλείδι, η υιοθέτηση των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, δεν αποτελεί μόνο ένα καίριο βήμα προς τη μείωση των ναυτιλιακών εκπομπών, αλλά ταυτόχρονα υπογραμμίζει τη παγκόσμια δέσμευση για ένα πιο υπεύθυνο και βιώσιμο μέλλον για τους ωκεανούς και το πλανήτη ως σύνολο.

Προτάσεις

Σε συνέχεια της εκτενούς ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, προτείνονται μερικοί τρόποι οι οποίοι θα επιταχύνουν την αγορά και εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία. Η επιτάχυνση αυτή, είναι ζωτικής σημασίας στην επίτευξη του απώτερου σκοπού της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα από ναυτιλιακές δραστηριότητες, προκειμένου να ενισχυθούν οι παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Αρχικά θα μπορούσαν να προταθούν προγράμματα επιδοτήσεων. Πιο αναλυτικά, οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς οργανισμοί, μπορούν να θεσπίσουν περισσότερα οικονομικά κίνητρα όπως επιδοτήσεις και επιχορηγήσεις, προκειμένου να ενθαρρύνουν τις πλοιοκτήτριες εταιρείες να επενδύσουν στα συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα. Τα οικονομικά κίνητρα, δύναται να περιλαμβάνουν φορολογικές απαλλαγές, δάνεια με χαμηλά επιτόκια και επιχορηγήσεις, που θα αποσκοπούν στην αγορά, εγκατάσταση και συντήρηση συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα.

Μια επιπρόσθετη αλλά πιο εξειδικευμένη πτυχή στην πρόταση των επιδοτήσεων, είναι η ανάπτυξη πράσινων επιλογών χρηματοδότησης και πράσινων επενδυτικών κεφαλαίων, προσαρμοσμένων στον ναυτιλιακό τομέα. Η χρήση αυτών, μπορεί να υποστηρίξει τις πλοιοκτήτριες εταιρείες στη μετάβαση των τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, προσφέροντας ανταγωνιστικούς όρους χρηματοδότησης και μειώνοντας την οικονομική επιβάρυνση των αρχικών επενδυτικών κεφαλαίων.

Παράλληλα, θα ήταν συνετή η χρηματοδότηση έρευνας και ανάπτυξης. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η διάθεση χρηματοδοτήσεων για την εκτέλεση ερευνών με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της οικονομικής προσιτότητας των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία. Μάλιστα, η συνεργασία μεταξύ ερευνητικών κέντρων, πανεπιστημίων και του ιδιωτικού τομέα, θα συμβάλει στην εύρεση νέων καινοτόμων τεχνολογιών και συστημάτων απανθρακοποίησης.

Ταυτόχρονα με την έρευνα, είναι προτείνεται η ανάπτυξη εκπαιδευτικών προγραμμάτων και πρωτοβουλιών κατάρτισης, για τους ναυπηγούς μηχανικούς αλλά και τα πληρώματα των πλοίων, ώστε να διασφαλιστεί πως είναι καλά γνωστικώς εφοδιασμένοι, για την σωστή κατασκευή, εγκατάσταση, χρήση και συντήρηση των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα. Η ανταλλαγή γνώσεων και η κατάρτιση, θα μειώσουν τα προβλήματα και τις προκλήσεις της υιοθέτησης τέτοιων συστημάτων, αυξάνοντας παράλληλα την ευαισθητοποίηση και την εμπιστοσύνη στις νέες αυτές τεχνολογίες.

Επιπρόσθετα, προτείνεται η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας μεταξύ των κυβερνήσεων, των βιομηχανικών φορέων, και των διαφόρων οργανισμών, για την καθιέρωση παγκόσμιων προτύπων και των βέλτιστων πρακτικών για τα συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία. Η συγκεκριμένη πρακτική,

θα εξορθολογήσει τη διαδικασία εφαρμογής των συστημάτων και θα εξασφαλίσει πως οι τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης είναι συμβατές τόσο σε διαφορετικές περιοχές, όσο και σε διαφορετικούς τύπους πλοίων.

Σε συνέχεια της διεθνούς συνεργασίας, προτείνεται η ενθάρρυνση των πλοιοκτητριών εταιρειών, των φορέων ναυτιλιακής εκμετάλλευσης, και των παρόχων τεχνολογίας, στη συμμετοχή σε συνεργατικά πιλοτικά έργα, τα οποία θα αναδείξουν την αναγκαιότητα και αποτελεσματικότητα των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα. Τα έργα αυτά, δύναται να παρουσιάσουν τις μειώσεις των εκπομπών στην πραγματική τους εφαρμογή, ενώ θα αποτελέσουν παραδείγματα για τους υπόλοιπους συνεργάτες του κλάδου.

Επιπρόσθετα, μια αρκετά βοηθητική επιλογή στην επιτάχυνση της υιοθέτησης και χρήσης τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, είναι η δημιουργία εκστρατειών ευαισθητοποίησης του κοινού για την ανάδειξη των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της χρήσης τέτοιων συστημάτων στη ναυτιλία. Οι εκστρατείες αυτές, μπορούν να απευθύνονται στους καταναλωτές, τους επενδυτές, καθώς και στο ευρύτερο κοινό, ενθαρρύνοντάς τους να υποστηρίξουν εταιρείες και πρωτοβουλίες που έχουν ως προτεραιότητα την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας μέσω της εφαρμογής και χρήσης της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία.

Ακόμη, η πρόταση που θα αποτελέσει τον σπουδαιότερο λόγο επιτάχυνσης της διαδικασίας εφαρμογής των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, είναι η εφαρμογή αυστηρότερων στόχων μείωσης εκπομπών και η θέσπιση κανονισμών για τη ναυτιλία. Πιο συγκεκριμένα, η υποχρεωτική εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, ιδίως στα νεότευκτα, θα επιταχύνει τη διαδικασία υιοθέτησης καθώς πλέον θα υφίσταται νομική απαίτηση για τους φορείς εκμετάλλευσης των πλοίων, να μειώσουν άμεσα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Καταλήγοντας, η εφαρμογή ενός συνδυασμού των παραπάνω προτάσεων, θα οδηγήσει τις κυβερνήσεις, τους διάφορους φορείς του κλάδου της ναυτιλίας και τους διεθνείς οργανισμούς, να επιταχύνουν τη διαδικασία εφαρμογής και χρήσης συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στα πλοία, συμβάλλοντας έτσι στις προσπάθειες για μια πιο υπεύθυνη και περιβαλλοντικά βιώσιμη ναυτιλία.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] F. M. G. Bozzano, «Efficient methanol synthesis: Perspectives, technologies and optimization strategies,» *Progress in Energy and Combustion Science*, τόμ. 56, αρ. 0360 - 1285, pp. 71-105, 2016.
- [2] M.-A. H. C. Stewart, «A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration—the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach,» *Energy Conversion and Management*, τόμ. 46, αρ. 3, pp. 403-420.
- [3] International Energy Agency, «CO2 emissions from fuel combustion high lights,» 2019.
- [4] D. J.-P. Rodrigue, «Transportation and the Environment,» *The Geography of Transport systems*, 2020.
- [5] IEA - International Energy Agency, «IEA,» Μάρτιος 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022.
- [6] K. F. Y. J. W. G. K. X. L. M. Zhu, «Impact of maritime emissions trading system on fleet deployment and mitigation of CO2 emission,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, τόμ. 62, αρ. 1361-9209, pp. 474-488, 2018.
- [7] E. Hauhia, «Bulk shipping in numbers and emissions,» Seaber, Espoo, 2021.
- [8] Y. A. A. S. C. H. A. J.F., «Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector,» *Journal of Cleaner Production*, τόμ. 320, αρ. 0959-6526, p. 128871, 2021.
- [9] J. B. L. S. I. P. Balcombe, «How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies,» *Energy Conversion and Management*, τόμ. 182, αρ. 0196-8904, pp. 72-88, 2019.
- [10] P. H. Hashim, «Optimization Model for Energy Planning with CO2 Emission Considerations,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, τόμ. 4, αρ. 44, pp. 879-890, 2005.
- [11] N. Z. W. W. Y. S. L. Li, «A review of research progress on CO2 capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences,» *Fuel*, τόμ. 108, αρ. 0016-2361, pp. 112-130, 2013.
- [12] M. M. P. R. W. R. Porter, «The range and level of impurities in CO2 streams from different carbon capture sources,» *International Journal of Greenhouse*

Gas Control, τόμ. 36, αρ. 1750-5836, pp. 161-174, 2015.

- [13] Z. W. C. Z. S. Z. Z. Q. P. L. J. W. S. W. J. Xu, «Parametric analysis and potential prediction of membrane processes for hydrogen production and pre-combustion CO₂ capture,» *Chemical Engineering Science*, τόμ. 40, αρ. 1750-5836, pp. 55-125, 2015.
- [14] T. W. R. S. M. P. S. G. M. W. G. S. D. M. K. M. J. R. R. Stanger, «Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 40, αρ. 1750-5836, pp. 55-125, 2015.
- [15] A. A. Olajire, «CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review,» *Energy*, τόμ. 35, αρ. 6, pp. 2610-2628, 2010.
- [16] M. S. M. R. a. R. S. M. Songolzadeh, «Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions,» *ScientificWorldJournal*, 2014.
- [17] Y. Y. Z. Q. a. Z. Z. X. Wu, «The Advances of Post-Combustion CO₂ Capture with Chemical Solvents: Review and Guidelines,» *Energy Procedia*, τόμ. 63, pp. 1339-1346, 2014.
- [18] C. H. a. C. T. C. Yu, «A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption,» *Aerosol and Air Quality Research*, τόμ. 12, αρ. 2012, pp. 745-769, 2012.
- [19] R. N. S. A. A. R. J. G. A. K. a. N. F. P. Fosbøl, «Process variables data from the lean vapour compressor campaign at Technology Centre Mongstad,» *Data in Brief*, τόμ. 26, 2019.
- [20] A. S. a. K. Stéphenne, «Shell Cansolv CO₂ capture technology: Achievement from First Commercial Plant,» *Energy Procedia*, τόμ. 63, pp. 1678-1685, 2014.
- [21] J. H. G. H. H. S. F. M. V. K. a. G. T. H. Kvamsdal, «Maintaining a neutral water balance in a 450 MWe NGCC-CCS power system with post-combustion carbon dioxide capture aimed at offshore operation,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 4, αρ. 4, pp. 613-622, 2010.
- [22] J. D. a. G. Rochelle, «Thermal degradation of monoethanolamine at stripper conditions,» *Energy Procedia*, τόμ. 1, αρ. 1, pp. 327-333, 2009.
- [23] L. F. T. d. C. O. H. A. K. M. E. H. K. V. G. W. S. P. T. C. B. F. M. S. G. L. a. E. G. N. Flø, «Degradation and Emission Results of Amine Plant Operations from MEA Testing at the CO₂ Technology Centre Mongsta,» *Energy Procedia*, τόμ. 114, pp. 1307-1324, 2017.

- [24] K. D. P. N. G. R. K. F. J. Y. E. C. P. S. a. J. D. A. Sexton, «Evaluation of Reclaimer Sludge Disposal from Post-combustion CO₂ Capture,» *Energy Procedia*, τόμ. 63, pp. 926-939, 2014.
- [25] National Carbon Capture Center, «The National Carbon Capture Center at the Power Systems Development Facility,» 2014.
- [26] «Wikipedia - Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_bis\(trifluoromethanesulfonyl\)imide](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_bis(trifluoromethanesulfonyl)imide). [Πρόσβαση 2023].
- [27] J. G. Y. W. J. H. a. P. C. Y. Ma, «Ionic liquid-based CO₂ capture in power plants for low carbon emissions,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 75, pp. 134-139, 2018.
- [28] S. K. T. B. a. P. M. S. Shukla, «Ionic Liquids: Potential Materials for Carbon Dioxide Capture and Utilization,» 2019.
- [29] G. K. M. K. G. G. a. C. H. M. Rabensteiner, «Investigation of carbon dioxide capture with aqueous piperazine on a post combustion pilot plant–Part I: Energetic review of the process,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 39, pp. 79-90, 2015.
- [30] Τ. Φουτράκης.
- [31] M. H. O. B. M. B. N. Q. A. P. T. L. a. M. A. R. Ben-mansour, «Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations – A review,» *Applied Energy*, τόμ. 161, pp. 225-255, 2016.
- [32] S. S. a. F. Maréchal, «Carbon Dioxide Capture From Internal Combustion Engine Exhaust Using Temperature Swing Adsorption,» *Frontiers in Energy Research*, 2019.
- [33] M. B. a. e. al., «Carbon capture and storage (CCS): the way forward,» *Energy & Environmental Science*, τόμ. 11, pp. 1062-1176, 2018.
- [34] H. K. T. S. a. T. C. S. Sjostrom, «Pilot test results of post-combustion CO₂ capture using solid sorbents,» *Energy Procedia*, τόμ. 4, pp. 1584-1592, 2011.
- [35] «Molecular sieve,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_sieve.
- [36] Jalon, «Jalon Zeolite,» [Ηλεκτρονικό]. Available:

<https://www.jalonzeolite.com/product-item/13x-molecular-sieve/>.

- [37] Interraglobal, «Interraglobal,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.interraglobal.com/products/molecular-sieve/molecular-sieve-13x/>.
- [38] C. G. a. A. Rodrigues, «Electric Swing Adsorption for CO₂ removal from flue gases,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 2, αρ. 2, pp. 194-202, 2008.
- [39] R. V. B. K. a. A. V. I. Sreedhar, «Process and engineering trends in membrane based carbon capture,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 68, pp. 659-684, 2017.
- [40] K. M. H. Z. A. A. G. S. a. E. R. R. Khalilpour, «Membrane-based carbon capture from flue gas: a review,» *Journal of Cleaner Production*, τόμ. 103, pp. 286-300, 2015.
- [41] H. L. X. W. a. R. B. T. Merkel, «Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for,» *Journal of Membrane Science*, τόμ. 359, pp. 126-139, 2010.
- [42] X. HE, «A review of material development in the field of carbon capture and the application of membrane-based processes in power plants and energy-intensive industries,» *Energy, Sustainability and Society*, τόμ. 8, 2018.
- [43] T. Merkel, «osti.gov,» Membrane Technology and Research, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1337555>.
- [44] H. K. B. P. V. M. K. Mondal, «Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review,» *Energy*, τόμ. 46, αρ. 1, pp. 431-441, 2012.
- [45] K. T. L. A. R. M. M. K. Lam, «Current status and challenges on microalgae-based carbon capture,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 10, αρ. 1750-5836, pp. 456-469, 2012.
- [46] I. I. o. Refrigeration, *International Dictionary of Refrigeration*, Leuven: Peeters Publishers, 2007.
- [47] R. A. P. N. D. Berstad, «Low-temperature CO₂ capture technologies – Applications and potential,» *International Journal of Refrigeration*, τόμ. 36, αρ. 5, pp. 1403-1416, 2013.
- [48] Y. L. Moullec, «Assessment of carbon capture thermodynamic limitation on coal-fired power plant efficiency,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Τόμ. %1 από %21750-5836, αρ. 7, pp. 192-201, 2012.

- [49] «Wikipedia - Packed Bed,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Packed_bed.
- [50] H. H. M. v. S. A. M. Tuinier, «Techno-economic evaluation of cryogenic CO₂ capture—A comparison with absorption and membrane technology,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 5, αρ. 6, pp. 1559-1565, 2011.
- [51] ΕΚΦΕ Χανίων, «ekfechanion.eu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ekfechanion.eu/files/chemistry_gymnasio/katastaseis_ylis.pdf.
- [52] M. v. S. A. J. K. M. Tuinier, «A novel process for cryogenic CO₂ capture using dynamically operated packed beds—An experimental and numerical study,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 5, αρ. 4, pp. 694-701, 2011.
- [53] .. S. B. L. B. A. B., «Cryogenic CO₂ Capture as a Cost-Effective CO₂ Capture Process,» *In : Proceedings of the international Pittsburgh coal conference*, 2009.
- [54] X. a. C. D. a. T. J. Pan, «CO₂ capture by antisublimation process and its technical economic analysis,» *Greenhouse Gases: Science and Technology*, τόμ. 3, αρ. 1, pp. 8-20, 2013.
- [55] Y. M. A. C. D., «Test Result of CO₂ capture by anti-sublimation capture efficiency and energy consumption for boiler plants,» *Preceedings of the seventh international conference on greenhouse gas control technologies*, 2004.
- [56] R. J. H. AS, «Cryogenic distillative seperation of acid gases from methane,» *S Patent 4,318,723*, 1982.
- [57] enggcyclopedia, «Joule Thomson or JT Valve,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://enggcyclopedia.com/2019/04/joule-thomson-or-jt-valve/>.
- [58] N. G. A. Hart, «Cryogenic CO₂ capture in natural gas,» *Energy Procedia*, τόμ. 1, αρ. 1, pp. 697-706, 2009.
- [59] Y. K. S.-H. L. K. O. C.-F. Song, «Design of a cryogenic CO₂ capture system based on Stirling coolers,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 7, αρ. 1750-5836, pp. 107-114, 2012.
- [60] P. J. M. A. J. I. B. W. E. S. H. W. W. T. J. N. C. Z. Craig J. Donlon, «Science Direct,» 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/stirling-cycle>.

- [61] «Wikipedia - Stirling Cycle,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_cycle.
- [62] G. L. A. C. S. M. C. F.-P. M. E. D. M. P. J. H. P. Willson, «Evaluation of the performance and economic viability of a novel low temperature carbon capture process,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 86, αρ. 1750-5836, pp. 1-9, 2019.
- [63] C. F.-P. P. W. D. Cann, «Experimental analysis of CO₂ frost front behaviour in moving packed beds for cryogenic CO₂ capture,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 107, αρ. 1750-5836, pp. 103-291, 2021.
- [64] L. a. H. C. a. S. K. a. B. S. a. B. A. Baxter, «Cryogenic Carbon Capture(CCC) status Report,» *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference*, 2021.
- [65] J. V. P. N. C. M. B. Kelley, «Controlled Freeze Zone™ for developing sour gas reserves,» *Energy Procedia*, τόμ. 4, αρ. 1876-6102, pp. 824-829, 2011.
- [66] N. S. J. R. D. W. P. ME, «CO₂ management at ExxonMobil's LaBarge field, Wyoming, USA,» *Energy Procedia*, τόμ. 4, αρ. 5455-5470, 2011.
- [67] S. Rackley, *Carbon Capture and Storage Second Edition*, Elsevier and Butterworth-Heinemann, 2017.
- [68] A. P. D. C. J. D. C. H. O. K. M. O. a. M. A. R. Doctor, «Transport of CO₂,» IPCC, 2005.
- [69] JAPEX, «JAPEX,» Japan Petroleum Exploration Co., Ltd., [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.japex.co.jp/en/technology/research/eor/>.
- [70] P. C. J. A. S. B. H. N. B. B. J. B. G. D. J. G. G. v. G. W. H. S. H. R. K. D. K. P. L. P. R. B. S. J. T. T. T. T. W. M. W. F. Z. a. D. Z. S. Benson, *Underground geological storage*, IPCC, 2005.
- [71] M. A. P. B. B. C. P. H. T. I. P. J. H. K. Q. L. T. O. H. P. C. S. Y. S. a. J. T. K. Caldeira, *Ocean storage*, IPCC, 2005.
- [72] J. A. R. A. K. L. F. M. E. R. J. S. K. Y. a. R. Z. M. Mazzotti, *Mineral carbonation and industrial uses of*, IPCC, 2005.
- [73] Statista, «Statista.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1065891/global-methanol-production-capacity>.

- [74] J. R. a. M. D. B. Wetenhall, «The Effect of CO₂ Purity on the Development of Pipeline Networks for Carbon Capture and Storage Schemes,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 30, pp. 197-211, 2014.
- [75] N. D. H. M. S. B. a. R. P. S. Martynov, «Impact of stream impurities on compressor power requirements for CO₂ pipeline transportation,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 54, αρ. 2, pp. 6708-6720, 2016.
- [76] I. F. H. S. D. M. a. R. A. T. Harkin, «Development of a CO₂ Specification for a CCS Hub Network,» *Energy Procedia*, τόμ. 114, αρ. 6708-6720, 2017.
- [77] S. O. a. P. Sandberg, «northernlightsccs,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://northernlightsccs.com/en/about>.
- [78] R. G. R. R. V. R. m. R. A. Raza, «Significant aspects of carbon capture and storage - A review,» *Petroleum*, τόμ. 5, αρ. 4, pp. 335-340, 2019.
- [79] Α. Κανάκης, «Είδη Πλωτών Κατασκευών και Κριτήρια Σχεδίασης Βάσει της Περιοχής Εγκατάστασης,» Αθήνα, 2021.
- [80] X. L. a. M. Wang, «Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation,» *Applied Energy*, τόμ. 195, pp. 402-413, 2017.
- [81] J. V. d. Akker, «CARBON CAPTURE ONBOARD LNG-FUELED VESSELS A FEASIBILITY STUDY,» *Delft University of Technology*, 2017.
- [82] R. S. N. E. a. F. J. J. Kjærstad, «Ship transport—A low cost and low risk CO₂ transport option in the Nordic countries,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, τόμ. 54, αρ. 1, pp. 168-184, 2016.
- [83] The International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), «ec.europa.eu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/iogp_-_report_-_ccs_ccu.pdf.
- [84] The International Maritime Organization, «UN agency pushes forward on shipping emissions reduction,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/11-MEPC-74-GHG.aspx>.
- [85] The International Maritime Organization, «Market-Based Measures,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Market-Based-Measures.aspx>.

- [86] The International Maritime Organization, «Energy Efficiency Measures,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>.
- [87] DNV-GL, «Recommended practice — DNV-RP-J201,» DNV-GL Publications, 2019 and 2021.