

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ

ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΣΠΟΥΔΩΝ ‘Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και

Τεχνολογία’

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνολογίες Μείωσης των Εκπομπών SOx από Πλοία και

Συντήρηση Ένυδρων Πλυντρίδων Ανοικτού Βρόχου

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΜΑΝΤΕΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΖΑΝΝΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ ‘Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία’.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- Κατσάνης Ιωάννης, τ. Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Ναυτικών Δοκίμων
- Παριώτης Ευθύμιος, Καθηγητής Σχολής Ναυτικών Δοκίμων
- Ζάννης Θεόδωρος (Επιβλέπων), Καθηγητής Σχολής Ναυτικών Δοκίμων

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.»

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση των μεθόδων μείωσης των εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x) στην ναυτιλία μέσω συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (Exhaust Gas Cleaning Systems-EGCS). Στην παρούσα εργασία αναλύονται οι διάφοροι τύποι συστημάτων πλυντρίδων καυσαερίων που χρησιμοποιούνται για την μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x) που εκπέμπονται από ναυτικούς κινητήρες με έμφαση στις πλυντρίδες ανοικτού βρόχου με θαλασσινό νερό. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα αλλά και οι τεχνικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που διέπουν την λειτουργία του κάθε συστήματος. Επιπλέον γίνεται μια αναφορά σύγκρισης και αξιολόγησης για κάθε σύστημα EGCS και ποιο εξυπηρετεί καλύτερα ανάλογα τον τύπο του πλοίου. Επίσης έχει γίνει και μια οικονομική αξιολόγηση για τα συστήματα EGCS αναφέροντας το κόστος επένδυσης(CAPEX) και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απόσβεση του συστήματος που ποικίλει φυσικά ανάλογα με τις εκάστοτε τιμές καυσίμων που επικρατούν στην ναυτιλία αλλά και πόσο συχνά χρησιμοποιείται το σύστημα από το εκάστοτε πλοίο. Επιπλέον εκτός από το θεωρητικό κομμάτι της έρευνας, η εργασία περιλαμβάνει και μια πρακτική προσέγγιση που απαιτείται για την συντήρηση των πλυντρίδων μείωσης οξειδίων του θείου (SO_x) ανοικτού βρόχου βασισμένα σε εμπειρικά δεδομένα και παρατηρήσεις από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας επί του πλοίου.

Λέξεις κλειδιά: οξείδια του θείου, πλυντρίδες καυσαερίων, καύσιμα, ναυτιλία, συντήρηση, κόστος επένδυσης

Abstract

The purpose of this thesis is to examine the methods of reducing sulfur oxide (Sox) emissions in shipping through exhaust gas cleaning systems but mainly with wet scrubbers. The various types of exhaust gas scrubber systems for reducing sulfur dioxide (Sox) emissions in marine combustion engines are analyzed with emphasis in open loop seawater scrubbers. The advantages, disadvantages and technical and environmental limitations governing the operation of each system are presented. In addition, a comparison and evaluation report is made for each EGCS system, and which one best fit each type of ship. An economic evaluation has also been made for the EGCS systems, indicating the investment cost (CAPEX) and the time required for the amortization of the system, which naturally varies depending on the prevailing fuel prices in shipping industry and how often the system is used by the ship. In addition to the theoretical part of the research, the work also includes a practical approach required for the maintenance of open-loop sulfur oxide (Sox) scrubbers based on practical data and observations from real operating conditions on board the ship.

Key words sulfur dioxide, open loop scrubbers, fuels, shipping industry, maintenance, investment cost

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.Εισαγωγή	9
2.Κανονισμοί IMO για Scrubbers.....	10
2.1 Κανονισμοί και όρια απόρριψης νερού στην θάλασσα	13
2.2 Διαχείριση υπολειμμάτων νερού πλύσης	15
3.Τύποι Συστημάτων επεξεργασίας και δέσμευσης SOx	15
3.1 Σύστημα Scrubber Ανοικτού Τύπου (Open Loop)	16
3.2 Μειονεκτήματα-περιορισμοί.	20
3.3 Πλεονεκτήματα scrubber (Open Loop)	21
4.Σύστημα Scrubber κλειστού τύπου(Closed Loop)	22
4.1 Μειονεκτήματα-περιορισμοί.	23
4.2 Βασικά πλεονεκτήματα Scrubber κλειστού τύπου(closed loop)	24
5.Υβριδικά συστήματα Scrubber	24
6.Ξηρά συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων και δέσμευσης SOx	25
7.Σύγκριση των υποψηφίων συστημάτων Scrubber	27
8.Οικονομική αξιολόγηση EGCS	28
8.2 Κόστος Συντήρησης ένυδρης πλυντρίδας ανοιχτού βρόχου.....	31
9.Διαδικασίες συντήρησης των open loop Scrubber(Kangrim)	32
10.Τελικά Συμπεράσματα	51
Βιβλιογραφία	52

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Διακύμανση αλκαλικότητας στην περιοχή της Βαλτικής θάλασσας. Όριο ασφαλούς λειτουργίας έχουν τεθεί τα 1000μmol/L για scrubber ανοιχτού τύπου. (WARTSILLA, 2014) ..	18
Εικόνα 2. Scrubber ανοιχτού τύπου(Open loop) (McClelland, 2025).....	19
Εικόνα 3. Βασική διάταξη συστήματος scrubber ανοιχτού τύπου (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)	21
Εικόνα 4. Βασική διάταξη scrubber κλειστού τύπου(closed loop) (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)	22
Εικόνα 5. Βασική διάταξη υβριδικού συστήματος scrubber (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)	25
Εικόνα 6. Διάταξη συστήματος ξηρής δέσμευσης SOx σε εγκατάσταση SCR.....	26
Εικόνα 7. Συγκριτικός πίνακας συστημάτων Scrubber (IPIECA, 2007).....	27
Εικόνα 8. Ενδεικτικές τιμές κατανάλωσης ισχύος για υβριδικά συστήματα, συστήματα θαλασσινού και γλυκού νερού. (Kjølholt J. et al, 2012).....	28
Εικόνα 9. Κόστος λειτουργίας τριών τύπων πλυντρίδων SOx. (Gregory D et al, 2010)	28
Εικόνα 10. Κόστος ανά τόνο μείωσης SO ₂ (Gregory D et al, 2010).....	29
Εικόνα 11. Δεδομένα πλοίου για αγορά και εγκατάσταση Scrubber. (Greek Shipowner, 2020)	30
Εικόνα 12. Διάγραμμα απόσβεσης κεφαλαίου εγκατάστασης συστήματος EGCS σε έτη συνάρτηση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου εντός περιοχών ECA. (wartsila, 2017)	31
Εικόνα 13. Όψη πύργου Scrubber(Kangrim).....	35
Εικόνα 14. Σχεδιάγραμμα συστήματος Scrubber	37
Εικόνα 15. Σχεδιάγραμμα συστήματος Scrubber	38
Εικόνα 16. Ηλεκτρονικό Σύστημα παρακολούθησης CO ₂ /SO ₂	39
Εικόνα 17. Φίλτρο καυσαερίων δείγματος ratio CO ₂ /SO ₂	39
Εικόνα 18. Πλυντρίδα καυσαερίων με διαρροή καυσαερίων.....	40
Εικόνα 19. Probe – filter συλλογής καυσαερίων	41
Εικόνα 20. Αντλία EGCS	42
Εικόνα 21. Monitoring data cabin.....	43
Εικόνα 22. Monitoring cabin	44
Εικόνα 23. Monitoring cabin	46
Εικόνα 24. Ηλεκτρονικό Σύστημα παρακολούθησης EGCS	47
Εικόνα 25. Monitor παρακολούθησης γεωγραφικού πλάτους και μήκους.	48
Εικόνα 26. Εσωτερικό πλυντρίδας καυσαερίων SOx.....	49
Εικόνα 27. Φθαρμένο ακροφύσιο σε Scrubber.....	49
Εικόνα 28. Κατάληξη νερού έτοιμο στο κάτω μέρος το συστήματος ψύξης των καυσαερίων ...	50
Εικόνα 29. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάβρωσης σωλήνα εξαγωγής καυσαερίων λόγω διοξειδίου του θείου.(SOx).....	50

Πίνακας Συντομογραφιών

CAPEX:	Capital Expenditures (Εξοδα επένδυσης)
CO ₂ :	Διοξείδιο του Άνθρακα
EGCS:	Συστήματα καθαρισμού καυσαερίων
H.F.O:	Heavy Fuel Oil (Βαρύ πετρέλαιο)
IMO:	International Maritime Organization
Nox:	Οξείδια του αζώτου
PAH:	Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
PH:	Οξύτητα
PM:	Αιωρούμενα Σωματίδια
SO ₂ :	Διοξείδιο του Θείου
SOx:	Οξείδια του θείου

1.Εισαγωγή

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν δημιουργηθεί από την παγκόσμια ναυτιλία και τις εκπομπές καυσαερίων από τους ναυτικούς κινητήρες έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε αυστηρούς περιορισμούς των εκπομπών μέσω διάφορων τεχνολογιών δέσμευσης καυσαερίων. Ως αποτέλεσμα, έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο φάσμα τεχνολογιών με στόχο τη μείωση επιβλαβών εκπομπών, όπως τα οξείδια του αζώτου (NOx), τα οξείδια του θείου (SOx) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Έτσι θα προσπαθήσουμε να δούμε τις τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών μέσω του συστήματος πλυντρίδας δέσμευσης καυσαερίων και των διαφόρων τύπων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παγκόσμια ναυτιλία (Καραγεώργος, 2022)

Σήμερα, η πλειονότητα των μεγάλων εμπορικών πλοίων χρησιμοποιεί χαμηλού κόστους βαρέως τύπου καύσιμο (Heavy Fuel Oil – HFO). Ωστόσο, λόγω της αυξανόμενης περιβαλλοντικής ανησυχίας —ιδίως σε σχέση με τις εκπομπές SOx και σωματιδίων— ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – IMO) έχει θεσπίσει ένα παγκόσμιο όριο στην περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων. Η εν λόγω ρύθμιση περιορίζει σημαντικά την ευελιξία των πλοιοκτητών στην προμήθεια ανταγωνιστικών καυσίμων υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, όπως το συμβατικό HFO. Με την εφαρμογή τεχνολογιών περιορισμού εκπομπών, όπως τα συστήματα πλύσης καυσαερίων (SOx scrubbers), οι πλοιοκτήτες μπορούν να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν χαμηλού κόστους HFO, διατηρώντας ταυτόχρονα τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς για τις εκπομπές θείου. Υπό κανονικές συνθήκες, το HFO περιέχει συγκεντρώσεις θείου σημαντικά υψηλότερες από τα ισχύοντα και μελλοντικά ρυθμιστικά όρια. (Ραγκόπουλος, 2013) Από περιβαλλοντικής άποψης, η πλέον βιώσιμη μέθοδος για τη συνέχιση της χρήσης του HFO φαίνεται να είναι η απομάκρυνση του θείου από τα καυσαέρια του κινητήρα, για παράδειγμα μέσω συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers) που χρησιμοποιούν θαλασσινό ή γλυκό νερό με την προσθήκη χημικών ουσιών. Αντιθέτως, η αποθείωση του HFO στα διωλιστήρια αποτελεί μια ιδιαίτερα ενεργειακή και οικονομικά απαιτητική διαδικασία. (Sethi, 2021)

2.Κανονισμοί IMO για Scrubbers

Το 2015 ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός(IMO) μέσω της Απόφασης **MEPC.259(68)**, (IMO, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.259\(68\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.259(68).pdf), 2015) καθόρισε τις τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις που απαιτούνται για τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (Exhaust Gas Cleaning Systems – EGCS), τα οποία χρησιμοποιούνται για την μείωση των εκπομπών του οξειδίου του θείου θέτοντας συγκεκριμένα όρια σύμφωνα με τον Κανονισμό 14 του Παραρτήματος VI της MARPOL. Στον κανονισμό αυτό αναφέρονται ρητά οι παρακάτω οδηγίες:

- τα κριτήρια ισοδυναμίας εκπομπών μέσω της αναλογίας SO₂/CO₂(Ratio)
- τα όρια ποιότητας και τις απαιτήσεις παρακολούθησης του νερού πλύσης που απορρίπτεται στην θάλασσα (pH, PAH, θολότητα, νιτρικά),
- τις απαιτήσεις συνεχούς καταγραφής δεδομένων και τήρησης αρχείων,

Για κάθε μία από τις παραπάνω οδηγίες υπάρχει εγκεκριμένο σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής επί του πλοίου το οποίο μπορεί να ζητηθεί ανά πάσα ώρα σε κάθε έλεγχο που μπορεί να διενεργηθεί επί του πλοίου από τις λιμενικές αρχές ή το εκάστοτε λιμένα που βρίσκεται το πλοίο. Το σύστημα αυτό, Onboard Monitoring Manual – OMM, εκτός από τις προηγούμενες οδηγίες περιλαμβάνει και μεταξύ άλλων τις εξής λειτουργίες:

- Στοιχεία αισθητήρων παρακολούθησης εκπομπών και νερού πλύσης
- Θέσεις μέτρησης καυσαερίων και νερού πλύσης
- Προδιαγραφές αναλυτών, απαιτήσεις λειτουργίας, συντήρησης και βαθμονόμησης
- Διαδικασίες ελέγχου μηδενικού σημείου και εύρους
- Διαδικασίες επιθεώρησης των συστημάτων παρακολούθησης

Επιπλέον, σύμφωνα με συγκεκριμένες οδηγίες του 2015 από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό(IMO) απαιτείται με την εγκατάσταση του συστήματος Scrubber και η εγκατάσταση συσκευών παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων, οι οποίες καταγράφουν συνεχώς και αυτόματα βασικές παραμέτρους του συστήματος σε συνάρτηση με την ώρα UTC και τη θέση του πλοίου (GNSS). Τα δεδομένα πρέπει να περιλαμβάνουν τα εξής:

- Πίεση και παροχή νερού πλύσης
- Πίεση και πτώση πίεσης καυσαερίων
- Φορτίο κινητήρα ή λέβητα
- Θερμοκρασία καυσαερίων πριν και μετά το Scrubber
- Συγκεντρώσεις SO₂ (ppm) και CO₂ (%)
- ΡΗ, θολότητα και θερμοκρασία νερού πλύσης
- καθώς και τις διαδικασίες έγκρισης και επιθεώρησης των συστημάτων EGCS μέσω των Σχεδίων Α και Β.

Οι συσκευές καταγραφής πρέπει να είναι ανθεκτικές και είναι μόνο για ανάγνωση και ικανές να αποθηκεύουν δεδομένα για τουλάχιστον 18 μήνες χωρίς δυνατότητα επεξεργασίας, τα οποία πρέπει να είναι διαθέσιμα στις Αρχές Σημαίας ή στις αρχές ελέγχου κράτους λιμένα (PSC) κατόπιν αιτήματος (MEPC, 2005) (IMO, International Maritime Organization (IMO). (2015). 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (Resolution MEPC.259(68)). London: IMO., 2015)

Τα δύο σχέδια σύμφωνα με την MARPOL ορίζονται ως εξής:

1. Σχέδιο Α: βασίζεται στην αρχική πιστοποίηση της απόδοσης εκπομπών του συστήματος Scrubber, σε συνδυασμό με συνεχή παρακολούθηση των παραμέτρων λειτουργίας και ημερήσιο έλεγχο των εκπομπών καυσαερίων.
2. Σχέδιο Β: βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των εκπομπών καυσαερίων, σε συνδυασμό με ημερήσιο έλεγχο των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος.

Και στα δύο σχέδια απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή της ποιότητας του απορριπτόμενου νερού πλύσης που χρησιμοποιείται στη διαδικασία καθαρισμού όπως αναλύονται στα παρακάτω κεφάλαια ανεξαρτήτως τύπου πλυντρίδας που χρησιμοποιείται στο πλοίο.

Στο Σχέδιο Α, οι πλυντρίδες επεξεργασίας καυσαερίων πρέπει να πιστοποιούνται ότι συμμορφώνονται με την οριακή τιμή εκπομπών που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής για συνεχή λειτουργία με καύσιμο της μέγιστης προβλεπόμενης περιεκτικότητας σε θείο. Οι κατευθυντήριες οδηγίες προβλέπουν μηχανισμούς μείωσης του αριθμού δοκιμών εκπομπών για σειριακά

κατασκευασμένες μονάδες παρόμοιου σχεδιασμού, μέσω συμφωνημένων διαδικασιών «συμμόρφωσης παραγωγής». (Association., 2012)

Εναλλακτικά, ο κατασκευαστής μπορεί να λάβει «έγκριση γκάμας προϊόντων» (product range approval) πραγματοποιώντας δοκιμές εκπομπών στις ανώτερες, ενδιάμεσες και κατώτερες βαθμίδες ισχύος. Η πιστοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν ή μετά την εγκατάσταση επί του πλοίου και ολοκληρώνεται με την έκδοση Πιστοποιητικού Συμμόρφωσης Εκπομπών SOx (SOx Emissions Compliance Certificate – SECC) για λογαριασμό της Αρχής-Σημείας. (Hufnagl, 2005)

Η βάση της έγκρισης, οι παράμετροι λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και οι διαδικασίες επιθεώρησης του συστήματος, πρέπει να περιγράφονται αναλυτικά στο Τεχνικό Εγχειρίδιο EGCS για το Σχέδιο Α (ETM-A), το οποίο υπόκειται σε έγκριση. Μετά την εγκατάσταση, το σύστημα επιθεωρείται ώστε να επιβεβαιωθεί ότι έχει εγκατασταθεί σύμφωνα με το ETM-A και ότι διαθέτει έγκυρο SECC. Κατόπιν, τροποποιείται και επανεκδίδεται το Πιστοποιητικό IAPP του πλοίου. (Register, 2012)

Η συνεχής συμμόρφωση επαληθεύεται μέσω συνεχούς παρακολούθησης των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος, ημερήσιων ελέγχων των εκπομπών καυσαερίων και συνεχούς παρακολούθησης της εκροής του νερού πλύσης. Οι πλοιοκτήτες υποχρεούνται να τηρούν Αρχείο Συστήματος, στο οποίο καταγράφονται όλες οι εργασίες συντήρησης και επισκευής και το οποίο πρέπει να είναι διαθέσιμο για επιθεώρηση. (Register, 2012)

Το Σχέδιο Β δεν απαιτεί προ-πιστοποίηση συμμόρφωσης με συγκεκριμένη οριακή τιμή εκπομπών, αλλά απαιτεί απόδειξη συμμόρφωσης με τις ισοδύναμες τιμές εκπομπών που αντιστοιχούν στα όρια περιεκτικότητας σε θείο καυσίμου σύμφωνα με τους Κανονισμούς 14.1 και 14.4 της MARPOL ANNEX VI. Έτσι στις 15 Μαΐου 2015 ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) εξέδωσε συγκεκριμένες οδηγίες σχετικά με τις τεχνικές προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (Exhaust Gas Cleaning Systems – EGCS), μέσω των Αποφάσεων MEPC.130(53), MEPC.170(57), MEPC.184(59) του 2009 και MEPC.259(68) (IMO, International Maritime Organization (IMO). (2015). 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (Resolution MEPC.259(68)). London: IMO., 2015). Οι οδηγίες αυτές παρέχουν πλαίσιο για την παρακολούθηση της αναλογίας SO₂/CO₂ στα καυσαέρια για διάφορες περιεκτικότητες θείου στο καύσιμο, με στόχο τη διασφάλιση ισοδυναμίας με τα προβλεπόμενα όρια εκπομπών

SOx που έχει εκδώσει η MARPOL. Η συμμόρφωση αυτή επαληθεύεται μέσω της συνεχούς μέτρησης της αναλογίας SO₂/CO₂. (IMO, International Maritime Organization (IMO). (2015). 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (Resolution MEPC.259(68)). London: IMO., 2015)

Η παρακολούθηση πραγματοποιείται με εγκεκριμένο σύστημα συνεχούς παρακολούθησης καυσαερίων, το οποίο καταγράφει δεδομένα με συχνότητα όχι μικρότερη από 0,0035 Hz. Όπως και στο Σχέδιο Α, απαιτείται εγκεκριμένο Τεχνικό Εγχειρίδιο ETM-B, στο οποίο καθορίζονται τα όρια και οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος. Το σύστημα υπόκειται σε επιθεώρηση μετά την εγκατάσταση και κατά τις ετήσιες, ενδιάμεσες και ανανεωτικές επιθεωρήσεις του Παραρτήματος VI, για την έκδοση ή ανανέωση του Πιστοποιητικού IAPP. (MEPC, 2005)

Αν και οι κατευθυντήριες γραμμές του IMO 2015 δεν έχουν κανονιστικό χαρακτήρα, εφαρμόζονται ευρέως από τις Αρχές Σημείας και τα κράτη λιμένα ως τεχνική βάση για την αποδοχή των συστημάτων Scrubber ως ισοδύναμων μέτρων συμμόρφωσης. (IMO, International Maritime Organization (IMO). (2015). 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (Resolution MEPC.259(68)). London: IMO., 2015)

2.1 Κανονισμοί και όρια απόρριψης νερού στην θάλασσα

Σύμφωνα με τον IMO(2015) οι πλυντρίδες καυσαερίων για την μείωση των εκπομπών του θείου (Sox) θα πρέπει να πληρούν κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές και να καταγράφουν τα δεδομένα του συστήματος για το νερό που απορρίπτεται στην θάλασσα αλλά και τις βασικές παραμέτρους παρακολούθησης του συστήματος. Οι βασικοί παράμετροι παρακολούθησης είναι οι εξής παρακάτω:

PH (Αλκαλικότητα)

Το PH του νερού πλύσης κατά την απόρριψή του στη θάλασσα δεν επιτρέπεται να είναι χαμηλότερο από 6,5. Κατά τη διάρκεια ελιγμών ή διέλευσης σε περιοχές περιορισμένων υδάτων, μπορεί να έχει και μια μικρή προσωρινή απόκλιση έως και 2 μονάδες PH. Η μέτρηση του PH πρέπει να πραγματοποιείται συνεχώς μέσω ηλεκτροδίου και μετρητή PH με ανάλυση τουλάχιστον 0,1 μονάδων PH και με ενσωματωμένη αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Ο εξοπλισμός μέτρησης πρέπει να συμμορφώνεται με τα σχετικά διεθνή πρότυπα που αναφέρονται στις κατευθυντήριες οδηγίες του IMO. (Eelco den Boer et al, 2015)

(PAH) Πολυκυκλικούς Αρωματικούς Υδρογονάνθρακες

Η απόρριψη του νερού πλύσης πρέπει να παρακολουθείται ως προς την περιεκτικότητα σε πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – PAH). Η μέγιστη επιτρεπόμενη συνεχής συγκέντρωση PAH δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 µg/LH μέτρηση της συγκέντρωσης PAH πρέπει να πραγματοποιείται με τον υπάρχον εξοπλισμό επεξεργασίας νερού πλύσης, χωρίς να υπάγεται σε οποιασδήποτε επεξεργασία αραίωσης η επεξεργασία με χημικά αντιδραστήρια, πριν από την τελική απόρριψη του νερού στην θάλασσα. Το εν λόγω όριο ισχύει για ρυθμούς ροής νερού πλύσης σε 45 t/MWh, όπου το MW αναφέρεται στη μέγιστη συνεχή ισχύ ή στο 80% της ονομαστικής ισχύος της μονάδας καύσης. (Eelco den Boer et al, 2015)

Θολότητα και Αιωρούμενα σωματίδια(PM)

Η θολότητα του νερού πλύσης των πλυντρίδων καυσαερίων για την μείωση του διοξειδίου των (Sox) δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 25 FNU (Formazin Nephelometric Units) ή 25 NTU (Nephelometric Turbidity Units) πάνω από τη θολότητα του νερού εισόδου. Η θολότητα πρέπει να μετράτε συνεχώς με εγκεκριμένο εξοπλισμό που συμμορφώνεται με τα πρότυπα των οδηγιών που έχει ορίσει ο διεθνής οργανισμός IMO. Η μέτρηση πραγματοποιείται με κατάλληλο εξοπλισμό που βρίσκεται πάνω στο σύστημα επεξεργασίας των καυσαερίων όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο συντήρησης αυτών των ηλεκτρονικών συστημάτων και πριν την έξοδο του νερού από σύστημα προς την θάλασσα. Το σύστημα επεξεργασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων, όπως τέφρα και βαρέα μέταλλα. (Eelco den Boer et al, 2015)

Νιτρικά (NO_3^-)

Δείγματα του απορριπτόμενου νερού πλύσης πρέπει να λαμβάνονται εντός τριών μηνών από κάθε ανανεωτική επιθεώρηση του συστήματος Scrubber και να αναλύονται ως προς τη συγκέντρωση νιτρικών. Το πιστοποιητικό ανάλυσης πρέπει να τηρείται στο Αρχείο του συστήματος Scrubber. Η ανάλυση πρέπει να επιβεβαιώνει ότι το σύστημα επεξεργασίας νερού πλύσης περιορίζει την απόρριψη νιτρικών σε επίπεδο που αντιστοιχεί είτε σε απομάκρυνση NO_x ίση με 12% των καυσαερίων είτε σε συγκέντρωση έως 60 mg/L είτε για ρυθμό απόρριψης νερού 45 t/MWh. (Eelco den Boer et al, 2015)

2.2 Διαχείριση υπολειμμάτων νερού πλύσης

Τα υπολείμματα που προκύπτουν από την επεξεργασία του νερού πλύσης των συστημάτων Scrubber πρέπει να συλλέγονται επί του πλοίου και να παραδίδονται σε κατάλληλες χερσαίες εγκαταστάσεις υποδοχής, τις οποίες τα κράτη μέλη υποχρεούνται να διαθέτουν σύμφωνα με τον Κανονισμό 17 του Παραρτήματος VI της MARPOL. Απαγορεύεται ρητά τόσο η απόρριψη των υπολειμμάτων αυτών στη θάλασσα όσο και η αποτέφρωσή τους επί του πλοίου.

Επιπλέον, οι κατευθυντήριες γραμμές του IMO απαιτούν η αποθήκευση και η παράδοση των υπολειμμάτων να καταγράφονται στο Αρχείο του συστήματος Scrubber, με αναφορά στην ημερομηνία, την ώρα και την τοποθεσία παράδοσης, ώστε να είναι διαθέσιμες για έλεγχο από τις αρμόδιες αρχές. (IMO, International Maritime Organization (IMO). (2015). 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (Resolution MEPC.259(68)). London: IMO., 2015)

3. Τύποι Συστημάτων επεξεργασίας και δέσμευσης SO_x

Οι ναυτικοί κινητήρες παράγουν μεγάλες ποσότητες σωματιδίων θείου (SO_x), σωματιδίων (PM) και οξειδίων του θείου (NO_x) τα οποία επηρεάζουν το περιβάλλον και την δημόσια υγεία και για αυτό το λόγο προσπαθούμε με κάθε μέσο να μειώσουμε τις ποσότητες αυτών μέσω διάφορων συστημάτων όπως είναι τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, πλυντρίδες ή αλλιώς τα συστήματα EGCS (Exhaust Gas Cleaning System). Οι βασικοί τύποι συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τα υγρά συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων.

- τα ξηρά συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων. (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2013). Exhaust Gas Scrubber Systems: Status and Guidance. Houston, TX: ABS., 2013)

Τα υγρά συστήματα τώρα χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- Στα συστήματα υγρής πλύσης πλυντρίδων ανοιχτού βρόχου(open loop) τα οποία χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό σαν μέσο πλύσης των καυσαερίων ώστε με διάφορες χημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μεταξύ καυσαερίων και θαλασσινού νερού, οι οποίες αναλύονται παρακάτω, ώστε να μειώσουν τα οξειδία του θείου(Sox) και τα αιωρούμενα σωματίδια PM.
- Στα συστήματα υγρής πλύσης πλυντρίδων καυσαερίων (Closed loop) τα οποία χρησιμοποιούν το γλυκό νερό σαν μέσο πλύσης συνδυασμένο με καυστική σόδα (NaOH) ώστε να καταφέρουν να μειώσουν τα σωματίδια Sox και PM τα οποία εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.
- Και τέλος υπάρχουν και τα υβριδικά συστήματα που σχεδιάστηκαν ώστε να δουλεύουν και με τους δύο τρόπους, είτε με θαλασσινό νερό είτε με γλυκό νερό τα οποία όμως δεν είναι τόσο γνωστά διαδεδομένα.

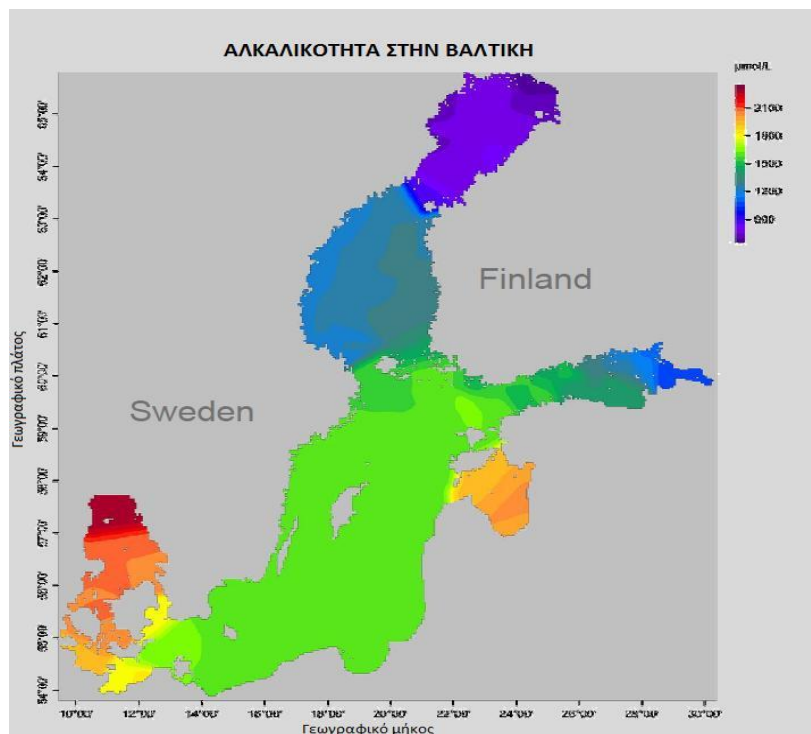
Τα συστήματα Scrubber τα οποία καταφέρνουν να μειώσουν τις εκπομπές των Sox και σωματιδίων PM κατάφεραν και τα συνδύασαν και με άλλα συστήματα μείωσης εκπομπών καυσαερίων σε ναυτικούς κινητήρες, με τα συστήματα EGR τα οποία στοχεύουν πιο πολύ στα οξειδία του αζώτου επειδή χρόνο με τον χρόνο τα όρια και οι προδιαγραφές για τις εκπομπές των ρύπων στενεύουν επειδή οι κανονισμοί για την ναυτιλία στοχεύουν στην πράσινη ναυτιλία και στις μηδενικές εκπομπές ρύπων. Τα συστήματα αυτά επανακυκλοφορούν τα καυσαέρια στον θάλαμο καύσης ώστε να καταφέρνουν να μειώνουν τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου(Nox) ενώ ταυτόχρονα με την πλύση των καυσαερίων μέσω του συστήματος EGCS στοχεύουν να μειώσουν περαιτέρω τα οξειδία του θείου(Sox).

3.1 Σύστημα Scrubber Ανοικτού Τύπου (Open Loop)

Ένα από τα βασικά και πιο απλά συστήματα δέσμευσης οξειδίων του θείου (SOx) είναι το σύστημα δέσμευσης καυσαερίων ανοικτού τύπου, το οποίο χρησιμοποιεί αλμυρό θαλασσινό νερό από το περιβάλλον του πλοίου ως μέσο πλύσης. Σε αυτή την περίπτωση, το νερό δεν

επανακυκλοφορεί εντός του συστήματος, αλλά αντλείται απευθείας από τη θάλασσα μέσω αντλιών περνώντας μέσα από το σύστημα πλύσης καυσαερίων Scrubber και επιστρέφει στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η φυσική αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού είναι συνήθως επαρκής για την αποτελεσματική απομάκρυνση των SOx αφού η αλκαλικότητα και η αλμυρότητα του θαλασσινού νερού ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και το βάθος συλλογής που βρίσκεται το πλοίο. Έρευνες έχουν δείξει πως τα ωκεάνια νερά παρουσιάζουν περίπου ± 5 ppm διαφορά σε σχέση με το κοινό θαλασσινό νερό, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ποσότητα νερού που απαιτείται για την αποτελεσματική απορρόφηση των οξειδίων του θείου ώστε να μην χρειάζεται επιπλέον πρόσθετα χημικά για την ενίσχυσή του νερού και την μείωση των οξειδίων του θείου(Sox), σε αντίθεση με τα συστήματα κλειστού τύπου όπου είναι απαραίτητη η προσθήκη ουσιών όπως η καυστική σόδα(NaOH). (Hufnagl, 2005)

Η διαχείριση των αποβλήτων, όπως των βαρέων καταλοίπων και του ακάθαρτου νερού, παραμένει μια πρόκληση για τους καθαριστές SOx, καθώς η ανεπαρκής επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Για αυτόν τον λόγο βλέπουμε ότι σιγά σιγά πολλές χώρες απαγορεύουν την χρήση του συστήματος κοντά στα παράλια του ή στα λιμάνια αναγκάζοντας τα πλοία να χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλά σε θείο ώστε να μπορούν να βρίσκονται πάντα μέσα στα όρια των εκπομπών που έχει ορίσει η MARPOL. Γι' αυτό και η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου λόγω της αντίθλιψης(backpressure) στους κινητήρες, λόγω μειωμένης ταχύτητας καυσαερίων, απαιτεί συνολική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών οφελών και η επιλογή του συστήματος πρέπει να βασίζεται σε ανάλυση του κύκλου ζωής και στις τοπικές κανονιστικές απαιτήσεις, εξασφαλίζοντας ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας και προστασίας του περιβάλλοντος. (Hufnagl, 2005)



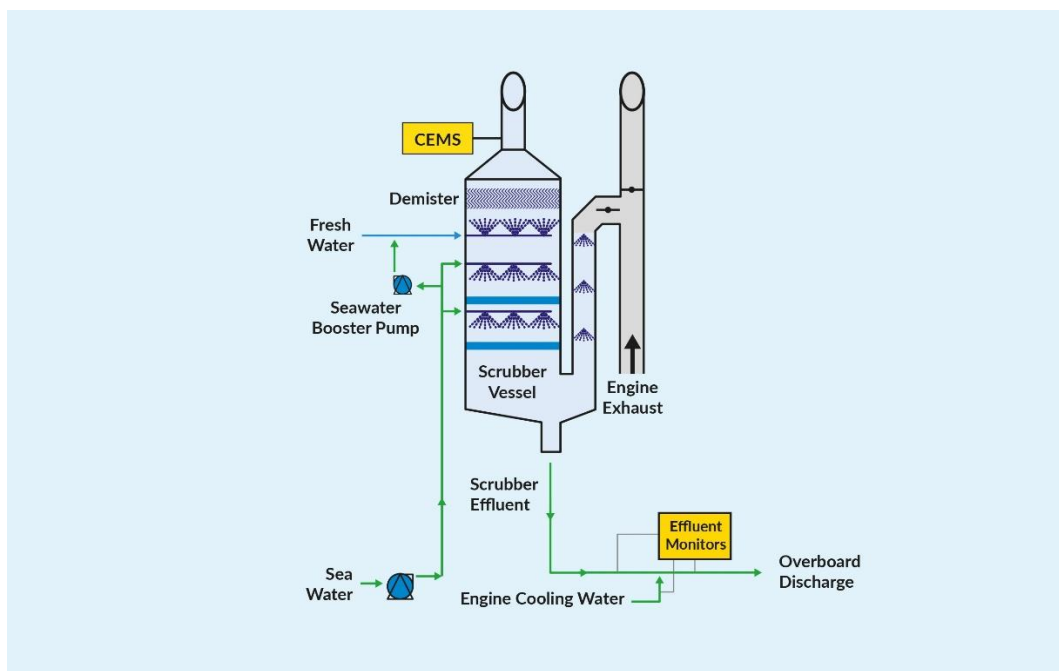
Εικόνα 1. Διακύμανση αλκαλικότητας στην περιοχή της Βαλτικής θάλασσας. Όριο ασφαλούς λειτουργίας έχουν τεθεί τα 1000 $\mu\text{mol/L}$ για scrubber ανοιχτού τύπου. (WARTSILLA, 2014)

Το σύστημα scrubber αποτελείται από τα εξής εξαρτήματα:

- Το δοχείο του Scrubber(πύργος) ο οποίος είναι συνήθως κυλινδρικός και κυμαίνεται από 1 έως 3 μέτρα ανάλογα το μέγεθος και τις ανάγκες του εκάστοτε πλοίου μέσα στο οποίο αναμειγνύονται τα καυσαέρια με το θαλασσινό νερό. Είναι τοποθετημένος συνήθως εντός ή παραπλεύρως της τσιμινιέρας του πλοίου ανάλογα τους διαθέσιμους χώρους του πλοίου.
- Ένα σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης (monitoring) όλων των παραπάνω συστημάτων.

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος scrubber είναι πολύ απλή. Μέσα στον κύλινδρο που εισέρχονται τα καυσαέρια αναμειγνύονται με θαλασσινό νερό απευθείας από το δίκτυο θάλασσας του πλοίου που αντλείται από τις αντλίες του συστήματος. Τα καυσαέρια εισέρχονται στον θάλαμο του Scrubber αναμειγνύονται και λόγω της αλκαλικότητας του νερού που βρίσκεται ήδη μέσα στον πύργο καθαρίζει τα καυσαέρια από τα οξείδια του θείου(Sox) και στην συνέχεια μέσω του οχετού εξαγωγής απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα με την βοήθεια ενός ανεμιστήρα που διευκολύνει τη ροή των καυσαερίων. Το διοξείδιο του θείου από τα καυσαέρια μετατρέπεται σε

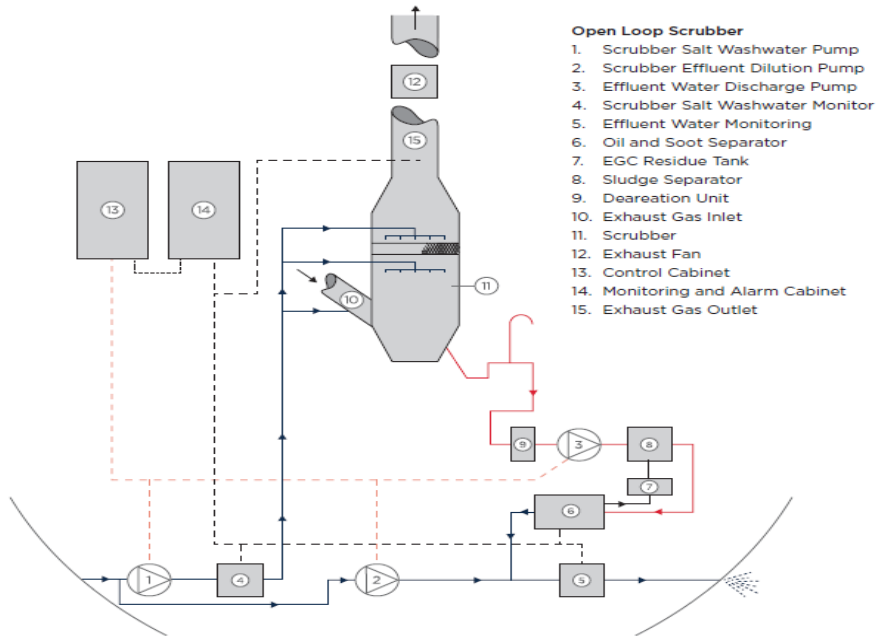
θεικό άλας αυξάνοντας την οξύτητα του νερού με συνέπεια θειικά άλατα να σχηματίζονται μετά την περαιτέρω ανάμειξη των καυσαερίων. Έτσι τα στέρεα συστατικά από τα καυσαέρια απομακρύνονται και το νερό διοχετεύεται και πάλι στην θάλασσα. Επίσης, η υψηλή θερμοκρασία του θαλασσινού νερού (32 °C) μπορεί να μειώσει τη διαλυτότητα του διοξειδίου του θείου (SO₂) στο υδατικό μέσο, καθώς και την αποτελεσματικότητα της φυσικής αλκαλικότητας του νερού στην εξουδετέρωση των όξινων προϊόντων της αποθείωσης. Παράλληλα, η μέτρια προς χαμηλή αλκαλικότητα (2.200 μmol/L) περιορίζει τη διαθέσιμη ρυθμιστική ικανότητα (buffer capacity) του θαλασσινού νερού, αυξάνοντας τον κίνδυνο πτώσης του pH του απορριπτόμενου νερού κάτω από το επιτρεπόμενο όριο των 6,5. Η υψηλή σχετική υγρασία (80%) αυξάνει την υγρασία των καυσαερίων εισόδου στο scrubber, γεγονός που ενισχύει τον σχηματισμό όξινων συμπυκνωμάτων και επιβάλλει αυξημένες απαιτήσεις σε υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση, καθώς και σε αποτελεσματικό σύστημα απομάκρυνσης σταγονιδίων (demister). (Kjølholt J. et al, 2012)



Εικόνα 2. Scrubber ανοιχτού τύπου(Open loop) (McClelland, 2025)

3.2 Μειονεκτήματα-περιορισμοί.

1. Πέρα από την βασική και απλή λειτουργία τους υπάρχουν και κάποια πράγματα που πρέπει να προσέξουμε στην λειτουργία τους ώστε να μην έχουμε προβλήματα. Κατά την ανάμειξη του νερού απόπλυσης με τα καυσαέρια δημιουργείται μια πίεση αντίθλιψης (backpressure) η οποία θέλει ιδιαίτερη προσοχή επειδή μια λάθος επιλογή scrubber μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στον κινητήρα λόγω αδυναμίας εξόδου των καυσαερίων.
2. Για να μειωθούν τα σωματίδια(Sox) στα επιθυμητά επίπεδα θα πρέπει το scrubber να καλύπτει την μίξη νερού-καυσαερίων ώστε να μπορέσουν οι τιμές των Sox στα επιτρεπόμενα όρια. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει σωστή επιλογή γιατί ένα μικρότερο scrubber θα δημιουργούσε προβλήματα στην μηχανή αλλά και ένα μεγαλύτερο θα καταλάμβανε περισσότερο χώρο άρα και μεγαλύτερο το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. (Reynolds, 2011)
3. Οι κατασκευαστές αναφέρουν ότι η απόδοση του μηχανήματος είναι σταθερή όλο το χρόνο αφού στην πραγματικότητα γίνονται οι χημικές αντιδράσεις μέσω του νερού που διοχετεύουμε.
4. Απαιτείται πολύ μεγάλο όγκος νερού για να πετύχουμε την ψύξη πράγμα το οποίο μας οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας για την τροφοδοσία του νερού.
5. Το scrubber μπορούμε να το τοποθετήσουμε είτε σε παλιά είτε σε καινούρια πλοία κάνοντας μετασκευή και μελέτη επί του πλοίου.
6. Τα scrubber συστήματα σύμφωνα με τους κατασκευαστές θα πρέπει να δουλεύουν ανεξάρτητα από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Δηλαδή είτε αυτό είναι 3,5% για τα βαριά πετρέλαια HFO είτε λιγότερο θα πρέπει να είναι ικανά όταν δουλεύουν σε περιοχές ECA να εκπέμπουν ρύπους που να αντιστοιχούν σε καύσιμο περιεκτικότητας 0,1% σε θείο. (Register, 2012) Οι συνθήκες αυτές επιβάλλουν αυξημένες απαιτήσεις παρακολούθησης pH, PAH και θολότητας του νερού πλύσης.
7. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η χαμηλή αλκαλικότητα θαλασσινού νερού επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση open-loop scrubbers.



Εικόνα 3. Βασική διάταξη συστήματος scrubber ανοιχτού τύπου (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)

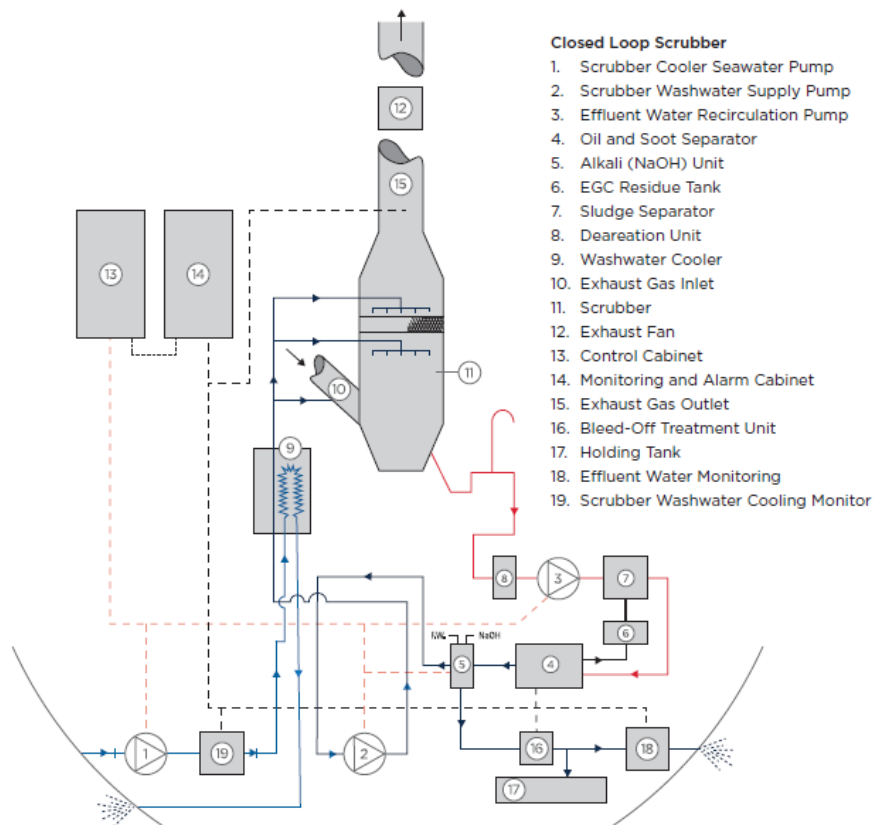
3.3 Πλεονεκτήματα scrubber (Open Loop)

- Αφθονία χρήσης θαλασσινού νερού ειδικά σε ανοιχτούς ωκεανούς
- Δεν απαιτούνται ειδικές κατασκευές δεξαμενών και χημικά πρόσθετα όπως στο closed loop scrubber τα οποία αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα τους.
- Μείωση έως 70-80% σε ποσοστό τα αιωρούμενα σωματίδια(PM)
- Υψηλή απόδοση στην μείωση των ρύπων(98%) με σχετικά χαμηλό κόστος και γρήγορο χρόνο απόσβεσης. Το ποσοστό αυτό προκύπτει από το είδος λειτουργίας του Scrubber μέσω της χημικής διεργασίας με την ανάμειξη των καυσαερίων με το νερό πλύσης.

$$\eta_{SOx} = \left(1 - \frac{0,1}{3,5}\right) \times 100 \approx 97,1\%$$

4.Σύστημα Scrubber κλειστού τύπου(Closed Loop)

Σε ένα τέτοιο σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων η κύρια διαφορά με του ανοιχτού τύπου είναι ότι εδώ χρησιμοποιούμε γλυκό νερό σε συνδυασμό με χημικά πρόσθετα και συγκεκριμένα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) ή καυστική σόδα αντί για το θαλασσινό νερό. Το σύστημα μας περιλαμβάνει ένα υποσύστημα μεταχείρισης και επεξεργασίας του νερού που απορρίπτεται στην θάλασσα και ένα άλλο σύστημα που επεξεργάζονται και αποθηκεύονται τα απόβλητα που προκύπτουν από την ανάμειξη των καυσαερίων με το γλυκό νερό. Έτσι σ' αυτό το σύστημα το νερό επανακυκλοφορεί μέσα στο σύστημα στο οποίο έχει γίνει πρόσμιξη με χημικά πρόσθετα για να μπορέσουμε να επιτύχουμε την μείωση και την κατακράτηση των εκπομπών των διοξειδίων του θείου που προκύπτουν από τα καυσαέρια



Εικόνα 4. Βασική διάταξη scrubber κλειστού τύπου(closed loop) (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)

Στην ουσία, το νερό απόπλυσης των καυσαερίων αφού εξέλθει από το scrubber δεν πηγαίνει απευθείας στην θάλασσα αλλά σ ένα διαχωριστή λάσπης ώστε να κρατήσει όλα τα κατάλοιπα του

μίγματος (αιωρούμενα σωματίδια, στάχτη, κλπ.) και τα οποία μένουν στην δεξαμενή αποβλήτων του συστήματος. Το υπόλοιπο μίγμα αφού καθαριστεί από τα λιπαντικά έλαια εκβάλλει στην δεξαμενή επεξεργασίας του μίγματος, το βρώμικο νερό που έχει απομείνει ξανά καθαρίζεται μέσα σε μια μονάδα επεξεργασίας σε έναν διαχωριστή και μέσω αυτού αφού καθαριστεί και υποστεί τις κατάλληλες επεξεργασίες αποθηκεύεται σε κατάλληλη δεξαμενή ή εκκενώνεται στην θάλασσα αφού πρώτα ελεγχθεί το PH,PAH, η θολότητα από τα συστήματα παρακολούθησης. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό μπορούμε να καταλάβουμε ότι σ αυτήν την διαδικασία εξουδετέρωσης του θείου (Sox) απαιτείται η συμπλήρωσή γλυκού νερού αλλά και χημικού μείγματος στο ήδη υπάρχον κλειστό κύκλωμα ώστε να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία του.

4.1 Μειονεκτήματα-περιορισμοί.

- Το συγκεκριμένο σύστημα λόγω της κατασκευής του επειδή αυξομειώνεται η παροχή του χημικού μίγματος (καυστική σόδα) η απαιτούμενη ισχύς της επανακυκλοφορίας μειώνεται στα μισά σε σχέση με του ανοιχτού τύπου σε $20\text{m}^3/\text{MWh}$.
- Σε περίπτωση που δεν γίνεται πλήρως η απομάστευση του νερού από την δεξαμενή επεξεργασίας αυτό θα δημιουργήσει θειικό νάτριο σε υψηλά επίπεδα το οποίο οδηγεί σε σχηματισμό κρυστάλλων και σε σταδιακή φθορά του συστήματος του EGCS και γι' αυτό οι κατασκευαστές προτείνουν $0,1\text{m}^3/\text{MWh}$ ροή νερού.
- Το EGCS κλειστού τύπου μπορεί να λειτουργήσει χωρίς καθόλου εκκένωση όταν έχει περιορισμούς όπως λιμάνια ή ποτάμια αποθηκεύοντας όλο το απομαστευμένο νερό στην δεξαμενή του (Holding Tank).
- Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η επιλογή των υλικών κατασκευής των σωληνώσεων και εξαρτημάτων γιατί το διοξείδιο του νατρίου είναι διαβρωτικό με αλουμίνιο, ορείχαλκο, μπρούτζο κλπ. ενώ μετά τους $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ παρουσιάζει αστοχία λόγω διάβρωσης.
- Η αποθήκευση της καυστικής σόδας πρέπει να είναι μεταξύ 20 με $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ γιατί σε μικρότερες θερμοκρασίες αλλάζει η σύνθεσή του και είναι δύσκολη η μεταφορά μέσω των αντλιών.
- η συμπλήρωση καθαρού νερού στην ήδη υπάρχουσα δεξαμενή επεξεργασίας οφείλεται, εκτός από το ποσοστό που απομακρύνεται και τελικά αποθηκεύεται ή απορρίπτεται στη θάλασσα, και στο ποσοστό του νερού που εξατμίζεται κατά τη διαδικασία ανάμειξής του με τα καυσαέρια. Ο ρυθμός εξατμίσεως του νερού εξαρτάται από τις θερμοκρασίες των δύο

ροών, δηλαδή του νερού απόπλυσης και των καυσαερίων, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζονται από τη θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού που αντλείται και χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο για την ψύξη του νερού απόπλυσης, καθώς και από το φορτίο του κινητήρα, αντίστοιχα. Ένα ποσοστό των υδρατμών που περιέχονται στα εξερχόμενα από τον Scrubber καυσαέρια είναι δυνατόν να εγκλωβιστεί με τη βοήθεια ενός συλλέκτη υγρασίας και να επιστραφεί στο σύστημα. Επιπροσθέτως, ο συλλέκτης αυτός συμβάλλει στη μείωση του θορύβου που προέρχεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις να μην απαιτείται η χρήση σιγαστήρα.

- Τα απόβλητα που δημιουργούνται στην δεξαμενή λάσπης περιέχουν συνήθως σωματίδια (PM), στάχτη βαρέα μέταλλα κ.α (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)

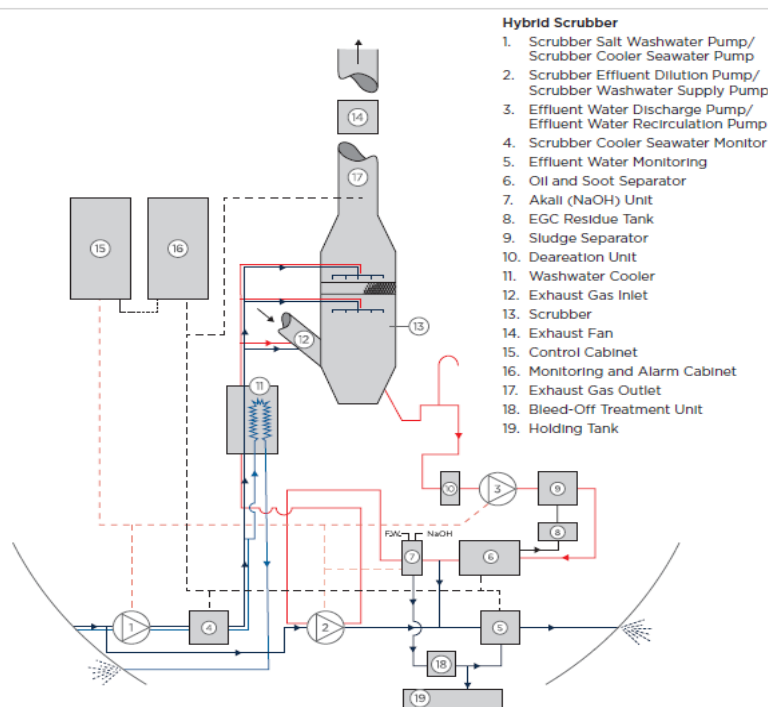
4.2 Βασικά πλεονεκτήματα Scrubber κλειστού τύπου (closed loop)

- Τα συστήματα κλειστού τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα περιβάλλοντα ασχέτως της αλμυρότητας ή της αλκαλικότητας του νερού όταν η χρήση του ανοιχτού τύπου θα απαγορευόταν.
- Χρειάζεται χαμηλότερη ισχύ επανακυκλοφορίας του νερού το οποίο συνεπάγεται χαμηλότερη ισχύ και άρα λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση
- Λιγότερα προβλήματα διάβρωσης.
- Το νερό απόπλυσης είναι λιγότερο μολυσμένο σε σχέση με αυτό του ανοιχτού τύπου.

5. Υβριδικά συστήματα Scrubber

Τα υβριδικά συστήματα scrubber επινοήθηκαν προκειμένου να συνδυαστούν όλα τα πλεονεκτήματα και των δύο παραπάνω συστημάτων. Επειδή τα συστήματα στην πραγματικότητα είναι αρκετά παρόμοια το μόνο που χρειάζεται να κάνει ο χειριστής είναι να επιλέξει ποιο από τα δύο συστήματα χρειάζεται να δουλέψει. Όταν το πλοίο θα πλέει σε νερά που θα επιτρέπεται η χρήση των open loop scrubber και η απόρριψη των νερών στην θάλασσα επιλέγει το συγκεκριμένο σύστημα βάζοντας την αντλία θαλάσσης να δουλεύει με το σύστημα. Ενώ όταν το επιθυμεί να μεταβεί σε κλειστό σύστημα επειδή είναι σε κάποιο λιμάνι ή ποτάμι ή κάπου όπου δεν μπορεί να

χρησιμοποιηθεί το ανοιχτό σύστημα επιλέγει την αντλία του γλυκού νερού για την δεξαμενή του μαζί μετά απαραίτητα χημικά πρόσθετα ώστε να δουλέψει το σύστημα.

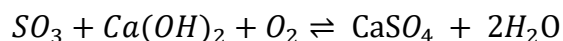
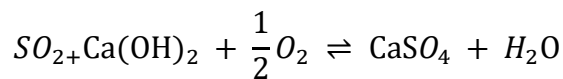


Εικόνα 5. Βασική διάταξη υβριδικού συστήματος scrubber (ABS, ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems. Houston, TX: ABS., 2017)

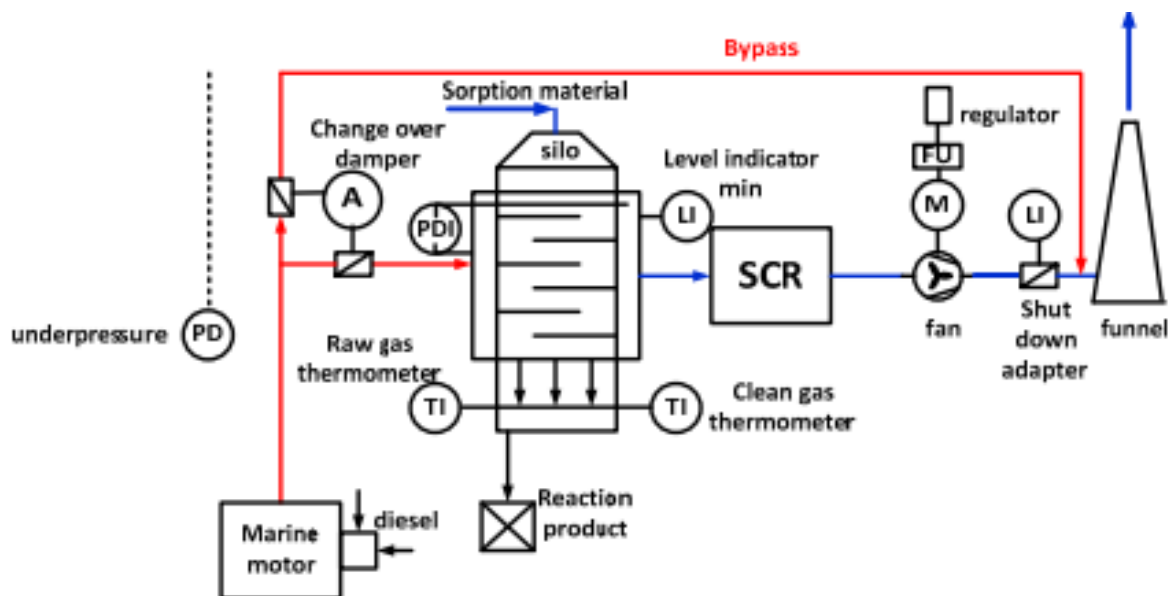
6. Ξηρά συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων και δέσμευσης SOx

Σ αυτού του είδους τα συστήματα για την επεξεργασία και την δέσμευση των Sox τα οποία χρησιμοποιούνται και πάρα πολύ στην βιομηχανία, εκτός από τους ναυτικούς κινητήρες, βασίζεται στην χρήση ασβεστόλιθου ή ενυδατωμένου ασβέστη για τον καθαρισμό των οξειδίων του θείου από τα καυσαέρια. Στις ναυτικές εφαρμογές βασίζονται σε μια κλίνη πληρωτικού υλικού από ενυδατωμένο ασβέστη(υδροξείδιο του ασβεστίου) στο οποίο όσο μεγαλύτερο είναι το σύστημα της επεξεργασίας καθώς και η διατήρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα του υλικού με τα καυσαέρια βελτιστοποιεί την απομάκρυνση και των οξειδίων του θείου αλλά και των σωματιδίων από το ρεύμα των καυσαερίων.

Οι χημικές αντιδράσεις στις οποίες βασίζεται η διαδικασία για την δέσμευση των καυσαερίων είναι:



Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα συστήματα ξηρής επεξεργασίας καυσαερίων είναι εξώθερμες, απελευθερώνοντας θερμότητα που μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης του λέβητα καυσαερίων μέσω κατάλληλης εγκατάστασης.



Εικόνα 6. Διάταξη συστήματος ξηρής δέσμευσης SOx σε εγκατάσταση SCR

Σε αντίθεση με τα υδατικά συστήματα, τα συστήματα ξηρού καθαρισμού καυσαερίων δεν απορρίπτουν ρύπους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το χρησιμοποιημένο υλικό συσκευασίας συλλέγεται και απορρίπτεται ή αξιοποιείται σε κατάλληλες χερσαίες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά εμφανίζουν χαμηλότερες απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας (1,5–2 kW/MW ισχύος κινητήρα ντίζελ), γεγονός που οδηγεί σε περιορισμένες πρόσθετες εκπομπές CO₂. Ωστόσο, η παραγωγή και διανομή του υλικού συσκευασίας συνιστά αρνητική περιβαλλοντική παράμετρο λόγω της σχετικής συμβολής της στις συνολικές εκπομπές CO₂ (Association., 2012)

7. Σύγκριση των υποψηφίων συστημάτων Scrubber

	Wet scrubber, open loop	Wet scrubber, closed loop	Wet scrubber, hybrid	Dry scrubber
Main system components	<ul style="list-style-type: none"> •Scrubber •Washwater piping •Washwater pumps •Washwater treatment equipment •Sludge handling equipment 	<ul style="list-style-type: none"> •Scrubber •Washwater piping •Washwater pumps •Washwater processing tank •Washwater holding tank •Sodium hydroxide storage tank •Washwater treatment equipment •Sludge handling equipment 	<ul style="list-style-type: none"> •Scrubber •Washwater piping •Washwater pumps •Washwater processing tank •Washwater holding tank •Sodium hydroxide storage tank •Washwater treatment equipment •Sludge handling equipment 	<ul style="list-style-type: none"> •Absorber •Fresh granulate hopper •Used granulate hopper •Granulate transport system •Additional granulate storage (new and used granules)
Operation in fresh water	X	✓	✓ (Only when operating in closed loop mode)	✓
Operation without discharge to sea	No	For a limited time depending on the size of the washwater holding tank	For a limited time depending on the size of the washwater holding tank	Yes
Weight Typical values for a 20MW SO _x scrubber	30-55t (Excluding washwater system and treatment equipment)	30-55t (Excluding washwater system, treatment equipment, washwater processing tank and washwater holding tank)	30-55t (Excluding washwater system, treatment equipment, washwater processing tank and washwater holding tank)	~200t (including granules stored adjacent to the absorber but excluding additional granulate storage)
Power consumption (% of max. scrubbed engine power)	1-2%	0.5-1%	0.5-2% (Depending on whether it is operating in open or closed loop mode)	0.15-0.20%
Scrubbing Chemical consumable	No consumable	Sodium hydroxide solution (~6 t/MWh-%S)	Sodium hydroxide solution (Only when operating in closed loop mode) (~6 t/MWh-%S)	Calcium hydroxide granules (~10 kg/MWh-%S)
Compatibility with waste heat recovery system	Yes, provided the scrubber is installed after the waste heat recovery system	Yes, provided the scrubber is installed after the waste heat recovery system	Yes, provided the scrubber is installed after the waste heat recovery system	Yes. Can be placed before or after the waste heat recovery system
Compatibility with SCR system	No, unless a reheater is fitted after the wet scrubber to raise the exhaust gas temperature	No, unless a reheater is fitted after the wet scrubber to raise the exhaust gas temperature	No, unless a reheater is fitted after the wet scrubber to raise the exhaust gas temperature	✓
Compatibility with EGR system	✓	✓	✓	✓
Particulate matter removal	✓	✓	✓	✓

Εικόνα 7. Συγκριτικός πίνακας συστημάτων Scrubber (IPIECA, 2007)

8. Οικονομική αξιολόγηση EGCS

Το κεφαλαιακό κόστος εγκατάστασης πλυντρίδας SO_x σε πλοίο εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των κύριων και βοηθητικών κινητήρων, τον τύπο καυσίμου και τις απαιτούμενες κατασκευαστικές τροποποιήσεις. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το κόστος μιας ένυδρης πλυντρίδας SO_x για κινητήρα ντίζελ ισχύος 1 MW μπορεί να προσεγγίσει το 1 εκατ. USD, ενώ για κινητήρα ισχύος 20 MW κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5 εκατ. USD (Lehtoranta K. et al, 2019) Επιπλέον κόστος προκύπτει από την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος, η οποία εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του συστήματος και των κινητήρων.

SO _x Scrubber Type	Power Consumption (kW/MW of Engine Power)
Hybrid scrubber	10–23
Seawater scrubber	10–30
Freshwater scrubber	6–110

Εικόνα 8. Ενδεικτικές τιμές κατανάλωσης ισχύος για υβριδικά συστήματα, συστήματα θαλασσινού και γλυκού νερού. (Kjølholt J. et al, 2012)

Το σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων και ο βοηθητικός εξοπλισμός του λειτουργούν σε ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον, ιδίως κατά τη χρήση θαλασσινού νερού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει διάβρωση ακόμη και σε ανοξείδωτους χάλυβες, όπως ο SS316. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν κράματα νικελίου, τιτάνιο ή μη μεταλλικά υλικά (π.χ. εποξικά και σύνθετα), ωστόσο η σταδιακή φθορά και η πιθανή αντικατάσταση εξοπλισμού αυξάνουν το συνολικό κόστος και το ανθρακικό αποτύπωμα του συστήματος.

SO _x Scrubber Type	Operation Cost
Hybrid scrubber	Not available
Seawater scrubber	3% of the investment cost
Freshwater scrubber	5 USD/MWh
	≈0.5 to 2.5 × 10 ⁶ USD

Εικόνα 9. Κόστος λειτουργίας τριών τύπων πλυντρίδων SO_x. (Gregory D et al, 2010)

Σε προηγούμενη μελέτη (Ritchie A. et al, 2015), εκτιμήθηκε το κόστος ανά τόνο μειωμένων εκπομπών SO₂, συγκρίνοντας τη χρήση τεχνικών μείωσης SO₂ με τη μετάβαση από καύσιμα υψηλής σε χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Τα εξεταζόμενα σενάρια ήταν:

- χρήση πλυντρίδα SO_x με θαλασσινό νερό,
- μετάβαση από βαρύ καύσιμο με 2,7% θείο σε ναυτικό καύσιμο 1,5% θείου
- μετάβαση σε ναυτικό καύσιμο 0,5% θείου. Τα αντίστοιχα ποσοστά σύλληψης SO₂ ήταν 75%, 44% και 81%, αντίστοιχα. (<https://pubs.acs.org>, 2019)

SO _x Reduction Measure	Vessel Type	Small Size Vessel (€/ton SO ₂)	Medium Size Vessel (€/ton SO ₂)	Large Size Vessel (€/ton SO ₂)
Seawater scrubber	New building	390	351	320
Seawater scrubber	Retrofit	576	535	504
Fuel change from 2.7% sulfur to 1.5% sulfur	New building/Retrofit	2053 (1230)	2050 (1230)	2045 (1230)
Fuel change from 2.7% sulfur to 0.5% sulfur	New building/Retrofit	1439 (1690)	1438 (1690)	1434 (1690)

Εικόνα 10. Κόστος ανά τόνος μείωσης SO₂ (Gregory D et al, 2010)

Οι υπολογισμοί κόστους που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν σημαντικές αβεβαιότητες, οι οποίες σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε πλοίου, τα επίπεδα συντήρησης του εξοπλισμού, τις συνθήκες λειτουργίας και φόρτωσης, καθώς και τις διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε θείο των καυσίμων. Σε μεταγενέστερη μελέτη, ο Reynolds (Ushakov et al, 2020) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι από το 2015 και μετά, πλοία που καταναλώνουν τουλάχιστον 4.000 τόνους καυσίμου ετησίως εντός Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (ECAs) παρουσιάζουν πλεονέκτημα κόστους με τη χρήση συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων έναντι της χρήσης καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

Η ίδια μελέτη επισημαίνει ότι όταν η περιεκτικότητα σε θείο μειώνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, η παραγωγή τέτοιων καυσίμων καθίσταται τεχνικά δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη, καθιστώντας εναλλακτικές λύσεις, όπως τα συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων ή το LNG, περισσότερο ελκυστικές. Το οικονομικό πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις προβλέψεις των τιμών καυσίμων και το κόστος διαφοροποίησης μεταξύ καυσίμων υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

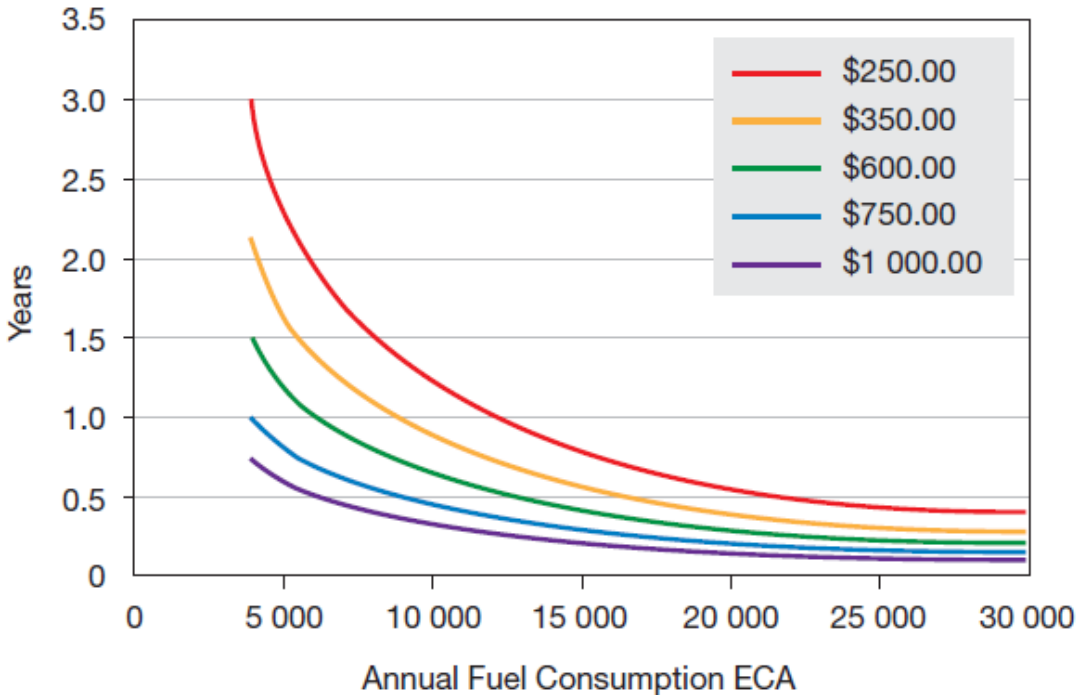
Επιπλέον, στοιχεία από ελληνική ναυτιλιακή εταιρεία (Greek Shipowner, 2020) δείχνουν ότι το κόστος εγκατάστασης πλυντρίδων SO_x θαλασσινού νερού σε ναυπηγείο κυμαίνεται περίπου

μεταξύ 540.000 και 635.000 USD, ενώ το κόστος αγοράς του εξοπλισμού ανέρχεται σε 980.000–1.091.475 USD. Συνεπώς, το συνολικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης εκτιμάται περί τα 1,6 εκατ. USD ανά πλοίο. Τα δεδομένα αυτά καταδεικνύουν ότι η εγκατάσταση πλυντρίδων SOx σε στόλο πλοίων αποτελεί μια ιδιαίτερα δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία, που απαιτεί σημαντικό συντονισμό και διαχειριστική προσπάθεια.

	VSL Name	Scrubber Cost	Scrubber Installation Cost
1	VSL#1	\$1,149,225	\$580,000
2	VSL#2	\$1,091,475	\$580,000
3	VSL#3	\$1,091,475	\$580,000
4	VSL#4	\$1,091,475	\$580,000
5	VSL#5	\$1,085,700	\$580,000
6	VSL#6	\$1,027,950	\$580,000
7	VSL#7	\$1,027,950	\$580,000
8	VSL#8	\$1,027,950	\$580,000
9	VSL#9	\$1,027,950	\$580,000
10	VSL#10	\$1,027,950	N/A YET
11	VSL#11	\$1,027,950	N/A YET
12	VSL#12	\$1,200,000	\$600,000
13	VSL#13	\$1,200,000	\$600,000
14	VSL#14	\$980,000	\$580,000
15	VSL#15	\$980,000	N/A YET
16	VSL#16	\$980,000	N/A YET

Εικόνα 11. Δεδομένα πλοίου για αγορά και εγκατάσταση Scrubber. (Greek Shipowner, 2020)

Επίσης λόγω και των μειωμένων πληροφοριών που μπορούμε να βρούμε την σημερινή νομοθεσία για τα οικονομικά στοιχεία του κάθε πλοίου η εταιρεία Wartsila, μία από τις μεγαλύτερες εταιρείες κατασκευής μηχανών πλοίων παρουσιάζει ενδεικτικά τον χρόνο που χρειάζεται για να γίνει η απόσβεση σε μια τέτοια απόσβεση η οποία κυμαίνεται κάπου στα 3 χρόνια αναλόγως φυσικά την ρότα του πλοίου και πόσο χρόνο πλέει σε περιοχές ECA. (wartsila, 2017)



Εικόνα 12. Διάγραμμα απόσβεσης κεφαλαίου εγκατάστασης συστήματος EGCS σε έτη συνάρτηση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου εντός περιοχών ECA. (wartsila, 2017)

8.2 Κόστος Συντήρησης ένυδρης πλυντρίδας ανοιχτού βρόχου

Όπως είδαμε από τα παραπάνω πέρα από το κεφαλαιακό αρχικό κόστος που θα χρειαστεί και είδαμε ότι θα κυμανθεί μεταξύ 2 και 5 εκατομμύρια δολάρια ανά πλοίο ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου και το είδος της εγκατάστασης που θα επιλέξουμε, ανοιχτού, κλειστού ή hybrid συστήματος θα χρειαστεί να υπολογίσουμε και ένα εκτιμώμενο κόστος συντήρησης. Αυτό εξαρτάται από το πόσες μέρες τον χρόνο χρησιμοποιείται το σύστημα του Scrubber και εκτιμάται ότι ετήσια για την επισκευή και συντήρηση του συστήματος θα χρειαστούν περίπου 30.000 – 100.000 δολάρια τον χρόνο. Τα χρήματα αυτά είναι εκτιμώμενα αφού το κόστος συντήρησης επηρεάζεται από τις μέρες λειτουργίας του Scrubber πάνω στο πλοίο. Τα προβλήματα που θα προκύψουν από την χρήση του συστήματος και θα χρειαστούν χρήματα είτε για συντήρηση είτε για επισκευή είναι:

Αντλίες νερού θαλάσσης

- Αισθητήρες ελέγχου συστήματος οι οποίες χρειάζονται άμεσα αντικατάσταση λόγω της σημαντικότητας για την λειτουργία του συστήματος.

- Διάβρωση σωληνώσεων και εξαρτημάτων τα οποία είτε μπορεί να επισκευαστούν με επικαλύψεις είτε θα πρέπει να αντικατασταθούν
- Δυσλειτουργίες συστημάτων ελέγχου όπως ηλεκτρονικά μέρη PLCs και χρειάζονται αντικατάσταση και πολλές φορές προγραμματισμό από τον κατασκευαστή (Dominic O, 2023)

9. Διαδικασίες συντήρησης των open loop Scrubber(Kangrim)

Αφού είδαμε σε θεωρητικό επίπεδο τις διάφορες τεχνολογίες μείωσης για τα καυσαέρια και καταλάβαμε την βασική λειτουργία τους, θα προσπαθήσουμε να δούμε την διαδικασία συντήρησης σε πραγματικό επίπεδο ενός συστήματος πλυντρίδας(SOx).Προτού παρουσιάσουμε τις διαδικασίες συντήρησης ενός συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων Scrubber ας δούμε πώς είναι ένα πραγματικό σύστημα Scrubber.

Το σύστημα Scrubber είναι της εταιρείας Kangrim και είναι τοποθετημένο σε VLCC καράβι.

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

1.Λειτουργία απόδοσης συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων (EGCS)

Main Engine: 75%

Auxiliary engine: 100%

Normal capacity :212.867kg/h

2. Δεδομένα Μηχανής

2.1 Κύρια Μηχανή

2χρονη ή 4χρονη Μηχανή	2	
Συνθήκες	Μέγιστες	Σχεδιασμού
Λειτουργικό φορτίο(%)	100	75
Μέγιστη δύναμη κύριας μηχανής(kw)	31.640	23.730
Μέγιστη ροή καυσαερίων (kg/h)	244.620	195.409
Θερμοκρασία καυσαερίων (°C)	450	350

2.2 Βοηθητικές Μηχανές (Ηλεκτρομηχανές)

	Aux. Engine 1		Aux. Engine 2		Aux. Engine 3	
2χρονη ή 4χρονη Μηχανή	4		4		4	
Συνθήκες	Μέγιστες	Συνθήκες	Μέγιστες	Συνθήκες	Μέγιστες	Συνθήκες
Λειτουργικό φορτίο(%)	100	100	100	-	100	-
Μέγιστη δύναμη κύριας μηχανής(kw)	2390	2390	1800	-	1800	-
Μέγιστη ροή καυσαερίων (kg/h)	17458	17458	13293	-	13293	-
Θερμοκρασία καυσαερίων(°C)	450	450	450	-	450	-

3.Σχεδιαστικά δεδομένα συστήματος επεξεργασίας συστήματος καυσαερίων(EGCS)

3.1 Γενικά δεδομένα.

Τύπος: Ανοιχτού Συστήματος Open loop

Περιεκτικότητα θείου στο HFO: 3,5 %

Ισοδύναμη περιεκτικότητα θείου καυσαερίων: 0,1 %

Θερμοκρασία περιβάλλοντος: 35 °C

Θερμοκρασία θαλασσινού νερού: 32 °C

Αλκαλικότητα θαλασσινού νερού: 2.200 μmol/L

Σχετική υγρασία αέρα: 80 %

3.2 Scrubber data

Outlet gas SO₂/CO₂ Ratio: Μέγιστο 4.3

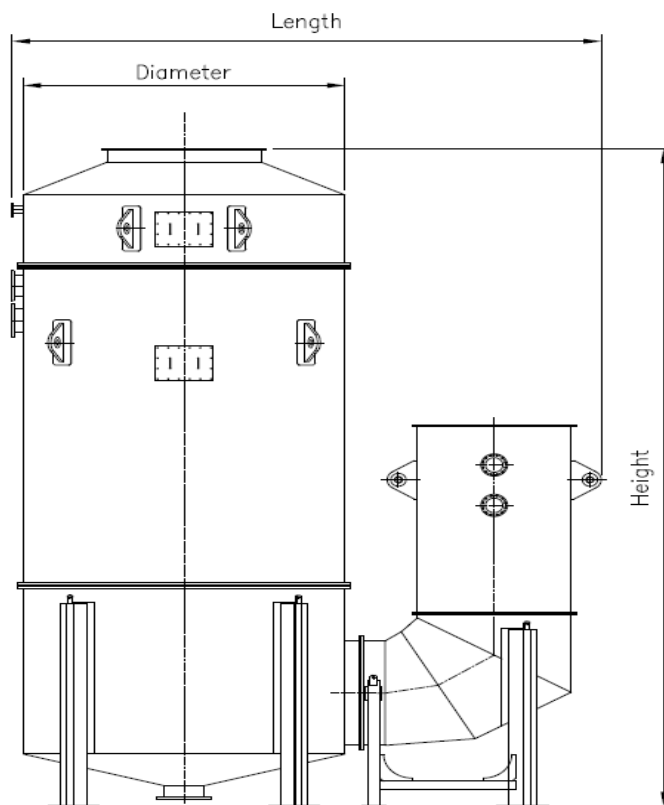
Differential pressure excluding the piping and dampers: 150 mmAq

4.Discharge water condition

	Εύρος	Αναφορά
Αλκαλικότητα(PH)	≥ 6.5	4m from overboard discharge point
Πολυκυκλικούς Αρωματικούς Υδρογονάνθρακες(PAH)	$\leq 50 \mu g/L$	Comparing the inlet and outlet water
Θολότητα (Turbidity)	$\leq 25 FNU$	Comparing the inlet and outlet water

5.Scrubber data

Μήκος(mm)	8,531
Διάμετρος(mm)	4,700
Ύψος(mm)	9,588
Βάρος(Στεγνό,ton)	16.3
Βάρος(Λειτουργικό, ton)	20.5



Εικόνα 13. Όψη πύργου Scrubber(Kangrim)

6. Seawater

Κατανάλωση : 1405 m³/h

Reaction seawater consumption: 1830m³/h

Ποιότητα : Φιλτραρισμένο θαλασσινό νερό(mesh size 5mm)

7.Ισχύς

Ηλεκτρική ισχύς 3φάσεων/440V/60Hz

Αντλία θάλασσας A : 165 kW

Αντλία θάλασσας B : 165 kW

Αντλία θάλασσας A : 165 kW

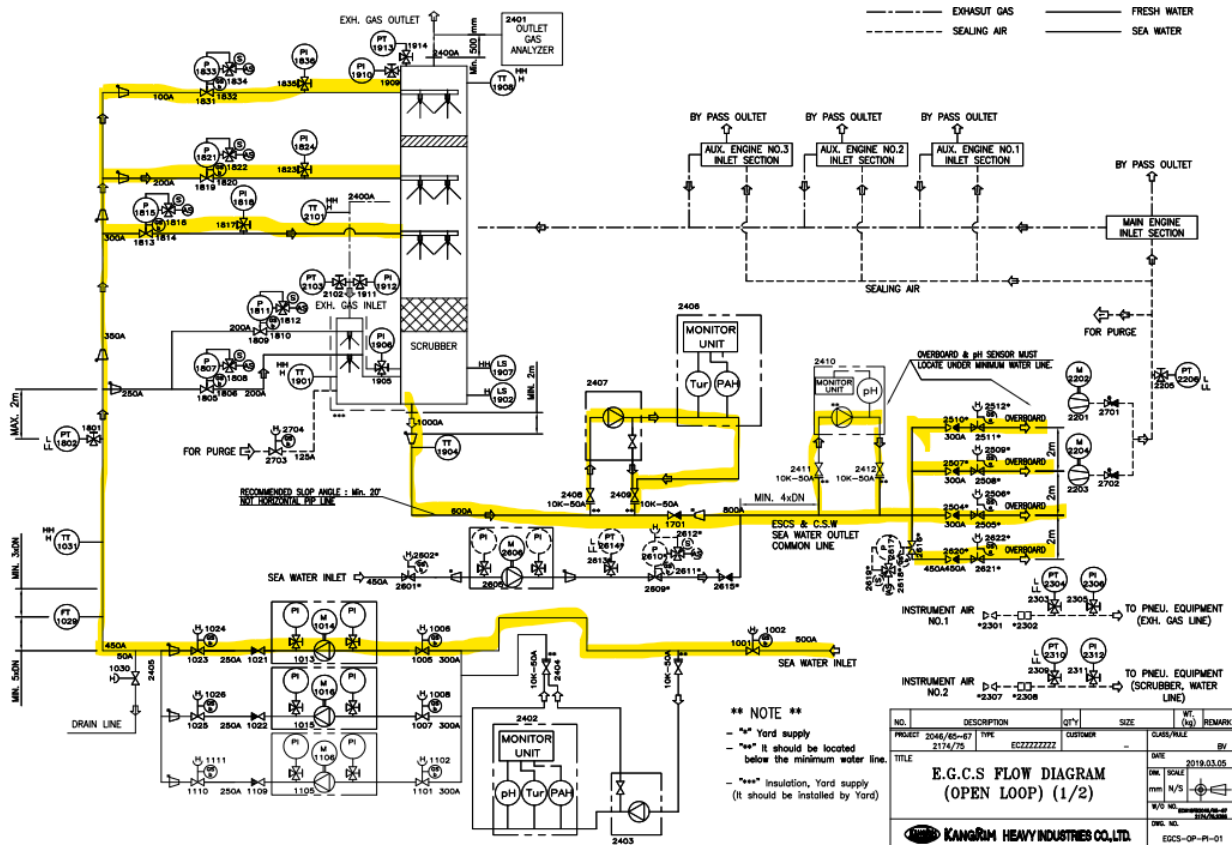
Seal air fan A : 12.8 kW

Seal air fan B : 12.8 kW

Αντλία θάλασσας A (Reaction pump) : 200 kW

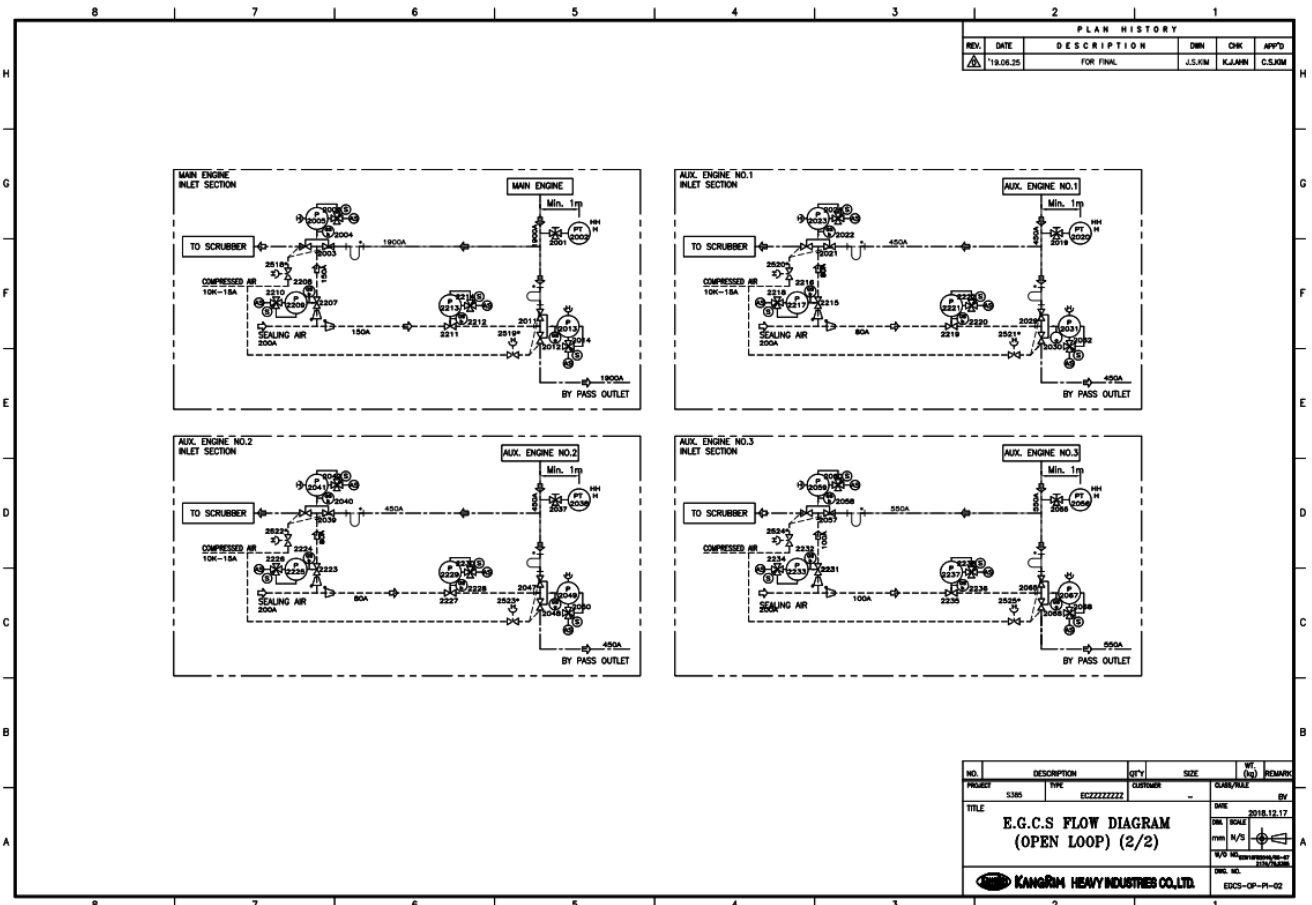
7.2 Electric power 1 phase / 220V / 60 Hz

Control system: 7 Kw



Εικόνα 14. Σχεδιάγραμμα συστήματος Scrubber

Από το παραπάνω σχέδιο βλέπουμε μια τυπική ροή διαγράμματος του σχεδίου του scrubber προκειμένου να μπορούμε να εντοπίζουμε τυχόν προβλήματα του συστήματος. Ακολουθώντας τον ροή του διαγράμματος βλέπουμε την εισαγωγή της θάλασσας (sea water inlet), τον πίνακα παρακολούθησης για τα PH, TUR, PAH, τις τρεις αντλίες θαλάσσης που χρησιμοποιούνται για να πάει το νερό στον πύργο του scrubber, το νερό συνεχίζει την ροή του προς το πύργο ψύξης των καυσαερίων όπου διοχετεύεται μέσα στον πύργο με την μορφή σπρέι. Το νερό μετά πάει στην εξαγωγή του Scrubber περνώντας πάλι μέσα από ένα σύστημα παρακολούθησης για να βλέπουμε την ποιότητα του νερού μετά την ανάμειξή τους με τα καυσαέρια και οδηγούνται σε μια κοινή γραμμή με τέσσερα επιστόμια εξαγωγής νερού προς την θάλασσα.



Εικόνα 15. Σχεδιάγραμμα συστήματος Scrubber

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε για κάθε ένα σύστημα ξεχωριστά για την κύρια μηχανή του πλοίου και τις τρεις ηλεκτρομηχανές για την παραγωγή ρεύματος του πλοίου το δίκτυο σωληνώσεων και τα επιστόμια που χρησιμοποιούνται για την ροή των καυσαερίων και το πως συνδέονται και χρησιμοποιούνται πάνω στο σύστημα του Scrubber. Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να δούμε ποια επιστόμια χρησιμοποιούνται για να περάσουν τα καυσαέρια μέσα απ' το σύστημα του Scrubber και ποια επιστόμια χρησιμοποιούνται όταν το σύστημα δεν χρησιμοποιείται λόγω αλλαγής καυσίμου από H.F.O σε M.D.O και γίνεται by-pass.

Τα συνήθη προβλήματα που παρουσιάζονται για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος συνήθως είναι στον πίνακα ελέγχου που παρακολουθούν διαρκώς τις τιμές ροής νερού, καυσαερίων και η αναλογία του μείγματος του SO₂/CO₂. Παρακάτω θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε πώς γίνεται η πραγματική συντήρηση ενός τέτοιου συστήματος σε ένα πλοίο με

βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή και να δούμε προβλήματα που προκύπτουν από κακή ή ελλιπή συντήρηση σε πραγματικές συνθήκες πλοίου.



Εικόνα 16. Ηλεκτρονικό Σύστημα παρακολούθησης CO₂/SO₂



Εικόνα 17. Φίλτρο καυσαερίων δείγματος ratio CO₂/SO₂



Εικόνα 18. Πλυντρίδα καυσαερίων με διαρροή καυσαερίων

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε σε τι κατάσταση βρίσκεται το δωμάτιο που στεγάζεται ο πύργος του Scrubber που γίνεται η επεξεργασία των καυσαερίων μέσω του Scrubber. Μπορούμε να διακρίνουμε τις καταστροφικές συνέπειες των καυσαερίων και το θειικό οξύ που σχηματίζετε όταν υπάρχουν τυχόν διαρροές. Γι' αυτό τον λόγο υπάρχει και θα πρέπει να γίνεται ο περιοδικός έλεγχος του συστήματος σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Ο έλεγχος του συστήματος πρέπει να γίνεται καθημερινά σε οπτικό έλεγχο για τυχόν διαρροές ή φθορές στα βασικά μέρη του όπως είναι ο πύργος, οι σωληνώσεις οι αντλίες κ.λπ.. Από εκεί και πέρα στον εβδομαδιαίο έλεγχο έχουμε το φίλτρο του air-condition που ψύχει την καμπίνα παρακολούθησης των δεδομένων το οποίο πρέπει να καθαρίζεται ώστε να πετύχουμε την απαραίτητη θερμοκρασία για τον απρόσκοπτο υπολογισμό

των δεδομένων και των μηχανημάτων τα οποία επηρεάζονται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Το φίλτρο αισθητήρα(probe filter) θα πρέπει να γίνεται οπτικός έλεγχος και να καθαρίζετε ή να αλλάζετε μηνιαίως ανάλογα την κατάστασή του.



Εικόνα 19. Probe – filter συλλογής καυσαερίων

Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για την προστασία του αισθητήρα για την μέτρηση των καυσαερίων. Επίσης έλεγχος γίνεται και στην καμπίνα παρακολούθησης(monitoring cabin) για την αντλία συμπυκνώματος, αφού πολλές φορές λόγω υδρατμών μπορεί να φρακάρει ο δειγματοληπτικό σωλήνας και να μην δουλεύει το σύστημα. Κάθε 6 μήνες όλα τα σωληνάκια ροής των υδρατμών θα πρέπει να αλλάζονται ανεξάρτητα από τον οπτικό τους έλεγχο, ενώ κάθε 2 χρόνια θα πρέπει να αλλάζει ολόκληρη η αντλία του συστήματος.



Εικόνα 20. Αντλία EGCS

Επίσης στον περιοδικό έλεγχο που κάνουμε για το σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων αυτός δεν είναι μόνο στο δωμάτιο ελέγχου που βρίσκεται ο πύργος ψύξης των καυσαερίων αλλά και στο μηχανοστάσιο επί του πλοίου, εκεί που βρίσκονται και οι αντλίες θαλάσσης αλλά και το σύστημα παρακολούθησης ροής νερού απόρριψης, θερμοκρασίας νερού κ.λπ..



Εικόνα 21. Monitoring data cabin

Μπορούμε εδώ να δούμε ένα σύστημα παρακολούθησης δεδομένων του συστήματος Scrubber το οποίο κ αυτό βρίσκεται μετά την ανάμειξη του θαλασσινού νερού με τα καυσαέρια. Εδώ στο σύστημα βλέπουμε μια αντλία νερού συνδεδεμένη με ένα φίλτρο το οποίο χρειάζεται καθαρίσμα εβδομαδιαίως ή ακόμα και νωρίτερα αναλόγως τις τιμές δεδομένων που μας δίνει το σύστημα. Αυτά τα βλέπουμε στο επόμενο σύστημα καταγραφής όπως φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα. Βλέπουμε το φίλτρο νερού πόσο βρώμικο είναι μετά την ανάμειξή του με τα καυσαέρια γι' αυτό και ο περιοδικός του έλεγχος είναι πολύ σημαντικός για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Τα φίλτρα αυτά αλλά και τα ο'ring καθώς και οι μετρήσεις ελέγχονται καθημερινά και καθαρίζονται εβδομαδιαίως. Η αντλία νερού δουλεύει συνεχώς και εφόσον οι τιμές της είναι στα όρια δεν χρειάζεται κάποια αλλαγή. Στον περιοδικό της έλεγχο βλέπουμε την ροή του νερού(bar) και αναλόγως προχωράμε σε αλλαγή του impeller της αντλίας ή ακόμα κ ολόκληρης της αντλίας εφόσον δεν δουλεύει.



Εικόνα 22. Monitoring cabin

Όπως μπορούμε να δούμε η καμπίνα παρακολούθησης στην οποία βλέπουμε τον αισθητήρα ΡΑΗ, λαμβάνοντας δειγματοληπτικό έλεγχο νερού με συγκεκριμένη ποσότητα ροής και παρακολουθεί την ποσότητα των πολυκλωνικών αρωματικών υδρογονανθράκων τα οποία απορρίπτονται στην θάλασσα. Αντίστοιχα υπάρχει και ο αισθητήρας για την θολότητα του νερού που μετράει τα δικά του αντίστοιχα όρια βάση ΜΑRΡΟL πριν γίνει η απόρριψη του νερού στην θάλασσα. Το πιο σύνηθες εδώ που χρειάζεται για την συντήρηση είναι τα σωληνάκια που περνάει το νερό να χρειάζονται είτε καθαρίσμα είτε αλλαγή γιατί γεμίζουν με θαλασσινό αλάτι και δεν αφήνουν τον αισθητήρα να λάβει σωστή μέτρηση. Σε περίπτωση σφάλματος και δεν φταίνε τα δειγματοληπτικά

σωληνάκια τότε εξετάζουμε την περίπτωση των αισθητήρων οι οποίοι μια φορά τον χρόνο χρειάζονται καθάρισμα διακρίβωση(calibration) ώστε να είναι ακριβείς οι μετρήσεις.

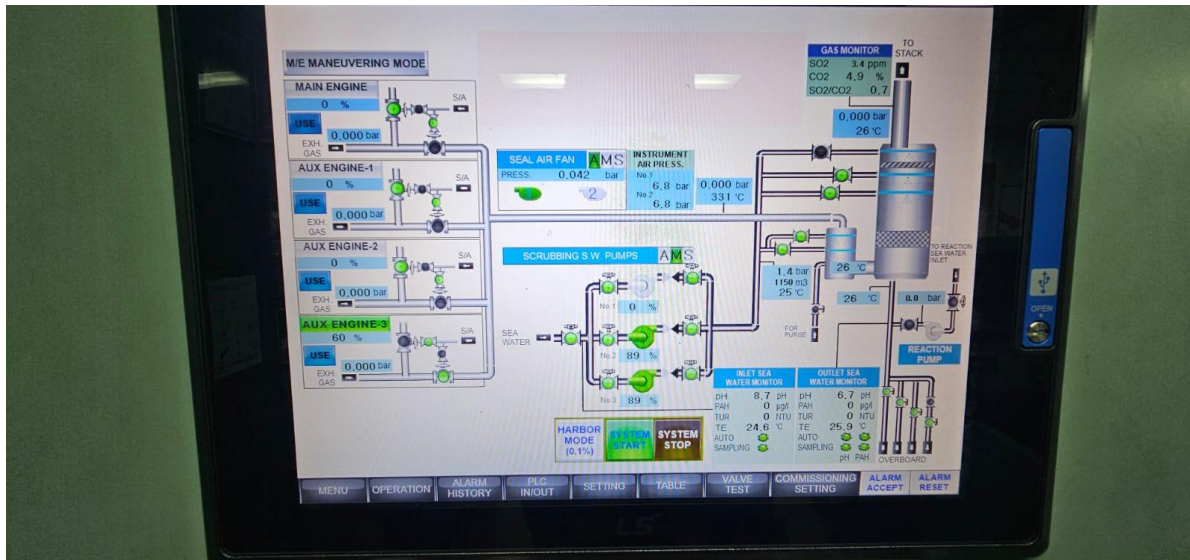
Στην παρακάτω περίπτωση βλέπουμε επίσης ένα σύστημα παρακολούθησης αλλά τώρα βρίσκεται στην είσοδο πριν φτάσει το νερό στο σύστημα ψύξης και αναμειχθεί με τα καυσαέρια. Μπορούμε να διακρίνουμε την ροή του νερού στο σύστημα, το PH του νερού αλλά και την θερμοκρασία θάλασσας. Αναλόγως με την ποσότητα ροής που βλέπουμε στο σύστημα θα πρέπει τουλάχιστον εβδομαδιαίως να καθαρίζουμε το φίλτρο του νερού διότι συσσωρεύονται βρωμιές και ακαθαρσίες μειώνοντας την ροή και διακόπτοντας την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 23. Monitoring cabin

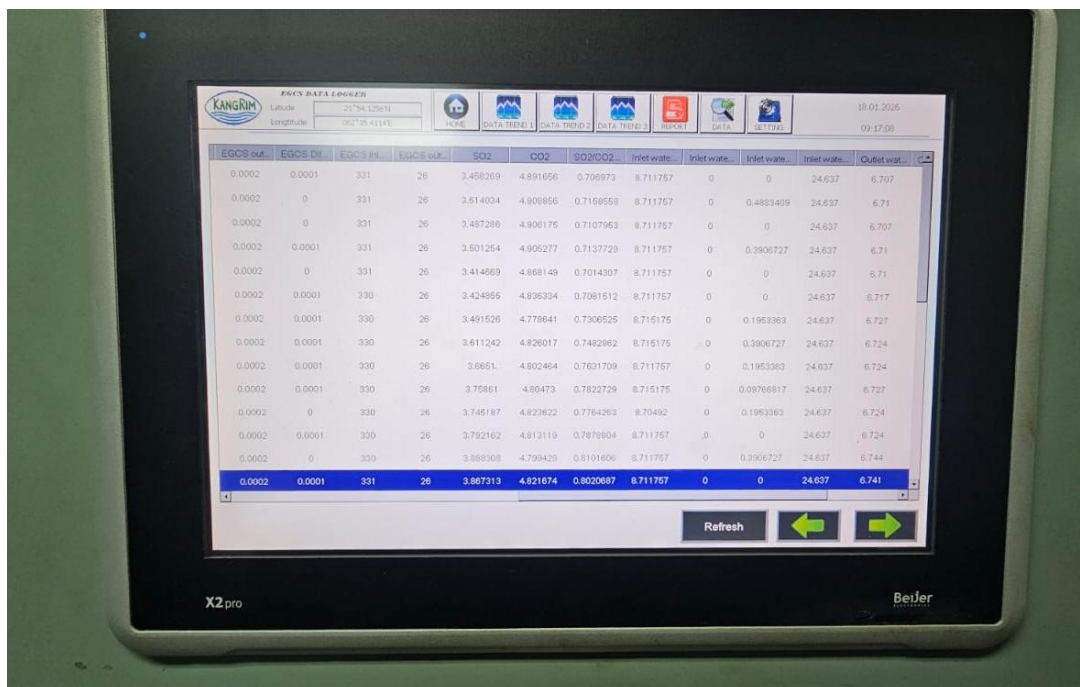
Όλο το παραπάνω σύστημα υπάγεται σε ένα κεντρικό σύστημα το οποίο μας δίνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και τιμές που χρειαζόμαστε για την σωστή λειτουργία του συστήματος. Σ αυτό είναι συνδεδεμένες όλες οι μηχανές που χρησιμοποιούνται από το σύστημα του Scrubber δείχνοντάς μας ποιες δουλεύουν ανά πάσα στιγμή. Τις αντλίες θαλάσσης για το ποιες δουλεύουν αλλά και την παροχή του νερού που φτάνει στον πύργο για την ψύξη του συστήματος. Το διοξείδιο

του θείου αλλά και το διοξείδιο του άνθρακα καθώς και την αναλογία τους όπως και τα επιστόμια εισαγωγής εξαγωγής νερού αλλά και καυσαερίων του συστήματος.



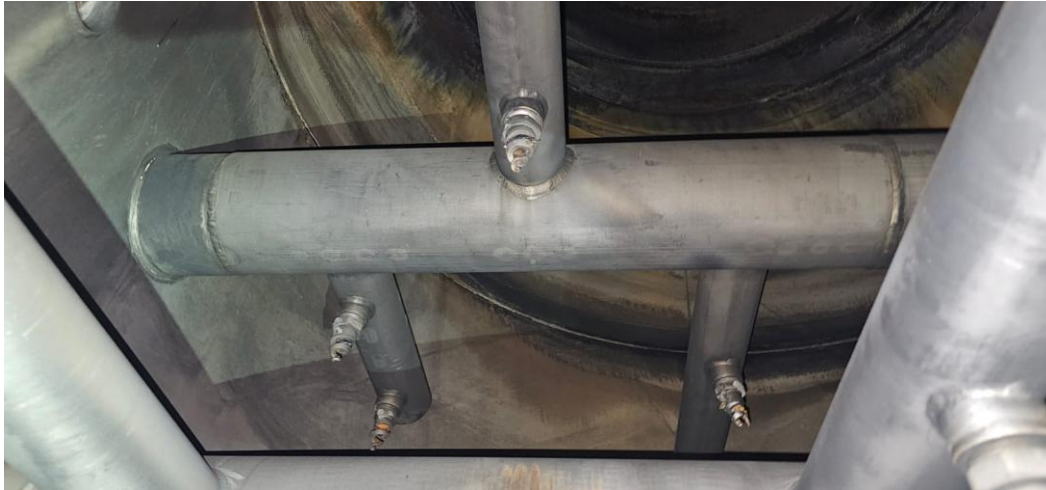
Εικόνα 24. Ηλεκτρονικό Σύστημα παρακολούθησης EGCS

Και όλα τα παραπάνω όπως είπαμε και πιο πριν με βάση την MARPOL θα πρέπει να καταγράφονται συνεχώς το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος και να αποθηκεύονται στο σύστημα χωρίς επεξεργασία ώστε να μπορούμε να τα δείξουμε στις Λιμενικές Αρχές ή στην Σημαία σε περίπτωση ελέγχου.



Εικόνα 25. Monitor παρακολούθησης γεωγραφικού πλάτους και μήκους.

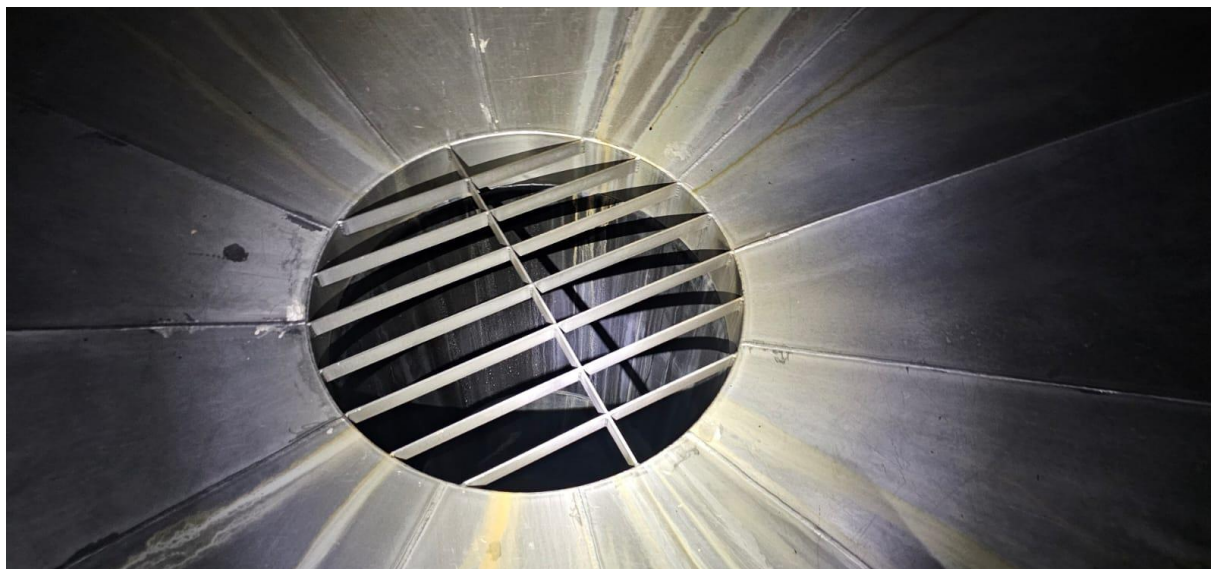
Όσον αφορά την κατάσταση εντός του πύργου επεξεργασίας των καυσαερίων θα πρέπει να ελέγχεται σε καθημερινή βάση για τυχόν διαρροές ή τρύπες στους σωλήνες εξόδου των καυσαερίων γιατί αναφέραμε πιο πάνω την επικινδυνότητα και την διάβρωση που προκαλούν τα καυσαέρια. Οπότε κρίνεται σκόπιμο εκτός του οπτικού ελέγχου να γίνεται και στο εσωτερικό του πύργου ένας έλεγχος για να δούμε την κατάσταση του συστήματος. Επειδή το νερό διοχετεύεται με μορφή σπρέι πολλές φορές κακή συντήρηση μας έχει δείξει ότι μπορούν να φρακάρουν αυτά τα σπρέι και ο πύργος να μην έχει αρκετή ποσότητα νερού με συνέπεια να ανεβαίνει η θερμοκρασία εντός του συστήματος και να μπορεί να οδηγήσει μέχρι και σε φωτιά. Γι' αυτό σε περίπτωση που αντιληφθούμε το παραμικρό γίνεται αμέσως η αντικατάσταση και διόρθωση τυχών φθορών του συστήματος γιατί είναι άμεσο αντιληπτό το πόσο επικίνδυνο αλλά και κοστοβόρο μπορεί να γίνει σε περίπτωση κάποιας μεγαλύτερης βλάβης.



Εικόνα 26. Εσωτερικό πλυντρίδας καυσαερίων SOx



Εικόνα 27. Φθαρμένο ακροφύσιο σε Scrubber.



Εικόνα 28. Κατάληξη νερού έτοιμο στο κάτω μέρος το συστήματος ψύξης των καυσαερίων



Εικόνα 29. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάβρωσης σωλήνα εξαγωγής καυσαερίων λόγω διοξειδίου του θείου.(Sox)

10.Τελικά Συμπεράσματα

Η παγκόσμια ναυτιλία λόγω των αυστηρών περιορισμών των ρύπων που θέσπισε ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO) αναγκάστηκε να προσαρμοστεί και να υιοθετήσει νέες τεχνολογίες που υπόκεινται σ' αυτούς τους κανόνες ώστε να μπορέσει να προσαρμοστεί στα καινούρια δεδομένα για την μείωση των αερίων. Μία απ' αυτές τις τεχνολογίες είναι και οι διάφοροι τύποι πλυντρίδων που χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία για να καταφέρουν να μειώσουν τους αέριους ρύπους στα επιθυμητά επίπεδα.

- Επικρατέστερος τύπος πλυντρίδας που χρησιμοποιείται στην ναυτιλία είναι οι ανοιχτού τύπου(Open Loop) που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό.
- Η αποτελεσματικότητα των πλυντρίδων θαλασσινού νερού εξαρτάται από την αλατότητα και την θερμοκρασία της θάλασσας.
- Είναι βαρύ και απλό σύστημα σε κατασκευή και εγκατάσταση χρησιμοποιώντας το θαλασσινό νερό σε αφθονία.
- Δεν έχει μεγάλο κόστος συντήρησης λόγω της απλότητας του συστήματος.
- Το μεγαλύτερο πρόβλημα του συστήματος είναι η διάβρωση των εξαρτημάτων λόγω του θαλασσινού νερού
- Τακτικός έλεγχος ακροφυσίων - σπρέι νερού και αντικατάσταση αυτών επειδή φράζουν λόγω αλατότητας και διάβρωσης.
- Ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών των σωληνώσεων ώστε να αντέχουν στην διάβρωση.
- Ενεργειακά έχει μεγάλη κατανάλωση λόγω της ποσότητας του νερού που χρειάζεται για την σωστή λειτουργία.

Βιβλιογραφία

- ABS. (2013). *ABS (American Bureau of Shipping). (2013). Exhaust Gas Scrubber Systems: Status and Guidance.* Houston, TX: ABS.
- ABS. (2017). *ABS (American Bureau of Shipping). (2017). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems.* Houston, TX: ABS. Ανάκτηση από www.ABS.com.
- Association., E. (. (2012). Ανάκτηση από <https://www.scribd.com>:
<https://www.scribd.com/document/394678468/EGCSA-Handbook-2012-a-Practical-Guide-to-Exhaust-Gas-Cleaning-Systems-for-the-Maritime-Industry>
- Dominic O. (2023). <https://sensorex.com/marine-scrubbers/>.
- Eelco den Boer et al. (2015, MARCH). <https://www.nabu.de/downloads/150312-Scrubbers.pdf>.
- Greek Shipowner. (2020). Ανάκτηση από www.greekshipowner.gr
- Gregory D et al. (2010). *Gregory, D.; West, M. EGCSA Handbook.* Ανάκτηση από Exhaust Gas Cleaning Systems Association: London.
- Gregory, D. &. (2010). EGCSA Handbook. London: Exhaust Gas Cleaning Systems Association (EGCSA). Ανάκτηση από Gregory, D., & West, M. (2010). EGCSA Handbook. London: Exhaust Gas Cleaning Systems Association (EGCSA).
- Hansen, J. P. (2014). Reduction of SO₂, NO_x and Particulate Matters.
<https://pubs.acs.org>. (2019). Ανάκτηση από <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b05555>.
- Hufnagl, M. L. (2005). Effects of Sea Water Scrubbing.
- IMO. (2015).
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.259\(68\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.259(68).pdf). Ανάκτηση από www.cdn.imo.org.
- IMO. (2015, MAY 15). *International Maritime Organization (IMO). (2015). 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems (Resolution MEPC.259(68)).* London: IMO. Ανάκτηση από www.imo.org.
- IPIECA. (2007). Ανάκτηση από International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IPIECA). (2007). Maritime Air Emissions and MARPOL Annex VI. London: IPIECA.
- Kircher, D., & Stotz, T. (2008). Holland America Line seawater scrubber demonstration project. Proceedings of the Faster Freight, Cleaner Air Northwest Conference, Seattle, USA. (2008).
- Kjølholt J. et al. (2012). *Kjølholt, J., Aakre, S., Jürgensen, C., & Lauridsen, J.*
- Lehtoranta K.et al. (2019). *Lehtoranta, K., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T., Vesala, H., Ntziachristos, L., Rönkko, T., Karjalainen, P., Kuittinen, N., & Timonen.*
- McClelland, K. (2025). Ανάκτηση από <https://www.pacificgreen-marine.com/envi-marine/open-or-closed-loop/>.
- MEPC. (2005, JULY 22).
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.130\(53\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.130(53).pdf). Ανάκτηση από <https://wwwcdn.imo.org>.
- Register, L. (2012). *Lloyd's Register. (2012). Understanding Exhaust Gas Treatment Systems: Guidance for Ship Owners and Operators.* London: Lloyd's Register.

- Reynolds, K. (2011). *Reynolds, K. (2011). Exhaust Gas Cleaning Systems Selection Guide. Ship Operations Cooperative Program. U.S. Department of Transportation.*
- Ritchie A. et al. (2015). *Ritchie, A., de Jonge, E., Hugi, C., & Cooper, D. Ανάκτηση από Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-Based Instruments. European Commission.*
- Sethi, S. (2021). <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>. Ανάκτηση από www.marinesight.com.
- Ushakov et al, Meeting future emission regulation at sea by combining low-pressure EGR and seawater scrubbing (Ushakov, S.; Stenersen, D.; Einang, P.-M.; Ask, T.-O. 2020).
- wartsila. (2017). *Wärtsilä. (2017). Project Guide: SOx Scrubber Technology. Vaasa, Finland. Ανάκτηση από Wärtsilä. (2017). Project Guide: SOx Scrubber Technology. Vaasa, Finland.*
- WARTSILLA. (2014). *WärtsiläHow to Choose the Correct Scrubber. Wärtsilä Moss Business White Paper. Vaasa, Finland.*
- Zis, T., & Psaraftis, H.N. (2017), Operational measures to mitigate and reverse the potential modal shifts due to environmental legislation. Transportation Research Part D. (2017).
- Καραγεώργος, Λ. (2022). <https://www.ot.gr/2022/10/23/naytilia/prasini-naytilia-katharizoume-ton-aera-molynoume-ti-thalassa/>. Ανάκτηση από <https://www.ot.gr>.
- Ρακόπουλος, Κ. (. (2013). (2013). *Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ι. Αθήνα: Εκδόσεις Φούντας.*