



**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**  
**ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΠΛΟΙΟΥ-  
SCRUBBERS.**



Νέα Μηχανιώνα, 2015

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ</b> .....	6
<b>1.1. Καύσιμα Κινητήρων Πλοίων</b> .....	6
<b>1.2. Κινητήρες Πλοίων</b> .....	7
<b>1.3. Εκπομπές Ρύπων Κινητήρων Πλοίων</b> .....	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ - ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ</b> .....	14
<b>2.1. Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO)</b> .....	14
<b>2.2. Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee, MEPC)</b> .....	16
<b>2.3. Ευρωπαϊκή Ένωση</b> .....	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΠΛΟΙΟΥ – SCRUBBERS</b> .....	19
<b>3.1. Περιγραφή Συστημάτων Scrubbers</b> .....	19
<b>3.2. Τύποι Συστημάτων Scrubbers</b> .....	20
<b>3.3. Αξιολόγηση Συστημάτων Scrubbers (Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα)</b> .....	26
<b>3.4. Οικονομική Εκτίμηση Συστημάτων Scrubbers</b> .....	29
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	31
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	32
<b>ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ</b> .....	33
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b> .....	34

<b>A.1 Χημικές Αντιδράσεις σε Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Ανοιχτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers) .....</b>	<b>34</b>
<b>A.2 Χημικές Αντιδράσεις σε Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Κλειστού Κύκλου (Closed Wet Scrubbers) .....</b>	<b>34</b>
<b>A.3 Χημικές Αντιδράσεις σε Συστήματα Ξηρού Καθαρισμού (Dry Scrubbers).....</b>	<b>35</b>

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα τελευταία χρόνια δίνεται όλο και μεγαλύτερη έμφαση στις περιβαλλοντικές πτυχές των θαλάσσιων μεταφορών λόγω της αυξημένης ανησυχίας για τις εκπομπές των αέριων ρύπων που συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα να επιβληθούν αυστηρές διεθνείς προδιαγραφές για τις εκπομπές των καυσαερίων από τους ναυτικούς κινητήρες. Η παρούσα εργασία περιγράφει τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίων (Scrubbers), ενώ παράλληλα επιχειρείται μια αξιολόγηση των συστημάτων αυτών τόσο από τεχνολογικής όσο και από οικονομικής απόψεως.

## **ABSTRACT**

In recent years there has been an increasing emphasis on the environmental aspects of maritime transport due to increased concern about greenhouse gases that contribute to global warming. This had the effect of imposing strict international standards for exhaust emissions from marine engines. This paper describes the Gas Cleaning Systems (Scrubbers), while attempting an evaluation of these systems both technologically and economically.

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η ναυτιλία αποτελεί μια παγκόσμια βιομηχανία και οι επιβλαβείς εκπομπές που δημιουργούνται από τους κινητήρες των πλοίων επηρεάζουν πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Έτσι, η παγκόσμια θαλάσσια βιομηχανία έχει να αντιμετωπίσει σήμερα την πρόκληση της αυστηρότερης νομοθεσίας για τις εκπομπές αερίων ρύπων. Κατά συνέπεια, τα συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων των πλοίων αποτελούν σήμερα έναν κρίσιμο τομέα ο οποίος απασχολεί ιδιαίτερα τη ναυτική βιομηχανία αλλά και τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Αντικείμενο της παρούσης εργασίας αποτελούν συγκεκριμένα τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίων (Scrubbers).

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να αξιολογήσει τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίων (Scrubbers) που χρησιμοποιούνται σήμερα στη θαλάσσια βιομηχανία. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται συγκρίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίων (Scrubbers), ενώ τέλος πραγματοποιείται και μια οικονομική εκτίμηση των συστημάτων αυτών.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται γενικά στοιχεία σχετικά με τους κινητήρες των πλοίων, τα καύσιμα που χρησιμοποιούν αλλά και τις εκπομπές των ρύπων που προέρχονται από τους κινητήρες των πλοίων.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η Διεθνής Νομοθεσία και οι Κανονισμοί που ισχύουν σήμερα σχετικά με τους αέριους ρύπους των κινητήρων των πλοίων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι Κανονισμοί του Διεθνή Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization-IMO), της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee, MEPC) και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 3 της παρούσης εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίων (Scrubbers). Επίσης, πραγματοποιείται η αξιολόγηση των συστημάτων αυτών, ενώ τέλος, παρουσιάζεται μια οικονομική εκτίμηση.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ

## 1.1. Καύσιμα Κινητήρων Πλοίων

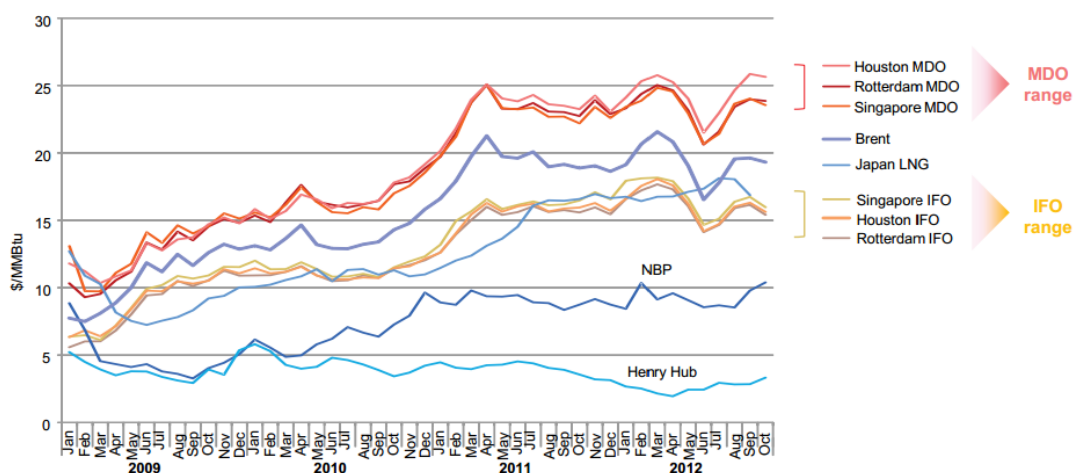
Τα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται στην ναυτική βιομηχανία αποτελούν κυρίως προϊόντα πετρελαίου. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι τα εξής (Townsend, 2008):

- **Heavy Fuel Oil (HFO):** αποτελεί ιστορικά τη λιγότερο δαπανηρή λύση και χρησιμοποιείται ευρέως στους εμβολοφόρους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας που κινούν πολλά από τα εμπορικά πλοία του κόσμου. Αν και το κόστος του καυσίμου είναι χαμηλό, η χρήση του HFO στους ναυτικούς κινητήρες απαιτεί ένα σύστημα καθαρισμού με σκοπό να αφαιρεθεί η περίσσεια προσμίξεων, καθώς και ένα σύστημα θέρμανσης για να μειώσει το ιξώδες για αποτελεσματική καύση. Η ενέργεια που απαιτείται για να παραδοθεί το καύσιμο στον κινητήρα έτοιμο για καύση είναι αρκετά υψηλό. Ο χώρος και το βάρος που απαιτείται για τα συστήματα θέρμανσης και καθαρισμού που συνδέονται με τη χρήση του HFO κάνουν τη χρήση αυτού του τύπου καυσίμου συμφέρουσα σε μικρότερα σκάφη. Τέλος, τα ολοένα αυξανόμενα πρότυπα εκπομπών ρύπων καθιστούν επίσης τη χρήση του HFO πιο δαπανηρή και λιγότερο πρακτική.
- **Marine Diesel Fuel/Marine Gas Oil:** τα καύσιμα αυτά αποτελούν μίγματα απεσταγμένου καυσίμου σε συνδυασμό με μικρές ποσότητες HFO. Έχουν χαμηλότερα επίπεδα περιεκτικότητας σε θείο από το HFO και έχουν καθαρότερη καύση. Αν και τα καύσιμα αυτά είναι πιο ακριβά, η εξάλειψη των εκτατικών συστημάτων θέρμανσης και καθαρισμού μπορεί να αντισταθμίσει το υψηλότερο κόστος

Ωστόσο, η ναυτική βιομηχανία τα τελευταία χρόνια έχει να αντιμετωπίσει – όπως θα εξετάσουμε αναλυτικά σε επόμενη ενότητα – μια πρόκληση από τη διεθνή νομοθεσία η οποία θα περιορίσει σημαντικά τις εκπομπές θείου από τα πλοία. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) αποτελεί μια πιθανή λύση για την

επίτευξη αυτών των απαιτήσεων καθώς δεν έχει σχεδόν καμία περιεκτικότητα σε θείο, και η καύση του παράγει χαμηλά NOx σε σύγκριση με το μαζούτ και το ντίζελ πλοίων (Adamchak & Adede, 2013).

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 1.1, το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο διαθέτει παράλληλα και ένα σαφές οικονομικό πλεονέκτημα το οποίο το καθιστά ως μια βιώσιμη εναλλακτική λύση καυσίμων.



**Εικόνα 1.1** Σύγκριση τιμών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) και Διαφόρων Κλασμάτων Πετρελαίου (Πηγή: Adamchak & Adede, 2013, σελ. 3).

## 1.2. Κινητήρες Πλοίων

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούν σήμερα στην ναυτική βιομηχανία διακρίνονται κυρίως σε Κινητήρες Πετρελαίου, Κινητήρες Φυσικού Αερίου και Κινητήρες Αεριοστρόβιλου (Gas Turbine). Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα τρία αυτά είδη ναυτικών κινητήρων.

### ➤ **Κινητήρες Πετρελαίου**

Ο πιο κοινός τύπος θαλάσσιας κινητήριας μηχανής είναι η παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης (όπως μια μηχανή diesel). Αυτός ο τύπος του κινητήρα χαρακτηρίζεται από την ταχεία καύση του αέρα και του καυσίμου μέσα σε ένα θάλαμο καύσης, απελευθερώνοντας ενέργεια που κινεί ένα έμβολο, δίδοντας γραμμική κίνηση που μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση

(Townsend, 2008). Οι κινητήρες αυτοί διακρίνονται συνήθως σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (Kristensen, 2012):

- Αργόστροφες δίχρονες μηχανές diesel (50 – 300 rpm)
- Μεσόστροφες τετράχρονες μηχανές diesel (300 – 1000 rpm)
- Υψηλόστροφες τετράχρονες μηχανές diesel (1000 – 3000 rpm)

Το σημαντικότερο ίσως πλεονέκτημα των παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης είναι η ευρεία αποδοχή και χρήση αυτού του τύπου κινητήρα στη θαλάσσια βιομηχανία. Οι υψηλοί αριθμοί παραγωγής μειώνουν το κόστος και προωθούν την αξιοπιστία. Ωστόσο, οι μηχανές αυτές δεν έχουν καλή αναλογία δύναμης προς βάρος αν και αυτό αντισταθμίζεται γενικά από το μεγαλύτερο εκτόπισμα του σκάφους (Townsend, 2008).

#### ➤ ***Κινητήρες Φυσικού Αερίου***

Το αυξημένο κόστος του πετρελαίου σε συνδυασμό με την αναγκαιότητα χρήσης φιλικότερων προς το περιβάλλον καυσίμων οδήγησαν στην αναζήτηση εναλλακτικών και καθαρότερων καυσίμων για την κίνηση των πλοίων. Η χρήση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου εμφανίζεται σήμερα κυρίως σε μεγάλα φορτηγά – πλοία μεγάλων αποστάσεων. Ωστόσο, σήμερα υπάρχουν λιγότερα από 50 πλοία παγκοσμίως που λειτουργούν με φυσικό αέριο, ενώ σχεδόν όλα λειτουργούν στη Νορβηγία, τη Βαλτική ή τη Βόρεια Θάλασσα (American Clean Skies Foundation, 2012).

Η τιμή του φυσικού αερίου σήμερα είναι σημαντικά χαμηλότερη από τα καύσιμα πετρελαίου. Το φυσικό αέριο έχει επίσης ελαφρώς υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας από τα υπόλοιπα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους ναυτικούς κινητήρες. Ωστόσο, το φυσικό αέριο παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στη μεταφορά, το χειρισμό και την αποθήκευση επί του σκάφους από ότι ένα υγρό καύσιμο και έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ενέργεια ανά όγκο από το πετρέλαιο. Το φυσικό αέριο μπορεί να αποθηκεύεται επί του σκάφους ως ένα υψηλής πίεσης πεπιεσμένου αέριο (Compressed Natural Gas



– CNG) ή ως κρυογονικό υγρό (Liquefied Natural Gas – LNG) (American Clean Skies Foundation, 2012).

Σήμερα υπάρχουν τρεις τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στους ναυτικούς κινητήρες φυσικού αερίου: (1) ανάφλεξη σπινθήρα φτωχού μίγματος (spark – ignited lean – burn), (2) διπλού καυσίμου diesel πιλοτικής ανάφλεξης με έγχυση χαμηλής πίεσης αερίου (dual – fuel diesel pilot ignition with low – pressure gas injection) και (3) διπλού καυσίμου diesel πιλοτικής ανάφλεξης με έγχυση υψηλής πίεσης αερίου (dual – fuel diesel pilot ignition with high – pressure gas injection). Οι κινητήρες της πρώτης κατηγορίας (ανάφλεξης σπινθήρα) λειτουργούν αποκλειστικά με φυσικό αέριο, ενώ οι κινητήρες των άλλων κατηγοριών λειτουργούν με diesel και φυσικό αέριο (American Clean Skies Foundation, 2012).

#### ➤ ***Κινητήρες Αεριοστρόβιλου (Gas Turbine)***

Οι αεριοστρόβιλοι βρίσκουν σήμερα σημαντική εφαρμογή στους ναυτικούς κινητήρες εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν έναντι των θερμικών κινητήρων. Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα των αεριοστρόβιλων είναι τα εξής (Troitsky, 2009):

- Καλύτερο βάρος και διαστάσεις
- Απουσία συστήματος ψύξης
- Απλή κατασκευή
- Καλά χαρακτηριστικά εκκίνησης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική μελέτη που διενήργησε ο Koehler (2000) μεταξύ των ναυτικών κινητήρων πετρελαίου και των κινητήρων αεριοστρόβιλου (Gas Turbine). Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα κυριότερα χαρακτηριστικά των δύο ανωτέρω κινητήρων (πετρελαίου και αεριοστρόβιλου) σύμφωνα με την εν λόγω μελέτη.

Οι κινητήρες αεριοστρόβιλων είναι γνωστό ότι καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και βάρος από ότι οι κινητήρες πετρελαίου. Το μέγεθος και η βαριά μάζα του

κινητήρα Diesel αποτελούν αναμφισβήτητο μειονέκτημα σε πολλές εφαρμογές (Koehler, 2000).

Ωστόσο, σε αντίθεση με το βάρος και το μέγεθος, το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης είναι χαμηλότερα στους κινητήρες Diesel από ότι στους κινητήρες αεριοστρόβιλου (Koehler, 2000).

Από τα στοιχεία του Πίνακα 1.1 παρατηρούμε επίσης, ότι οι κινητήρες πετρελαίου διαθέτουν επιπλέον οφέλη, όπως τα χαμηλότερα ποσοστά κατανάλωσης καυσίμων σε όλα τα φορτία και ως εκ τούτου, χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και την καλύτερη αποδοχή του φορτίου, καθώς και ταχύτερη εκκίνηση μετά από μια στάση (Koehler, 2000).

**Πίνακας 1.1** Σύγκριση ναυτικών κινητήρων Diesel και Αεριοστρόβιλου<sup>1</sup> (Πηγή: μετάφραση από Koehler, 2000, σελ. 3)

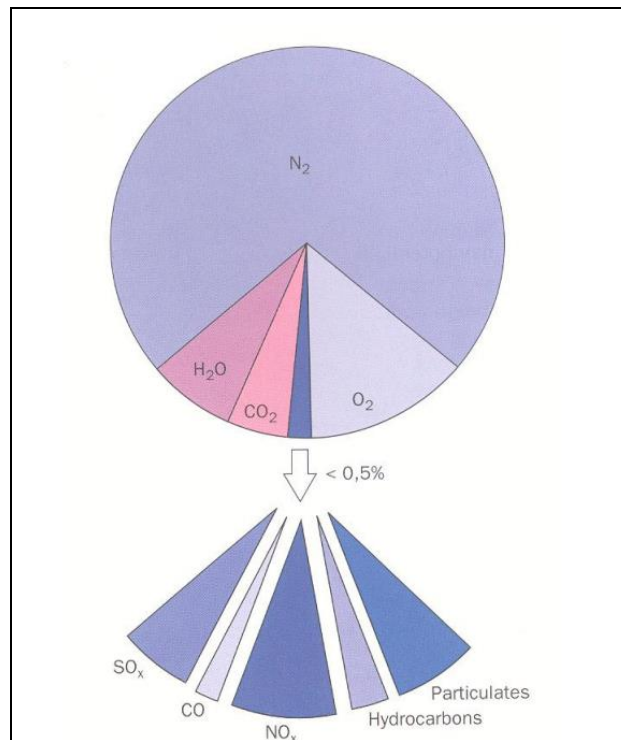
Κριτήριο	Κινητήρας Diesel	Κινητήρας Αεριοστρόβιλου
Βάρος και μέγεθος		✓
Αρχικό κόστος	✓	
Κόστος επισκευής	✓	
Κατανάλωση καυσίμου	✓	
Heavy Fuel Oil (HFO) ικανότητα	✓	
Λειτουργία σε μέσο φορτίο (part load)	✓	
Ανταπόκριση μετάβασης	✓	
Θόρυβος κατασκευής		✓
Θόρυβος αέρα		✓
Κατανάλωση L.O.		✓
Εκπομπές NO <sub>x</sub>		✓
Εκπομπές SO <sub>x</sub>		✓
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	✓	
Συνθήκες περιβάλλοντος	✓	

<sup>1</sup> Στον Πίνακα 1.1 σημειώνεται σε κάθε κριτήριο ο κινητήρας ο οποίος πλεονεκτεί ως προς το συγκεκριμένο κριτήριο.

### 1.3. Εκπομπές Ρύπων Κινητήρων Πλοίων

Οι εκπομπές αερίων ρύπων και σωματιδίων από τους κινητήρες των πλοίων συμβάλλουν σημαντικά στις συνολικές εκπομπές του τομέα των μεταφορών. Συγκεκριμένα, η ναυτική βιομηχανία παράγει ένα ιδιαίτερα μεγάλο φάσμα εκπομπών ρύπων, με κυριότερους το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), τις Πτητικές Οργανικές Ενώσεις ( $\text{VOC}$ ), το διοξείδιο του Θείου ( $\text{SO}_2$ ), τον μαύρο άνθρακα ( $\text{BC}$ ) και τα σωματίδια οργανικής ύλης ( $\text{POM}$ ) (Eyring et al. 2007).

Πιο αναλυτικά, στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζονται οι ρύποι από την ναυτιλιακή δραστηριότητα και συγκεκριμένα από τους ναυτικούς κινητήρες που λειτουργούν με πετρέλαιο.



**Εικόνα 1.2** Σύνθεση των εκπομπών ρύπων ναυτικών κινητήρων (Πηγή: Kristensen, 2012, σελ.5).

Όσον αφορά συγκεκριμένα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), αυτές εξαρτώνται από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιεί ο ναυτικός κινητήρας. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές ανάλογα με το καύσιμο διαμορφώνονται ως εξής (Kristensen, 2012):

- **Heavy Fuel Oil (HFO):** 3.114 ton ανά ton πετρελαίου
- **Light Fuel Oil (LFO):** 3.151 ton ανά ton πετρελαίου
- **Diesel Oil/Gas Oil (DO/GO):** 3.206 ton ανά ton πετρελαίου
- **Liquefied Natural Gas (LNG):** 2.750 ton ανά ton αερίου

Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) είναι ανάλογες με την κατανάλωση πετρελαίου και την περιεκτικότητα του θείου στο πετρέλαιο σύμφωνα με την ακόλουθη θεωρητική εξίσωση ρυθμού ειδικής εκπομπής (Kristensen, 2012):

$$21 \times \%S \text{ kg SO}_2 \text{ ανά ton καυσίμου}$$

Όπου S είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο.

Είναι φανερό ότι όσο χαμηλότερη η περιεκτικότητα σε θείο τόσο χαμηλότερος είναι και ο ειδικός ρυθμός εκπομπής SO<sub>2</sub>, γεγονός το οποίο αποτελεί τον λόγο για τον οποίο επιβάλλονται όλο και πιο αυστηρές απαιτήσεις για χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο στα καύσιμα των ναυτικών κινητήρων (Kristensen, 2012).

Οι εκπομπές SO<sub>2</sub> μπορούν να μειωθούν είτε με τη χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, γεγονός που καθιστά το καύσιμο πιο ακριβά, είτε με τη χρήση Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber), τα οποία θα εξεταστούν αναλυτικά σε επόμενη ενότητα (Kristensen, 2012).

Το ποσοστό των εκπομπών NO<sub>x</sub> στους ναυτικούς κινητήρες εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ένας εκ των οποίων είναι ο τύπος του κινητήρα. Ένας άλλος παράγοντας είναι ο τύπος του καυσίμου. Επίσης, οι κινητήρες χαμηλών ταχυτήτων έχουν γενικά υψηλότερες εκπομπές NO<sub>x</sub> σε σχέση με τους κινητήρες μέσης ταχύτητας (Kristensen, 2012).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ότι δίνεται όλο και μεγαλύτερη έμφαση στις εκπομπές NO<sub>x</sub> (όπως και για τις εκπομπές SO<sub>x</sub>) και οι κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων βρίσκονται ακόμα σε διαδικασία βελτίωσης της απόδοσης του κινητήρα για τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Αρκετές μέθοδοι έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί και εξακολουθούν να αναπτύσσονται. Οι δύο πιο πολλά υποσχόμενες μέθοδοι είναι η μέθοδος Επανακυκλοφορίας Καυσαερίων

(Exhaust Gas Recirculation – EGR) και η μέθοδος της Επιλεκτικής Καταλυτικής Αναγωγής (Selective Catalytic Reduction – SCR) (Kristensen, 2012).

Όσον αφορά στην εκπομπή μικροσωματιδίων, έχει αποδειχθεί ότι αυτή επηρεάζεται ιδιαίτερα από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Συγκεκριμένα, η σχέση που τα συνδέει είναι η εξής (Kristensen, 2012):

$$\text{Εκπομπή σωματιδίων σε g/kWh} = 0.26 + 0.081 \cdot S + 0.103 \cdot S^2$$

Όπου S είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο.

Τέλος, οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και υδρογονανθράκων (HC) παρουσιάζουν αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις, ανάλογα με το φορτίο του κινητήρα. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι εκπομπές CO και HC για έναν δίχρονο και έναν τετράχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel.

**Πίνακας 1.2** Εκπομπές CO και HC για έναν δίχρονο και έναν τετράχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel (Πηγή: Kristensen, 2012, σελ. 17)

Κινητήρας	Εκπομπές HC (g/kWh)	Εκπομπές CO (g/kWh)
Δίχρονος Κινητήρας Diesel	0,5	0,35
Τετράχρονος Κινητήρας Diesel	0,5	0,5

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ - ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ**

### **2.1. Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO)**

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO) αποτελεί έναν οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών του οποίου ο σκοπός είναι (μετάφραση από I.M.O., 2012, σελ.3): *«να παρέχει το μηχανισμό συνεργασίας μεταξύ των κυβερνήσεων στον τομέα των κυβερνητικών ρυθμίσεων και πρακτικών που αφορούν τεχνικά θέματα όλων των ειδών που επηρεάζουν τη ναυτιλία η οποία δραστηριοποιείται στο διεθνές εμπόριο, να ενθαρρύνει και να διευκολύνει τη γενική υιοθέτηση των υψηλότερων πρακτικά προτύπων σε θέματα που αφορούν την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, την αποτελεσματικότητα της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη και τον έλεγχο της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία και να ασχολείται με τα διοικητικά και νομικά ζητήματα που σχετίζονται με τους αντίστοιχους σκοπούς».*

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας εξέδωσε το 1973 τη Διεθνή Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships). Η εν λόγω σύμβαση, όπως τροποποιήθηκε από το Πρωτόκολλο του 1978 (MARPOL 73/78), εφαρμόζεται σε όλα τα πλοία οποιουδήποτε τύπου τα οποία λειτουργούν στη θάλασσα. Καλύπτει όλες τις πτυχές της εσκεμμένης ρύπανσης των πλοίων από πετρέλαιο (Annex I), επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται χύδην (Annex II), ή σε συσκευασμένη μορφή (Annex III), λύματα (Annex IV), και απόβλητα (Annex V) (Edwards & Rymarz, 1990).

Η σύμβαση MARPOL τροποποιήθηκε από το « Πρωτόκολλο του 1997», το οποίο περιλαμβάνει το Annex VI με τίτλο: «Κανονισμοί για την Πρόληψη της Ρύπανσης του Αέρα από τα Πλοία». Στο παράρτημα αυτό τέθηκαν όρια όσον αφορά στις εκπομπές οξειδίων του Αζώτου (NO<sub>x</sub>) και του Θείου (SO<sub>x</sub>) από τα καυσαέρια των πλοίων και απαγορεύει κάθε σκόπιμη εκπομπή ουσιών που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος (I.P.I.E.C.A., 2007).

Το MARPOL 93/97 Annex VI επικυρώθηκε το 2004, και τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005. Ο Κανονισμός 13 Annex VI ισχύει για τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου, και ο Κανονισμός 14 ισχύει για τις εκπομπές των οξειδίων του θείου. Το τελευταίο ορίζει ένα παγκόσμιο «ανώτατο όριο» περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο (δηλαδή την ποσότητα του θείου που επιτρέπεται στα καύσιμα για χρήση στη ναυτιλία) της τάξεως του 4,5 τοις εκατό m / m και τη δημιουργία κάποιων καθορισμένων περιοχών ελέγχου εκπομπών οξειδίων του θείου (SOx Emission Control Areas), στις οποίες το αντίστοιχο όριο είναι 1,5 τοις εκατό m / m (I.P.I.E.C.A., 2007).

Οι τροποποιήσεις του Annex VI που υιοθετήθηκαν το 2008 εισήγαγαν νέες απαιτήσεις για την ποιότητα των καυσίμων, με αφετηρία τον Ιούλιο του 2010, για τις εκπομπές οξειδίων του Αζώτου για τις καινούριες μηχανές και τις μηχανές που είχαν κατασκευαστεί πριν το 2000 (Κουγιουμπζόγλου, 2013).

Οι κυριότερες αλλαγές που εισήχθησαν στο Annex VI της MARPOL για τη ρύπανση από SO<sub>2</sub> είναι οι εξής (Simons, 2012):

- Η μείωση των ορίων που ισχύουν για την περιεκτικότητα σε θείο όλων των καυσίμων πλοίων στις Περιοχές Ελέγχου των Εκπομπών Θείου (ΠΕΕΘ) από 1,5% κατά βάρος σε 1,0% από την 1η Ιουλίου 2010 και 0,10% από την 1η Ιανουαρίου 2015.
- Η μείωση των ορίων που ισχύουν για την περιεκτικότητα σε θείο όλων των καυσίμων πλοίων εκτός Περιοχών Ελέγχου των Εκπομπών Θείου (ΠΕΕΘ) από 4,5% κατά βάρος σε 3,5% από τον Ιανουάριο του 2012 και σε 0,50% από τον Ιανουάριο του 2020, με την επιφύλαξη αναθεώρησης το 2018 και με πιθανή αναβολή έως το 2025.
- Η έγκριση της χρήσης ενός εκτενούς φάσματος μεθόδων μείωσης των εκπομπών (ισοδύναμων επιλογών), όπως εξοπλισμός, μέθοδοι, διαδικασίες ή εναλλακτικά καύσιμα.

## **2.2. Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee, MEPC)**

Η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee, MEPC) αποτελεί ένα συμβούλιο που ανήκει διοικητικά στον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO). Η επιτροπή αυτή συνεδριάζει κάθε εννέα μήνες με σκοπό την έκδοση των αναθεωρημένων κανονισμών που αφορούν στην προστασία του περιβάλλοντος από την ναυτιλιακή δραστηριότητα (Κουγιουμτζόγλου, 2013).

Η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) πραγματοποίησε την 66<sup>η</sup> συνεδρίαση της τον Απρίλιο του 2014, στην έδρα του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας στο Λονδίνο. Η Επιτροπή ενέκρινε τροποποιήσεις της Σύμβασης MARPOL με σκοπό να ορισθεί η ημερομηνία για την εφαρμογή των «Tier III» προτύπων στις περιοχές ελέγχου των εκπομπών (emission control areas – ECAs) ενώ παράλληλα αποφασίσθηκε το πρόγραμμα ελέγχων των κρατών μελών του IMO να καταστεί υποχρεωτικό. Επίσης, αξιολογήθηκαν οι περιβαλλοντικές διατάξεις στο σχέδιο Polar Code και οι σχετικές τροποποιήσεις του σχεδίου έτσι ώστε να καταστήσει τον κώδικα υποχρεωτικό, και συζητήθηκε η εφαρμογή των κανονισμών ενεργειακής απόδοσης και των Ballast Water Management και Ship Recycling Conventions (International Maritime Organization, <http://www.imo.org/>).

Η MEPC υιοθέτησε τροποποιήσεις στο Annex VI της MARPOL, του άρθρου 13, για τα οξειδία του αζώτου (NOx), σχετικά με την ημερομηνία για την εφαρμογή των προτύπων «Tier III» στις περιοχές ελέγχου των εκπομπών. Οι τροποποιήσεις προβλέπουν τα πρότυπα NOx Tier III να εφαρμοστούν στους θαλάσσιους κινητήρες ντίζελ που είναι εγκατεστημένοι σε ένα πλοίο που έχει κατασκευαστεί μετά την 1η Ιανουαρίου 2016 και η οποία λειτουργεί στην αμερικανική περιοχή ελέγχου των εκπομπών Βόρεια ή την Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών της Καραϊβικής Θάλασσας, που όπως έχουν ορισθεί για τον έλεγχο των εκπομπών NOx (International Maritime Organization, <http://www.imo.org/>).



Επίσης, η ΜΕΡC θεώρησε το χρονοδιάγραμμα για την αναθεώρηση, που απαιτείται βάσει του παραρτήματος VI της ΜΑRΡΟL, ρύθμιση 14.8, για τον έλεγχο των εκπομπών οξειδίων του θείου (SOX) από τα πλοία, για να πληρούν τις απαιτήσεις που ορίζονται στον κανονισμό. Η Επιτροπή συμφώνησε να συγκροτήσει μια ομάδα για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της συμμόρφωσης του πετρελαίου με το πρότυπο καύσιμο πετρέλαιο που καθορίζεται στον κανονισμό 14.1.3 του παραρτήματος VI της ΜΑRΡΟL. Η ομάδα θα υποβάλει έκθεση προόδου για την ΜΕΡC 67, με σκοπό την έγκριση των όρων αναφοράς της μελέτης στην ΜΕΡC 68 το 2015 (International Maritime Organization, <http://www.imo.org/>).

### **2.3. Ευρωπαϊκή Ένωση**

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με την Οδηγία 1999/32/ΕΚ (όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 2005/33/ΕΚ) ρυθμίζει την περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις θαλάσσιες μεταφορές και ενσωματώνει στο δίκαιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης ορισμένους διεθνείς κανόνες που έχουν συμφωνηθεί στο πλαίσιο του Διεθνή Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (Simons, 2012).

Στην τρέχουσα μορφή της, η εν λόγω οδηγία περιλαμβάνει αυστηρότερες διατάξεις σχετικά με την περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων πλοίων που χρησιμοποιούνται σε περιοχές που απαιτούν ιδιαίτερη προστασία του περιβάλλοντος, κυρίως στις περιοχές ελέγχου των εκπομπών θείου (ΠΕΕΘ) (Simons, 2012).

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνοχή με το διεθνές δίκαιο, καθώς και η εφαρμογή στην Ευρωπαϊκή Ένωση των νέων παγκόσμιων προτύπων για το θείο, οι διατάξεις της οδηγίας 1999/32/ΕΚ θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με το αναθεωρημένο Παράρτημα VI της ΜΑRΡΟL. Συγκεκριμένα θα πρέπει να υλοποιηθούν τα εξής (Simons, 2012):

- Ενσωμάτωση στην οδηγία των τροποποιήσεων του παραρτήματος VI της ΜΑRΡΟL του 2008 όσον αφορά την περιεκτικότητα των καυσίμων πλοίων σε θείο.

- Ευθυγράμμιση της οδηγίας με τις διατάξεις του Διεθνή Οργανισμού Ναυσιπλοΐας που επιτρέπουν ένα ευρύ φάσμα ισοδύναμων μεθόδων μείωσης των εκπομπών. Προσθήκη στις διατάξεις αυτές πρόσθετων εγγυήσεων για να διασφαλιστεί ότι οι ισοδύναμες μέθοδοι μείωσης των εκπομπών δεν θα έχουν απαράδεκτες επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Καθορισμός της διαδικασίας ελέγχου του Διεθνή Οργανισμού Ναυσιπλοΐας για τα καύσιμα.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προτείνει επίσης τα ακόλουθα πρόσθετα μέτρα (Simons, 2012):

- Καθιέρωση ορίου περιεκτικότητας σε θείο 0,1%, από το 2020, για τα επιβατηγά πλοία που δραστηριοποιούνται εκτός ΠΕΕΘ.
- Ανάπτυξη μη δεσμευτικής κατευθυντήριας γραμμής για τη δειγματοληψία και την υποβολή εκθέσεων. Αν αυτό δεν φέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, πρέπει να εξεταστεί η θέσπιση δεσμευτικών κανόνων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΠΛΟΙΟΥ – SCRUBBERS**

### **3.1. Περιγραφή Συστημάτων Scrubbers**

Για να μπορέσουν να ανταποκριθούν στα όρια εκπομπής οξειδίων του θείου ( $SO_x$ ), οι φορείς εκμετάλλευσης των πλοίων σήμερα έχουν δύο βασικές επιλογές: τη χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο ή τη χρήση ενός Συστήματος Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber). Η επιλογή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του κόστους των συμμορφούμενων καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, τις κεφαλαιακές δαπάνες και τις λειτουργικές δαπάνες από τον  $SO_x$  – Scrubber, αλλά και το χρονικό διάστημα που το πλοίο αναμένεται να περάσει μέσα από μια περιοχή ECA –  $SO_x$  (Lloyd's Register, 2012).

Τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) αποτελούν συστήματα ελέγχου / αποτροπής της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, τα οποία χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν μια σημαντική ποσότητα των σωματιδίων ή / και των αερίων που προκαλούν ρύπανση του περιβάλλοντος ή ανθρώπινες ασθένειες. Η αφαίρεση αυτή πραγματοποιείται είτε με φυσικό είτε με χημικό τρόπο. Ο διεθνής όρος που χρησιμοποιείται για τα συστήματα αυτά είναι ο όρος «Scrubber», ο οποίος προέρχεται από την αγγλική λέξη «Scrub» που σημαίνει «Τρίβω» (Κουγιουμτζόγλου, 2013).

Ο σημαντικότερος σκοπός της χρήσης των Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) είναι η απομάκρυνση του διοξειδίου του θείου ( $SO_2$ ) από τα καυσαέρια. Σε αυτήν την περίπτωση τα συστήματα αυτά συχνά καλούνται και Συσκευές Αποθείωσης Καυσαερίων (flue gas desulfurization – FGD) (Κουγιουμτζόγλου, 2013).

Με τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) υπάρχει δυνατότητα μείωσης των εκπομπών θείου κατά 98%, δηλαδή σε ένα επίπεδο τόσο χαμηλό όπως εάν χρησιμοποιηθεί καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο φρέσκο νερό

αναμεμιγμένο με καυστική σόδα (NaOH) όσο και θαλασσινό νερό (Kristensen, 2012).

Τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubber) μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές SO<sub>x</sub> και αιωρούμενων σωματιδίων με μικρή αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως για τις αντλίες που χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του νερού (Kristensen, 2012).

Στην πράξη, η διαδικασία καθαρισμού μπορεί να περιέχει διάφορα στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, μειώνεται η θερμότητα των καυσαερίων στους 160 – 180 °C σε ένα εξοικονομητή καυσαερίων. Στο δεύτερο βήμα, το καυσαέριο κατεργάζεται με ένα ειδικό εκτοξευτήρα όπου ψύχεται περαιτέρω με έγχυση νερού και απομακρύνονται η πλειονότητα των σωματιδίων αιθάλης στα καυσαέρια. Κατά το τρίτο στάδιο, το καυσαέριο οδηγείται μέσω ενός αγωγού απορρόφησης, όπου ψεκάζεται με νερό και ως εκ τούτου, καθαρίζεται από το υπόλοιπο διοξείδιο του θείου. Νερό και θείο αντιδρούν για να σχηματίσουν θειικό οξύ, το οποίο εξουδετερώνεται από αλκαλικά συστατικά που βρίσκονται στο θαλασσινό νερό. Στη συνέχεια ειδικά φίλτρα διαχωρίζουν τα σωματίδια από το μίγμα, πριν να οδηγηθεί το καθαρισμένο νερό πίσω στη θάλασσα. Τα στερεά σωματίδια απομακρύνονται από τα αέρια που είναι παγιδευμένα σε μια δεξαμενή καθίζησης ή λάσπης και συλλέγονται για διάθεση στην ξηρά (Kristensen, 2012).

### **3.2. Τύποι Συστημάτων Scrubbers**

Οι βασικοί τύποι Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Scrubbers) είναι τα Συστήματα Υγρού Καθαρισμού (Wet Scrubbers), τα οποία διαχωρίζονται σε Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers), Συστήματα Κλειστού Κύκλου (Closed Wet Scrubbers) και Υβριδικά Συστήματα (Hybrid Wet Scrubbers), και τα Ξηρά Συστήματα Καθαρισμού (Dry Scrubbers). Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι εν λόγω τύποι Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου.

### ➤ **Συστήματα Υγρού Καθαρισμού (Wet Scrubbers)**

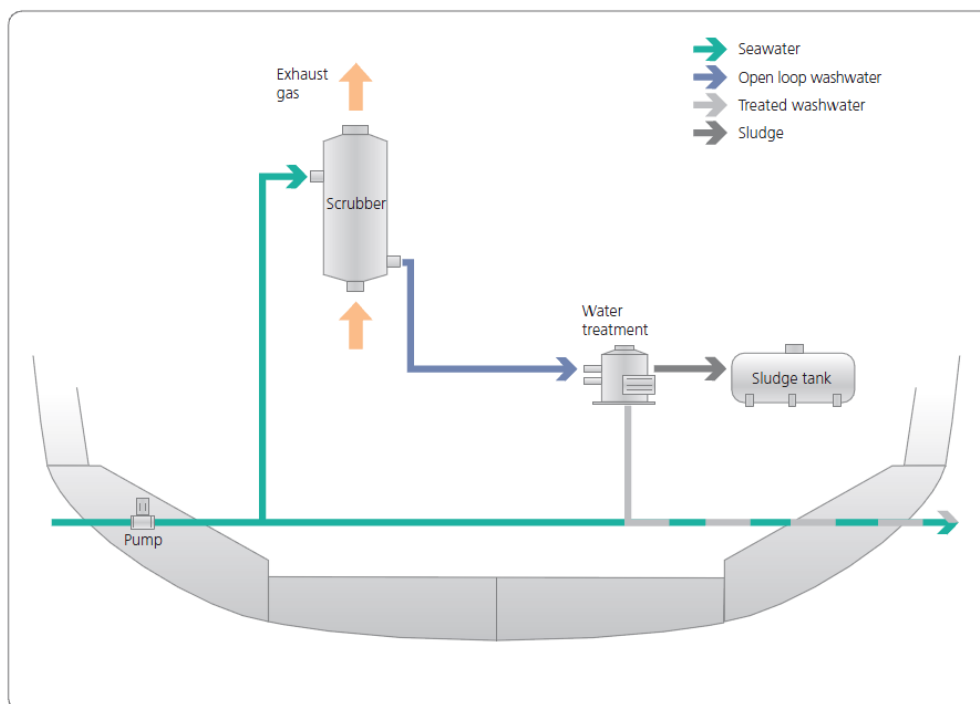
Τα Συστήματα Υγρού Καθαρισμού (Wet Scrubbers) αποτελούν μια απλή και αποτελεσματική τεχνολογία απομάκρυνσης των οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) η οποία χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές για πολλά χρόνια. Τα Συστήματα Υγρού Καθαρισμού (Wet Scrubbers) σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν τα ακόλουθα στοιχεία (Lloyd's Register, 2012):

1. Μονάδα Scrubber: ένα σκάφος ή μια σειρά από στενά συζευγμένα συστατικά, τα οποία φέρνουν το νερό σε στενή επαφή με το καυσαέριο από μία ή περισσότερες μονάδες καύσης. Η μονάδα είναι τυπικά τοποθετημένη ψηλά στο πλοίο μέσα ή γύρω από τη χοάνη.
2. Μονάδα επεξεργασίας για την προετοιμασία του νερού πλύσης.
3. Εγκατάσταση επεξεργασίας καταλοίπων της ιλύος που διαχωρίζεται από το νερό πλύσης.
4. Σύστημα ελέγχου του καθαρισμού και των εκπομπών

Τα Συστήματα Υγρού Καθαρισμού διακρίνονται σε Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers), Συστήματα Κλειστού Κύκλου (Closed Wet Scrubbers) και Υβριδικά Συστήματα (Hybrid Wet Scrubbers).

### ➤ **Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Ανοιχτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers)**

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται σχηματικά ένα Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου Ανοιχτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers).



**Εικόνα 3.1** Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου Ανοιχτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers) (Πηγή: Lloyd's Register, 2012, σελ. 15).

Στην Εικόνα 3.1 παρατηρούμε ότι αντλείται νερό από την θάλασσα το οποίο οδηγείται στον Scrubber, καθαρίζεται και στη συνέχεια απορρίπτεται πάλι στη θάλασσα. Το νερό πλύσης δεν ανακυκλώνεται. Ο ρυθμός ροής του νερού πλύσης σε συστήματα ανοικτού κύκλου είναι συνήθως περίπου  $45\text{m}^3 / \text{MWh}$  (Lloyd's Register, 2012).

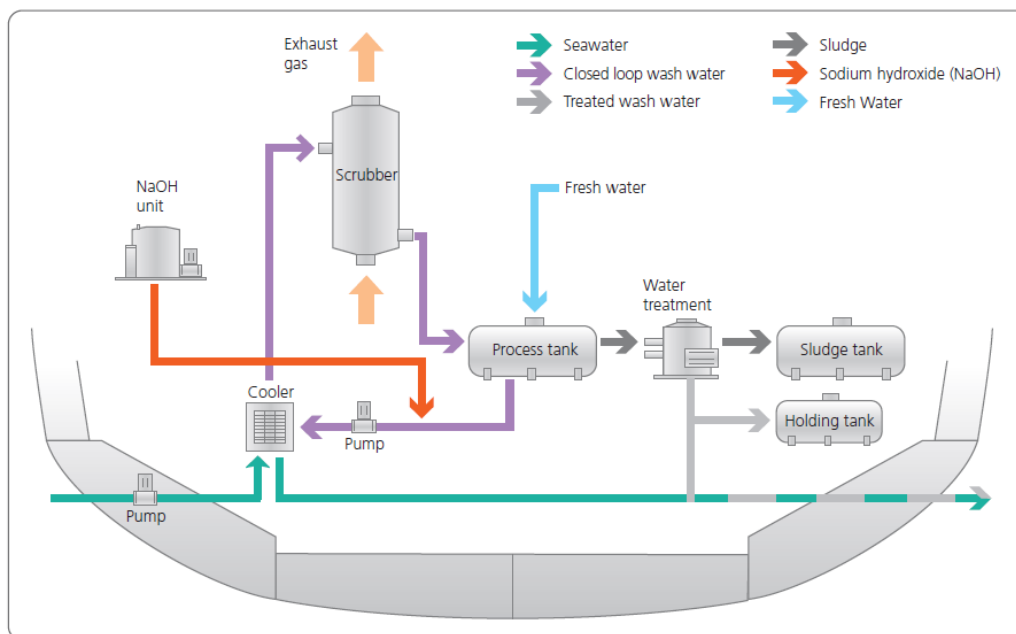
Συνήθως αναμένεται ένας ρυθμός αφαίρεσης  $\text{SO}_x$  κοντά στο 98%, δηλαδή μετά τον καθαρισμό οι εκπομπές από ένα καύσιμο με περιεκτικότητα 3,50% σε θείο θα είναι ισοδύναμες αυτών ενός καυσίμου με περιεκτικότητα 0,10% σε θείο (Lloyd's Register, 2012).

Λεπτομέρειες σχετικά με τις χημικές αντιδράσεις που συντελούνται παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.1.

➤ **Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Κλειστού Κύκλου (Closed Wet Scrubbers)**

Όλα τα Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Κλειστού Κύκλου που χρησιμοποιούνται στους ναυτικούς κινητήρες χρησιμοποιούν φρέσκο νερό το οποίο περιέχει με Υδροξείδιο του Νατρίου ( $\text{NaOH}$ ) ως μέσο καθαρισμού. Αυτό

έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των SO<sub>x</sub> από το ρεύμα των καυσαερίων ως θειικό νάτριο. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 3.2, σε αντίθεση με τα Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου, το νερού πλύσης από ένα Σύστημα Κλειστού Κύκλου διέρχεται σε μια δεξαμενή διεργασίας όπου καθαρίζεται προτού επανακυκλοφορήσει (Lloyd's Register, 2012).



**Εικόνα 3.2** Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου Κλειστού Κύκλου (Closed Wet Scrubbers) (Πηγή: Lloyd's Register, 2012, σελ. 18).

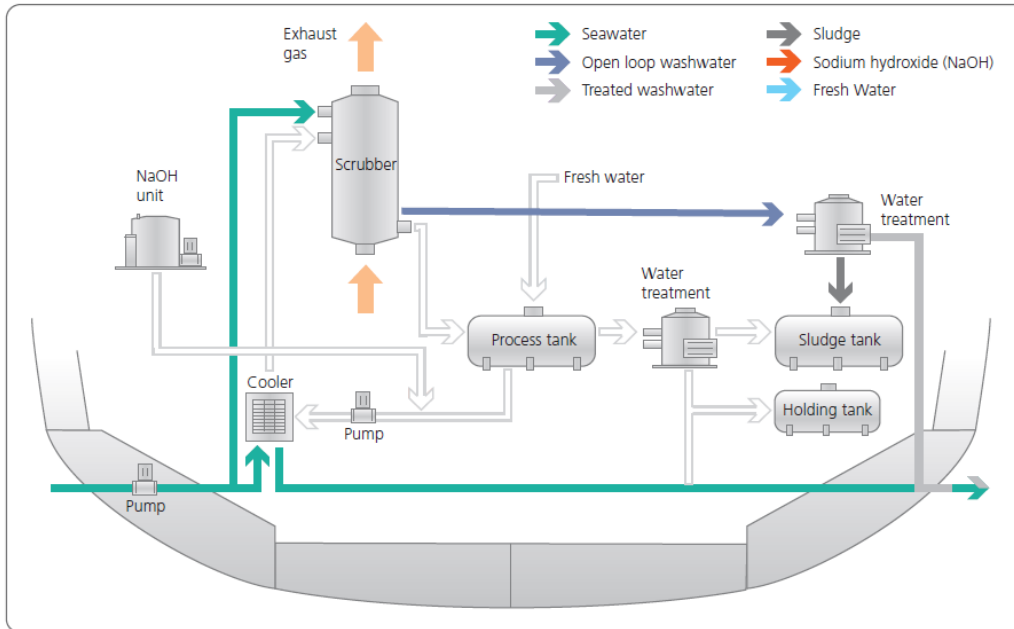
Ο έλεγχος του pH με τη βοήθεια του υδροξειδίου του νατρίου επιτρέπει το ρυθμό κυκλοφορίας του νερού πλύσης και, επομένως, η κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου η μισή σε σύγκριση με τα Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου, ενώ κυμαίνεται σε περίπου 20 m<sup>3</sup>/MWh και μεταξύ 0,5 έως 1% της δύναμης του κινητήρα που καθαρίζεται (Lloyd's Register, 2012).

Λεπτομέρειες σχετικά με τις χημικές αντιδράσεις που συντελούνται παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.2.

#### ➤ **Υβριδικά Συστήματα Καθαρισμού (Hybrid Wet Scrubbers).**

Τα Υβριδικά Συστήματα Καθαρισμού μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε κατάσταση Ανοιχτού Κύκλου είτε σε κατάσταση Κλειστού Κύκλου, όπως αυτά περιγράφηκαν ανωτέρω. Αυτό παρέχει την ευελιξία στο σύστημα να λειτουργεί σε λειτουργία κλειστού κύκλου, όταν η αλκαλικότητα του νερού

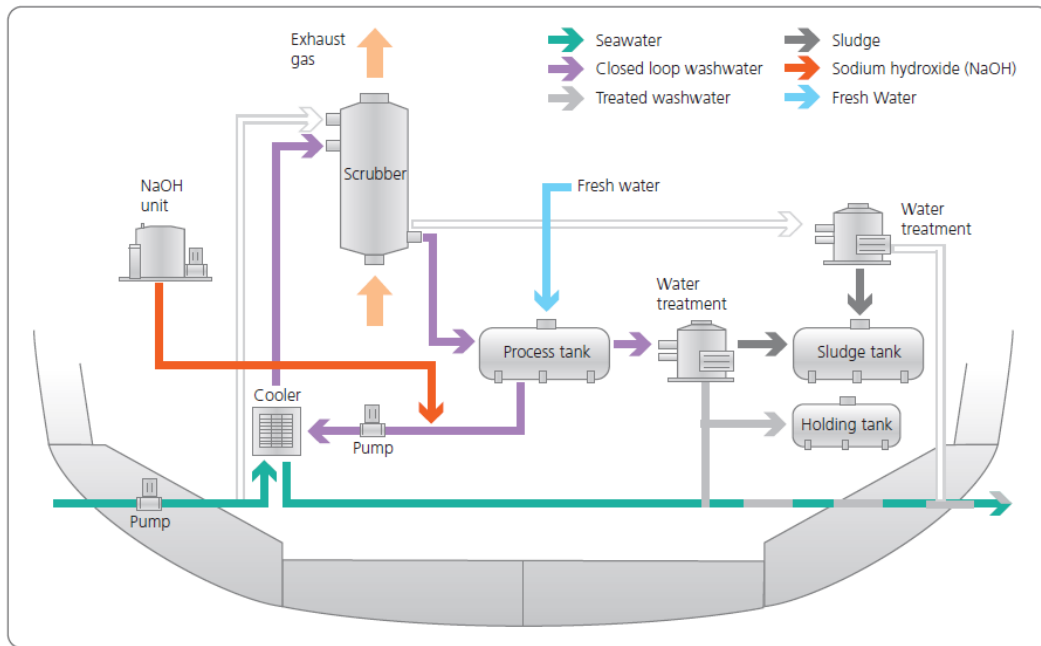
είναι ανεπαρκής ή όταν υπάρχει ιδιαίτερη ευαισθησία σχετικά με τη ρύθμιση ή την εκκένωση του νερού πλύσης, και σε κατάσταση ανοικτού κύκλου, χωρίς να καταναλώνεται υδροξείδιο του νατρίου σε όλες τις άλλες περιπτώσεις (Lloyd's Register, 2012).



**Εικόνα 3.3** Υβριδικό Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου σε λειτουργία Ανοικτού Κύκλου (Πηγή: Lloyd's Register, 2012, σελ. 19).

Ωστόσο, τα Υβριδικά Συστήματα είναι, περισσότερο πολύπλοκα από ό, τι τα Συστήματα Ανοικτού ή Κλειστού Κύκλου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα διαγράμματα των Εικόνων 3.3 και 3.4, όπου παρουσιάζεται η διάταξη ενός τυπικού υβριδικού συστήματος σε ανοικτή και κλειστή λειτουργία αντίστοιχα.





**Εικόνα 3.4** Υβριδικό Σύστημα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου σε λειτουργία Κλειστού Κύκλου (Πηγή: Lloyd's Register, 2012, σελ. 19).

### ➤ **Συστήματα Ξηρού Καθαρισμού (Dry Scrubbers)**

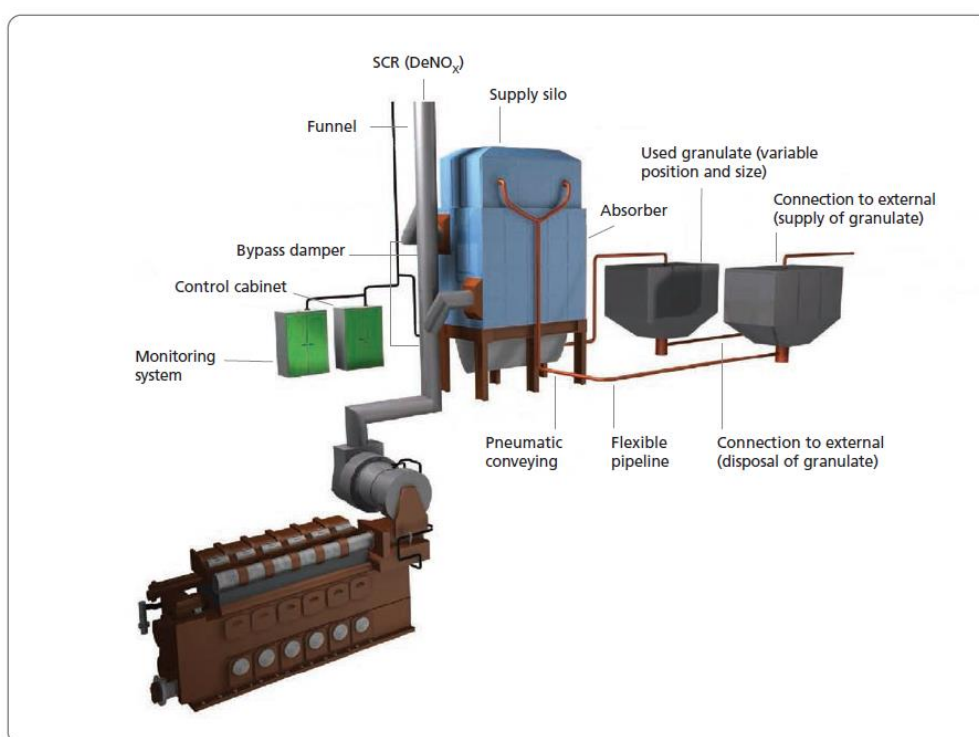
Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται ένα τυπικό Σύστημα Ξηρού Καθαρισμού (Dry Scrubbers), όπου διακρίνονται τα εξής βασικά στοιχεία (Lloyd's Register, 2012):

1. Μονάδα Scrubber: πρόκειται για έναν «απορροφητή», ο οποίος φέρνει τα καυσαέρια από μία ή περισσότερες μονάδες καύσης σε επαφή με κόκκους υδροξειδίου του ασβεστίου.
2. Σιλό τροφοδοσίας κόκκων και κοχλιωτός μεταφορέα εκκένωσης, τοποθετημένα στο επάνω και κάτω μέρος του απορροφητή, αντίστοιχα. Ένα πνευματικό σύστημα μεταφοράς επιτρέπει στους κόκκους να μεταφέρονται από προς την ενσωματωμένη εγκατάσταση αποθήκευσης. Η χρήση εύκαμπτων σωληνώσεων διευκολύνει την αποθήκευση των κόκκων σε διάφορες θέσεις επί του σκάφους.
3. Σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης του Scrubber και των εκπομπών.

Τα Συστήματα Ξηρού Καθαρισμού συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασίες καυσαερίων μεταξύ 240 °C και 450 °C. Οι κόκκοι του υδροξειδίου του ασβεστίου έχουν διάμετρο μεταξύ 2 και 8 mm με μία πολύ υψηλή περιοχή επιφάνειας με σκοπό τη μεγιστοποίηση της επαφής με το καυσαέριο.

Μέσα στον απορροφητή, οι κόκκοι υδροξειδίου του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) αντιδρούν με τα οξείδια του θείου για το σχηματισμό γύψου ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Lloyd's Register, 2012).

Λεπτομέρειες σχετικά με τις χημικές αντιδράσεις που συντελούνται παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.3.



**Εικόνα 3.4** Σύστημα Ξηρού Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (Dry Scrubber) (Πηγή: Lloyd's Register, 2012, σελ. 26).

### **3.3. Αξιολόγηση Συστημάτων Scrubbers (Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα)**

Ο καθαρισμός των καυσαερίων αποτελεί μια κοινή και αποδεδειγμένη τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των οξειδίων του θείου από τα καυσαέρια. Ωστόσο, οι συνθήκες στα πλοία είναι θεμελιωδώς

διαφορετικές από ό, τι είναι στις χερσαίες εγκαταστάσεις. Στα πλοία υπάρχει έλλειψη χώρου, τα συστήματα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ελαφρότερα, και όσο το δυνατόν πιο ισχυρά, ώστε να μπορούν να αντέξουν τις επιταχύνσεις και τις δονήσεις στις οποίες θα εκτεθούν. Επιπρόσθετα, η λειτουργία πρέπει να διασφαλίζεται, ακόμη και όταν το σκάφος ταλαντεύεται, ενώ σπάνια υπάρχει χώρος για ένα εφεδρικό σύστημα, γεγονός το οποίο συνεπάγεται υψηλές απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία και την ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη και οι απαιτήσεις απόδοσης είναι ιδιαίτερα υψηλές (Walter & Wagner, 2012).

Τα διάφορα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου, τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα, έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.1.

Τα Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου δεν απαιτούν επιβλαβή χημικά, ενώ παράλληλα αποτελούνται από λιγότερα μέρη συγκριτικά με τα άλλα συστήματα. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι η λειτουργία σε υφάλμυρο ή γλυκό νερό, είτε σε νερό υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να αναστείλει τον καθαρισμό των οξειδίων του θείου. Επίσης, απαιτείται η χρήση καυσίμου μικρής περιεκτικότητας σε θείο, ή ένα εναλλακτικό σύστημα καθαρισμού, καθώς σε ορισμένες περιοχές ενδέχεται να περιορίζεται η εκκένωση του λύματος με όξινο pH.

Αντιθέτως, τα Συστήματα Κλειστού Τύπου έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε όλες τις περιοχές, ανεξάρτητα από την αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού ή τη θερμοκρασία του. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των αποβλήτων επί του πλοίου για όση διάρκεια επιτρέπει η δεξαμενή αποθήκευσης τους. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά αποτελούνται από περισσότερα μέρη σε σύγκριση με τα συστήματα ανοιχτού κύκλου. Επίσης, η διαδικασία καθαρισμού απαιτεί συνεχή εφοδιασμό διαλύματος υδροξειδίου του Νατρίου, μίας επιβλαβούς ουσίας που απαιτεί ειδικό χειρισμό και υψηλότερο κόστος.

Τα υβριδικά συστήματα, ανάλογα με τη λειτουργία τους σε Κλειστό ή Ανοιχτό Κύκλο, παρουσιάζουν τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Ωστόσο, αν και παρέχουν ευελιξία, παρουσιάζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα καθώς αποτελούνται από περισσότερα μέρη.

Τέλος, τα Ξηρά Συστήματα έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν παράγουν υγρά απόβλητα για αποβολή στη θάλασσα, ενώ παράλληλα μειώνουν αποτελεσματικά την εκπομπή οξειδίων του Αζώτου. Ωστόσο, το πλοίο στο οποίο θα εφαρμοσθεί ένα Ξηρό Σύστημα θα πρέπει να διαθέτει επαρκή αποθήκευση και μέσα χειρισμού για να διευκολύνει τα ξηρά αντιδρώντα αλλά και τα προϊόντα της αντίδρασης, καθώς και αξιόπιστες προμήθειες υλικών. Τέλος, τα Ξηρά Συστήματα παρουσιάζουν αυξημένο κόστος λειτουργίας.

**Πίνακας 3.1** Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων Πλοίου (*Πηγή: επεξεργασία στοιχείων από Κουγιουμτζόγλου, 2013*).

Σύστημα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Η διαδικασία δεν απαιτεί επιβλαβή χημικά (το θαλασσινό νερό είναι το μοναδικό μέσο καθαρισμού).</li> <li>- Το σύστημα αποτελείται από λιγότερα μέρη συγκριτικά με τα άλλα συστήματα.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Η λειτουργία σε υφάλμυρο ή γλυκό νερό, είτε σε νερό υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να αναστείλει τον καθαρισμό των οξειδίων του θείου.</li> <li>- Η εκκένωση του λύματος με όξινο pH ενδέχεται να περιορίζεται σε κάποιες περιοχές, συνεπώς απαιτείται χρήση καυσίμου μικρής περιεκτικότητας σε θείο, ή ένα εναλλακτικό σύστημα καθαρισμού</li> </ul>
<b>Συστήματα Κλειστού Κύκλου</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε όλες τις περιοχές, ανεξάρτητα από την αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού ή τη θερμοκρασία του.</li> <li>- Τα απόβλητα μπορούν να αποθηκευτούν επί του πλοίου για όση διάρκεια επιτρέπει η δεξαμενή αποθήκευσής τους.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Αποτελούνται από περισσότερα μέρη σε σχέση με τα συστήματα ανοικτού κύκλου.</li> <li>- Η διαδικασία καθαρισμού απαιτεί συνεχή εφοδιασμό διαλύματος υδροξειδίου του Νατρίου, μίας επιβλαβούς ουσίας που απαιτεί ειδικό χειρισμό και υψηλότερο κόστος.</li> </ul>
<b>Υβριδικά Συστήματα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Όλα τα παραπάνω</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Όλα τα παραπάνω</li> </ul>

	ανάλογα τη λειτουργία σε Κλειστό ή Ανοιχτό Κύκλο.	ανάλογα τη λειτουργία σε Κλειστό ή Ανοιχτό Κύκλο. - Απαιτεί περισσότερα μέρη.
<b>Ξηρά Συστήματα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Δεν παράγουν υγρά απόβλητα για αποβολή στη θάλασσα.</li> <li>- Μειώνουν αποτελεσματικά την εκπομπή οξειδίων του Αζώτου.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Το πλοίο πρέπει να διαθέτει επαρκή αποθήκευση και μέσα χειρισμού για να διευκολύνει τα ξηρά αντιδρώντα αλλά και τα προϊόντα της αντίδρασης, καθώς και αξιόπιστες προμήθειες υλικών.</li> <li>- Υπάρχει αυξημένο κόστος λειτουργίας.</li> </ul>

### 3.4. Οικονομική Εκτίμηση Συστημάτων Scrubbers

Η οικονομική αποδοτικότητα των Συστημάτων Scrubbers εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαφορά των τιμών μεταξύ των καυσίμων με κανονική περιεκτικότητα σε θείο (σήμερα περίπου 3,5% S) και των καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (1,0, 0,5, 0,1% S). Με απλά λόγια, θα μπορούσε κανείς να πει ότι σε όσο χαμηλότερα απαιτείται να βρίσκεται η περιεκτικότητα σε θείο στα καυσαέρια τόσο πιο ελκυστική γίνεται η επεξεργασία των καυσαερίων (Walter & Wagner, 2012).

Επίσης, η οικονομική αποδοτικότητα των Συστημάτων Scrubbers επηρεάζεται από το κόστος των υλικών λειτουργίας τους, το κόστος της επισκευής και συντήρησης, καθώς και από την απώλεια της ικανότητας φορτίου, τον χώρο αποθήκευσης και την απώλεια της σταθερότητας που προκαλεί ο Scrubber (Walter & Wagner, 2012).

Το κόστος εγκατάστασης λαμβάνεται από τους κατασκευαστές και τα ναυπηγεία σε κάθε περίπτωση. Εκτός από την τιμή του ίδιου του Scrubber, υπάρχουν και τα έξοδα του ναυπηγείου για την εγκατάσταση αυτή, και το κόστος των υπόλοιπων συστατικών στοιχείων, όπως δεξαμενές, αντλίες, σωλήνες, εξαρτήματα, εξοπλισμός επεξεργασίας νερού και εξοπλισμός ελέγχου και αυτοματισμού. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του σκάφους στο οποίο εγκαθίσταται το σύστημα και την τοποθεσία του ναυπηγείου, τα έξοδα

ναυπηγείου μπορεί να ξεπεράσουν την τιμή του ίδιου του συστήματος. Ένας από τους στόχους του σχεδιασμού ενός εκ των υστέρων εξοπλισμού θα πρέπει να είναι η διατήρηση του κόστους των ναυπηγείων όσο το δυνατόν χαμηλότερα, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα προ-εγκατεστημένα στοιχεία (Walter & Wagner, 2012).

Όσον αφορά στα λειτουργικά έξοδα, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι όλοι οι τύποι Scrubber απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν. Επιπρόσθετα, στα Συστήματα Κλειστού Κύκλου απαιτείται διάλυμα καυστικής σόδας και γλυκό νερό, ενώ τα Ξηρά Συστήματα απαιτούν κόκκους ασβεστίου. Τα Συστήματα Ανοιχτού Τύπου απαιτούν θαλασσινό νερό συγκεκριμένης ποιότητας, αλλά δεν χρειάζεται να αποθηκεύεται επί του σκάφους (Walter & Wagner, 2012).

Όσον αφορά στο κόστος επισκευής και συντήρησης, εξαιτίας του αριθμού των συνιστωσών και της πολυπλοκότητας των Υγρών Συστημάτων, είναι σαφές ότι απαιτούν περισσότερο έλεγχο, συντήρηση και επισκευή από ότι τα Ξηρά Συστήματα. Σε ένα Ξηρό Σύστημα, εφόσον ο κόκκος του ασβεστίου παραμένει σε μια σταθερή ποιότητα, το μόνο που πραγματικά χρειάζεται είναι να διατηρηθούν τα αποθέματα των υλικών επί του πλοίου και να μεταφερθούν από και προς τον καθαριστή (Walter & Wagner, 2012).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση ενός συστήματος Scrubber συνεπάγεται την απώλεια όχι μόνο της ικανότητας φορτίου, αλλά και της σταθερότητας. Τα Ξηρά Συστήματα προκαλούν μακράν τη μεγαλύτερη απώλεια της σταθερότητας. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί εκ των προτέρων αν το σκάφος θα εξακολουθήσει να συμμορφώνεται μετά την εγκατάσταση με τα απαραίτητα επίπεδα σταθερότητας. Αν υπάρχει ένας υπολογιστής φορτίου επί του σκάφους, τότε η εκτίμηση αυτή είναι σχετικά εύκολο να γίνει εκ των προτέρων (Walter & Wagner, 2012).

## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα ολοένα και αυξανόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα οδήγησαν στην θέσπιση αυστηρότερων προδιαγραφών σχετικά με τις εκπομπές θείου από τα καυσαέρια των πλοίων που πλέουν σε καθορισμένες περιοχές σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα μεγάλο δίλημμα στη ναυτική βιομηχανία, καθώς τα νέα όρια μπορούν να καλυφθούν είτε με την χρήση καυσίμων με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο είτε με την τοποθέτηση ενός Συστήματος Καθαρισμού Καυσαερίων (Scrubber). Δεδομένου του αυξημένου κόστους των καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, η χρήση των Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων αποτελεί μια ιδιαίτερα ικανοποιητική λύση.

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν τα Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων (Scrubber) τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στους ναυτικούς κινητήρες. Τα συστήματα αυτά, τα οποία διακρίνονται σε Συστήματα Υγρού Καθαρισμού (Ανοιχτού Κύκλου, Κλειστού Κύκλου, Υβριδικά) και σε Συστήματα Ξηρού Καθαρισμού, έχουν μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το στάδιο της επιλογής.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας που είναι σήμερα διαθέσιμη, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και διάφοροι οικονομικοί παράγοντες. Συγκεκριμένα, για να εκτιμηθεί η τοποθέτηση ενός Συστήματος Καθαρισμού θα πρέπει να συνυπολογιστούν μια σειρά από παράγοντες όπως το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης, επισκευής και το κόστος της απώλειας φορτίου και της σταθερότητας.

Συνεπώς, η επιλογή ενός Συστήματος Καθαρισμού Καυσαερίων (Scrubber) εξαρτάται από τις εκάστοτε οικονομικές και επιχειρησιακές ιδιαιτερότητες του πλοίου και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες που εξετάσθηκαν στην παρούσα εργασία, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η τεχνολογικά και οικονομικά αποδοτική λειτουργία.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Adamchak, F. & Adede, A. (2013), LNG as Marine Fuel, *17<sup>th</sup> International Conference & Exhibition On Liquefied Natural Gas (LNG 17)*, 16 – 19/4/2013, George R. Brown Convention Center, Houston.

American Clean Skies Foundation, (2012), *Natural Gas for Marine Vessels, U.S. Market Opportunities*, American Clean Skies Foundation, Washington, DC

Edwards, D.T. & Rymarz, E. (1990), International Regulations for the Prevention and Control of Pollution by Debris From Ships, In R. S. Shomura and M. L. Godfrey (editors), *Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris*, 2-7 April 1989, Honolulu, Hawaii. U.S. Dep. Comer., NOM Tech. Memo. NMFS, NOM-TM-NMFS-SWFSC-154, pp 956 – 988.

Eyring, V., Corbett, J.J., Lee, D.S. & Winebrake, J.J. (2007), Brief summary of the impact of ship emissions on atmospheric composition, climate, and human health, *Health and Environment sub-group of the International Maritime Organization*, 6<sup>th</sup> November.

I.M.O. (2012), *International Maritime Organization, Financial Statements, Year Ended 31.12.2012*, Ηλεκτρονικά Διαθέσιμο στη διεύθυνση: [http://www.imo.org/Documents/IMO\\_Financial\\_Statements\\_for\\_the\\_year\\_ended\\_31\\_12\\_2012.pdf](http://www.imo.org/Documents/IMO_Financial_Statements_for_the_year_ended_31_12_2012.pdf) (Τελευταία Πρόσβαση: 25 Μαΐου 2015).

I.P.I.E.C.A., (2007), *Maritime air emissions and MARPOL Annex VI, Strategies and consequences*, International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (I.P.I.E.C.A.), Ηλεκτρονικά Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.world-petroleum.org/docs/docs/socialres/marpol.pdf> (Τελευταία Πρόσβαση: 20 Μαΐου 2015).

Koehler, H.W. (2000), *Diesel Engines and Gas Turbines in Cruise Vessel Propulsion*, The Institution of Diesel and Gas Turbine Engineers, London, 17<sup>th</sup> February.

Kristensen, H.O. (2012), *Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines*, Technical University of Denmark, Project no. 2010-56,



Emissionsbeslutningsstøttesystem, Work Package 2, Report No. 05, September.

Lloyd's Register, (2012), *Understanding exhaust gas treatment systems Guidance for shipowners and operators*, Lloyd's Register, June.

Simons, J. (2012), Γνωμοδότηση της Ευρωπαϊκής Οικονομικής και Κοινωνικής Επιτροπής με θέμα: *Πρόταση οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την τροποποίηση της οδηγίας 1999/32/EK όσον αφορά την περιεκτικότητα των καυσίμων πλοίων σε θείο*, COM(2011) 439 final – 2011/0190 (COD), Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή, Βρυξέλλες, 18 Ιανουαρίου.

Townsend, C. (2008), Marine Fuels and Engines, *Maritime Reporter & Engineering News*, November

Troitsky, I.N. (2009), Gas Turbine Engines for Marine and Road Transport, In Favorsky, O.N. (Editor), *Thermal to Mechanical Energy Conversion: Engines and Requirements*, Volume II, Eolss Publishers Company Limited.

Walter, J. & Wagner, J. (2012), *Choosing Exhaust Scrubber Systems: Complying with the SOX limits laid out in MARPOL ANNEX VI, EU Directive 2005/33 and the California Code of Regulations Title 17.3.1.7.5*, On behalf of Maritimes Cluster Northern Germany, December.

Κουγιουμπζόγλου, Γ. (2013), *Νέοι Κανονισμοί Εκπομπών Οξειδίων του Θείου από τη Ναυτιλία: Οικονομική Σύγκριση Χρήσης Αποσταγματικών Καυσίμων και Συστημάτων Καθαρισμού των Καυσίμων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

## **ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ**

International Maritime Organization: <http://www.imo.org/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α<sup>2</sup>

### Α.1 Χημικές Αντιδράσεις σε Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Ανοικτού Κύκλου (Open Wet Scrubbers)

For SO<sub>2</sub>:

- SO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O ⇌ 'H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>' (sulphurous acid) ⇌ H<sup>+</sup> + HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bisulphite)
- HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bisulphite) ⇌ H<sup>+</sup> + SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (sulphite)
- SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (sulphite) + 1/2 O<sub>2</sub> ⇌ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (sulphate)

For SO<sub>3</sub>:

- SO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O ⇌ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sulphuric acid)
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O ⇌ HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> (hydrogen sulphate) + H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>
- HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> (hydrogen sulphate) + H<sub>2</sub>O ⇌ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (sulphate) + H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>

### Α.2 Χημικές Αντιδράσεις σε Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Κλειστού Κύκλου (Closed Wet Scrubbers)

For SO<sub>2</sub>:

- Na<sup>+</sup> + OH<sup>-</sup> + SO<sub>2</sub> ⇌ NaHSO<sub>3</sub> (aq sodium bisulphite)
- 2Na<sup>+</sup> + 2OH<sup>-</sup> + SO<sub>2</sub> ⇌ Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (aq sodium sulphite) + H<sub>2</sub>O
- 2Na<sup>+</sup> + 2OH<sup>-</sup> + SO<sub>2</sub> + 1/2 O<sub>2</sub> ⇌ Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (aq sodium sulphate) + H<sub>2</sub>O

For SO<sub>3</sub>:

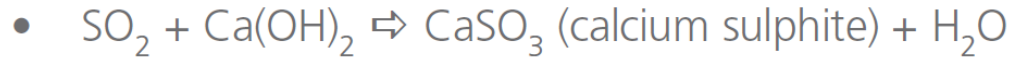
- SO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O ⇌ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sulphuric acid)
- 2NaOH + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ⇌ Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (aq sodium sulphate) + 2H<sub>2</sub>O

---

<sup>2</sup> Πηγή: Lloyd's Register, 2012, σελ. 50

### **A.3 Χημικές Αντιδράσεις σε Συστήματα Ξηρού Καθαρισμού (Dry Scrubbers)**

In a dry SO<sub>x</sub> scrubber using calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) the reaction with sulphur dioxide forms calcium sulphite:



The sulphite is then oxidised and hydrated in the exhaust stream to form calcium sulphate dihydrate, or gypsum:

- $2\text{CaSO}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CaSO}_4 \text{ (calcium sulphate)}$
- $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ (calcium sulphate dihydrate - gypsum)}$

Similarly for SO<sub>3</sub>:

- $\text{SO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ (calcium sulphate dihydrate - gypsum)}$