

Uređaji za smanjivanje emisije ispušnih plinova na brodu

Levanat, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:951392>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU

POMORSKI ODJEL

IVAN LEVANAT

**UREĐAJI ZA SMANJIVANJE EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA NA
BRODU**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ

Pristupnik:

IVAN LEVANAT

DUBROVNIK, 2020.

Republika Hrvatska
SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU
POMORSKI ODJEL
Brodostrojarski smjer
Preddiplomski sveučilišni studij (3 godine)

Ur. broj: 35/21

Dubrovnik, rujan 2021.

Kolegij: **BRODSKI POMOĆNI STROJEVI I UREĐAJI**

Mentor: izv. prof. dr. sc. **ŽARKO KOBOEVIĆ**

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Pristupnik: **IVAN LEVANAT**, apsolvant ak. godina. 2020/21.

Zadatak: **UREĐAJI ZA SMANJIVANJE EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA
NA BRODU**

Zadatak treba sadržavati:

- Uvod u problematiku emisija ispušnih plinova
- Međunarodne norme u svezi ograničenja emisija ispušnih plinova s broda
- Metode smanjivanja emisija ispušnih plinova s naglaskom na scrubbere
- Princip rada i konstrukcijske značajke scrubbera
- Analiza tipova scrubber uređaja
- Analiza SCR tehnologije
- Zaključak

Osnovna literatura:

1. Exhaust Gas Cleaning System, Marko Buršić & Kristijan Lenac, 2020.
2. Introduction to Scrubber Technologies, Aron Tasin, 2015.
3. A Life Cycle Cost Analysis of Marine Scrubber Technologies, Shih-Tung Shu, 2013.
4. Comparing Wet and Dry Exhaust Gas Cleaning Systems, Aarhus School of Marine and Tehnical Engineering, 2013.

Zadatak uručen pristupniku: ožujak 2020.

Rok za predaju završnog rada: rujan 2021.

Mentor:

dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ
izvanredni profesor

Pročelnik odjela:

dr. sc. ŽARKO KOBOEVIĆ
izvanredni profesor

Izjava

S punom odgovornošću izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora izv.prof.dr.sc. Žarka Koboevića.

Ime i prezime studenta: Ivan Levanat

Potpis: _____

Posveta

Za mog djeda i moju majku. Hvala Vam na svemu što ste učinili za mene tokom mog školovanja, hvala Vam na svemu što činite za mene svakoga dana.

UREĐAJI ZA SMANJIVANJE EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA NA BRODU

SAŽETAK

Čisti zrak izvorna je potreba svih živih bića. Onečišćenje zraka, prouzrokovana ispuhom iz motora s unutarnjim izgaranjem, sve više utječe na našu planetu i sve njene stanovnike. Najopasnije ispušne emisije po zrak su: CO, SO_x, NO_x i HC. Negativne posljedice onečišćenja zraka očituju se u: stakleničkom učinku, kiselim kišama, ozonskim rupama te fotokemijskom i industrijskom smogu. Kako bi doprinijela očuvanju čistoće zraka, a samim time i cijele planete, Međunarodna pomorska organizacija zadnjih tridesetak godina donosi razne regulative sadržane u konvencijama MARPOLA, što je za kulminaciju imalo donošenje prilagodbe Priloga VI MARPOLA, u kojem globalni limit sumpora u gorivu sveden na 0.5 %. U nekim područjima ovaj limit je još niži. Odluka je stupila na snagu 1. siječnja 2020. Ovom odlukom IMO-a, vlasnicima brodova ostavljena je mogućnost ili korištenje lakog dizelskog goriva ili za slučaj da žele nastaviti koristiti teško dizelsko gorivo, mogućnost ugradnje uređaja za smanjivanje emisije štetnih plinova poznatijih kao scrubberi. Rad se bavi proučavanjem i analizom, svih vrsta, inovativne i iznimno učinkovite tehnologije scrubber uređaja.

Ključne riječi:

onečišćenje, brodski dizelski motor, apsorpcija, scrubber uređaji, SCR tehnologija

REDUCTION DEVICES FOR EXHAUST GASES ON SHIP

ABSTRACT

Clean air is the basic need of all living beings. Air pollution, caused by exhaust from internal combustion engines is increasingly affecting our planet and all its inhabitants. The most dangerous emissions into the air are: CO, SO_x, NO_x and HC. The negative consequences of air pollution are manifested in the: greenhouse effect, acid rain, ozone holes and photochemical and industrial smog. In order to contribute to the preservation of clean air, at the same time the entire planet, the International Maritime Organization for about last thirty years has adopted various regulations contained in MARPOL conventions culminating in the adoption of MARPOL Annex VI, in which the global sulphur cap is reduced to 0.5 %. In some areas this limit is even lower. The resolution entered into force on January 1, 2020. By this IMO resolution, shipowners are left with the option of either using Marine Diesel Oil, or in case if they want continue using Heavy Fuel Oil, the possibility of installing exhaust gases reduction devices, known as scrubbers. The paper deals with study and analysis of all types, innovative and extremely effective scrubber technology.

Keywords:

pollution, marine Diesel engine, absorption, scrubber devices, SCR technology

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| Popis slika..... | I |
| Popis grafikona..... | III |
| Popis tablica..... | IV |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Onečišćenje zraka s broda..... | 3 |
| 2.1 Onečišćenje općenito vezano uz rast svjetskog gospodarstva..... | 3 |
| 2.2 Onečišćenje prouzrokovano radom broda s naglaskom na onečišćenje zraka..... | 4 |
| 3. Smanjenje emisije ispušnih plinova na brodu..... | 9 |
| 3.1 Problematika brodskog goriva..... | 9 |
| 3.2 Smanjenje emisije ispušnih plinova s pomoću scrubbera..... | 12 |
| 4. Konstrukcijske i instalacijske značajke brodskog scrubbera..... | 19 |
| 5. Suhi scrubberi..... | 25 |
| 6. Mokri scrubberi..... | 31 |
| 6.1 Općenito..... | 31 |
| 6.2 Mokri scrubberi otvorenog tipa (<i>Open Loop Scrubbers</i>)..... | 37 |
| 6.2.1 Problematika vode za ispiranje kod scrubberi otvorenog tipa..... | 45 |
| 6.2.2 Scrubber otvorenog tipa- razlozi za i protiv..... | 48 |
| 6.3 Mokri scrubberi zatvorenog tipa (<i>Closed Loop Scrubbers</i>)..... | 49 |
| 6.4 Scrubberi hibridnog tipa (<i>Hybrid Scrubber Systems</i>)..... | 55 |
| 7. Selektivna katalitička redukcija- SCR (<i>Selective Catalytic Reduction</i>)..... | 59 |
| 8. Najčešći kvarovi brodski scrubber sustava..... | 69 |
| 9. Ocjena scrubber sustava..... | 74 |
| 10. Zaključak..... | 78 |
| Literatura..... | 79 |

POPIS SLIKA

- Slika 1. Shema lanca povezanosti između globalizacije, brodskog pogona i onečišćenja zraka, str. 3
- Slika 2. Karta zemalja koje su ratificirale MARPOL konvenciju, str. 6
- Slika 3. Prikaz unosa i ispusta kod brodskog dizelskog motora, str. 10
- Slika 4. Jedan scrubber finskog proizvođača *Wärtsilä*, str. 15
- Slika 5. Detaljan prikaz podjele scrubbera, str. 16
- Slika 6. Dvostruka ilustracija gdje gornja prikazuje položaj scrubbera na brodu s njegovim priključcima, dok donja daje shematski prikaz procesa koji se odvija u njemu, str. 18
- Slika 7. Tipovi dizajna tornja scrubbera i to: lijevo podijeljeni dizajna i desno linijski dizajn, str. 20
- Slika 8. *Wärtsilä* SO_x scrubber sustav, str. 21
- Slika 9. Dijelovi tornja scrubbera (bez ventilatora), str. 23
- Slika 10. Prikaz kuglica kalcijevog hidroksida i njihove veličine, str. 27
- Slika 11. Ilustrativni prikaz suhog scrubber sustava, str. 28
- Slika 12. Shematski prikaz suhog scrubber sustava, str.28
- Slika 13. Ukrcaj scrubber pred instalaciju na brod pomoću lučkih dizalica, str. 32
- Slika 14. Izvedbe tornjeva kod mokrih scrubbera, str. 34
- Slika 15. Najjednostavniji sustav mokrog skrubiranja, str. 35
- Slika 16. Kompozicija otvorenog scrubber sustava, str. 39
- Slika 17. Shema Open Loop sustava, str. 40
- Slika 18. Jedan scrubber otvorenog tipa tvrtke *Wärtsilä*, str. 43
- Slika 19. Scrubber sustav zatvorenog tipa, str. 49
- Slika 20. Kaustična soda koja se koristi za tretiranje slatke vode u scrubberima zatvorene petlje, str. 52

Slika 21. Prikaz WCU jedinice, str. 54

Slika 22. Shema Closed Loop sustava, str. 54

Slika 23. Prikaz načina rada i uređaja hibridnog sustava, str. 56

Slika 24. Prikaz hibridnog sustava u otvorenom načinu rada, str. 57

Slika 25. Prikaz hibridnog sustava u zatvorenom načinu rada, str. 58

Slika 26. SCR sustav ugrađen na brodski motor, str. 64

Slika 27. Prikaz načina rada i uređaja hibridnog sustava, str. 65

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Usporedba ispusta dušikovih oksida (lijevo) i sumporovih oksida (desno), u odnosu kopno-brod, str. 9

Grafikon 2. Prikaz postotka brodova s ugrađenim EGCS-om kod najvećih svjetskih brodarskih kompanija, str. 13

Grafikon 3. Razvoj ugradnje SCR sustava na brodove u periodu 1987.-2013., str. 60

Grafikon 4. Prikaz izmjerenih vrijednosti CO, NO, NO₂ i SO₂ za lijevi motor broda *DBM-82 Krka*, str. 61

Grafikon 5. Prikaz izmjerenih vrijednosti CO, NO, NO₂ i SO₂ za desni motor broda *DBM-82 Krka*, str. 62

Grafikon 6. Potrebne temperature kod SCR-a i njihova veza s tlakom, str. 66

Grafikon 7. Razlika između standardnog brodskog motora i motora s ugrađenom SCR, str. 68

Grafikon 8. Prikaz pada NO_x i SO_x emisija nakon ugradnje scrubbera na brod, str. 74

Grafikon 9. Isplativost scrubber sustava ovisno o vremenu provedenom u SECA zonama, str.

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tablični prikaz udjela kemijskih spojeva u ispušnim plinovima brodskog Diesel motora, str. 11

Tablica 2. Sažetak o zagađivačima, str. 11

Tablica 3. Oznake dijelova scrubbera sa *Slika 9*, str. 24

Tablica 4. Usporedba karakteristika suhog i mokrog scrubbera, str. 29

Tablica 5. Usporedba tehnologija brodski scrubbera, str. 30

Tablica 6. Troškovi ugradnje raznih scrubber sustava na brod, str. 36

Tablica 7. Usporedba Open Loop i Closed Loop sustava, str. 38

Tablica 8. Usporedba karakteristika medija za ispiranje otvorenog i zatvorenog sustava, str. 41

Tablica 9. Vrijednosti izmjerenih emisija ispušnih plinova na brodu *DBM-82 Krka*, str. 61

Tablica 10. Procjena troškova SCR sustava, str. 69

Tablica 11. Usporedba troškova scrubber sustava i goriva s niskom udjelom sumpora, str. 75

Tablica 12. Procjena uštede goriva na četiri različita tipa broda sa scrubber sustavom, str. 76

1. UVOD

Ispušni plinovi su plinovi nastali izgaranjem pogonskog goriva kod motora s unutarnjim izgaranjem, bilo da se radi o Ottovom, Dieselovom ili Wankelovom motoru.¹ Kakve će prirode biti ti ispušni plinovi ovisi o sastavu goriva koje izgara te dali je izgaranje kod našeg motora potpuno ili nepotpuno.

Uzevši u obzira da je motor s unutarnjim izgaranjem još uvijek prisutan kod velike većine prometno-transportnih sredstava, dolazimo da zaključka da si ispušni plinovi nezaobilazan dio svakog transporta. Svakog transporta pa tako i onog koji je za našu brodstrojarsku struku najbitniji, brodskog pomorskog transporta. Izuzmemo li alternativne pogone broda (koji su još uvijek u manjini) te neke posebne tipove plovila koja koriste elektromotore napajane iz akumulatora (primjer su podmornice), poznato je da većina današnjih brodova koristi Dieselov motor s unutarnjim izgaranjem. Bilo da se radi o klasičnom dizelskom postrojenju ili o dizel-električnom pogonu gdje pogonski elektromotor dobiva električnu energiju od generatora pogonjenog Dieselovim motorom, Diesel motor je prisutan na brodovima.² Snage brodskog porivnog Diesel motora kreću se 0.25 MW za najmanje primjerke pa sve do 100 MW za najveće dizelske motore.³

Za svoj pogon Diesel motori koriste tešku naftu. Izgaranjem teške nafte, osim što se oslobađa energija potrebna za pogon Diesel motora, oslobađa se kao što je prethodno naglašeno i niz štetnih ugljikovih (CO_x), sumporovih (SO_x) i dušikovih spojeva (NO_x) koji štetno i razarajuće djeluju na atmosferu, ljude i ljudsku okolinu. U posljednjih četrdesetak godina svjedoci smo sve većeg i većeg porast ljudske svijesti o ekologiji. Čovjek je postao svijestan da razvoj gospodarstva, te masovna globalizacija i industrilizacija doprinosi negativnom utjecaju na čovjeka i njegov okoliš. Tom negativnom utjecaju, nažalost uvelike doprinose i brodovi kao jedni od najvećih nositelja svjetske trgovine i ekonomije.⁴ Sve to dovelo je do toga da su brojne svjetske organizacije, među kojima je i IMO, donijele razne regulative koje nastoje umanjiti štetnost ispušnih plinova pa samim time i onečišćenje zraka. Konkretno vezano uz pomorsku struku, imamo Prilog VI MARPOLA o globalnom ograničenju udjela sumpora. Ovaj prilog donesen je 1997. godine, no međutim važeći je postao osam godina kasnije, to jest u listopadu

¹ Ispušni plinovi. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=27966>

² Brod. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Brod#Podjela_brodova

³ Zoko Duje, 2018. *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora*, diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Split.

⁴ Potrebica Damir, 2019. *Prilog VI MARPOLA i strateške prilagodbe brodara*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

2005. Kako su godine prolazile Prilog VI MARPOLA se konstantno nadopunjavao i postajao sve stroži u pogledu postotka sumpora u brodskom teškom gorivu. Početnih 4.5% smanjilo se na 3.5%, a početkom 2020. godine učinjen je još jedan veliki korak prema smanjenju onečišćenja zraka s broda te je dotadašnjih 3.5% svedeno je na svega 0.5%.

Dakle prema najnovijoj IMO direktivi iz 2020. značajno se mijenja globalni limit sumpora u gorivu.⁵ Odsada je dozvoljeni limit sumpora u gorivu 0.5%.

Donošenjem ove direktive brodarima su ostavljene dvije mogućnosti, korištenje takozvanog lakog dizelskog goriva (engl. *MDO-Marine Diesel Oil*) ili ugradnja i primjena uređaja za smanjivanje emisije štetnih plinova na brodu.⁶

U svom radu ja ću se detaljno posvetiti izučavanju drugo navedene mogućnosti i njenom približavanju čitaocu.

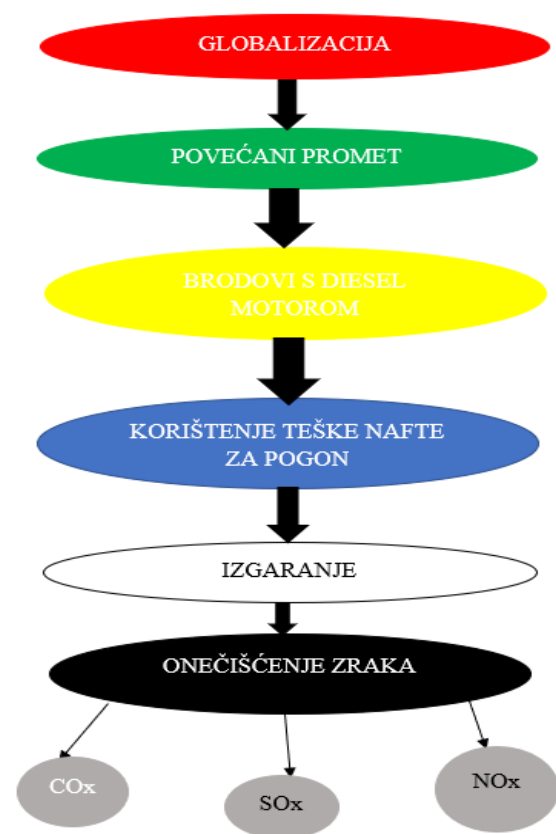
⁵ Vučina Ivan, 2019. *Pročistači ispušnih plinova*, seminarski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik

⁶ Percentage of sulphur in the fuel. URL: <https://www.seatrade-maritime.com/>

2. ONEČIŠĆENJE ZRAKA S BRODA

2.1. Onečišćenje općenito vezano uz rast svjetskog gospodarstva

Može se reći da brodovi općenito onečišćuju okoliš. Između ostalog jedno od područja koje onečišćuju je i zrak. Veza između rasta globalizacije, brodskog pogona i onečišćenja zraka ispušnim plinovima s broda jasno je prikazana na pojednostavljenoj shemi na slici 1.



Slika 1: shema lanca povezanosti između globalizacije, brodskog pogona i onečišćenja zraka

Povijesni razvoj općenito, znanstvena otkrića, rast globalne trgovine, industrijske i poljoprivredne revolucije, uza sve dobrobiti koje su donijele čovječanstvu sabrali su većinu sadašnjih problema vezanih uz okoliš i njegovu održivost.⁷ Dakle možemo reći da je ljudskim napretkom te time uzročno posljedičnim rastom svjetskog tržišta i pojavom globalizacije, potreba za svakom vrstom prometa, a pogotovo brodskom (jer se radi o najjeftinijem načinu prijevoza) naglo je porasla. Kao što je u uvodnom poglavlju rečeno, većina brodova na ovaj ili onaj način koristi Diesel motore, a ti motori kao svoje primarno gorivo koriste tešku naftu. Radi sastava nafte njenim izgaranjem oslobađaju se štetni ispušni plinovi u vidu CO_x, SO_x i NO_x,

⁷ Milošević-Pujo Branka & Jurjević Nataša, 2004. *Onečišćenje mora iz zraka emisijom ispušnih plinova*, Naše more, Dubrovnik.

to jest u vidu ugljikovih, sumporovih i dušikovih vodika. U ispušnom plinu dizelskog motora nalazimo još u manjoj ili većoj mjeri i na vodenu paru, krute čestice te druge ugljikovodike (HC). Oslobođanje ovih spojeva iz goriva ima brojne negativne posljedice na ljude i njihovu okolinu. Neki od najeksponiranijih negativnih čimbenika ispušnih plinova s broda su: njihovo negativno djelovanje na ljudsko zdravlje, naročito u pogledu bolesti respiratornog sustava, globalno zagrijavanje i efekt staklenika koji dovodi to uništenja ozonskog omotača te pojave kiselih kiša.

Stručnjaci iz raznih gospodarskih grana, pa tako i iz pomorske struke, kao općenito cjelokupna svjetska javnost postepeno su u zadnjoj petini 20. stoljeća počeli uviđati štetnost sve većeg razvoja gospodarstva i industrijalizacije po planet Zemlju. Postalo je jasno da se moraju poduzeti određene mjere kako opstanak samog planeta pa tako i života na njemu nebi došao u pitanje kroz idućih par desetljeća.

Sve aktualniji problemi globalnog zatopljenja prouzrokovani naročito otpuštanjem emisije štetnih plinova u atmosferu potaknulo je svjetske čelnike na organiziranje masovnih konferencija (samita) na kojima je bilo zamišljeno da se donesu mjere potrebne za spas planeta. Prvi značajniji globalni samit o zaštiti okoliša odvio se pod pokroviteljstvom UN-a 1992. godine. Trajao je jedanaest dana u lipnju, te su na njemu donesene bitne odluke potkrepljene konvencijama koje su kasnije služile kao smjernice brojnim međunarodnim organizacijama u donošenju restrikcija za dobrobit i očuvanje našega planeta. Najvažnije konvencije donesene u Rio 1992. su *Konvencija o okolišu i razvoju iz Ria* te *UN-ova okvirna konvencija o klimatskim promjenama*. U primjenama ovih konvencija države potpisnice su se obavezale surađivati u izradi i provedbi programa mjera za ublažavanje klimatskih promjena prouzrokovanih emisijom ispušnih plinova na nacionalnoj i regionalnoj razini.⁸ Nakon samita u Rio de Janeiru uslijedila su još dva značajna dogovora o očuvanju svjetskog okoliša. *Kyoto protokol* iz 97. i *Pariški sporazum* potpisan 2016. godine.

2.2. Onečišćenje prouzrokovano radom broda s naglaskom na onečišćenje zraka

Dogovori iz Rio de Janeiroa, Kyotoa i Pariza podignuli su spoznaju o važnosti odnosa čovjeka prema prirodi te potaknuli brojne važne organizacije na donošenje sličnih konvencija.

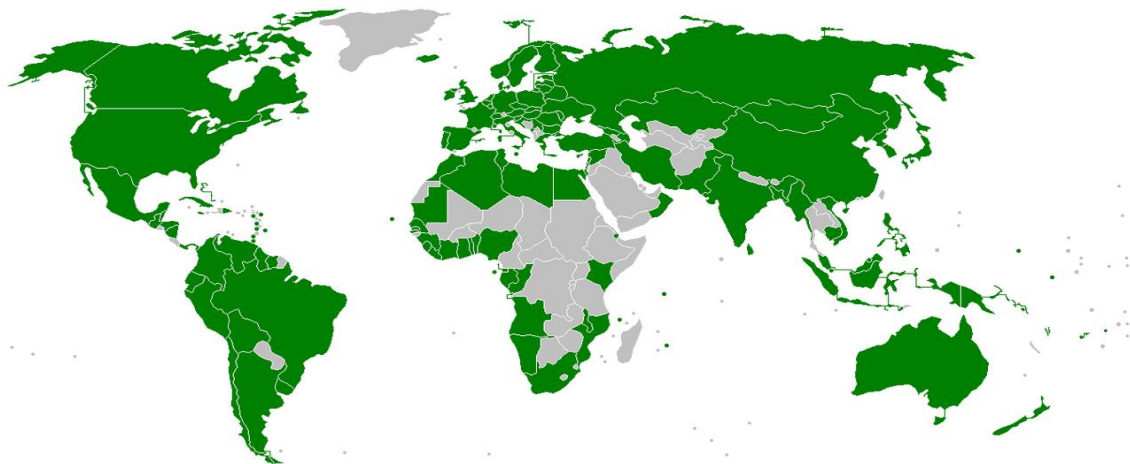
⁸ UNFCCC, 1992. *Report of INCFCCC on the work*. URL: https://unfccc.int/documents?search2=&search3=&order=field_document_publication_date&sort=asc&f%5B0%5D=year%3A1992&page=0%2C0%2C3

Tako je između gore spomenutih konvencija nastalih nakon Ria, na inicijativu IMO-a, 2005. godine proširena MARPOL-ova konvencija o zaštiti okoliša sa *Prilogom VI*. Ispravno bi bilo za reći da je šesti prilog MARPOL-a donesen već 1997. godine, no kako za svaku konvenciju treba proći određeni broj godina dok je prihvati većina svjetske brodske tonaže tako je MARPOL Prilog VI stupio na snagu i postao obavezujući 2005. Mnogo prije UN-ove ekološke konferencije iz 1992. Međunarodna pomorska organizacija (engl. *IMO-International Maritime Organization*), čije je sjedište u Londonu, počela uviđati važnost uloge čovjeka, odnosno pomorca u očuvanju okoliša. Točnije bi bilo reći da je MEPC (Marine Environment Protection Committee) tijelo unutar IMO-a koje je zaduženo za ovakva pitanja, počelo raditi na cilju da smanji štetnost brodova po okoliš. Naime kao primarno prijevozno sredstvo za transport robe koje nudi najbolji omjer efikasnosti i cijene, poglavito za velike količine tereta, brod ima i svoje pozitivne i negativne strane. Momentalno u svjetskim vodama se nalazi 50 000 trgovačkih brodova, što čini oko 90% međunarodne trgovine.⁹ Jedna zanimljiva činjenica koja prikazuje bitnost broda u modernom prometu data je od kompanije *Clear Seas Centre for Responsible Marine Shipping*. Njihovo istraživanje kaže da s istom količinom tereta te istom količinom goriva kamion prewali 49 kilometara, vlak 226 a brod čak 394.¹⁰ Fascinantan podatak. Koliko god se njegove pozitivne strane očitavale u ranije spomenutoj efikasnosti i povoljnosti, a svakako nije ni za zanemariti njegovu iznimno visoku pouzdanost, ni brod nije imun na manjkavosti koje uništavaju ekosustav. Primjerice onečišćenje zraka s brodova prisutno je još od ugradnje prvih motora s unutarnjim izgaranjem na brod, negativne posljedice po ljudsko zdravlje i cjelokupni ekosustav počele su se uviđati tek tijekom globalnog razvoja pomorskog prometa u drugoj polovici 20. stoljeća. Stoga je sada već davne 1973. godine, gotovo dvadeset godina prije samita u Riu donesena je *Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova* na engleskom jeziku znana kao *International Convention for the Prevention of Pollution From Ships*. Konvencija je nadopunjena dodatnim protokolima 1978. godine pa je danas u cijeloj pomorskoj struci poznata pod skraćenicom MARPOL 73/78. Primarni cilj ove konvencije bio je spriječiti u što većoj mjeri onečišćenje oceana i mora prouzrokovano uljem, ispušnim plinovima i otpadom s broda.¹¹ MARPOL se sa raznim dopunama održao na snazi sve do današnjih dana i smatra se kao najvažniji dokument o očuvanju okoliša u pomorstvu. O njegovoj važnosti govori i podatak da ga je ratificiralo 99.42% svjetske brodske tonaže.

⁹ Šećer Marko, 2019. *Metode smanjenja emisija štetnih plinova iz brodskih generatora pare*, završni rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

¹⁰ Clear Seas. Energy Efficiency of Transportation Modes. URL: <https://clearseas.org/en/air-pollution/>

¹¹ MARPOL 73/78. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL_73/78



Slika 2: karta zemalja koje su ratificirale MARPOL konvenciju (preuzeto: https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL_73/78 MARPOL 73/78 ratifying states)

MARPOL se sastoji od šest priloga ili ti ga aneksa. Prvih pet priloga doneseno je od listopada 1983. do rujna 2003. Međutim šesti prilog za kojega sam spomenuo da je donesen između dogovora u Kyotou i Parizu i koji se odnosi na sprječavanje onečišćenja zraka s broda donesen je 19. svibnja 2005. godine.

MARPOL 73/78 prilozima su idući:

- Prilog I: Sprječavanje onečišćenja uljima
- Prilog II: Sprječavanje zagađenja štetnim tekućim tvarima
- Prilog III: Sprječavanje zagađenja štetnim tvarima koje se prevoze morem u pakiranom obliku
- Prilog IV: Sprječavanje zagađenja sanitarnim otpadnim vodama
- Prilog V: Sprječavanje zagađenja krutim otpadom
- Prilog VI: Sprječavanje zagađenja emisijom štetnih plinova

U zadnje vrijeme mogu se čuti špekulacije kako će IMO nadopuniti MARPOL konvenciju sa sedmim prilogom koji će se odnositi na štetnost brodske buke i vibracija na okoliš, no zasad još nema službenih potvrda.

Prije šestog priloga govora o zaštiti zraka od onečišćenja ispušnim plinovima s broda bilo je govora i u 212. članku Konvencije o pravu mora koja je donesena 1982. godine. Međutim tek se u Prilogu VI MARPOL-a detaljno definirane mjere za suzbijanje onečišćenja. MARPOL-ov Prilog VI. sastoji se od tri djela u kojima se nalazi sveukupno devetnaest pravila. Pravila 13 i

14 su ona koja predviđaju korištenje čistih goriva.¹² Ovaj prilog zasada je ratificiralo 94.70% svjetske brodske tonaže, to jest preko 170 država među kojima je i SAD.¹³ Osnovna restriktivna mjera kojom ovaj prilog MARPOL konvencije nastoji smanjiti onečišćenje zraka je ograničavanje udjela sumpora u teškom gorivu. U uvodnom poglavlju sam spomenuo podatak kako je prvo ograničenje udjela sumpora u teškom gorivu iznosilo 4.5%, taj limit vrijedio je od 2005. pa do 2012. 2012. uslijedilo je smanjenje na 3.5%. Spomenuti limiti odnose se na motore jačine veće od 130 Kw. Osim ograničavanja količine sumpora u gorivu Prilog VI regulira i spaljivanje otpada na brodu, jer i ono može imati negativan utjecaj na zrak. Također prilogom su uvedene ekološke zone od posebnog značaja, znane kao ECA zone, u kojima vrijede još strože mjere kada je u pitanju sumporni udio u teškom gorivu. Inače postoje četiri ECA zone (Baltičko more, Sjeverno more, sjevernoamerička zona i Karipsko more).

Limit od 3.5% sumpornog udjela u gorivu bio je na snazi do 2020. godine kada je na snagu stupilo još strože pravilo Međunarodne pomorske organizacije, IMO 2020 koje se nadovezuje na MARPOL Prilog VI. Pravilom IMO 2020 količina sumpora u brodskom gorivu smanjila se na dosad najnižih 0.5%. U ECA zonama taj postotak je još manji i iznosi 0.1%. Limiti koje je IMO donio su maksimalni limiti sumpora u gorivu. IMO je time ostavio mogućnost svojim članicama da ako žele dodatno postrože i snize limit sumpora u gorivu u za brodove koji viju njihovu zastavu te luke koje su pod njihovom jurisdikcijom. To je pravo iskoristila Europska unija, gdje je za ovakva pitanja zadužena agencija EMSA, te Direktivom 2016/802 u lukama svojih članica te na njihovim brodovima od 1.1.2010. ograničila postotak sumpora u gorivu na 0.1%.¹⁴ Primjer Europske unije slijedile su i vlade SAD-a, Australije i Kine.

Donošenjem Priloga VI IMO se nada postići brojne benefite vezane uz ljudsko zdravlje, kvalitetu zraka te očuvanje okoliša naročito u obalnim područjima. Istraživanje koje je provela grupa znanstvenika na čelu sa profesorom Mikhailom Sofievim pokazalo je do ovakvo limitiranje sumpora na brodu spriječi 100 000 smrtnih slučajeva i još mnogo potencijalnih slučajeva astme.¹⁵ Istraživanje je sprovedeno Finskoj. Još jedno istraživanje koje je obavljeno u Finskoj, a objavio ga je MEPC 2016. godine, kaziva da kada se nebi ograničilo otpuštanje

¹² Nižić Franjo, 2017. *Pročistači ispušnih plinova na brodovima*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik

¹³ MARPOL 73/78. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/MARPOL_73/78

¹⁴ EMSA. Sulphur Directive. URL: <http://www.emsa.europa.eu/main/air-pollution/sulphur-directive.html>

¹⁵ Sofiev Mikhail i grupa znanstvenika, 2018. *Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs*, Nature communications. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02774-9/>

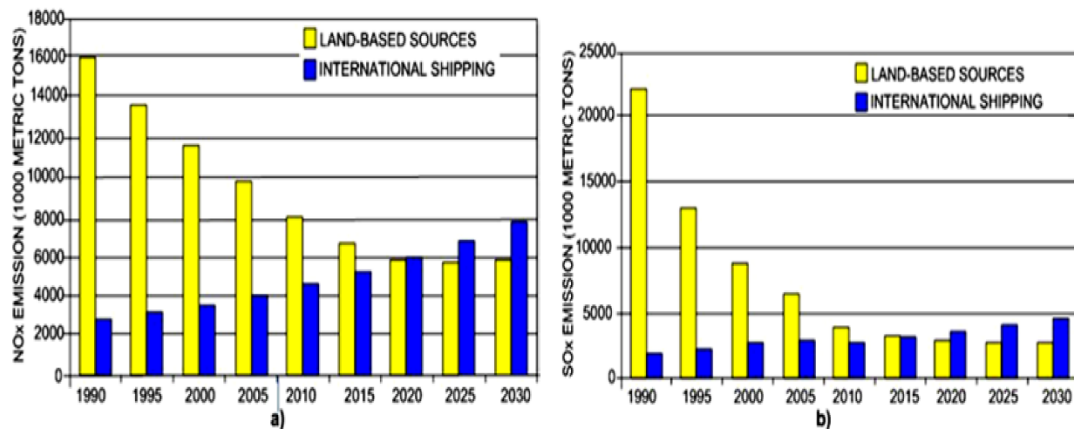
SOx to bi rezultiralo sa više od pola milijuna preranih smrtnih slučajeva u razdoblju od 2020. do 2025. Ovaj zasad posljednji prilog iz MARPOL serije, zajedno sa svojim modificiranim pravilom IMO 2020, je za ovaj rad nekako najbitniji s obzirom da se u njemu bavimo uređajima za smanjenje štetnosti ispušnih plinova s broda.

Kako uopće dolazi do zagađenja zraka s broda ? Direktna linija između onečišćenja zraka i brodskog pogona prikazana je u prvom djelu ovog poglavlja na slici 1. Naime dizelski motori koji pogone brod za svoj rad koriste teško gorivo s visokim udjelom sumpora. Izgaranjem goriva s visokim udjelom sumpora oslobađaju se konvencionalni štetni spojevi iz ispušnih plinova kao što su ugljikov dioksid i monoksid te drugi staklenički plinovi.¹⁶ Prema jednom nezavisnom istraživanju provedenom 2012. brodovi svojim djelovanjem sudjeluju u nastanku 2.2% ukupne godišnje emisije CO₂ u svijetu, što svakako nije zanemariv udio. Ako vam se to ovako na prvu ne čini kao značajna brojka, uzmimo za činjenicu da cijela Kanada, po površini druga najveća država svijeta i jedno od top 20 svjetskih gospodarstava, u cjelokupnoj globalnoj emisiji CO₂ sudjeluje sa 1.6%.¹⁷ CO₂ nije otrovan spoj, međutim svejedno doprinosi efektu staklenika. Uz ugljikove spojeve oslobađaju se emisije sumporovog i dušikovog oksida koji predstavljaju još veću opasnost. Isto istraživanje iz 2012. godine koje je ustvrdilo količinu CO₂ s kojom brodovi sudjeluju u ukupnoj emisiji tog spoja na globalnoj razini, ustvrdilo je također da brodovi proizvode 15% svjetske količine NO_x, odnosno 13% SO_x. NO_x i SO_x prema brojnim priznatim međunarodnim studijama su jedni od glavnih uzročnika kroničnih ljudskih bolesti kao što su astma, bronhitis te bolesti srca i cirkulacije. Povećanoj proizvodnji štetnih ispušnih plinova doprinose pokušaji povećanja učinkovitosti brodskih motora. Naime jedan od najčešćih načina za povećanje učinkovitosti kod Diesel motora je povećanje temperature izgaranja i kompresijskog omjera. Taj postupak dovodi do povećane emisije ispušnih plinova, u prvom redu NO_x. Onečišćenje zraka s broda još je izraženije nego kod drugih, cestovnih prometnih sredstava. Osnovni razlozi tome su što čak 80% svjetskog brodovlja tokom većine svoje navigacije koristi teško dizelsko gorivo (engl. *HFO- Heavy Fuel Oil*) koje je bogato sumporom, te zbog toga što su na brodovima ugrađeni sporohodni dizelski motori koji gotovo da nemaju vijek trajanja. Dakle za razliku od kopnenih transportnih vozila, brodovi duže vremensko razdoblje mogu obavljati svoju funkciju, no isto tako nažalost i duže razdoblje mogu onečišćivati okoliš. To onečišćenje još je izraženije kada se uzme u obzir velike

¹⁶ Potrebica Damir, 2019. *Prilog VI MARPOLA i strateške prilagodbe brodara*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

¹⁷ Clear Seas. Energy Efficiency of Transportation Modes. URL: <https://clearseas.org/en/air-pollution/>

udaljenosti između polaznih i dolaznih luka, što rezultira većim vremenskim periodom onečišćenja.¹⁸ Krajem prošlog stoljeća kopneni izvori su još uvijek bili veći izvor onečišćenja od onih brodskih. Međutim rezultati jednog istraživanja pokazuju kada se nebi vjerno pridržavali zabrana IMO-a, brodovi bi kroz nekih 5-10 godina postali veći onečišćivači nego kopno. Rezultati istraživanja jasno su prikazani u grafu 1.



Grafikon 1: usporedba ispusta dušikovih oksida (lijevo) i sumporovih oksida (desno), u odnosu kopno-brod (preuzeto: <https://www.intechopen.com/books/current-air-quality-issues/sea-transport-air-pollution> *Sea Transport Air Pollution*)

Pravilima koje je IMO donio doprinio je očuvanju zraka, našeg planeta i svih njegovih stanovnika, ali je i stavio izazov pred brodare svojih članica. Izazov na koji način smanjiti štetnost ispušnih plinova s broda.

3. SMANJENJE EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA NA BRODU

3.1. Problematika brodskog goriva

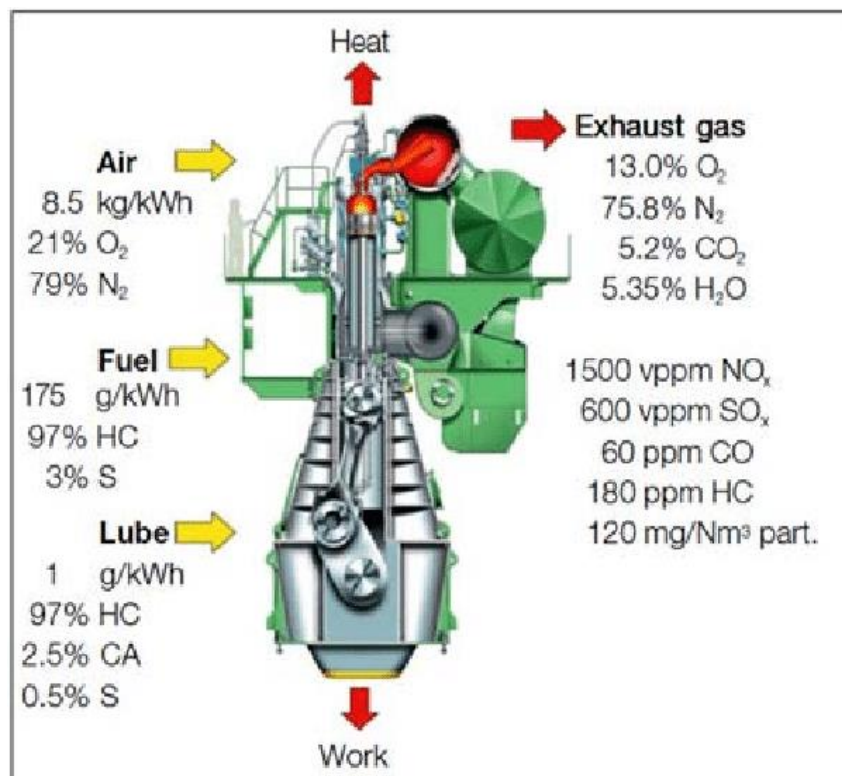
I u ovo poglavlje krećemo s premisom da ispušni plinovi Diesel motora izgaranjem svog pogonskog goriva stvaraju po čovječji okoliš štetne plinove. Posebice štetne po zrak.

Goriva su primarni oblici energije u kojima je ta ista energija pohranjena u kemijskom obliku. Brodski dizelski motori koriste različite vrste goriva. Primarna podjela je prema viskozitetu, stoga se brodska goriva dijele na destilirana i ostatna. Daljnjom podjelom destiliranim goriva dolazimo do brodskih plinskih ulja (engl. *MGO-Marine gas oil*), brodskog dizela (engl. *MDO-Marine diesel oil*) i teškog goriva (engl. *HFO-Heavy fuel oil*) kojeg smo već jednom kratko spomenuli. Ovo zadnje navedeno brodsko gorivo, ujedno je, ponajprije radi svoje cijene

¹⁸ Nižić Franjo, 2017. *Pročistači ispušnih plinova na brodovima*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik

najčešće korišteno tokom pomorskog pothvata. Čak 4/5 svog rada motor na brodu za pogon koristi HFO. Za takvo gorivo, unatoč tome što je povoljno možemo ustvrditi da je nečisto, prljavo. Zato se izgaranjem HFO oslobađa više štetnih emisija ispušnih plinova nego kod drugih vrsta goriva.

Brodski dizelski motori ugrožavaju kvalitetu zraka i još više nego benzinski motori koje nalazimo u kopnenim transportnim sredstvima. Razlog leži u činjenici i da za rad koriste „prljavije“ gorivo, ali i da se rad dizelskog motora odvija na većoj temperaturi i tlaku nego kod benzinskog motora. Takav režim rada pogoduje rastu emisije ispušnih plinova što se naročito očituje u rastu emisije dušikovog ugljika. Količina ispušnih plinova ovisiti će o volumenu i vremenu trajanja najvrućeg djela plamena.¹⁹ Zoran prikaz onoga što ulazi u brodski motor i onoga što je nusprodukt izgaranja brodskog goriva prikazano je na slici ispod.



Slika 3: prikaz unosa i ispusta kod brodskog dizelskog motora (preuzeto: https://www.researchgate.net/figure/Flow-process-and-typical-exhaust-gas-composition-from-two-stroke-diesel-engine_fig5_282434624 Flow process and typical exhaust gas composition from LSDE)

Na sljedećoj stranici moguće je vidjeti tablicu koja prikazuje raspodjelu ukupnog volumena ispušnih plinova iz motora.

¹⁹ Clean- carbonenergy.com. NOX emissions- formation, reduction and abatement. URL: <https://clean-carbonenergy.com/nox-emissions.html>

| UKUPNI VOLUMEN ISPUŠNIH PLINOVA BRODSKOG MOTORA | | | |
|---|-----------|-----------------|--------|
| PLINOVI KOJI NE ZAGAĐUJU ZRAK | | ZAGAĐIVAČI | |
| O ₂ | 13% | NO _x | 0.25% |
| | | SO _x | 0.19% |
| N ₂ | 75.8 % | HC | 0.08% |
| CO ₂ (nije zagađivač no svejedno ima negativne posljedice po okoliš) | 5.2% | CO | 0.067% |
| H ₂ O | 5.35 % | Krute čestice | 0.063% |

Tablica 1: tablični prikaz udjela kemijskih spojeva u ispušnim plinovima brodskog Diesel motora

Udio plinova onečišćivača može varirati između 0,25 i 0,4%, ovisno o karakteristikama motora i goriva kao što su: razina sumpora u gorivu, vrsta motora te njegova brzina i učinkovitost.²⁰

Da bi se stekao potpuni dojam o svim onečišćivačima, koji su nusproizvodi izgaranja, u ovom poglavlju ćemo dati još jednu tablicu u koju smo uz zagađivače iz *Tablice 1* pridodali i CO₂.

| Emisija | Izvor |
|-----------------|--|
| NO _x | Rezultat maksimalne temperature izgaranja, količine kisika i vremena zadržavanja (funkcija brzine motora u okretajima po minuti) |
| SO _x | Rezultat sadržaja sumpora u gorivu |
| CO | Rezultat viška omjera zraka, temperature izgaranja i mješavine zrak/gorivo |
| CH | Rezultat količine goriva i ulja za podmazivanje koja je ostala neizgorena tijekom procesa sagorijevanja |
| Krute čestice | Potječe od neizgorenog goriva kao i udjela pepela u gorivu i ulju za podmazivanje |
| CO ₂ | Rezultat izgaranja |

Tablica 2: sažetak o zagađivačima (izvor: Ivan Komar i Branko Lalić, 2015, *Current Air Quality Issues*)

²⁰ Woodyard, Doug, 2009. *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*.

Kada govorimo o gorivima u trgovačkoj mornarici, uz ranije navedena, postoji još jedna vrsta goriva koje nismo spomenuli do sada radi razvoja priče ovog rada. Riječ je o gorivu s niskim udjelom sumpora (engl. *LSFO- Low Sulfur Fuel Oil*) kojeg su razne naftne kompanije počele razvijati od 2005. godine pa na ovamo. Ovaj tip goriva, naročito njegova modifikacija u vidu ULSFO-a (*Ultra Low Sulfur Fuel Oil*), sadrži iznimno nizak nivo sumpora. Konkretno u slučaju ULSFO-a količina sumpora u gorivu iznosi maksimalnih 0.1%. Ta karakteristika je ovu vrstu goriva istaknula kao jedno od mogućih odgovora na zahtjeve koje je IMO svojim Prilogom VI. MARPOL konvencije stavio pred pomorsku struku. Iako figuriraju kao jedno od rješenja, mana ovog tipa goriva je njegova cijena koja je osjetno viša od uobičajeno korištenog HFO. Još jedan problem je dostupnost te količina goriva s niskom postotkom sumpora. Kao prvo ne postoji garancija da će naftne kompanije uspjeti proizvesti dostatnu količinu potrebnu za sva brodske pogone koji se nalaze u međunarodnim morima. Proizvodnja ovakvog „čišćeg“ goriva je skuplja od proizvodnje HFO, zato ostaje upitna motivacija kompanija za njegovom proizvodnjom. Za slučaj da naftne kompanije i uspiju osigurati potrebno nisko sumporno gorivo ono neće biti jednako dostupno svakoj svjetskoj regiji. Sigurno je da ULSF-o neće biti jednako dostupan u Aziji (posebice na Bliskom istoku) te u nekim afričkim lukama. Povoljnost u vidu cijene te dostupnost bilo kojeg proizvoda operateru u svakom trenutku bez obzira na dane okolnosti, jedni su od najvažnijih karakteristika svakog proizvoda u današnjem poslovnom svijetu. Karakteristike koje za nisko sumporno gorivo ne možemo sa sigurnošću reći da ih ima.

Uzevši sve navedeno u obzir ne treba čuditi da u zadnje vrijeme sve popularnijim postaju neka sekundarna rješenja, koja se očituju u ugradnji dodatnih uređaja, koja služe za smanjenje emisije ispušnih plinova s broda. Nama su ti uređaji iznimno interesantni, jer je i sama tema rada naslovljena na tu temu. Stoga ćemo nakon ovog uvoda u problematiku koja se javlja izgaranjem na brodu, u idućem poglavlju prijeći na detaljniju analizu uređaja za smanjivanje emisije ispušnih plinova na brodu.

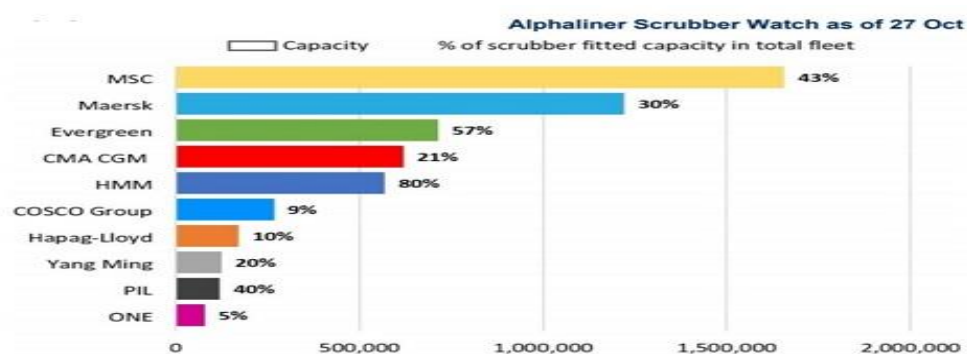
3.2. Smanjenje emisije ispušnih plinova s pomoću scrubbera

Nakon duboke analize kompletnog procesa nastajanja štetnih emisija ispušnih plinova s broda, te metoda reduciranja istih, dolazimo do stvarne teme ovog rada. Još tamo u preposljednjem paragrafu prvog poglavlja istaknuo sam da u svrhu smanjenja ispušnih plinova s broda, osim lakog dizelskog goriva brodar može koristiti i sustav EGCS (eng. *Exhaust Gas Cleaning System*) češće nazivan scrubber uređaj. Ovakav sustav može se bez problema ugraditi

na novogradnjama, ali isto tako i na većini postojećih brodova koji u startu nisu zamišljeni da imaju scrubbere.

Prvi primitivni oblik scrubbera na brodovima nalazimo još na podmornici *Ictineo I* španjolskog inženjera Narcisa Monturiola, koji je djelovao tokom 19. stoljeća. Od tada, kroz period od više od 140 godina do današnjeg dana, scrubberi su prošli fazu od nečega malo ili nimalo iskoristivog do uređaja kojeg na sebi danas ima ugrađeno preko 3500 brodova diljem svjetskih mora. Uređaja koji su u današnje vrijeme postali jedna od dvije alternative za smanjenje zagađenja zraka od strane brodskih motora.

Pandemija COVID-19 koja je pogodila svijet u globalu početkom 2020. koja je za jednu od posljedica imala i rast cijene naftnih derivata, samo je doprinijela povećanoj ugradnji scrubbera na brodove, prosto jer se nameću kao povoljnije te jednako ili više kvalitetno rješenje nego korištenje lakog dizelskog goriva na danas nepredvidivom svjetskom tržištu. MSC Crusies, jedan od divova svjetskog pomorstva, već je krenuo s praksom da na svim svojim novogradnjama ima ugrađen EGCS. Štoviše, još tamo 2019. godine 11 od 17 brodova MSC Crusies flote je imalo ugrađen EGCS, dok će praksa ugradnje scrubbera na novogradnjama dovesti do toga da će do kraja 2023. svi MSC-ovi brodovi imati na sebi ugrađene scrubbere.²¹ Još jedan podatak koji ide u prilog tezi da je MSC predvodnik ugradnje scrubber sistema na svoje brodove, ali i tome koliko važnim scrubbere smatraju i ostale velike kompanije, jest graf ispod koji prikazuje postotak ugradnje scrubbera kod najvećih svjetskih brodara na njihovim brodovima.



Grafikon 2: prikaz postotka brodova s ugrađenim EGCS-om kod najvećih svjetskih brodarskih kompanija (preuzeto: <https://globalmaritimehub.com/scrubber-fittings-on-the-increase.html> Alphaliner Scrubber Watch)

²¹ Msckrstarenja.com. Poboljšanje kvalitete brodske emisije. URL: <https://www.msckrstarenja.com/hr/hr/About-MSK/MSK-Odrzivost/Planet.aspx>

Graf se temelji na istraživanju sprovedenom od strane *Global Maritime Hub* u zadnjem kvartalu 2020. godine. Naglasak je da su u istraživanju uzeti u obzir samo kontejnerski brodovi.

Još jedna zanimljiva činjenica koja govori o eksponencijalnom porastu ugradnje na brodovima je istraživanje DNV GL-a po kojemu se u periodu od listopada 2018. do ožujka 2019. udvostručio broj brodova s ugrađenim scrubber sustavom. Treba imati na umu da govorimo o periodu prije pandemije, kada je općenito cijena nafte na tržištu bila koliko toliko stabilna i prihvatljiva. Drugo istraživanje sprovedeno strane Clarkson Research tvrdi da će do kraja prve polovice ovog desetljeća najmanje 15% svjetske brodske tonaže biti opremljeno sa scrubberima.²²

Prije nego što uđemo u detaljniju razradu tematike scrubbera osvrnimo se kratko na etimologiju ovog pojma. Naime *scrubber* je angliziran pojam, što je čest slučaj u našoj pomorskoj struci, što bi značilo da potječe iz engleskog jezika. Doslovan prijevod pojma *scrubber* na hrvatski bio bi pročišćivač. U stručnoj literaturi pojam je malo preoblikovan pa za scrubbere kažemo da su uređaji za smanjivanje emisije ispušnih plinova ili jednostavnije rečeno ispirajući plinova. Ipak, ja ću se u svojem radu voditi uvriježenom praksom i koristiti anglikanski pojam radi jednostavnosti.

Sada kada smo razriješili ovaj manje bitan dio priče prijedimo na ono konkretno i za ovaj rad bitno.

Iako ima malen značaj u ovom radu, etimologija scrubbera nam ipak pomaže da definiramo što bi scrubber ustvari bio. Na prvu kada bi laički išli zaključivati, većina bi rekla da se vjerojatno radi o nekom uređaju koji *čisti* plinove. I nebi bili daleko od istine. Naime u većini dostupne literature nailazimo na definiciju da je scrubber uređaj koji omogućuje prikupljanje krutih čestica uslijed dodira onečišćenog plina s odgovarajućom kapljevnom koja se još naziva apsorbent. Referirajući se na brod, scrubberi prikupljaju i čiste plinove bilo da su oni produkt glavnog porivnog motora, pomoćnih generatora ili pak brodskih kotlova. Scrubber je sistem koji čini više komponenti koje djeluju kao mreža tuševa. Sekundarna primjena scrubbera odnosi se na njihovo korištenje za povrat topline iz vrućih plinova kondenzacijom plinskog goriva. Nalaze primjenu i kod visokih protoka u solarnim, PV i LED procesima.²³

²² Pacificgreen-group.com. How To Choose The Right Scrubber For IMO 2020. URL: <https://www.pacificgreen-group.com/articles/how-choose-right-scrubber-imo-2020>

²³ Scrubber. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Scrubber>

Primarna podjela scrubbera je na scrubbere koji djeluju u skladu s Pravilom 13 MARPOL Priloga VI poznati kao pročištači dušikovih oksida, te one djeluju u skladu s Pravilom 14 MARPOL Priloga VI poznati kao pročištači sumpornih oksida. Daljnja podjela proizlazi iz metode apsorpcije onečišćenih čestica plina.



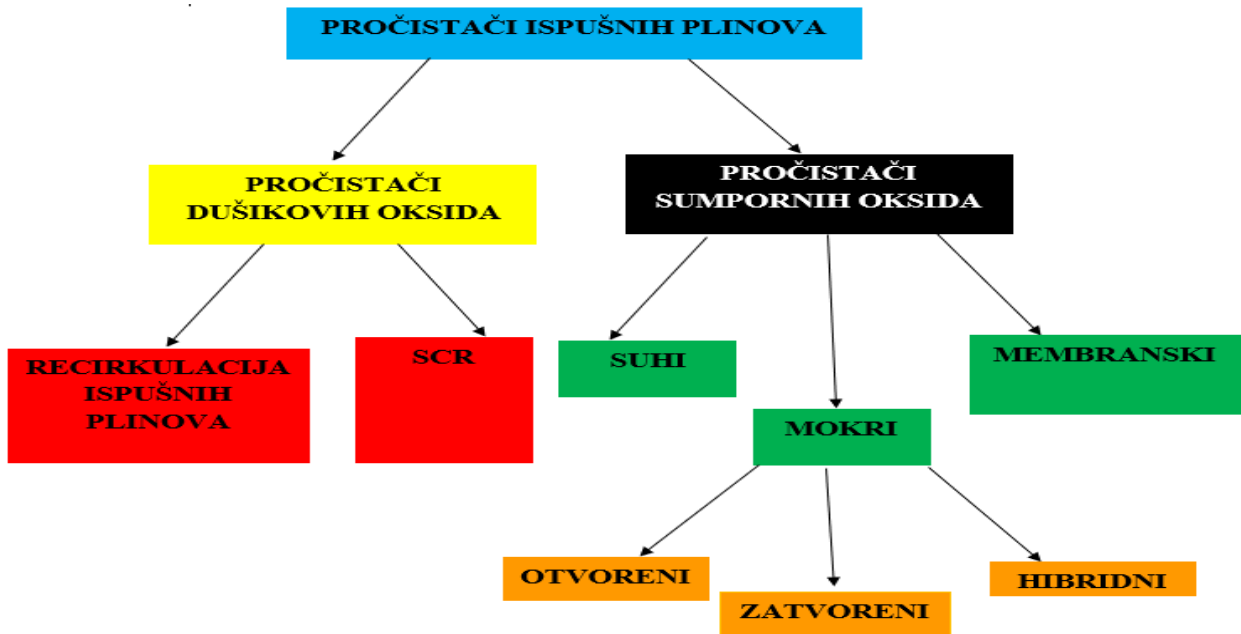
Slika 4: jedan scrubber finskog proizvođača *Wärtsilä* (preuzeto:

<https://www.vesselfinder.com/news/6346-MOL-Launches-Study-to-Equip-In-service-Vessels-with-SOX-Scrubber-System> *SO_x scrubber main unit*)

Naime nakon što prikupi onečišćene čestice scrubber ih pročišćuje ili apsorbira, što je u principu njegova osnovna namjena. Poznato je pet metoda apsorpcija čestica kod scrubbera:

- suha apsorpcija
- mokra apsorpcija
- fizička apsorpcija
- kemijska apsorpcija
- fizičko-kemijska apsorpcija

Najčešće korištena metoda apsorpcije, kako na kopnu tako i na brodu, jest metoda mokre apsorpcije. Scrubber koji koriste metodu mokre apsorpcije mogu se podijeliti u tri podskupine: scrubberi otvorenog tipa i scrubberi zatvorenog tipa. U najnovije vrijeme vodeći svjetski proizvođači scrubbera sve više razvijaju hibridni model scrubbera, tj. scrubber koji ima odlike i otvorenog i zatvorenog tipa. Zasad se nećemo zadržavati na podskupinama scrubbera koji rade na principu mokre metode apsorpcije isključivo zbog toga što će se o njima detaljno govoriti u zasebnim poglavljima ovog rada.

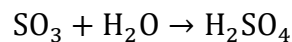
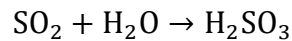


Slika 5: detaljan prikaz podjele scrubbera

Kod mokre metode scrubber stvara jednu vrstu tekuće zavjese ili tankog filma kapljevine, kroz koju potom prolazi onečišćeni plin. Promjer raspršenih kapljica tekuće zavjese je između 0,1 i 1 mm. Kapljevina kroz koju plin prolazi je najčešće voda, a rjeđe se primjenjuju alkalne otopine, kisele otopine, Na_2S_4 otopine, kombinacije alkalno-oksidacijskih otopina te ostale. Na brodovima je situacija nešto specifičnija jer brodski scrubberi osim slatke vode s aditivima, više koriste vodu, ali onu morską koja se dovodi do scrubbera pomoću pumpi morske vode. Pumpe crpe more direktno iz broskog okruženja. Razlog primjene morske vode leži u praktičnosti, jednostavno zato što je morska voda na brodu dostupna praktički u neograničenim količinama. Samom uporabom morske vode štedimo pitku vodu koja nam je na brodu manje dostupna i dragocjena. Voda za ispiranje ispušnih plinova mora biti konstantno nadzirana uzimanjem uzorka ispirne vode.

Protok plina kroz sustav potpomognut je ventilatorima (obično se radi o dva ventilatora) visoke snage, koji protjeravaju plin prema gore. Ventilatori su konstruirani tako da uvijek imaju veći kapacitet nego što je maksimalni kapacitet ispušnih plinova brodskih uređaja. Prolaskom kroz zavjesu/film kapljevine čestice onečišćenog plina postaju veće (te veće čestice nazivaju se aglomerati), što rezultira njihovim lakšim uklanjanjem iz onečišćenih plinskih struja s pomoću neke od inercijskih sila. Dobar primjer za to je centrifugalna sila. Uspješnost uklanjanja štetnih čestica iz ispušnih plinova je čak 97% kada govorimo o štetnim česticama sumpora u ispušnim plinovima.

Cijeli ovaj proces potrebno je sagledati i sa strane kemije. Kemijski proces koji se odvija u scrubberima naziva se neutralizacija. Neutralizacija je inače reakcija lužine i kiseline. Ovisna je o ili o pH ili o bazičnosti medija kojim se ispuh ispire.²⁴ Kod neutralizacije unutar scrubbera kiselina se dobiva iz sumpora, a baza ili lužina iz morske vode ili pak iz vode s aditivima. Dvije jednostavne formule će nam zorno prikazati kako sumporovi oksidi unutar scrubber sustava reagiraju s vodom.

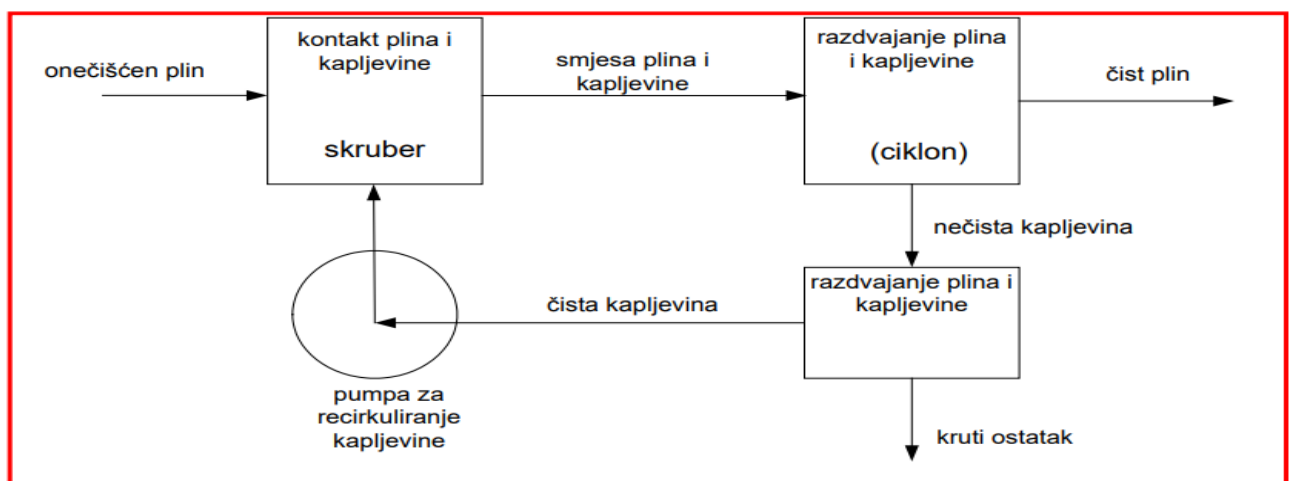
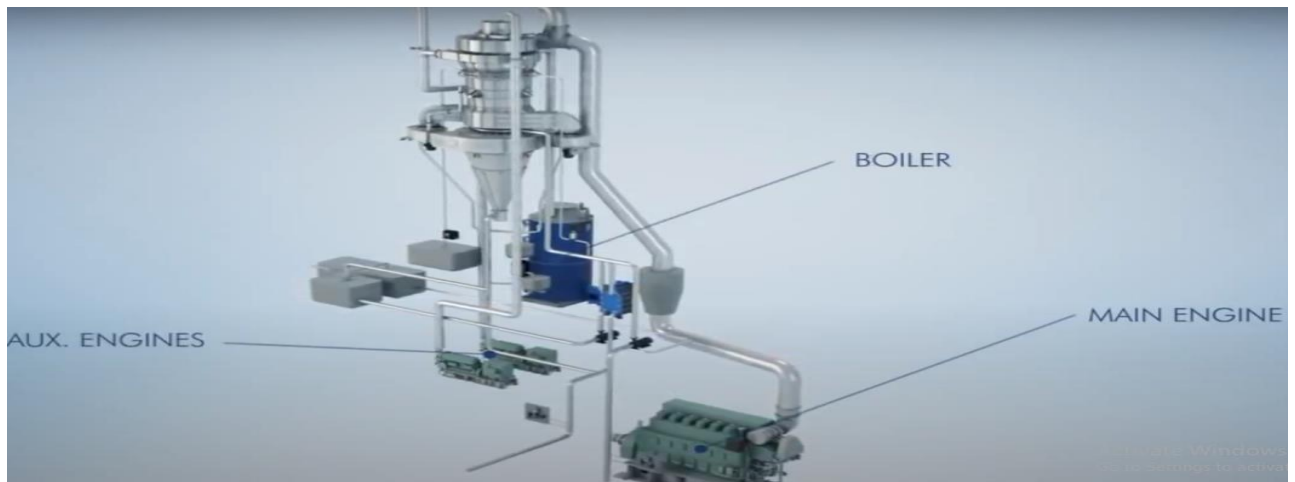


Dakle sumporov dioksid ili trioksid koji je nastao kao nusprodukt izgaranja, tj. spajanja atoma sumpora i kisika (dioksid) ili spajanjem sumporovog dioksida sa pola atoma kisika (trioksid) se unutar scrubber sustava u dodiru s vodom pretvara u određenu vrstu sumporne kiseline. Nastalu sumpornu kiselinu je moguće ukloniti tj. spriječiti njezin odlazak u atmosferu. Plin koji je sada pročišćen od štetnih čestica, otpušta se kroz brodski dimnjak u atmosferu dok se tekućina otpušta u more ili zadržava u posebnim brodskim spremnicima (*Effluent tank*), ovisno već o konstrukciji scrubber sistema. Konkretno za situaciju na brodu postoji olakotna okolnost jer korištenje morske vode omogućuje otpuštanje produkta reakcije sumpornog spoja i morske vode u more (pričamo o otvorenom tipu scrubbera). Naime morska voda sadrži prirodnu alkalnost koja neutralizira kiselinu.²⁵ U slučaju zatvorenog scrubbera potrebno je dodati kaustičnu sodu da bi se podigla pH vrijednost vode za ispiranje, što za rezultat ima bolju apsorpciju dušikovih i sumporovih čestica .

Za kraj ovog poglavlja i bolje razumijevanje idućeg na jednom shematskom i jednom slikovnom prikazu sumirati ćemo dosadašnja saznanja o scrubberima.

²⁴ Lukačević Pavo, 2020. *Održavanje i kvarovi uređaja za ispiranje ispušnih plinova (Scrubber uređaja)*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

²⁵ Radić Matej, 2019. *Metode smanjenja onečišćenja zraka štetnim ispušnim plinovima*, završni rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.



Slika 6: dvostruka ilustracija gdje gornja prikazuje položaj scrubbera na brodu s njegovim priključcima, dok donja daje shematski prikaz procesa koji se odvija u njemu (preuzeto: <https://www.youtube.com/watch?v=GK2uHie3w34&t=185s> Exhaust Gas Scrubbers & <https://www.fkit.unizg.hr/> Predavanje 5)

Prva ilustracija prikazuje položaj scrubbera čiji se ispuh nalazi na brodskom dimnjaku.

Kroz dimnjak, protjerivani od para ventilatora, bi u atmosferu trebali biti otpušteni pročišćeni ispušni plinovi. Ispušni plinovi u scrubber sistem dolaze od strane svih uređaja strojarnice čije unutarnje izgaranje za produkt ima ispušne plinove koji sadrže dušikove, sumporove i ostale po zrak štetne spojeve. Radi se o tri sustava:

- sustav glavnog porivnog uređaja
- sustav brodskih kotlova
- sustav brodskih pomoćnih motora ili generatora

Svaki od ova tri sustava ima svoju ispušnu cijev s kojom je povezan na zajednički cjevovod koji je pak povezan sa scrubber jedinicom unutar koje se odvija neutralizacija.

Kako se pak taj unutarnji proces odvija ? To nam tumači donja shema sa *Slike 6*. Onečišćeni plin od tri gore spomenuta sustava ulazi kroz ispušnu cijev i ulaznu zaklopku u scrubber. Da bi se povećala učinkovitost pročišćavanja plina, cijev kojom se plin dovodi do scrubbera može biti dizajnirana kao Venturijeva cijev. Time se postiže manja brzina strujanja plina (koja ne smije biti viša od 1-5 m/s) i bolji stupanj učinkovitosti pročišćavanja, koji ide do 99%. Ovako konstruirani scrubberi služi i za hlađenje plina.

Kroz cijev ventilatori plin protjeravaju uzbrdo prema kapljevini, gdje dolazi do kontakta. Kontakt onečišćenog plina i kapljevine stvara njihovu smjesu koja se potom metodom ciklona razdvaja na čisti plin i onečišćenu kapljevinu. Čisti plin dalje kroz scrubber i dimnjak odlazi u atmosferu, dok onečišćena kapljevina odlazi na drugi stupanj pročišćavanja gdje se dobiva kruti ostatak, koji se uklanja iz sustava, te potpuno čista kapljevina. Pumpom za recirkuliranje kapljevine čista kapljevina se vraća natrag na početak sustava za pročišćavanje onečišćenog plina i tako u krug.

4. KONSTRUKCIJSKE I INSTALACIJSKE ZNAČAJKE BRODSKOG SCRUBBERA

Kada sam tek krenuo pisati o scrubberima u zadnjem djelu prijašnjeg poglavlja spomenuo sam da je njihova prednost što se osim na novogradnju mogu ugraditi i na brodove u čijem idejnom projektu nije zamišljena uporaba scrubber sistema. Sistem može biti instaliran unutar dimnjaka ili do dimnjaka, ovisno već o željama brodarka i konstrukcijskim mogućnostima. Proces ugradnje scrubber sustava na brod je kompleksna operacija, koja zahtjeva visoki stupanj suradnje i komunikacije između proizvođača sustava, brodarka i brodogradilišta u kojem se ugradnja vrši. Potrebno vrijeme za instalaciju scrubber sustava na brod ovisiti će prije svega o proizvođaču sustava, a potom i o vrsti samog sustava. Kada se vrši dizajniranje scrubber sustava za brod na kojeg se sustav naknadno ugrađuje, to jest u čijem projektu scrubber sustav pročišćavanja nije bio originalno zamišljen, potrebno je da dizajner sustava posjeduje određene podatke prema kojima će izraditi projekt dodatne ugradnje sustava na brod. Radi se o podacima kao što su broj i tip motora, kotlova i općenito svih uređaja na brodu čije će plinove scrubber sustav pročišćavati. Također bitno je za znati maksimalni povratni tlak tih uređaja, ali i postotak sumpora u njihovom pogonskom gorivu. Dobro je poznavati i uobičajenu rutu kojom se brod kreće, jer tada znamo i uvjete u kojima će novoinstalirani sustav raditi. Neki od radnih uvjeta koje je dobro za poznavati jesu

temperatura i relativna vlaga okoline, kao i alkalnost morske vode u kojoj brod plovi. Izuzetno je važno da dizajner sustava zna s kolikim prostorom za ugradnju raspolaže.²⁶

Površina samog tornja scrubbera za preookeanske brodove varira od 73 m³ do 73 m³, dok je japanska firma Fuji Electric otišla najdalje po pitanju kompaktnosti i proizvela toranj od 34 m³. Kada se govori isključivo o dizajnu samog tornja scrubber sustava, može se reći da postoje dva osnovna dizajna tornja koje je patentirala *Wärtsilä* od kojih su se potom razvili svi ostali dizajni. Po uzoru na finskog proizvođača, sve ostale firme koje se bave proizvodnjom scrubbera preuzele su ova dva *Wärtsilä* dizajna. Radi se o linijskom dizajnu i podijeljenom dizajnu, vidljivima na *Slika 7*.



Slika 7: tipovi dizajna tornja scrubbera i to: lijevo podijeljeni dizajna i desno linijski dizajn (izvor: Wärtsilä Finland, *Wärtsilä Scrubber Product Guide*, 2014., *EGCU Scrubber with single inlet and Inline Scrubber*)

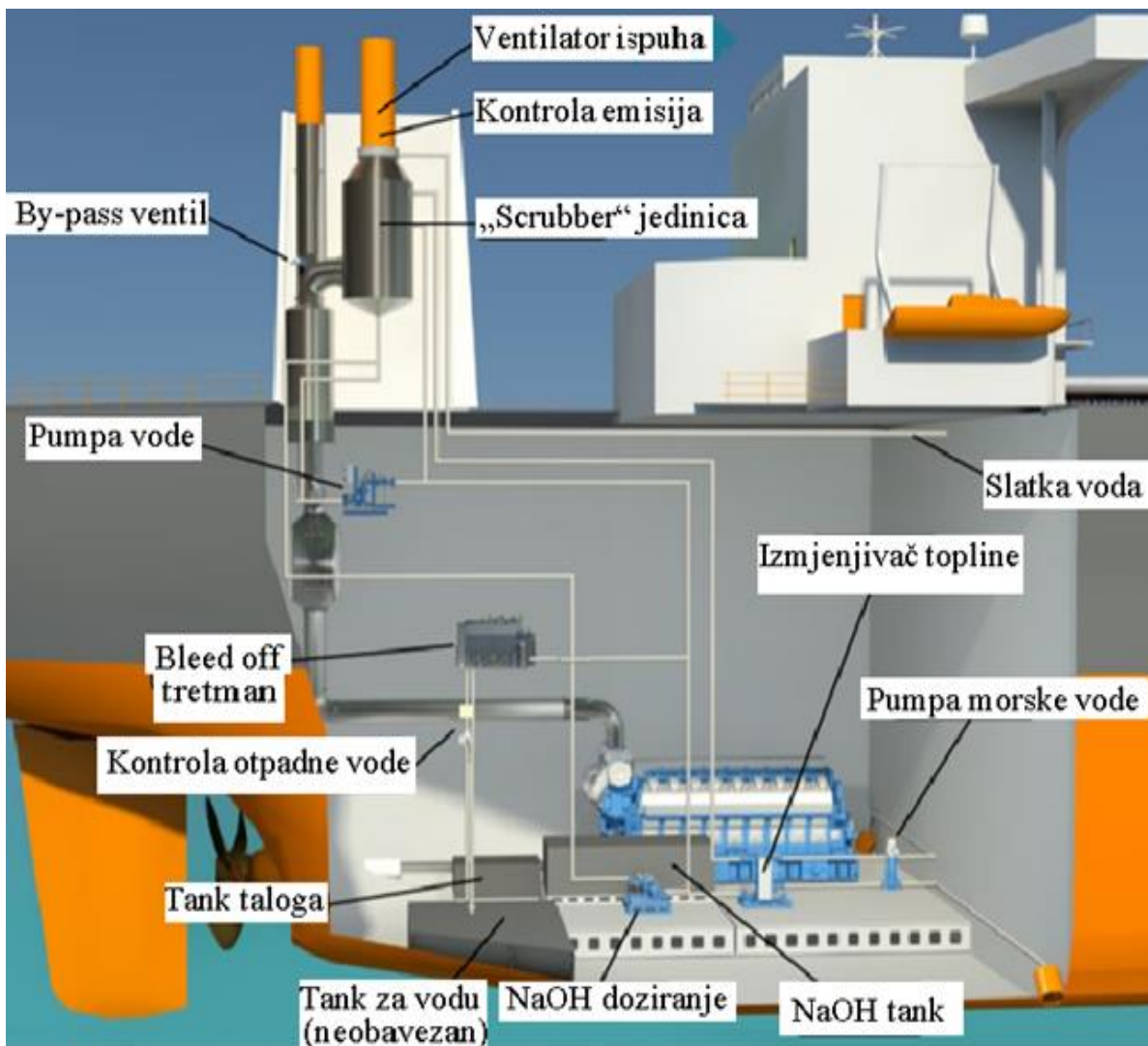
Sva sila podataka o kojoj se govorilo u prvom paragrafu ovog poglavlja, važna je jer će ugradnja scrubbera nepovratno utjecati na cijeli brodski sustav. Ponajviše u pogledu prostora i njegovog iskorištavanja. Promjene u prostoru naročito dolaze do izražaja kada se brodar odluči na ugradnju mokrog sustava za smanjivanje štetnih emisija ispušnih brodskih plinova (a najčešće se odlučuju, jer se radi o najviše korištenom i za brod najfunkcionalnijem sustavu). Kod scrubber sustava mokrog tipa, jedinica za prskanje onečišćenog plina iz mlaznica te jedinica u kojoj se vrši sama apsorpcija, najčešće su fizički odvojene, što rezultira većom potrebom sustava za prostorom. Kada govorimo o naknadnoj ugradnji scrubber

²⁶ Marko Buršić & Kristijan Lenac, 2020. *Exhaust Gas Cleaning System*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka

sustava na brod, možda čak važnije od samog prostora je pitanje stabiliteta broda, kojeg će naknadna ugradnja znatno izmijeniti.

Scrubber se do broda vezanog u luci dostavlja kamionima, te se potom brodskim ili lučkim dizalicama u posebnim koferima ukrcava na brodsku palubu. S obzirom da brodovi imaju svoj glavni motor u krmenom dijelu broda ili eventualno u središnjem dijelu, scrubber će biti jednako tako pozicioniran.

Značajke scrubber sustava koje ćemo u nastavku poglavlja podrobnije opisati moguće je vidjeti na primjeru Wärtsilino^g SO_x scrubber sustava na Slici 8.



Slika 8: Wärtsilä SO_x scrubber sustav (preuzeto:

<https://www.smpe.org/sites/default/files/docs/presentations/Wartsila%20Scrubber%20presentation%201-2015.pdf> Wärtsilä Scrubber System)

Inače prikazani sustav sa prethodne slike ima uspješnost uklanjanja SO_x spojeva veću od 98%, čime udovoljava i najstrožim zahtjevima IMO-a.²⁷

Na postojeći sustav cijevi dimnjaka nadograđuje se gornji dio scrubbera poznat pod nazivom toranj scrubbera. Toranj scrubbera je izrađen od visokokvalitetnog čelika i sastoji se od šest razina, a na svakoj razini postavljene su mlaznice koje služe za raspršivanje vode za pročišćavanje. Izbor materijala tornja, ma koji god on bio, vrši proizvođač scrubber sustava. Međutim materijala cjevovoda koji povezuje kompletni sustav strojarnice sa scrubberom ostavljen je na izbor brodaru. Izuzetno je to bitno, jer se dobrim izborom materijala cjevovoda znatno mogu smanjiti težina sustava te njegovi instalacijski troškovi. Kada se radi o scrubber sustavima koji u svom radu koriste morsku vodu, praksa je u prošlosti bila da se za cjevovoda koriste čelikom obložene cijevi. No u sustavima u kojima su se one koristile počeli su se pojavljivati slučajevi lokalne korozije, obično na prirubnicama i zavarenim spojevima. Stoga se danas umjesto cijevi obloženih čelikom koriste cijevi od stakloplastike. Iako je cjevovod od stakloplastike znatno otporniji na razna trošenja nastala tokom rada, čak i on mora biti dodatno zaštićen u predjelu bliže tornju scrubbera. Razlog je utjecaj vrućih ispušnih plinova. Temperatura kojoj su izložene cijevi između uređaja koji proizvodi onečišćeni plin i same jedinice scrubbera jest otprilike 300 °C. Ta temperatura, međutim značajno opada nakon napuštanja tornja scrubbera.²⁸

Ugradnju tornja olakšava činjenica da je njegov promjer samo duplo širi od cijevi ispušnih plinova koja ulazi u njega.²⁹ Osim mlaznicama voda se može raspršivati i s rotirajućim diskovima, zrakom pod pritiskom, cjevčicama za raspršivanje te sudaranjem mlazova tekućine sa strujom zraka. Na vrhu tornja, bio da je on konstruiran po uzoru na Venturijevu cijev ili linijski nalazi se mrežica čija je namjena da spriječi prenošenje kapljica putem ispušnih plinova, takozvani *droplet separator*. Spomenimo još to, da kada se radi o naknadnoj ugradnji scrubbera na brod, linijski tip scrubbera je pogodniji za ugradnju od Venturijeveg tipa scrubbera. Tome je tako prvenstveno zbog manjih gabarita linijskog scrubbera (duplo manji od Venturijeveg).

²⁷ Smpe.org. *Wärtsilä Scrubber Presentation*. URL: <https://www.smpe.org/sites/default/files/docs/presentations/Wartsila%20Scrubber%20presentation%201-2015.pdf>

²⁸ Marko Buršić & Kristijan Lenac, 2020. *Exhaust Gas Cleaning System*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka

²⁹ Wärtsilä Finland OY, Collected presentation: *Wärtsilä Hybrid and Inline Scrubbers Operation*

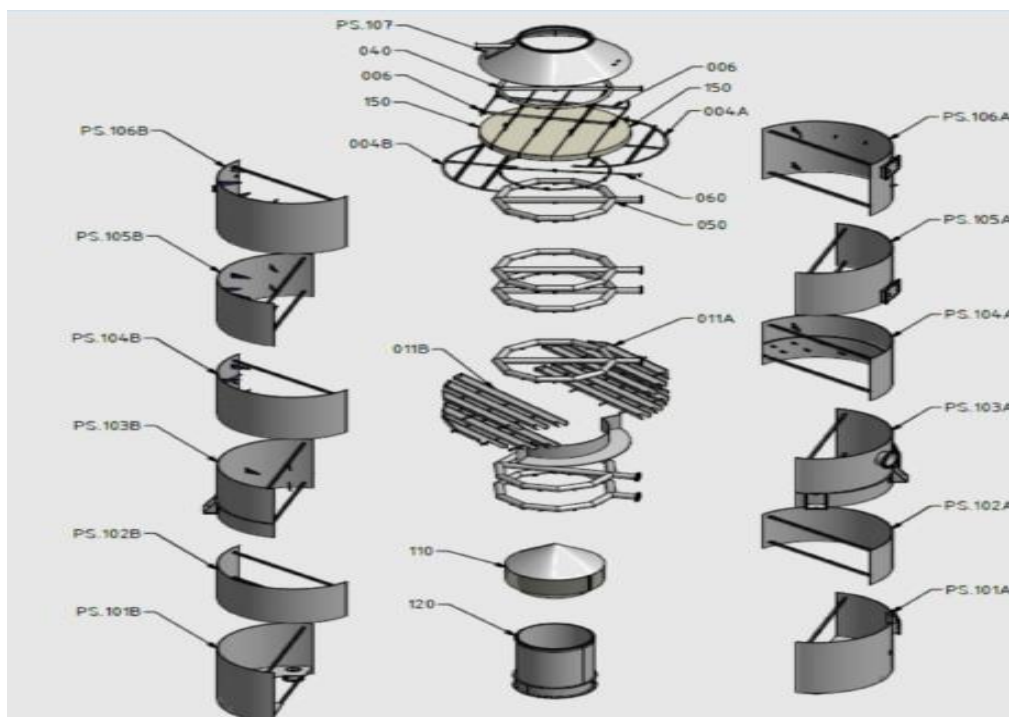
Do tornja scrubbera plinovi se provode toliko puta već spomenutom ispušnom cijevi. Između dijela cijevi koja vodi s motora i dijela cijevi koja vodi u toranj scrubbera postavljen je hladnjak za ispušni plin kao i prigušivač ispuha.

U kontrolnoj sobi strojarnice nalazi se glavna kontrolna jedinica za nadgledanje rada scrubber sistema. Njezin rad temelji se na povratnim informacijama četiri jedinice:

- jedinice za nadzor ispušnih plinova
- jedinice za nadzor ulazne vrijednosti vode za pročišćavanje
- jedinice za nadzor izlazne vrijednosti vode za pročišćavanje
- jedinice za nadzor morske vode na prirubnici van broda (samo kod scrubbera otvorenog tipa)

S glavne kontrolne scrubber jedinice vršu se sve upravljačke radnje, pa tako i pokretanje rada sustava koje se vrši pritiskom na gumb ili display.

Upućivanjem sustava u rad, pumpa za tekućinu direktno iz morskog okružja broda ili tanka s tretiranom vodu, pumpa tekućinu u scrubber gdje se ona raspršuje jednom od metoda (najčešće mlaznicama). Pumpi prethodi serija filtera koja bi trebala osigurati čistoću vode namijenjene za scrubber.



Slika 9: dijelovi tornja scrubbera (bez ventilatora) (izvor: Wärtsilä Finland OY, Collected presentation: *Wärtsilä Hybrid and Inline Scrubbers Operation*, 2017., *Inline scrubber parts*)

Oznake za dijelove tornja scrubbera date su u tablici ispod:

| LEGENDA SLIKE 9 | |
|---|--|
| OZNAKA | ZNAČENJE |
| PS107 | vrh tornja |
| PS101B, PS102B, PS103B, PS104B, PS105B, PS106B, PS101A, PS102A, PS103A, PS104A, PS105A, PS106A | dijelovi kućišta |
| 120 | uzlazna cijev za ispušne plinove |
| 110 | zaštitna kapa |
| 050 | par mlaznica |
| 011B, 011A | mrežice za odvajanje kapljica |
| 150, 004A, 004B | završne mrežice za odvajanje kapljica |
| 040 | par mlaznica za paru |

Tablica 3: oznake dijelova scrubbera sa *Slika 9*

U isto vrijeme dok pumpa tlači tekućinu prema mlaznicama, ohlađeni plin iz cijevi dimnjaka se pomoću kontrolnog ventila koji aktivira zaklopku *bajpasira* u komoru tornja scrubbera. U najdonjoj razini tornja, gdje *bajpasirani plin* najprije ulazi, vrši se još jedno dodatno hlađenje s pomoću tekućine iz mlaznica. Na ovoj razini ukloniti će se i većina onečišćenih čestica koje se iz scrubbera odvođe slivnikom u taložnu komoru, a iz taložne komore u *sludge tank*.

Plin dalje odlazi u reakcijski odjeljak, koji može sadržavati dodatno punjenje radi boljeg pročišćivanja plina. U reakcijskom odjeljku događa se kontakt kapljevine i plina uz pomoć disperzirane vode, te stvaranje njihove smjese. Za slučaj da je ova razina tornja ispunjena odgovarajućim punilom jedan dio čestica će se vezati za punilo. Ovo poboljšava pročišćavanje plina na ovoj razini scrubbera sa 75% (bez punila) na 85%.³⁰

³⁰ fkit.unizg.hr., 2020. *Predavanje 5/Skrubiranje*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

Nadalje plin dolazi u demister u kojem se nalaze mlaznice za paru čija je uloga čišćenje mrežice za sprječavanje prenošenja kapljica dalje kroz sustav. Preostali plin odlazi van broda, a tome pridonose ventilatori.

Izvedba scrubber sustava može biti takva da jedna jedinica obavlja pročišćivanje za sve potrebite uređaje ili pak tako da svaki uređaj čiji se ispušni plinovi moraju pročistiti ima zasebnu scrubber jedinicu. Unatoč tome što jedna zajednička scrubber jedinica ima manje troškove ugradnje i instalacije (kao i ekonomičniju iskoristivost prostora) nego sustav sa više jedinica, brodari se češće odlučuju na potonju opciju radi veće operativne fleksibilnosti, ali i većeg kapaciteta. Testiranja su također pokazala da sustav sa odvojenim jedinicama daje bolje rezultate pročišćivanja ispušnih plinova. Ovo se naročito očituje kada svi motori i kotlovi nisu u pogonu.³¹

Izbor scrubber sustava uvelike će zavisiti od glavne putničke rute broda, to jest od alkalnosti vode u kojoj plovi. Ostali parametri bitni za izbor sustava su: raspoloživost prostora za ugradnju, željena učinkovitost, snaga motora i kotlova, značajke otpadnih plinskih struja, količina slatke vode raspoložive za korištenje te raspoloživost snage na brodu za pogon sustava u razno raznim uvjetima.

5. SUHI SCRUBBER

Dok je primarna metoda za uklanjanje dušikovih spojeva iz ispušnih plinova brodskih uređaja selektivna katalitička redukcija (SCR eng. *Selective Catalytic Reduction*), za sumporove spojeve je to skrubiranje mokrim i suhim sredstvom. Preciznije rečeno za uklanjanje sumporovih spojeva na brodu u mnogo većem obujmu se koristi scrubberi s mokrim sredstvom nego oni sa suhim. Međutim, pošto ćemo scrubbere sa mokrim sredstvom i njegove podgrupe obrađivati u zasebnom poglavlju, jedno poglavlje ćemo posvetiti i suhim scrubberima.

Suhi scrubberi ili ti ga scrubberi sa suhim sredstvom pretežito koriste u kopnenoj industriji, a u manjoj mjeri na brodu. Njihova uporaba krenula je u 70-tim godinama prošloga stoljeća.

³¹ Pacificgreen-group.com. How To Choose The Right Scrubber For IMO 2020. URL: <https://www.pacificgreen-group.com/articles/how-choose-right-scrubber-imo-2020>

Proces suhog skrubiranja se može podijeliti prema stanju granulata za apsorpciju na:

- skrubiranje sa suhim granulatom
- skrubiranje sa granulatom u formi spreja

Kod **skrubiranja sa suhim granulatom** neki suhi alkalni granulat se izravno dodaje u jedinicu u kojoj se odvija miješanje granulata i onečišćenog plina, te tu dolazi do reakcije. Reakcija granulat i onečišćenog plina rezultira stvaranjem čvrstih čestica koje se potom uklanjaju iz reakcijske jedinice. Ovakav način suhog skrubiranja je manjkav iz razloga što se njime može postići samo ograničeno pročišćavanje štetnih plinova poput SO₂, i HCl. Sustav kod ovakvog procesa može se poboljšati ugradnjom hladnjaka kroz koji će ispušni plinovi proći prije ulaska u toranj scrubbera. Kao i svi suhi scrubberi, tako i ovi, više su korišteni u kopnenoj industriji, naročito u spalionicama medicinskog otpada i u pogonima za sagorijevanje komunalnog otpada.³²

Skrubiranje sa granulatom u formi spreja vrši se na način da se isto kao i kod svakog drugog procesa skrubiranja onečišćeni plinovi sprovedu u toranj scrubbera, a potom u ovom konkretnom slučaju, dolaze u kontakt sa fino raspršenom alkalnom *kašom*. Kao i kod prethodnog procesa rezultat reakcije su čvrste čestice koje se uklanjaju iz reakcijske jedinice. Iako su dva procesa suhoga skrubiranja u biti vrlo slična, skrubiranje sa granulatom u formi spreja ostvaruju ipak puno bolje rezultate u vidu pročišćivanja, koji ide i preko 80%učinkovitosti.³³

Za cilj imaju uklanjanje plinovitih i problematičnih komponenti poput primjerice HF, SO₂, HCl, PAH. Uklanjaju također teške metale, mirise iz otpadnih ili korozivnih plinova. Za uklanjanje štetnih emisija ispušnih plinova koriste krute tvari u rasutom sredstvu. Ustvari za razliku od mokrih scrubbera koji koriste natrijev hidroksid, suhi scrubberi koriste dvostruko manje opasnu kalcijevu kemikaliju. To je granulat nastao od alkalne *kaše* koja je u ovakvom načinu apsorpcije baza. Obično se radi o peletima od hidratiziranog vapna ili kuglicama kalcijevog hidroksida. Promjer kuglica kreće se između 2 mm i 8 mm. Ovakvoga granulata je potrebno utrošiti 19 tona ili 24 m³ po danu ako uzmemo za pretpostavku da na brodu imamo motor snage 24 MW, te da pogonsko gorivo sadrži 2,7 % sumpora na ekvivalent emisija potrošnje goriva s 0,1 % sumpora.

³² en.wikipedia.org. Scrubber. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Scrubber>

³³ en.wikipedia.org. Scrubber. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Scrubber>



Slika 10: prikaz kuglica kalcijevog hidroksida i njihove veličine (izvor: Alfa Laval: *Understanding exhaust gas treatment systems*, 2012., *Calcium hydroxide granules*)

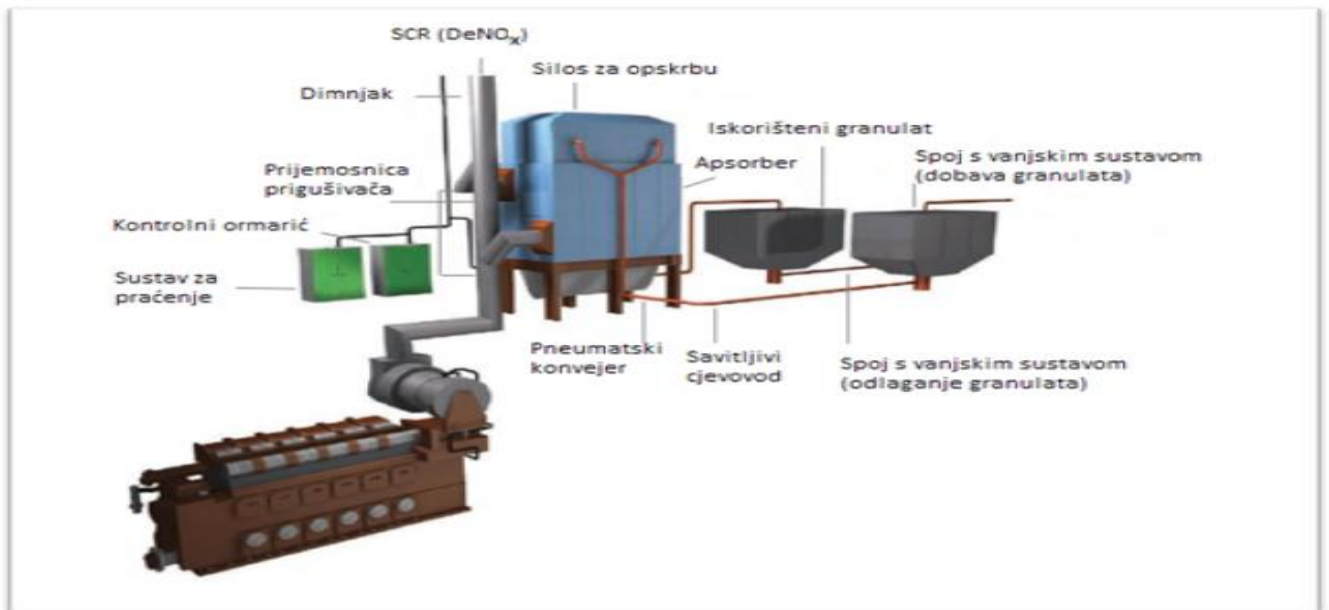
Iako je rečeno da je kalcijev hidroksid duplo manje opasan od natrijevog hidroksida svejedno je potrebno pažljivo rukovanje jer se radi o iznimno jakoj lužini. U slučaju neopreznog rukovanja može doći do oštećenja kože, očiju kao i respiratornog sustava.

Za razliku od scrubbera s mokrim sredstvom, ovaj sustav nije toliko konstrukcijski zahtjevan pa samim time ne iziskuje tolika novčana sredstva u pogledu ugradnje i održavanja.

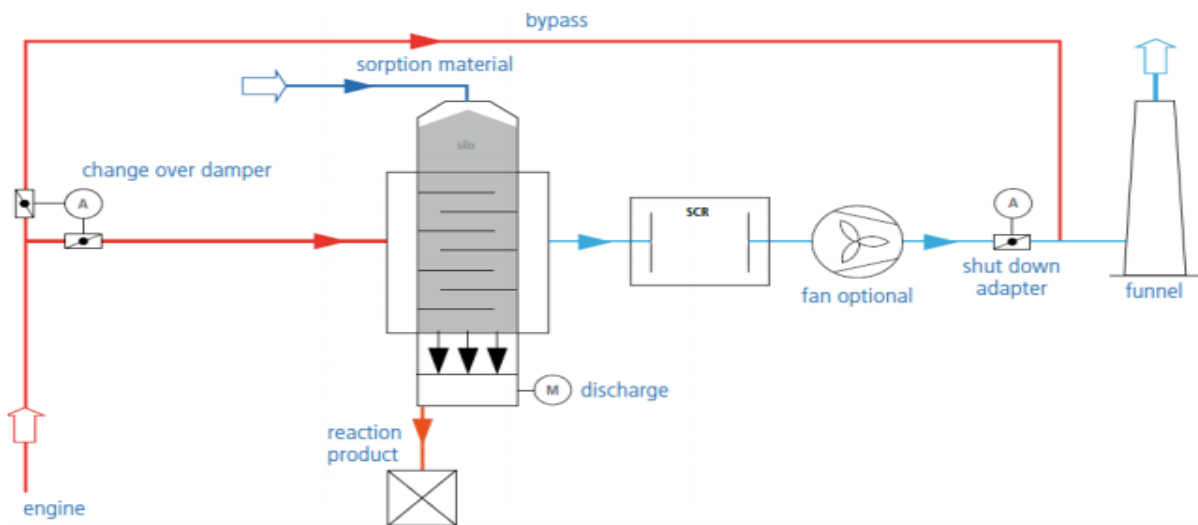
Konkretno govoreći sastoji se od četiri osnovna dijela i to: upijača u dimnjaku broda u kojeg se dovodi apsorvent, pokretne trake kojom se dovodi apsorvent, spremnika iz kojeg se apsorvent dovodi te spremnika gipsa koji je rezultat reakcije apsorbenta i emisija onečišćenog plina. Spremnik u kojem se apsorvent nalazi se mora moći nepropusno zatvoriti te mora biti u potpunosti suh zbog higroskopnosti apsorbenta.

Od ranije uskladišteni apsorvent se iz svoga spremnika, pokretnom trakom dovodi do upijača. Za to vrijeme onečišćeni plinovi izgaranja se cjevovodom također dovode do upijača. U upijaču apsorvent reagira zajedno sa onečišćenim plinskim spojevima. Reakcija će rezultirati kemijskim procesom i stvaranjem gipsa i vode. Voda odlazi kroz odvod upijača u sludge tank, dok se gips zasebnim cjevovodom odvodi u poseban tank za skladištenje. Pročišćeni plin iz upijača se otpušta u atmosferu kroz brodski dimnjak. Nije rijetkost da je sustav za pročišćavanje ispušnih plinova tako konstruiran da nakon upijača plinovi odlaze da dodatno pročišćavanje metodom SCR-a iz razloga što suhi scrubberi ne otklanjaju u potpunosti dušikove spojeve iz onečišćenog plina.

I slikovni i shematski prikaz suhog scrubber sustava moguće je vidjeti na iduće dvije slike sa iduće stranice (naglasak je da se kod *Slike 11* radi o dizajnu s dodatnim SCR pročišćavanjem).

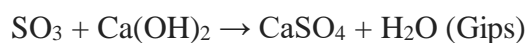


Slika 11: ilustrativni prikaz suhog scrubber sustava (izvor: Alfa Laval: *Understanding exhaust gas treatment systems*, 2012., *A dry SO_x scrubber system*)



Slika 12: shematski prikaz suhog scrubber sustava (izvor: Aarhus School of Marine and Technical Engineering : *Comparing Wet and Dry Exhaust Gas Cleaning Systems*, 2013., *Dry Couple System in combination with SCR*)

Kemijski dio priče kod suhog scrubiranja prikazan je u slijedećim formulama:



Proces pročišćivanja u suhim scrubberima odvija se na znatno većim temperaturama nego kod mokrih scrubbera, a radi se o temperaturama između 240 °C i 450 °C. Ovakav način rada za benefit ima sagorijevanje i uklanjanje sve čađe i masnih ostataka iz sustava.

Kada se već pokrenula tema o usporedbi suhi i mokrih scrubbera, korisno će biti pogledati iduće dvije tablice za stjecanje dubljeg dojma.

| TABLICA KARAKTERISTIKA BRODSKIH SCRUBBERA | | |
|--|---|---|
| STAVKA | MOKRI SCRUBBER | SUHI SCRUBBER |
| Apsorbent | slatka ili morska voda | peleti ili kuglice |
| Temperatura | niža nego kod suhi scrubbera | viša nego kod mokrih scrubbera, toliko viša da pri njoj i čađa izgara |
| Snaga | potražuje više snage nego suhi scrubber | 0.15-0.20 snage motora |
| Zbrinjavanje nusprodukta | nakon tretiranja, kod otvorenih sustava, otpušta se van broda | pohranjuje se u lukama |
| Težina | lakši od suhog scrubbera | teži od mokrog scrubbera |
| Podtipovi | otvoreni, zatvoreni, hibridni | sa suhim granulatom, sa granulatom u obliku spreja |

Tablica 4: usporedba karakteristika suhog i mokrog scrubbera

| | Otvoreni sustav mokrog prečistača | Zatvoreni sustav mokrog prečistača | Hibridni sustav mokrog prečistača | Prečistači sa suhim sredstvom |
|---|--|--|--|--|
| Rad u slatkim vodama | Ne | Da | Da, u slučaju da je u uporabi zatvoreni sustav | Da |
| Rad bez ispuštanja u morsku vodu | Ne | Ograničen period, ovisno o dimenzijama spremnika | Ograničen period, ovisno o dimenzijama spremnika | Da |
| Težina (za 20 MW SO _x prečistač) | 30-55 t | 30-55 t | 30-55 t | 200 t |
| Potrošnja energije (% snage motora) | 1-2 % | 0,5-1% | 0,5-2% | 0,15-0,20% |
| Potrošni materijal za rad prečistača | Ne postoji | Otopina natrijevog hidroksida (6l/ MWh·%S) | Otopina natrijevog hidroksida (6l/ MWh·%S) | Granule kalcijevog hidroksida (10kg/MWh·%S) |
| Kompatibilnost sa sustavom za ponovno korištenje otpadne energije | Da, u slučaju da je prečistač instaliran poslije sustava | Da, u slučaju da je prečistač instaliran poslije sustava | Da, u slučaju da je prečistač instaliran poslije sustava | Da. Može se ugraditi prije ili poslije sustava |
| Uklanjanje čvrstih čestica | Da | Da | Da | Da |

Tablica 5: usporedba tehnologija brodski scrubbera (izvor: Alfa Laval, 2012, *Comparison of SO_x scrubber technologies*)

Tablica 5 izuzetno je opširna, tako da su u njoj uspoređeni suhi scrubberi sa sva tri podtipa mokrih scrubbera o kojima se još uvijek u radu nije opširnije govorilo.

Pričajući o usporedbama, te govoreći o benefitima jedne ili druge scrubber tehnologije (suhe ili mokre) može se zaključiti da suhi scrubberi uz manju konstrukcijsku zahtjevnost i veću povoljnost za prednost u odnosu na mokre imaju i manju potrošnju električne energije. Važna stavka je, pričajući o budućnosti, ta da se nusprodukt suhog skrubiranja, dakle gips može i prodati kasnije na kopnu u industrijske svrhe.

Postavljamo si pak pitanje zašto onda obujam njihove uporabe na brodu nije ni približan kao mokrih scrubbera. Ukratko odgovor bi se mogao sažeti u četiri riječi: skupoća, težina, nužnost skladištenja. Da pojasnimo.

Cijelo vrijeme tvrdimo da su suhi scrubberi financijski povoljniji od mokrih. Istina. Povoljniji i jesu u samome startu i ugradnji. Međutim apsorvent kod mokrih scrubbera je voda, koja je vrlo često potpuno besplatno uzeta iz brodske okoline. Apsorbent kod suhi scrubbera je industrijski proizvod iznimno visoke cijene kojega je stalno potrebno nabavljati da mi sustav suhog skrubiranja uopće funkcionirao. Spominjući već nabavu kažimo da taj apsorvent ni ne možemo nabaviti u svakom trenutku. Primjerice, na sred otvorenog mora nema mogućnosti dobave apsorbenta za suho skrubiranje, dok je morska voda dostupna praktički u bilo kojem trenutku pomorskog putovanja. Sve navedeno nam daje do znanja da su suhi scrubberi dugoročno skuplji od mokrih.

Mokri scrubberi izrađuju se od težih materijala nego suhi što samo za sebe dovoljno govori zašto su u prednosti u pogledu težine.

Treća esencijalna mana suhих u odnosu na mokre scrubbere je potreba za skladištenjem apsorbenta, ali i reakcijskog nusprodukta. Naime, apsorvent suhих scrubbera je kruti proizvod koji zahtjeva skladištenje u posebna skladišta, koja pak zauzimaju dodatni prostor na brodu. Također gips koji nastane reakcijom onečišćenog plina i apsorbenta u reakcijskoj jedinici suhog scrubbera nije moguće odbaciti u more, već ga treba skladištiti (što iziskuje ugradnju još jednog dodatnog skladišta) i potom ili predati lučkim vlastima ili prodati zainteresiranom kupci po pristanku u luku. Apsorbent mokrih scrubbera može se jednostavno crpiti po potrebi iz mora ili već postojećih brodskih tankova vode, dok je nusprodukt reakcije kod otvorenih sustava mokrog skrubiranja moguće jednostavno ispustiti u morsku okolinu.

Glavni su ovo razlozi zašto su mokri scrubberi u značajnoj većini na brodovima. Stoga ćemo ih kao za ovaj rad bitnije, podrobnije analizirati u nastavku rada.

6. MOKRI SCRUBBERI

6.1. Općenito

Stigli smo do glavnog načina pročišćavanja onečišćenih ispušnih plinova na brodu, a radi se o procesu mokrog pročišćavanja (skrubiranja) poznatih kao mokri scrubberi.

Rečeno je već mnogo puta u radu međutim vrijedi ponoviti. Osnovni segment koji ih razdvaja od suhih scrubbera je medij koji koriste za apsorpciju, a radi se o slatkoj ili češće slanoj vodi. U scrubber sustav se pušta voda, u scrubber voda vrši reakciju, iz scrubber se voda otpušta. Jednostavno.

Materijali od kojih se u tvorničkim postrojenjima scrubberi izrađuju ovise o operativnoj temperaturi scrubbera, abraziji, koroziji i kemijskom djelovanju. U *Poglavlju 4* već je naznačeno da se sve vrste scrubbera na brod dostavljaju u posebnim kovčezima. Nakon toga slijedi ugradnja svakog pojedinačnog dijela sustava, gdje posebnu važnost ima pump vode kojom se dobavlja voda za apsorpciju.



Slika 13: ukrcaj scrubber pred instalaciju na brod pomoću lučkih dizalica (izvor: Alfa Laval: *Understanding exhaust gas treatment systems*, 2012., *Retrofitting of a closed loop scrubber with baypass*)

Dobava se kod mokrih tipova scrubbera vrši direktno iz mora ili iz posebnog tanka vode za apsorpciju. Voda, bila ona morska ili kemijski tretirana ulazi u toranj scrubbera u kojem se odvija miješanje nje same i onečišćenih plinova brodskih uređaja. Prethodno će voda proći kroz izmjenjivač topline, postavljen prije ulaza u toranj scrubbera, da bi se s pomoću njega

uklonila suvišna toplina nastala u prethodnom krugu pročišćivanja plinova. Slijedi proces već ranije spomenute neutralizacije. Miješanje plina, koji u toranj scrubbera ulazi pri brzini od otprilike 100 m/s, te vode za apsorpciju vrši se pomoću mlaznica za raspršivanje. Veličina kapljica vode koje stvara mlaznica je između 100 μm i 1000 μm . Kapljevina se u reakcijsku komoru ubrizgava pri tlaku od minimalno 241 Pa, a maksimalno 344 Pa. Kod ovih sustava nailazimo na implementaciju punjenja tornja scrubbera punilom (eng. *Packed bed*) čija primjena povećava kontaktnu površinu plina i kapljevine tokom prolaska njihove mješavine kroz punilo. Povećanje kontaktne površine između plina i kapljevine ključan je parametar za podizanje uspješnosti apsorpcije. Važno je stoga osigurati što je moguće veći protok tekućine kroz reakcijski toranj scrubbera. Što je protok tekućine veći, time je veća i mogućnost da će kompletna površina sekcije u kojoj se nalazi punilo biti pokrivena. Istraživanje dvojca Thomas i Vanderschuren sugerira da je povećanje kontaktne površine između plina i kapljevine te punila u direktnoj vezi sa temperaturom u tornju što je prikazano slijedećom jednačinom:

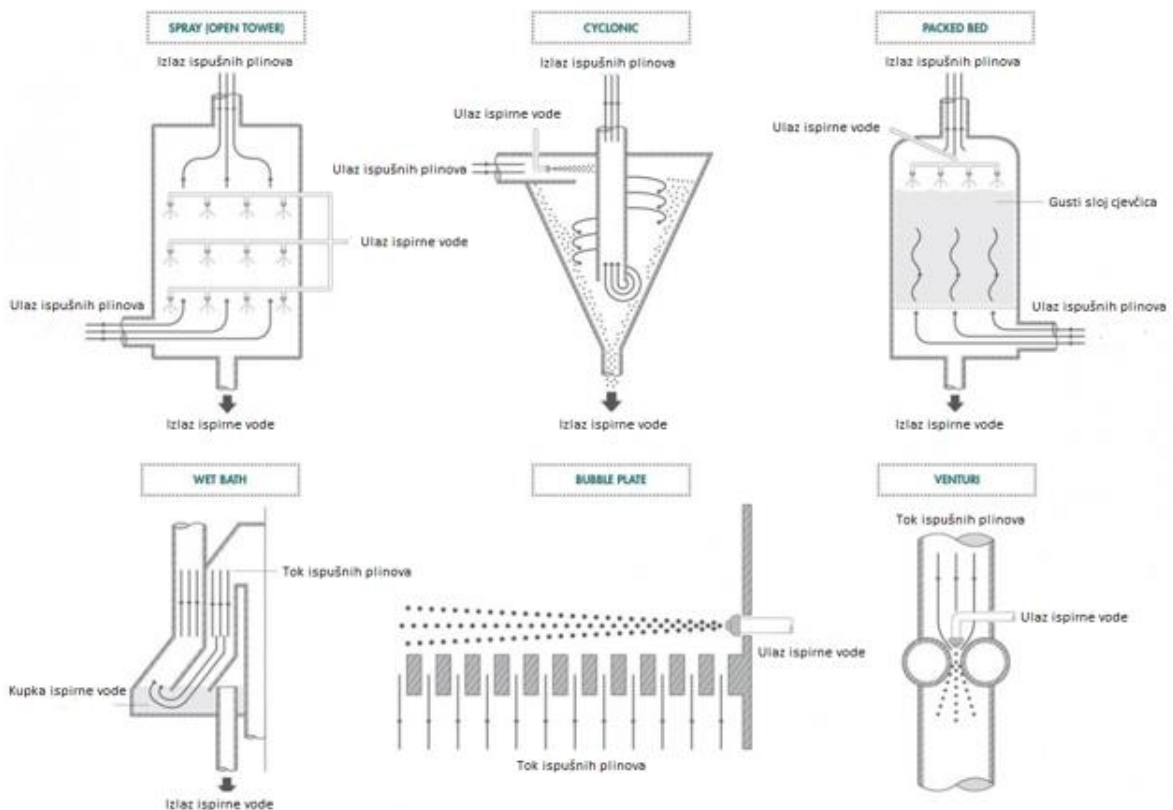
$$a_{p_{HNO_3}}(T) = a_{p_{H_2O}}(293) \left(\frac{v_{HNO_3}(T)}{v_{H_2O}(293)} \right)^{0.7}$$

Nije ovo jedini parametar na kojeg temperatura u tornju scrubbera ima utjecaj. Kod mokrog skrubiranja razina temperature ima utjecaja na postotak uspješnosti apsorpcije emisije NO_x spojeva. Istraživanja su pokazala da se najbolje pročišćivanje dušikovih spojeva kod mokrih scrubbera postiže pri temperaturi od 10 °C.

Nakon ubrizgavanja kapljevine, voda odlazi na daljnje recirkuliranje ili van broda (ovisno već o vrsti mokrog scrubbera) dok se pročišćeni plin kroz dimnjak otpušta van broda. Kao i kod većine ostalih tipova scrubber sustava i ovdje ćemo često naići na demister ili odmagljivač postavljen na izlazu dimnjaka sa svrhom smanjenja količinu kapljične pare da izađe van dimnjaka. Kod više-manje svih scrubbera mlaznice ubrizgavaju kapljevinu s vrha prema dolje, no izvedbe gdje su mlaznice postavljene pri dnu i ubrizgavaju kapljevinu prema gore je također moguće pronaći u ponudi. Putanja raspršenih kapi igra bitnu ulogu u učinkovitosti same apsorpcije.

Sami toranj scrubbera u kojemu se miješanje odvija je ugrađen ili u kućište motora ili okomito u brodski dimnjak iz razloga što se toranj scrubbera ne može vodoravno ugraditi. Naime proces mokrog skrubiranja zahtjeva protustrujno međudjelovanje između ispušnog

plina i apsorpcijske kapljevine koje je moguće samo kod okomite ugradnje. Toranj može biti raznih izvedbi, ovisno već kakvo miješanje želimo postići.



Slika 14: izvedbe tornjeva kod mokrih scrubbera ((izvor: Aarhus School of Marine and Technical Engineering : *Comparing Wet and Dry Exhaust Gas Cleaning Systems*, 2013., *Classical types of wet towers*)

U jednom od šest poviše prikazanih izvedbi tornjeva ustvari događa se *lijepljenje* čvrstih čestica za kapljevinu i stvaranje aglomerata (većih čestica) koje se potom lakše separiraju. Prijenos tvari između onečišćenog plina i tekućine odvija se pri njihovom međusobnom kontaktu u tornju. Kontakt koji kasnije dovodi do pročišćavanja plina može se ostvariti zahvaćanjem čestice plina s tekućinom, inercijskim sudarom ili difuzijom koja se još naziva Brownovo gibanje po škotskom botaničaru Robertu Brownu.

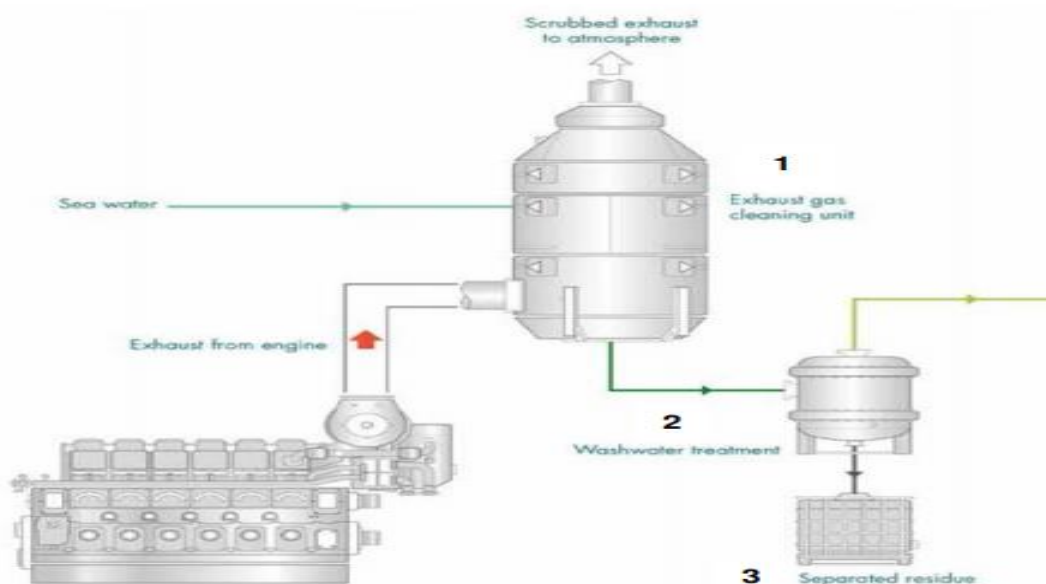
Najčešći proces separacije čvrstih onečišćenih čestica zasniva se na inerciji aglomerata kapljica i čestica. Koliko će uspješan proces pročišćavanja plina te potom separacije čestica

koje nastaju biti ovisi o: veličini površine kontakta, veličini promjera kapljica, temperaturi te koncentraciji onečišćenja.³⁴

Može se reći da se svi mokri scrubberi, bez obzira kojem tipu pripada, sastoje od četiri osnovna dijela ili jedinice:

- dijela za čišćenje
- dijela za obradu medija za čišćenje
- dijela za kontrolu ispušnih plinova
- dijela za zbrinjavanje medija za čišćenje

Prikaz ova četiri dijela, to jest jednog najjednostavnijeg mokrog scrubbera sa svojim osnovnim komponentama moguće je vidjeti na shemi ispod.



Slika 15: najjednostavniji sustav mokrog skrubiranja (izvor: Aarhus School of Marine and Technical Engineering : *Comparing Wet and Dry Exhaust Gas Cleaning Systems*, 2013., *Basic wet EGCS*)

Svi mokri scrubberi mogu podijeliti u tri osnovne grupe:

- otvoreni scrubberi (*Open loop scrubber*)
- zatvoreni scrubberi (*Closed loop scrubber*)

³⁴ fkit.unizg.hr., 2020. *Predavanje 5/Skrubiranje*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

- hibridni tip scrubbera (*Hybrid loop scrubber*)

Svaki od ova tri tipa mokrih scrubber sustava nosi sa sobom određene prednosti i mane i svaki je specifičan na svoj način. Mi ćemo u idućoj tablici obratiti pozornost na trošak njihove ugradnje, bilo da se radi o ugradnji na brodovima bez scrubber sustava (starim brodovima) ili novogradnji.

| TIP SCRUBBERA | UGRADNJA NA STARE BRODOVE (teretni brodovi, 20 MW) | UGRADNJA NA NOVOGRADNJU (teretni brodovi, 20 MW) |
|------------------------|--|--|
| Otvoreni scrubber | 2 400 000 € | 2 100 000 € |
| Zatvoreni scrubber | 2 400 000 € | 1 900 000 € |
| Hibridni tip scrubbera | 3 000 000 € | 2 600 000 € |

Tablica 6: troškovi ugradnje raznih scrubber sustava na brod (izvor:

https://www.researchgate.net/figure/Estimated-installation-cost-for-different-types-of-scrubbers_tbl2_273632553, *Estimated installation cost for different types of scrubbers*)

Kojoj će grupi mokri scrubber koji se, koristi još od polovice tridesetih godina prošloga stoljeća, pripadati zavisi dali koristi slatku ili slanu vodu za apsorpciju. Ipak glavni kriterij pripadnosti ovisi ponajprije o tome dali vodu koju koristi za pročišćavanje ispušta van broda za slučaj da udovoljava MARPOL regulativama ili je zadržava na brodu te je kasnije predaje lučkim vlastima.

Što se kapljevine za apsorpciju tiče, ako se radi u morskoj vodi radi njezine lužnatosti nije je potrebno dodatno kemijski tretirati. Međutim za slučaj da se za apsorpciju koristi slatka voda, potrebno ju je dodatno tretirati i to najčešće sa kaustičnom sodom (NaOH) ili sa vapnencem (CaCO₃). Obično nam je za apsorpciju 1 m³ onečišćenog ispušnog plina potrebno 1 do 3 litre tekućine, čiji je protok između 1,34 i 2,68 l/ m³.³⁵

Uspješnost pročišćivanja onečišćenih brodskih plinova kod mokrih scrubber kreće se između 60 i 90%, zavisno već o tipu mokrog scrubber sustava. Značajno je da postotak pročišćenosti stalno raste zbog neprestanog razvoja ovog tipa scrubbera. Konkretno primjer tog neprestanog razvoja mokrih scrubbera je maksimiziranje površine tekućine za apsorpciju koja dolazi u dodir

³⁵ fkit.unizg.hr., 2020. *Predavanje 5/Skrubiranje*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

sa onečišćenim plinom. Dobar primjer maksimizacije površine je korištenje posebnog punila opisano na stranici 34 ovog rada. Primjena ove metode znači da će povećanjem površine tekućine biti povećana površina kontakta tekućine i plina te samim time i količina pročišćenih čestica ispušnih plinova. Količinu pročišćenih čestica moguće je povećati i povećanjem tlaka plina i atomiziranjem veće količine tekućine što za posljedicu ima primjenu veće energije. Još neke od mogućnosti su snižavanje temperature, povećanje protoka i postizanje toplinskog gradijenta u uskim prolazima scrubbera. Sve ove tri zadnje navedene metode dovode do porasta veličine onečišćenih čestica.

Kakogod uz brojne pogodnosti mokri scrubberi imaju i svoje mane. *Pranje* plinova puno je kompliciranije nego što na prvu zvuči. Ova metoda već dokazana u kopnenim postrojenjima, postavlja brojne izazove pred brođare i njihovu posadu. Nedostaci se očituju u taloženju kamenca, padu tlaka dimnih plinova, začepljivanju sustava a ni sami troškovi nisu zanemarivi. Naime troškovi same instalacije scrubbera kreću se od 500 000 pa čak do 5 000 000 \$, što ovisi od proizvođača te veličine broda. Ipak, ovi troškovi bi s vremenom trebali postajati sve niži i niži kako potražnja za scrubberima općenito bude rasla. Glava mana bih ipak bila to što mokra *Open Loop* izvedba donosi određene okolišne probleme, pa stoga brojne države zabranjuju njezinu uporabu u svojim teritorijalnim vodama.

Nakon obrade ovog općeg dijela o mokrim scrubberima u idućim potpoglavljima *Poglavlja 6* pozabaviti ćemo se iscrpnom analizom svakog pojedinog tipa mokrih scrubbera.

6.2. Mokri scrubberi otvorenog tipa (*Open Loop Scrubbers*)

Prvi tip mokrih scrubbera koji ćemo predstaviti u ovom završnom radu je otvoreni tip za kojeg se u struci češće koristi engleski naziv *Open Loop*. Ovaj jednostavan sistem predstavlja najjednostavnije rješenje u pogledu ugradnje i troškova rada, te je od tri postojeća mokra sustava skrubiranja na brodovima, sustav otvorene petlje je najzastupljeniji. GlobalData je u siječnju 2020. godine kao rezultat istraživanja u suradnji sa DNV GL objavio podatak da od 3 756 brodova koji imaju ugrađen mokri sustav pročišćivanja na sebi, njih 3691 koristi otvoreni sustav. Drugi najzastupljeniji mokri sustav, onaj zatvoreni zastupljen je tek sa 65 brodova. Ovo je naročito izraženo kod brodova za prijevoz rasutog tereta te na kontejnerskim brodovima. Uzrok ovakve situacije na svjetskoj brođarskoj pozornici vjerojatno leži u tome da je otvoreni sustav od sva tri mokra sustava najpovoljniji, te da se prvotno ulaganje u njega

najbrže vraća (obično se radi od jednoj do dvije godine).³⁶ Brodovi sa hibridnim sustavom skrubiranja nisu uzeti u obzir pri ovom istraživanju.

Naziva se otvorenim sustavom iz razloga što za razliku od zatvorenog sustava, ne zadržava vodu koju koristi za apsorpciju onečišćenih plinskih produkata brodskih uređaja unutar broda, već je uz zadovoljavanje IMO regulativa izbacuje natrag u morski okoliš. Provjera dali je vode koja se ispušta u more iz sustava otvorene petlje u granicama zadatih IMO parametara, vrši se uz pomoć uređaja za nadziranje kvalitete vode za ispiranje. Voda za ispiranje koja se ispušta van broda znana je još i pod terminom *Washwater*. Radi se o morskoj vodi koja je tijekom pročišćavanja unutar zatvorenog scrubber sustava na sebe poprimila sumporove i dušikove štetne emisije te ostale nečistoće.

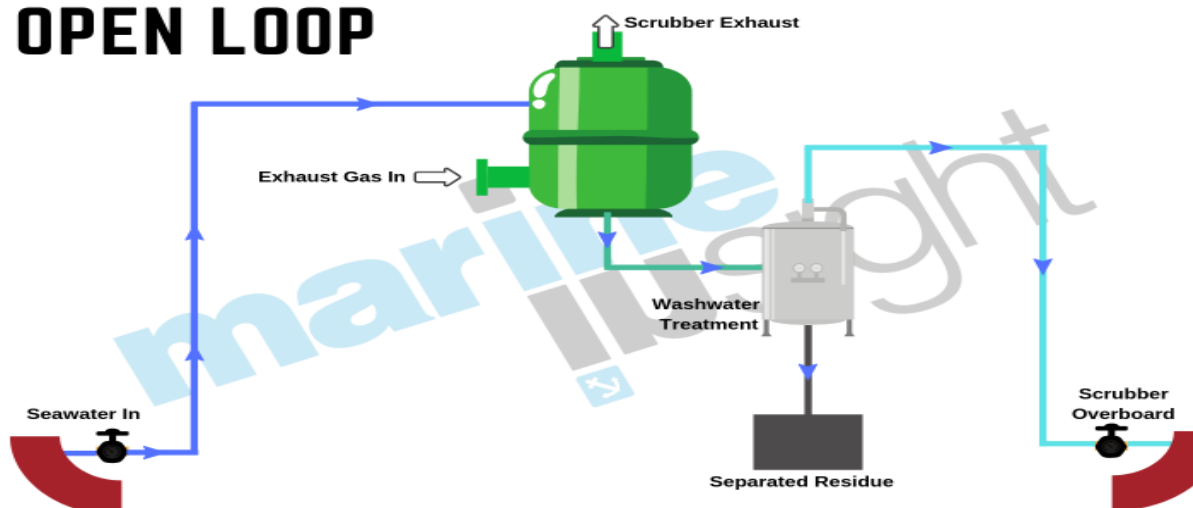
Jasno je dato do znanja da ovaj tip sustava odnosi primat u brodskoj industriji u odnosu na sve ostale tipove scrubbera, poglavito u odnosu na svog glavnog konkurenta, mokri scrubber zatvorenog tipa (*Closed Loop*). Sustav otvorene petlje je zastupljeniji, premda i jedan i drugi sustav imaju svoje prednosti i mane. Njihovu usporedbu moguće je vidjeti u *Tablici 7*.

| | Otvoren sustav | Zatvoren sustav |
|----------------------------------|--|---|
| Ruta | Nema ograničenja ispuštanja u slučaju bazičnih voda | Nisko bazične vode i luka sa zabranom ispuštanja |
| Energija koju troši medij | Visoka | Niska |
| Aditivi | Da | Ne |
| Dodatna oprema | Malo | Mnogo |
| Primjena goriva | Potrebno je koristiti nisko-sumporno gorivo u ECA zoni i mjestima za zabranom ispuštanja | Uvijek je moguće koristiti visoko-sumporno gorivo |
| Instalacija | Moguća u ograničenim prostorima | Potrebno je više strukturnih promjena |

Tablica 7: usporedba Open Loop i Closed Loop sustava (izvor: Johanna Snickars-Nykamb, 2017, *Treatment of Washwater From Open Loop Scrubbers*)

³⁶ pacificgreen-group.com. The Lies Surrounding Open Loop Exhaust Gas Scrubbing Systems. URL: <https://www.pacificgreen-group.com/articles/lies-surrounding-open-loop-exhaust-gas-scrubbing-systems>

OPEN LOOP



Slika 16: kompozicija otvorenog scrubber sustava (preuzeto:

<https://www.marineinsight.com/tech/exhaust-gas-scrubbers-of-ships/> *Open Loop*)

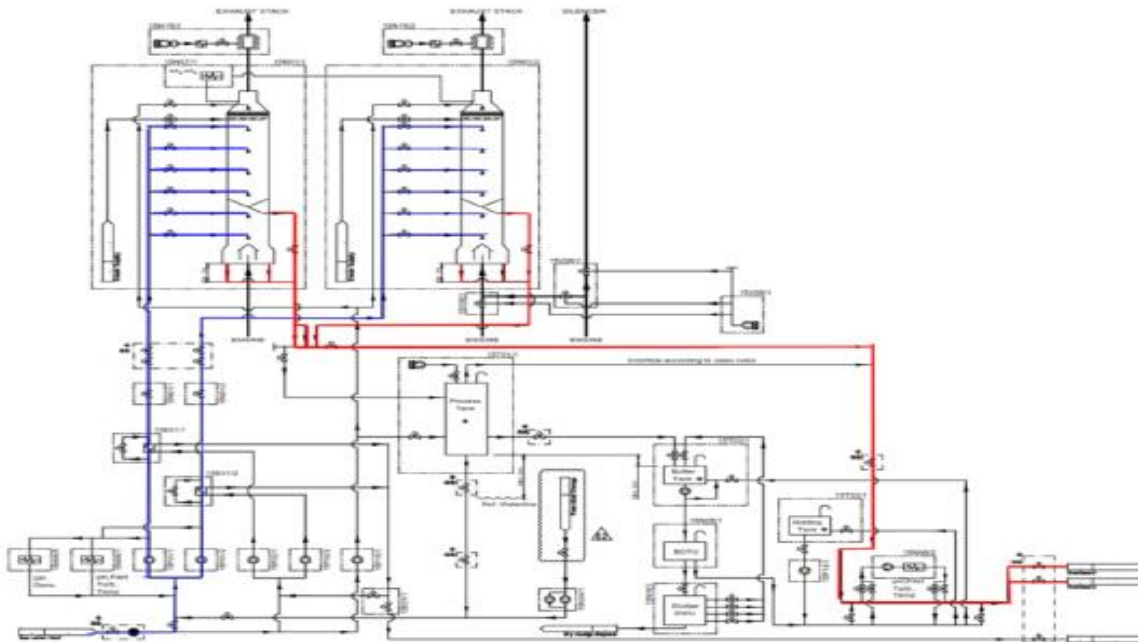
Jednako kao što iskorištenu vodu izbacuje u more, prvotni apsorber, ili ti ga more, uzima logično iz mora. Dakle ovaj sustav koristi pogodnost morske vode, to jest njenu alkalnost, da bi bez dodatnog kemijskog tretiranja pročistio brodске plinove. Alkalnost morske vode varira od područja do područja plovidbe, primjerice jednaka alkalnost nije na otvorenom moru ili pak u luci. Zatim čak se i otvorena mora razlikuju po salinitetu, jer nije isto dali plovite po Tihom oceanu ili Baltičkom moru koje je poznato po svojoj niskoj alkalnosti. Interesantno je recimo da čak i veliki broj rijeka ima određenu alkalnost potrebnu za rad scrubber sustava koji koristi slanu vodu. Plitke ili pijeskom izuzetno bogate vode također nisu pogodne za rad mokrih scrubbera otvorenog tipa, naprosto zato što pijeska ili sitne nečistoće s dna mogu biti pogubne za sustav ako uđu u njega. Neka alkalnost otvorenog mora, za koju se može reći da je referentna vrijednost je 2200-2300 $\mu\text{mol/l}$.³⁷

Dobavu mora kroz brodsku flandru vrši na brodu ugrađena pumpa morske vode. Radi preventive na flandi je postavljena serija finih filtera. Ovi filteri svojoj efikasnosti unatoč, ne rješavaju potencijalni problem pijeska, zato što je on toliko sitan da jednostavno prođe kroz filtere na flandi. Neki prosječni kapacitet morske vode kojeg scrubberi otvorene petlje koriste za pročišćivanje bi bio $45\text{m}^3 / \text{MW h}$ kada se za rad glavnog brodskog porivnog stroja koristi

³⁷ egcs.com. What qualities must the water supplied to an exhaust gas cleaning system have URL: <https://www.egcsa.com/technical-reference/what-qualities-must-the-water-supplied-to-an-exhaust-gas-cleaning-system-have/>

gorivo sa 2.7 % limita sumpora.³⁸ Ovom podatku unatoč, za točnu količinu vode za pročišćivanje potrebno je uzeti u obzir veličinu motora te njegovu izlaznu snagu.

Shema koja opisuje rad mokrog scrubbera otvorenog tipa data je ispod.



Plava linija- Morska voda za ispiranje(*Scrubbing water*)

Crvena linija- Voda za ispiranje(*Washwater*)

Slika 17: shema Open Loop sustava (izvor: Wärtsilä Moss AS : *Wärtsilä I-SOX Hybrid Scrubber Process Description*, 2018., *Open Loop System Scheme*)

Kod promatranja sheme sa *Slike 15* izuzetno je bitno uočiti i odvojeno promatrati put čiste morske vode (eng. *Scrubbing water*) i emisijama onečišćene morske vode (eng. *Washwater*).

Kao što je u *Tablici 7* bilo moguće vidjeti i usporediti razne karakteristike scrubber sustava otvorene i zatvorene petlje, tako je i u *Tablici 8* na samom početku iduće stranice moguće vidjeti usporedbu karakteristika vode (mora) za ispiranje u slučaju dva najčešće korištena scrubber sustava na brodovima.

³⁸ egcs.com. Tehnical Reference. URL: <https://www.egcsa.com/technical-reference/references/>

| Način rada scrubbera | | Otvorena petlja, Otvoreno more (Open Loop, Seagoing) | Tijekom manovre, Zatvorena petlja (Closed loop, Manouvering) | Zatvorna petlja u luci(Closed loop, Port) |
|--|-----|---|---|--|
| Dobava morske vode za ispiranje (t/h) | Min | 1722 | 1210 | 302 |
| | Nom | 2460 | 1728 | 432 |
| | Max | 2583 | 1815 | 454 |
| Tlak vode za ispiranje (bar) | Min | 3 | 3 | 3 |
| | Max | 10 | 10 | 10 |
| Maksimalni kapacitet ispuštanja vode za ispiranje (t/MW/h) | | 57.4 | | |

Tablica 8: usporedba karakteristika medija za ispiranje otvorenog i zatvorenog sustava (izvor: *Wärtsilä Moss AS, 2019, EGC system-Technical Manual for Sheme B*)

Metodom objašnjavanja korak po korak, tijekom procesa u scrubberu zatvorene petlje bi išao na slijedeći način: ranije spomenuta posebna pumpa za morsku vodu crpi more kroz flandžu ili prirubnicu, pozicionirano ispod razine mora. Sama pumpa se također nalazi ispod razine mora iz razloga što se ne radi o samousisnim pumpama. Pumpa koja se koristi za tlačenje morske vode mora biti iznimno velikog kapaciteta s obzirom da su za brodske prilike zahtjevi za morskom vodom otvorenog scrubber sustava dosta veliki. Pumpa je ujedno i jedini ozbiljni potrošač energije u ovakvom sustavu. Poštujući načela sustava zalihosti scrubber sustav otvorene petlje koristi dvije pumpe za dobavu mora u svome radu. Obično se radi o dvije centrifugalne pumpe. Već na samom ulazu morske vode u brod postavljen je prvi od sustava za nadziranje morske vode u ovakvom scrubber sustavu. Radi se o sustavu za nadziranje kvalitete ulaza morske vode.

Cjevovodom more se pod hidrauličkim tlakom transferira do scrubber jedinice ili pročistača koja je kod ovakve izvedbe sustava smještena u dimnjaku broda. Pročistač je uređaj koji je podijeljen u više sekcija namijenjenih za apsorpciju onečišćenog plina. Konstrukcijski, ne radi se o nekom zahtjevnom uređaju. Kada bih ga već uspoređivali s drugim brodskim uređajima i

sustavima, mogli bi reći da je po zahtjevnosti održavanja najbliži sustavu inertnog plina na tankerima.³⁹

Za vrijeme dok more prolazi svoj put do pročistača isto rade i ispušni plinovi iz tri podsustava strojarne koji putuju svojim cjevovodom. Onečišćeni plinovi iz brodskog dimnjaka preusmjeravaju se na pročišćavanje ventilom koji se nalazi na spoju brodskog dimnjaka i cijevi koja vodi u reakcijsku komoru scrubbera. Ventil vrši preusmjeravanje kada je scrubber sustav u pogonu. Plinovi potom ulaze u reakcijsku komoru tornja scrubbera pri njenom dnu.

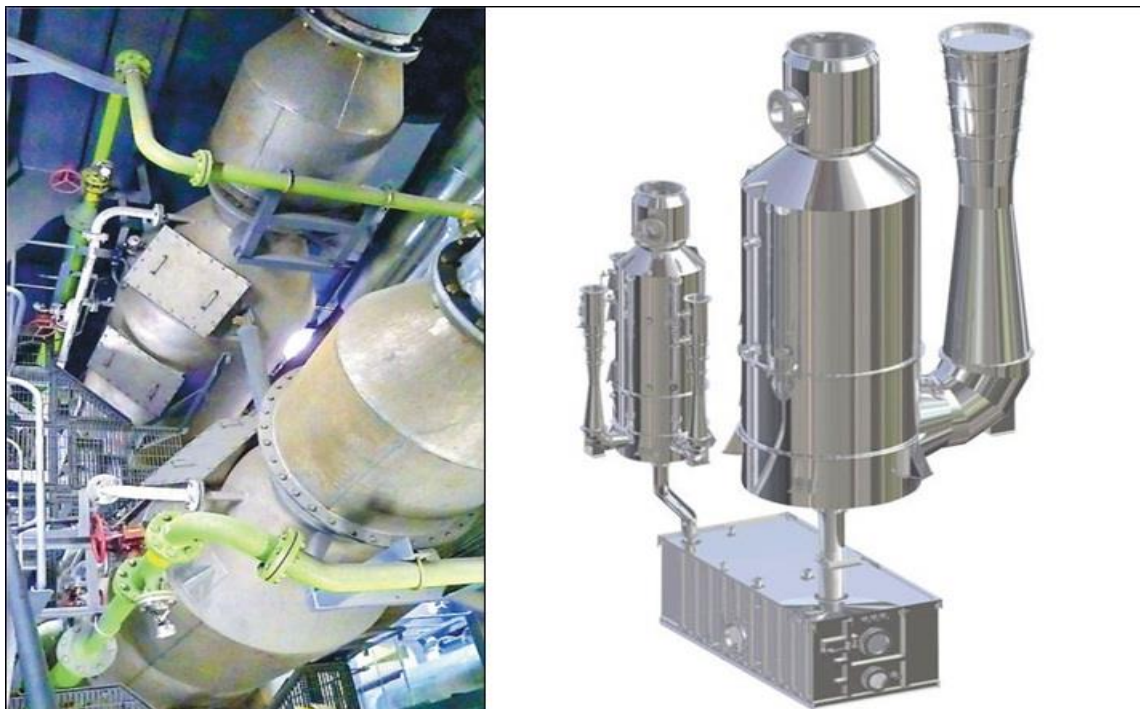
Ulaskom morske vode za apsorpciju i onečišćenih plinova u reakcijsku komoru dolazi do za scrubbere tipičnog miješanja te dvije komponente s pomoću nekog sredstva raspršivanja (i ovdje je kao i kod većine tipova mokrih scrubbera riječ o mlaznicama). Scrubber otvorenog tipa konstruiran je tako da mlaznice raspršuju more s vrha scrubbera vertikalno prema dolje, a samo raspršivanje vrši se na tri razine reakcijske komore. Uobičajena praksa je da se na najdonjoj razini tornja plinovi hlade kako bi se pospješilo njihovo pročišćavanje. Na ovoj razini je i većina onečišćenih čestica apsorbirana. Malo pomalo plin odlazi gotovo u sami vrh tornja gdje je ugrađen odvajač kapljica koji služi da bi maksimalno smanjio kapljice vode preostale u plinu tokom apsorpcije, te ih u biti spriječio da prođu dalje kroz sustav scrubbera.

Dalje prema gore odlazi sami pročišćeni plin kojeg u ovakvim sustavima otvorene petlje, ako se radi o scrubberu U izvedbe, protjeruje ventilator. Prije odlaska u atmosferu plin će biti kontroliran s pomoću sustava za nadzor ispušnog plina, ugrađenog u ispušnoj cijevi scrubbera. Isti taj sustav poslati će povratnu informaciju centralnoj upravljačkoj jedinici sustava, da bi se potvrdilo da je apsorpcija plina bila zadovoljavajuća, te da plin iz brodskih sustava više nije štetan po Zemljinu atmosferu. Dakle plin odlazi u zrak, dok se more korišteno za pročišćavanje plinova ,kao što je to vidljivo na prijašnjim shemama i slikama, naprosto otpušta natrag odakle je na početku procesa i uzeto. U more, odakle i dolazi naziv *otvoreni* scrubber sustav.

Prije nastavka daljnje priče o scrubber sustavima otvorene petlje, kazati ćemo par riječi o Wärtsilinom linijskom scrubberu sa slike koja se nalazi na stranici 41. Radi se dakle o linijskom scrubberu iz 2013. godine koji je po izvorima iz *Wärtsile* do tada bio scrubber konstruiran uz najniže troškove te također najekonomičniji scrubber u pogledu iskoristivosti prostora. Prvi brod na kojemu je scrubber sa prethodne slike bio ugrađen je Color Line's SuperSpeed 2. Ugradnja je izvršena u ožujku 2014. godine i to u danskom brodogradilištu FaYard. Iz *Wärtsile*

³⁹ The Glosten Associates, U.S. Department of Transportation, 2011. *Exhaust Gas Cleaning Systems Selection Guide*

tvrde da je to scrubber s najlakšom instalacijom na brod od svih do tada postojećih, što posebice dolazi do izražaja kod manjih brodova. Broj pokretnih dijelova sveden je na minimum. Uzevši u obzir da korozija može nanijeti ogromnu štetu unutar tornja scrubbera s obzirom da se unutar njega radi s morskom vodom, Wärtsiläni inženjeri osmislili su toranj u potpunosti izrađen od nehrđajućeg čelika. Novitet je što ova izvedba scrubbera ima tri ulaza za vodu koje služi za apsorpciju. Pročišćeni plin otpušten u atmosferu jedan je od dva nusprodukta mokrog sustava otvorene petlje, drugi je voda korištena za apsorpciju. Kao što je na početku potpoglavlja o otvoreni sustavima rečeno, njihova osnovna značajka je da tu vodu za apsorpciju ne zadržavaju unutar sustava ili broda općenito. Ona se naime kroz otvore brodske oplata ispušta natrag u more, odakle je prvotno i uzeta na početku procesa skrubiranja. Scrubber nudi i mogućnost ugradnje dodatne pumpe čija je svrha ostvarivanje većeg tlaka tekućine u području Venturijeve cijevi. Osim što se unutar sustava nadziru štetne emisije SO₂ i CO₂, kontrolni uređaji sustava dodatno prate i parametre pH i PAH (policiklični aromatski ugljikovodici) vrijednosti te zamućenost mora koje se koristi za apsorpciju na ulazu i izlazu petlje. Zamućenost mora za apsorpciju je fenomen uzrokovan pojedinim nevidljivim česticama koji se može usporediti s pojavom dima u zraku.



Slika 18: jedan scrubber otvorenog tipa tvrtke *Wärtsilä*, radi se inače o njihovom najpoznatijem modelu scrubbera (linijskom) iz 2014. godine (preuzeto: <https://officerofthewatch.com/2014/03/10/new-inline-scrubber-system-by-wartsila/> *New Inline Scrubber System by Wärtsilä*)

Nekakav nedostatak ove Wärtsiline izvedbe bi bio taj što se mulj nastao tokom apsorpcije ne može ispuštati u more ni spaliti na brodu, već ga je potrebno skladištiti i predavati lučkim vlastima.⁴⁰ Inače u stručnoj literaturi može se pronaći podatak da scrubber otvorenog tipa na 100 tona potrošenog pogonskog goriva glavnog motora, proizvede otprilike 0.6 tona mulja kao posljedicu apsorpcije.⁴¹

Spomenuto otpuštanje vode prethodno korištene za ispiranje onečišćenih emisija brodskih strojeva je nešto što stvara najviše glavobolje korisnicima sustava otvorene petlje. Konstantno se u ovom radu naglašava važnost i strogoća ekoloških zahtjeva, kako općenito tako i na samom brodu. Stoga ni voda korištena u postupku čišćenja ispušnih plinova ovakvog tipa scrubbera nije lišena strogih kontrola i regulativa, koje joj prije sve nameće IMO. Radi se o mjeri MEPC-a 184(59) koja se odnosi na tekućinu koja se ispušta s broda te njeno tretiranje prije samoga ispuštanja. Mjera je donesena, konkretno u slučaju scrubbera otvorenog tipa, sa svrhom da se spriječi otpuštanje u morsku okolinu štetnih čestica zaostalih tokom pročišćavanja plina u moru iz scrubbera. Zaostale štetne čestice prouzrokovane su od strane tri stavke koje smo ranije naveli da kontrolira sustav nadziranja Wärtsilinog scrubbera iz 2013., a to su: parametre pH i PAH vrijednosti te zamućenost mora za apsorpciju, gdje je poseban naglasak stavljen na pH vrijednost. Naročito je nadzor pH vrijednosti bitan u lukama jer su u njima regulative koje se pH tiču vrlo stroge.

Medij s previsokom pH razinom otpušten u okoliš može razarajuće djelovati po njega, a u morskom okolišu to razarajuće štetno djelovanje se naročito odnosi na školjke. Stoga bi gornja granica pH, koju morska voda za ispiranje nebi smjela prelaziti prema propisima IMO-a bila bi 6.5. Ipak za potpunu sigurnost preporučuje se pH vrijednost mora korištenog za ispiranje plinova unutar otvorenog scrubbera ekvivalentno pH3. Ova vrijednost jamči nam da morska voda ispuštena natrag u more neće prouzrokovati nikakve negativne posljedice po ekosustav, ali i da ista nebi trebala napraviti nikakvu štetu samim dijelovima scrubber sustava otvorene petlje. Radi se naime o tome da ako je vrijednost morske vode za ispiranje veća od pH3, dolazi do manifestacije korozivnih svojstava morske vode. Jasno, korozija kao i svugdje u strojarstvu, pa tako i ovdje je pojava koja se najstrože nastoji izbjeći.

⁴⁰ officerofthewatch.com. New Inline System by Wärtsilä URL: <https://officerofthewatch.com/2014/03/10/new-inline-scrubber-system-by-wartsila/>

⁴¹ egcs.com. How much sludge could an exhaust gas cleaning system produce. URL: <https://www.egcsa.com/technical-reference/how-much-sludge-could-an-exhaust-gas-cleaning-system-produce/>

Uzevši sve navedeno u obzir jasno je da je brodska posada primorana tretirati more za pročišćivanje onečišćenog plina prije otpuštanje van broda. Zbog te svrhe u otvorenom scrubber sustavu ugrađen je centrifugalni odvajač koji odvaja teže čestice koje su se zadržale u moru nakon apsorpcije, poput primjerice mulja, zauljenih ostataka te sitnih metalnih čestica. Na ovaj način more iz scrubbera očišćeno je od štetnih čestica, dok će mu se pH vrijednost neutralizirati tako što će se more iz centrifugalnog odvajača pomiješati s određenom dozom mora koja je zaobišla proces apsorpcije.

6.2.1. Problematika vode za ispiranje kod scrubberi otvorenog tipa

Nažalost bez obzira na ugradnju centrifugalnog odvajača čestica i neutralizaciju onečišćenog mora za ispiranje, emisijama plinova onečišćeno more te njegov tretman i dalje su glavne negativne stavke mokrih scrubbera otvorenog tipa.

Problem leži u tome da su sredinom 2019. a naročito tokom 2020., brojne države koje su ujedno iznimno bitne pomorske destinacije i pod čijom su jurisdikcijom neke od najvažnijih luka, počele eksponencijalno zabranjivati upotrebu mokrih scrubbera otvorenog tipa. Zabranu korištenja scrubbera otvorenog tipa one temelje na navodnim studijama (čiji rezultati još nisu predstavljeni svjetskoj javnosti), koje su provedene i koje tvrde da more korišteno za apsorpciju brodskih plinova, naprosto nije dovoljno dobro tretirano unutar postojećih sustava otvorene petlje, te da ono vraćanjem u morsku okolinu može prouzrokovati ozbiljne posljedice po okoliš. Prva značajnija pomorska sila koja je zabranila korištenje otvorenog scrubber sustava u svojim teritorijalnim vodama bio je Singapur. Singapur je inače poznat u svijetu kao država sa vjerojatno najstrožim mjerama u svrhu zaštite okoliša. Lučke vlasti ove malene (ali za pomorstvo izuzetno bitne) azijske državice, zabranile su korištenje otvorenih scrubbera u drugoj polovici 2019. godine. Primjerom Singapura zatim su se povele brojne europske zemlje, prije svega Ujedinjeno Kraljevstvo i Irska, a potom i ostale zemlje zapadne Europe poput Njemačke, Belgije, Francuske, Španjolske, Portugala, Švedske i Norveške. Od europskih država koje ne pripadaju zapadu Europe, a imaju određeni značaj u svjetskom pomorstvu zabranu je uvela Rusija. Doduše zabrana u svim ovim europskim zemljama odnosi se samo na zabranu korištenja otvorenog scrubbera u lukama i to čak ne u svim nego nekim određenim (recimo u Irskoj se zabrana odnosi na luke Cork, Dublin i Waterford). Trendu zabrane otvorenog tipa scrubbera još su se od važnijih svjetskih pomorskih zemalja pridružile: Bahrein, Egipat, Malezija pa čak i SAD. Međutim u Sjedinjenim Državama to nije uzelo toliko maha pa se zabrana odnosi samo na korištenje u morima saveznih država Connecticut i Kalifornija. Ipak

najveći udar za korisnike otvorenog tipa scrubbera bila je zabrana uvedena od strane Kine te luka Abu Dhabi i Fujairah u UAE. Razlog zašto je zabrana iz Kine i UAE pogodila brodare koji imaju na svojim brodovima ugrađen scrubber sustav otvorene petlje jeste u činjenici da su kineske i arapske luke jedne od vodećih svjetskih luka za *bunkering* goriva, to jest za krcanje pogonskog goriva neophodnog za pomorski poduhvat.

Cijeli ovaj niz zemalja koje su zabranile korištenje otvorenih scrubbera, za posljedicu je imao neviđenu hajku na scrubbere otvorenog tipa. Iz Europskog udruženja za transport i okoliš idu toliko daleko da čak tvrde da su: „scrubberi otvorenog tipa samo uređaji koji omogućuju brodarima da se opravdaju nakon što onečiste okoliš“.⁴² Da se razumijemo, nijedna zemlja koja je donijela restrikciju vezanu za scrubbere otvorenog tipa neće vam zabraniti da imate na svom brodu ugrađen ovakav scrubber. Naprosto će vam zabraniti njegovo korištenje i to najčešće u lučkim vodama. Međutim i to je dovoljno da vas dovede pred zid. Naime ako na brodu nemate dovoljnu količinu za pogon goriva s niskim udjelom sumpora, naprosto ili će te morati obustaviti rad pogona ili neće te moći ni uploviti u određenu luku. Uopće da ne spominjemo koliki će biti investicijski gubitci, jer će te na brodu imati sustav u kojeg je uložen enorman iznos, a koji vam praktički ne služi ničemu. Tu je i smanjeni manevarski prostor u vidu područja u kojima brod može ploviti i obavljati poslove... Pokretač ovog trenda Singapur, prednjači u diskreditaciji mokrih scrubber sustava otvorenog tipa. Njihova vlada je čak u svojim propisima koje se odnose na javno zdravstvo, more korišteno u sustavima scrubbera otvorenog tipa definirala kao TIW ili ti ga toksični industrijski otpad.⁴³ Iritira činjenica da baš taj Singapur, za kojim su se povele brojne druge pomorske sile, do današnjeg dana nije javno obznanio nijednu studiju koja bi išla u prilog zabranama korištenja otvorenih scrubbera. Štoviše, zabrane koje su stavili na snagu, donijete se bez ikakve prethodne konzultacije sa Međunarodnom pomorskog organizacijom koja je vodeći svjetski autoritet za sva pitanja u pomorskoj struci. Složiti ćemo se, pomalo neobična praksa. IMO naravno brani uporabu scrubbera otvorenog tipa te ne razmišlja o donošenju nikakve rezolucije koja bi ograničila njihovo korištenja. Naravno, jedino što i dalje uporno naglašava je da se potrebno držati propisane vrijednost pH od 6.5. Singapur, a i sve druge države koje su zabranu uvele, naprosto se vode pretpostavkom da će u područjima s velikom koncentracijom plovila (obalne vode, ušća rijeka, lučkih voda...) biti i velika koncentracija ispuštenog mora iz Open Loop sustava koja se neće moći adekvatno razgraditi.

⁴² ship-technology.com. Debunking: the problem of ships using open-loop scrubbers URL: <https://www.ship-technology.com/features/open-loop-scrubbers/>

⁴³ ship-technology.com. Debunking: the problem of ships using open-loop scrubbers URL: <https://www.ship-technology.com/features/open-loop-scrubbers/>

Hipoteza protivnika mokrih scrubbera otvorene petlje temelji se na tome da korisnici otvorenih scrubbera zamjenjuju jedno onečišćenje drugim. Dakle da se onečišćenje zraka ispušnim plinovima, zamjenjuje onečišćenjem mora s štetnim morem iz sustava. Pojednostavljeno rečeno, vode se izrekom „bolje spriječiti nego liječiti“, ni ne znajući koliko takvom logikom čine štete brodarima sa ugrađenim scrubberima otvorenog tipa, ali i cjelokupnoj svjetskoj pomorskoj trgovini. Paradoks je time veći iz razloga što, kao što je ranije dato do znanja, otvoreni scrubber sustavi ne koriste ama baš nikakve kemikalije u svom procesu apsorpcije. Singapur je neosporno jedna od država predvodnica u zaštiti okoliša, no međutim interesantno je da osim IMO-a, u zaštiti uporaba scrubbera otvorenog tipa staju i druge brojne svjetske ekološke sile poput primjerice Australije, Japana i Kanade.

Protivnici korištenja otvorenih scrubbera naprosto nemaju nijedan konkretan dokaz ili istraživanje koje bi im išlo u korist. S druge strane američka kompanija Carnival Cruise Line, dobrovoljno je prošle godine u suradnji s DNV GL-om na svojim brodovima provelo istraživanje vezano uz štetnost mora za apsorpciju iz otvorenog sustava. Carnival posjeduje gotovo stotinu brodova sa ugrađenim scrubber sustavom otvorene petlje, te je istraživanje provedeno na tim brodovima pokazalo da voda korištena za apsorpciju onečišćenih plinova iz ovakvog tipa sustava nema nikakav negativan utjecaj na more nakon ispuštanja iz broda. Konkretno govoreći, sa 23 Carnivalova broda uzeto je 79 uzoraka mora za apsorpciju. Svih 79 uzoraka mora za pročišćivanje bili su zadovoljavajuće kvalitete, štoviše, **MORE IZ NJIH POKAZALO SE KAO ČIŠĆE NEGO ONO KOJE JE PRVOTNO UZETO U SUSTAV** ! Zajedničku studiju DNV GL-a i Carnival Cruise Line potvrdila u svom trogodišnjem istraživanju je agencija CSA 2020 (Clean Shipping Alliance 2020). Tokom tri godine znanstvenici iz ove agencije, uzeli su 281 uzorak mora za apsorpciju iz scrubber sustava otvorenog tipa sa 53 različita broda. Apsolutno nijedan od uzetih uzoraka nije se pokazao štetan po morski okoliš, a uzorci su se analizirala prema 54 različita kriterija. ⁴⁴

Iz svega dosad predočenog, jasno je da je opasnost po okoliš od mora korištenog u procesu apsorpcije unutar scrubbera otvorenog tipa uvelike precijenjena, te vrlo vjerojatno nepostojeća. Pohvalna je svaka, pa i ona preventivna, briga za okoliš koju su zemlje protivnice otvorenog tipa scrubbera pokazale. Međutim do pojave neke nove studije i konkretnih dokaza koji će ukazati na štetnost otvorenog sustava, bilo bi poželjnije da države predvođene Singapurom se posvete nekih krucijalnijim problemima onečišćenja u pomorstvu (poput primjerice štetnih

⁴⁴ hellenicshippingnews.com. Facts and fears in the open loop scrubber debate URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/facts-and-fears-in-the-open-loop-scrubber-debate/>

emisija plinova iz vozila prometne mreže koja opskrbljuje luke) nego da vode u potpunosti neopravdanu kampanju protiv mokrih scrubbera otvorenog tipa i nanose što direktnu, što indirektnu štetu brodarskim kompanijama koje su u razvoj ovog sustava uložile samo dosada milijune i milijune dolara.

6.2.2. Scrubber otvorenog tipa- razlozi za i protiv

Nepobitno je nažalost, da unatoč tome što protivnici sustava otvorene petlje nemaju nikakav konkretan dokaz te činjenici da sve sprovedene studije o kvaliteti ispuštenog mora idu u korist scrubbera otvorene petlje, ova neopravdana hajka nanijela je, usudili bi se reći nepovratnu štetu. Mokri scrubber sustavi otvorenog tipa naprosto su došli na zao glas. Ponajviše jer kompanije čiji brodovi ih na sebi imaju ugrađene su ograničeni s pomorskim rutama, to jest ne mogu nesmetano ploviti po svim svjetskim morima. I dok će postojeći korisnici se i dalje boriti i forsirati njihovu uporabu, jer nakon silnih milijuna koje su uložili naprosto nemaju drugoga izbora, teško je očekivati to od ostalih. Ostali će se brodari naime teško odlučivati za ugradnju scrubbera otvorenog tipa. Oni će radije birati ili zatvoreni sustav ili onaj hibridni, a postoji mogućnost da se neće uopće okretati ugradnji scrubbera, već alternativnim načinima smanjenja emisija ispušnih plinova.

Osim problema zlog glasa i restrikcija određenih zemalja, mana otvorenih scrubbera je i problem hlađenja ispušnih plinova. Tu je također i problematika nejednake alkalnosti morske vode u svim područjima kojima brod plovi. Scrubber otvorenog tipa tako je naprosto osuđen na obustavljanje rada, ako more kojega crpi u datom trenutku nije na potrebnoj alkalnosti. Ovaj problem posebno dolazi do izražaja u bočatim vodama. Sustavu otvorene petlje potrebna je i izniman kapacitet mora za učinkovitu apsorpciju, što samo po sebi i nije problem, no međutim pri tim dobavama sustav trati ogromnu količinu energije. Također more koje se crpi na brod u svrhu apsorpcije nebi smjelo biti previsoke temperature, jer u tom slučaju pada učinkovitost pročišćivanja ispušnih plinova.

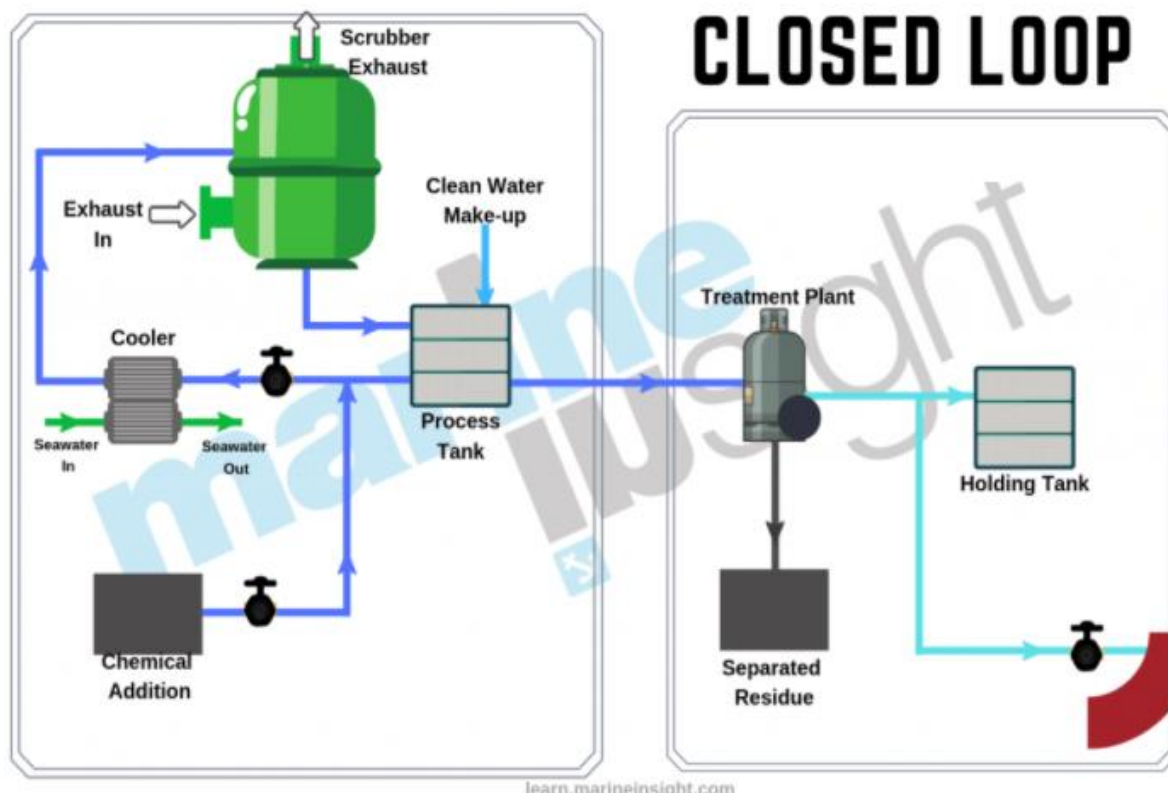
S druge strane jasno je da sustav koji je vodeći predstavnik ovog načina pročišćivanja ispušnih plinova ima više pozitivnih stavki. To je prije svega jednostavna instalacija te rijetki kvarovi. Poanta je da scrubber sustav otvorenog tipa ima vrlo malo pokretnih dijelova unutar sebe, pa se nema što previše ni kvariti. Sustav je potrebno operativno provjeravati te isto tako vršiti njegovo čišćenje od prljavštine. No osim tih minornih radova, scrubber sustav otvorenog tipa praktički ne zahtjeva nikakvo održavanje. Također ono što mu predstavlja veliku manu (barem u određenim područjima plovidbe) u vidu ispuštanja morske vode za apsorpciju natrag u more,

s druge strane mu je prednost iz razloga što nije potrebna ugradnja dodatnih spremnika u koje bi se to more skladištilo.

Sve u svemu još neko izgledno vrijeme scrubberi otvorenog tipa biti će najčešće korišteni predstavnici mokrih scrubbera, to jest scrubbera na brodu općenito. Da im je nanosena značajna šteta ugledu anti kampanjom koja se od određenih grupacija vodi protiv njih, neosporno da jest. Međutim naprosto su prevelika novčana sredstva uložena u njihov razvoj i naprosto je ova vrsta sustava toliko rasprostranjena, da u slučaju ako se ne pojavi neka konkretna studija koja će ih dodatno diskreditirati, nalaziti ćemo ih još kroz dogledno vrijeme u iznimno velikoj količini na brodovima diljem svijeta.

6.3. Mokri scrubberi zatvorenog tipa (*Closed Loop Scrubbers*)

Drugi najzastupljeniji predstavnik u svijetu mokrih scrubbera na brodovima je sustav zatvorene petlje koji se u literaturi po uzoru na engleski naziv može naći i pod terminom *Closed Loop Scrubber System*.



Slika 19: scrubber sustav zatvorenog tipa (preuzeto:

<https://www.marineinsight.com/tech/exhaust-gas-scrubbers-of-ships/> *Closed Loop*)

Princip rada mokrih scrubbera zatvorenog tipa relativno je sličan kao i kod otvorenih scrubbera. Razliku u radu između ova dva sustava moguće je primijetiti već u njihovom imenu. Kod zatvorenog sustava, medij korišten za apsorpciju (a najčešće se radi o slatkoj vodi) tokom cijelog procesa pročišćivanja ostaje unutar sustava. Ustvari jedna te ista voda koristi se u više navrata. Dakle možemo reći da se voda ne crpi se u sustav izvana niti se nakon završenog procesa pročišćivanja otpušta van broda. Ipak određena izmjena vode u sustavu postoji, no o tome više u nastavku rada. Slatka voda koja je u službi apsorpcije u sustavu zatvorene petlje, sama po sebi nema svojstvo da neutralizira kiseline do čijeg stvaranja dolazi kada se ona pomiješa s onečišćenim ispušnim plinovima iz strojarnice. Stoga se slatkoj vodi iz scrubbera zatvorenog tipa dodavaju kemikalije koje služe kao neutralizatori kiseline. Omjer miješanja slatke vode i kemikalija je obično pola-pola. To jest 50% slatke vode, a 50% kemikalija u kojima se nalaze spojevi NaOH, Na₂CO₃ ili MgO. NaOH ili ti ga kaustična soda je najčešće korišteni kemijski aditiv kod zatvorenih sustava. Ako će nam lakše biti za pojmiti utrošenu količinu kemijskog aditiva (u ovom slučaju govori se o kaustičnoj sodi) može se iznijeti podatak da se na ukupnu količinu iskorištenog dizelskog goriva, utroši 6 do 15% aditiva. Brojka dosta varira i ovisna je ponajprije o postotku sumpora unutar goriva, ali i o učinkovitosti apsorpcije sustava.⁴⁵

Ovaj sustav smatra se ekološki prihvatljivijom opcijom, te je konstrukcijsko je rješenje koje doskače problemima koje imaju scrubberi otvorene petlje poput nemogućnosti ispuštanja medija za apsorpciju van broda i nejednake alkalnosti mora. Ovaj sustav je naprosto neovisan o svim vanjskim faktorima. Osim zbog operativne fleksibilnosti, brodari se odlučuju na njegovu ugradnju poradi njegovog visokog postotka visokim postotkom uspješnosti apsorpcije onečišćenih plinova od čak 97,15 %. Stavka koja ide na stranu scrubber sustava zatvorenog tipa je manji utrošak u svakom pogledu kada su u pitanju pumpe sustava. Naime ovaj sustav ne zahtjeva toliko ispušavanja kao sustav otvorene petlje, kod kojeg je slučaj da konstantno mora upumpavati i ispumpavati tekućinu za apsorpciju. Razlog zašto je još uvijek u značajnoj manjini na brodovima je ponajprije visoki početni trošak ugradnje jer zahtijeva dosta dodatne opreme, koja se manifestira u veliko broju spremnika. Kod *dual fuel* motora pri ugradnji se osim troškova javlja i problem kompliciranosti instalacije. Većim troškovima scrubber sustava zatvorenog tipa u odnosu na otvoreni tip doprinosi i stalna potreba za uporabom kemijskih aditiva, koji su ujedno i opasni za rukovanje s njima.

⁴⁵ [wartsila.com. SO_x Scrubber Systems URL: https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/sox-scrubber-systems](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/sox-scrubber-systems)

Kao i kod svih postojećih mokrih scrubber sustava i ovdje se na samome početku paralelno odvijaju dva procesa. Proces izgaranja u nekom od brodskih uređaja unutar strojarnice i put medija za apsorpciju, u konkretnom slučaju slatke vode, kroz cjevovod scrubber sustava. Nakon što završi izgaranje unutar određenog brodskog uređaja, ispušni plinovi onečišćeni štetnim emisijama, kroz ispuh uređaja odlaze prema scrubber jedinici.

Za to vrijeme s pomoću pumpe, koja kao i kod svakog sustava zahtjeva stanovito održavanje, crpi se slatka voda iz tanka u kojemu je pohranjena. Govoreći o pumpama, može se naići na određene sličnosti sa sustavom otvorene petlje, jer i ovdje nailazimo na dvije pumpe i to najčešće na obje centrifugalne. Razlika je što se ove pumpe u odnosu na scrubber sustav otvorene petlje ipak dosta manje. Scrubber sustav zatvorene petlje, utroši za svoj rad gotovo upola manje slatke vode, nego što sustav otvorene petlje utroši morske vode. Kapacitet slatke vode kod sustava zatvorene petlje varira, no otprilike se radi o potrošni o 0.2 m³/MWh.⁴⁶ Odmah po napuštanju tanka slatke vode proći će kroz uređaj za obradu vode. Radi se o jednoj vrsti separatora, vrlo sličnoj onima koji se koriste za gorivo i ulja, a svrha mu je da pročisti vodu od svih potencijalnih nečistoća i tako pospješi sami proces apsorpcije. Tako pročišćena voda putuje prema akumulacijskom tanku u kojem se vrši miješanje i stabilizacija slatke vode sa kemijskim aditivom koji se u akumulacijski tanka dodaje iz posebnog spremnika. Spremnik u kojem se čuva kemijski aditiv obično ima epoksidni premaz, dok je cjevovod kroz kojeg kemijski aditiv prolazi izrađen od nehrđajućeg čelika 304L ili 316L sa epoksidnim premazom, polipropilenom, polietilenom, PVC-om ili C-PVC-om. Praksa je da se spremnik kemijskog aditiva nadopunjuje svaki puta kada je brod u luci. Temperatura čuvanja kemijskog aditiva u tanku iznosi između 26.7 °C i 37 °C. Postupak nadopunjavanja spremnika kemijskim aditivom traži od posade broda iznimnu pažnju i čvrsto držanje propisane procedure jer se radi o osjetljivoj operaciji.

⁴⁶ wartsila.com. SO_x Scrubber Systems URL: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/sox-scrubber-systems>



Slika 20: kaustična soda koja se koristi za tretiranje slatke vode u scrubberima zatvorene petlje (preuzeto: <https://camachem.com/en/caustic-soda-pearls-99-sodium-hydroxide-pearls99.html> Caustic Soda Pearls 99%)

Temperatura na kojoj se održava mješavina aditiva i slatke vode u akumulacijskom tanku iznosi između 20 i 50°C.⁴⁷ Naprosto se došlo do zaključka da je to najoptimalnija temperatura na kojoj kemijski aditivi neće izgubiti svoja svojstva. Mješavinu kemijskih aditiva i slatke vode pumpa dalje pogoni prema tornju scrubbera, prije kojeg će još proći kroz hladnjak ili izmjenjivač topline, u kojem će se mješavini oduzeti nepotrebna toplina. Kao rashladni medij u hladnjaku scrubbera zatvorene petlje koristi se morska voda. Morska voda za hladnjak sustava u potpunosti je izolirana od kemijski tretirane slatke vode, da nebi ni slučajno došlo do njihovog miješanja. Kada je i voda za apsorpciju i emisijama onečišćeni plin unutar tornja scrubbera odvija se više-manje isti proces kao i kod sustava otvorene petlje. Dakle voda za apsorpciju se dovodi u vrh i sredinu tornja u mlaznice koje potom prskaju onečišćene plinove te ih oslobađaju od štetnih emisija. Plin koji je sada pročišćen odlazi kao i kod svih scrubber sustava kroz ispuh i uz pomoć ventilatora van broda. Kao i kod sustava otvorene petlje i ovdje je na izlasku iz dimnjaka postavljen sakupljač kapljica kako bi spriječio izlazak kapljica vode kroz dimnjak.

Više je pažnje u ovom slučaju potrebno posvetiti vodi koja je korištena za apsorpciju te mulju koji je nastao kao rezultat apsorpcije. Voda korištena u tornju za apsorpciju pada u samo dno tornja, gdje se vrši nadzor njene pH vrijednosti i njene gustoće, ali i saliniteta. Tokom

⁴⁷ marineinsight.com. A Guide To Scrubber System On Ship URL: <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>

određenog vremena zbog gomilanja sulfata te čestica iz procesa sagorijevanja dolazi do povećanja gustoće i saliniteta vode za apsorpciju. Kada sustav nadziranja utvrdi da je voda za apsorpciju premašila zadate parametre gustoće i saliniteta, dio iste te vode će biti poslat natrag na početak sustava u tank slatke vode na recirkulaciju, dok će dio otići u tank taloga iz kojeg se može po potrebi, uz određene postupke, ispustiti van broda.

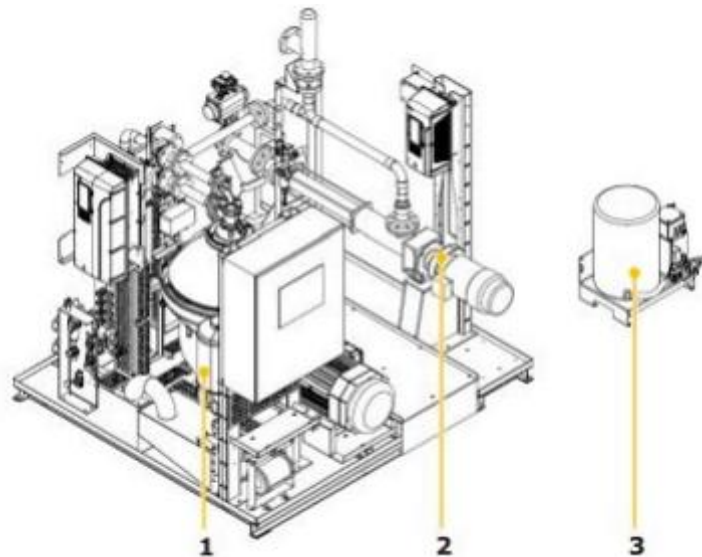
Prije nego što se ispusti van broda provodi se njeno pročišćavanje s pomoću posebnih uređaja i dodavanjem koagulanta ili bistrila u nju. Bistrilo se onečišćenoj vodi dovedi s pomoću plastičnih cijevi malog promjera. Bistrilo se čuva u tankovima od čelika koji su otporni na kiselost bistrila i iznutra presvučeni gumom. Ugradnja ovi tankova, posebno ako se radi o naknadnoj ugradnji scrubber sustava na brod, može biti izuzetno zahtjevna i komplicirana. Zbog toga brodari se češće odlučuju na ugradnju standardnog IBC kontejnera.⁴⁸ Onečišćeni dio se zadržava u tanku taloga. Taj talog prema IMO-vim regulativama nije moguće spaljivati u brodskim spalionicama, već ga se mora predati lučkim vlastima. Količina taloga koji korisnici zatvorenog scrubber sustava mogu očekivati kreće se oko 500 kg na svakih 100 tona utrošenog goriva, pod uvjetom da sustav radi sa minimalno 70% uspješnosti.⁴⁹ Pročišćeni dio vode se zadržava u tankovima za pročišćenu ispirnu vodu iz kojih se može kako je već rečeno, po potrebi ispustiti u more. *Sludge dijelom* vode za apsorpciju iz sustava manipulira se uz pomoć zasebnih pumpa taloga, ugrađenih iza reakcijske scrubber jedinice. Primjer jedne jedinice koja se bavi tretmanom onečišćene vode unutar scrubber sustava zatvorenog tipa moguće je vidjeti na *Slika 21*.

Dio vode koje je napustio sustav i nakon tornja scrubbera otišao u tank taloga, nadoknaditi će se novom svježom vodom koja se u terminologiji naziva *make up water*. Time se postiže održavanje potrebnog volumena slatke vode u sustavu. Količina onečišćene vode koju sustav ispusti kreće se između 0.1 i 0.3 m³ /MWh.⁵⁰ *Make up water* se u scrubber sustav zatvorene petlje uvodi iz brodskih tankova u kojima se nalaze zalihe slatke vode za razne potrebe na brodu.

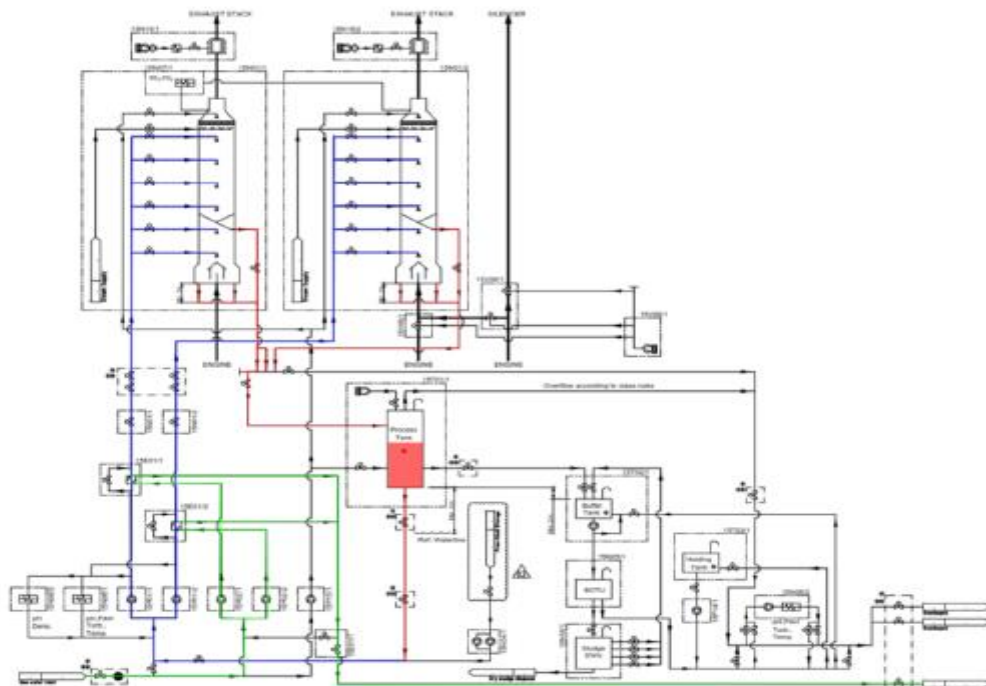
⁴⁸ Marko Buršić & Kristijan Lenac, 2020. *Exhaust Gas Cleaning System*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka

⁴⁹ Marko Buršić & Kristijan Lenac, 2020. *Exhaust Gas Cleaning System*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka

⁵⁰ Aarhus School of Marine and Technical Engineering : *Comparing Wet and Dry Exhaust Gas Cleaning Systems*



Slika 21: prikaz WCU jedinice gdje su brojevima rednom označeni slijedeći dijelovi: 1- separator, 2- dobavna pumpa, 3- pumpa za doziranje bistrila (izvor: Marko Buršić & Kristijan Lenac: *Exhaust Gas Cleaning System, 2020., Example of a Water Cleaning Unit*)



Plava linija- Reciklirana voda za ispiranje (*Scrubbing water*)

Crvena linija- Voda za ispiranje (*Washwater*)

Zelena linija- Morska voda za hlađenje reciklirane vode za ispiranje (*Cooling sea water*)

Slika 22: shema Closed Loop sustava (izvor: *Wärtsilä Moss AS : Wärtsilä I-SOX Hybrid Scrubber Process Description, 2018., Closed Loop System Scheme*)

Zgodna je stvar kod scrubber sustava zatvorene petlje, to što ako ne želimo trošiti ionako dragocjene zalihe slatke vode s broda koja je pretežito namijenjena za piće, za nadoknadu izgubljene vode iz sustava može nam poslužiti evaporirano more. Naime more koje je evaporacijom u generatoru slatke vode pretvoreno u vodu, nije baš najizvršnije kvalitete za piće. No međutim za rad unutar scrubber sustava ona je više nego zadovoljavajuće kvalitete. Na taj način korisno ćemo iskoristiti vodu iz evaporatora, a uštediti ćemo slatku vodu iz zaliha potrebitu za piće i neke druge prioritetnije potrebe. Kada je na bilo koji način zadovoljen potrebni volumen slatke vode unutar sustava zatvorene petlje, proces pročišćavanja onečišćenih plinova kreće ispočetka.

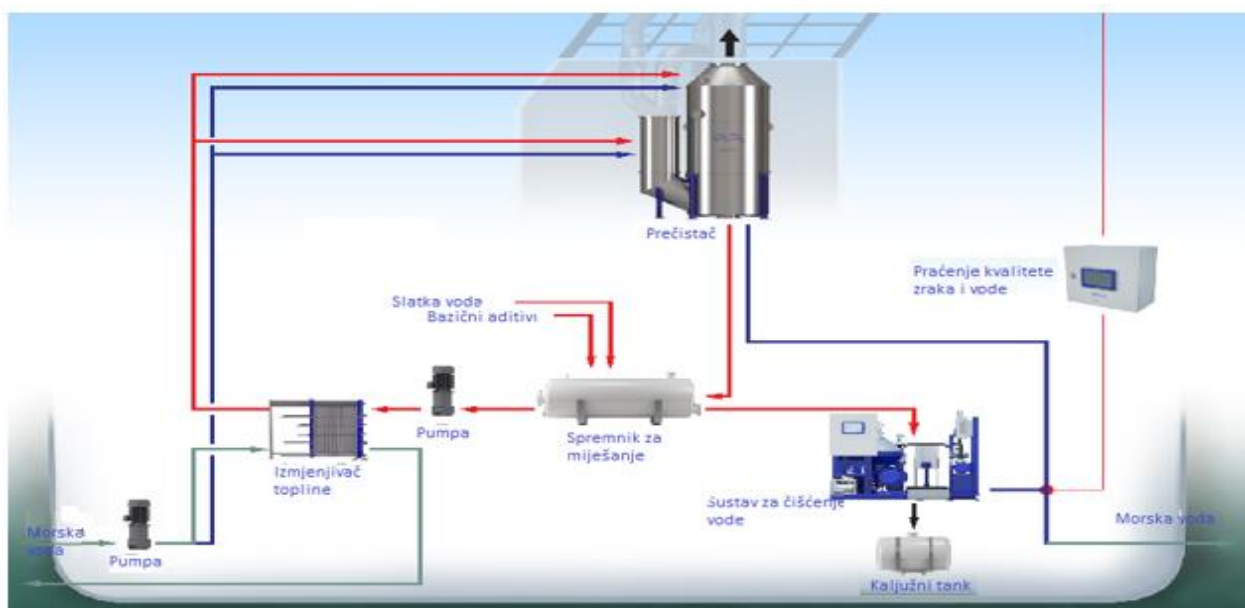
Shema sa *Slika 22* detaljno prikazuje cirkulaciju vode unutar scrubber sustava zatvorenog tipa, opisanu na prethodnim stranicama. Kod sheme je važno za primijetiti kako se u jednom trenutku *Washwater* iz crvene linije prelazi u plavu liniju i postaje takozvana *Scrubbing water*. U tom trenutku prelaska voda za ispiranje (*Washwater*) je dodan određeni kemijski aditiv, pa se ona preobrazila u *Scrubbing water*.

Financijska isplativost u modernom poslovanju postala je osnovni parametar prema kojem se ravnaju potezi svih koji nešto znače na svjetskom tržištu. Brodarske kompanije nisu izuzetak. Očituje se to i u ovoj priči o scrubber sustavima otvorenog i zatvorenog tipa. Iako se kroz ovaj rad jasno dalo do znanja koliko su scrubberi zatvorenog tipa fleksibilniji za korištenje od otvorenih, veći troškovi ugradnje i samog održavanja uporno priječe njihovu veću ekspanziju na pomorsko tržište sustava za smanjivanje emisija ispušnih plinova. Stoga, da bi se iskoristili benefiti koje korištenje scrubbera zatvorenog tipa nosi sa sobom, a da bi se ujedno zadržali povoljni financijski aspekti koji proizlaze iz korištenja sustava otvorenog tipa, veliki međunarodni proizvođači sustava za pročišćavanje brodskih plinova osmislili su kompromisno rješenje. Hibridni sustav koji ima značajke i scrubbera otvorene petlje i scrubbera zatvorene petlje, a o kojemu će više riječi biti u nastavku rada.

6.4. Scrubberi hibridnog tipa (*Hybrid Scrubber Systems*)

U ovom potpoglavlju govori se o kombiniranom sustavu otvorenog i zatvorenog scrubbera. Sustav skrubiranja hibridnog tipa je sustav gdje u skupini djeluju scrubberi otvorenog i zatvorenog tipa. Hibridni sustav, sustav je dakle sastavljen od skupine pročišćivača ispušnih plinova, koji nudi još veći stupanj fleksibilnosti nego što je to slučaj kod scrubbera zatvorene petlje. Njegova fleksibilnost se očituje u mogućnosti manevriranja slatkim i slanom

vodom tokom rada, ovisno kako to od njega zahtijevaju ekološki i ekonomski uvjeti.⁵¹ Dakle ako želite što manje operativne troškove, scrubber hibridnog tipa postavite na otvoreni način rada, a ako se pak nalazite u vodama koje nemaju dovoljnu alkalnost za otvoreni način rada ili su u njima na snazi posebne regulative koje se tiču ispuštanja vode za apsorpciju van broda prebacite se na zatvoreni način rada. Prednost ovog sustava očituje se i u uštedi slatke vode te kemijskih aditiva. Naime hibridni scrubber sustav za svoj rad koristi kemijski tretiranu slatku vodu samo kada je to nužno. Pojednostavljeno rečeno, u zatvorenom načinu rada djeluje samo kada je na to primoran, a to je najčešće u ECA zonama i lukama. Hibridni sustav definitivno je najidealnije rješenje ako se radi o brodu koji često mijenja svoje rute putovanja. Radi se dakle o najpogodnijem sustavu za duga, ali i kratka putovanja oko svijeta. Iako se radi o najprilagodljivijem od tri mokra sustava skrubiranja, istovremeno se radi o sustavima sa najvišim CAPEX izdacima ili ti ga najvišim kapitalnim izdacima. Njegova fleksibilnost i veći izbor mogućnosti tokom radi, činu ga kompleksnijim i glomaznijim, a samim time osjetno skupljim za ugradnju. Razlika u cijeni u odnosu na druga dva sustava mokrog skrubiranja očituje se u potrebi za ugradnjom kompletne opreme otvorenog i zatvorenog sustava skrubiranja što utječe i na težinu kompletnog sustava.

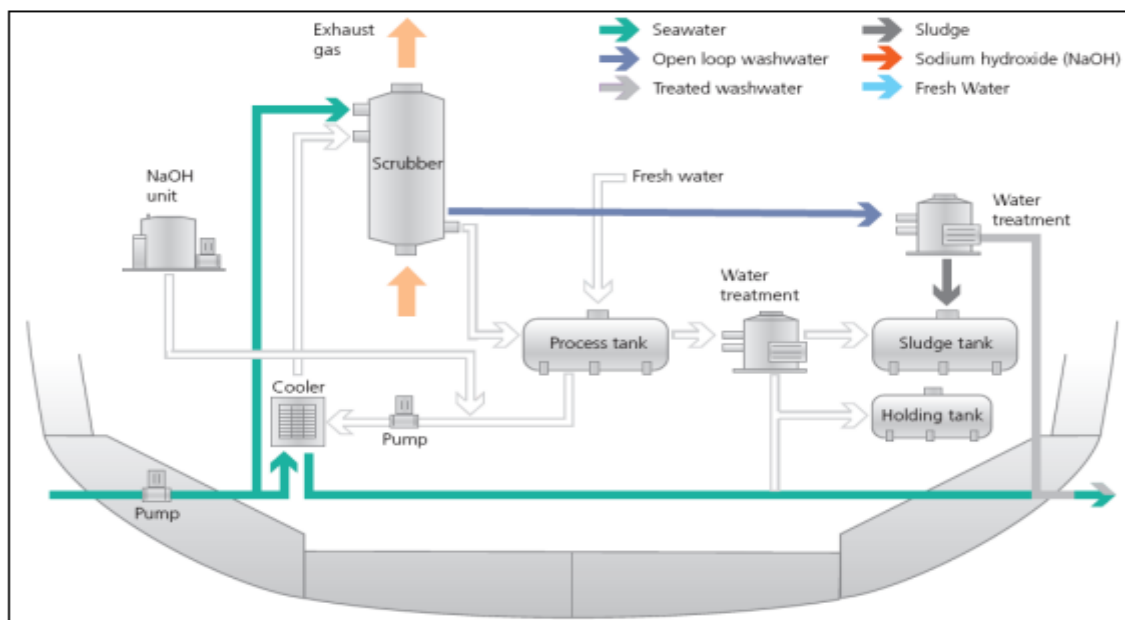


Slika 23: prikaz načina rada i uređaja hibridnog sustava (izvor: Marko Buršić & Kristijan Lenac: *Exhaust Gas Cleaning System, 2020., Hybrid system*)

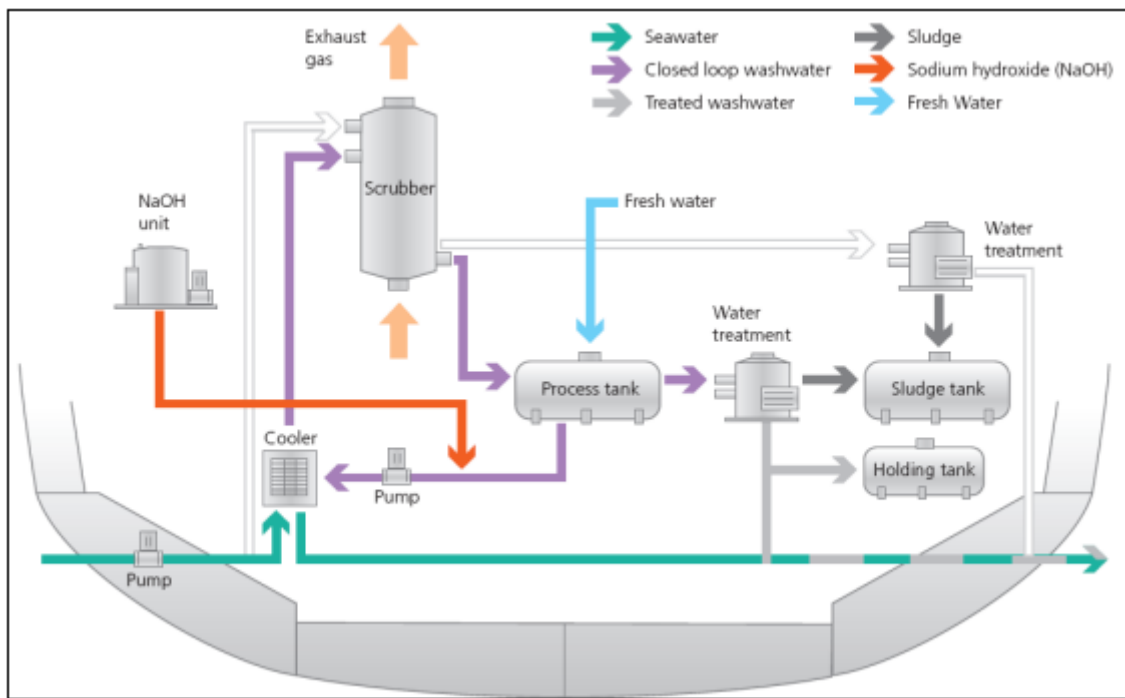
⁵¹ Ivan Vučina, *Pročistači ispušnih plinova*, seminarski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik

S aspekta kompleksnosti i glomaznosti možemo ustvrditi da je vrijeme potrebno za instalaciju hibridnog sustava na brod puno veće nego kod ostalih tipova scrubbera. Međutim s obzirom da sustav radi svog visokog stupnja prilagodljivosti omogućuje da brodski uređaji tokom cijelog svog radnog perioda mogu raditi na jeftinijem gorivu, s vremenom će premostiti visoke početne troškove ugradnje. Potreba za LSFO gorivom kod pogona sa hibridnim scrubberima uopće ne postoji.

Radne procese koji se odvijaju u njemu, bilo za vrijeme otvorenog ili zatvorenog načina rada, nema previše smisla opisivati jer se radi o identičnim procesima opisanim u poglavljima *Mokri scrubberi otvorenog tipa* i *Mokri scrubberi zatvorenog tipa*. Hibridni sustav u kojemu se odvija rad otvorene i zatvorene petlje moguće je vidjeti na kraju prethodne stranice, dok je rad hibridnog sustava napose u otvorenom načinu rada, te napose u zatvorenom načinu rada moguće vidjeti na iduće dvije slike (*Slika 24* i *Slika 25*). Zbog određenog broja zajedničkih pumpi, kao i zbog zajedničkog tornja scrubber jedinice i zajedničkog cjevovoda, hibridni sustav ne može paralelno raditi u otvorenom i zatvorenom načinu rada. Govoreći o načinu rada, vrijedi istaknuti da postoje slučajevi (konkretno kod firme *Wärtsilä*) gdje se za apsorpciju plinova koristi isključivo morska voda, bez obzira dali je hibridni scrubber sustav u otvorenom ili zatvorenom načinu rada. Razlika je jedino što se za vrijeme zatvorenog načina rada, more tretira kaustičnom sodom.



Slika 24: prikaz hibridnog sustava u otvorenom načinu rada (izvor: Shih-Tung Shu: *A Life Cycle Cost Analysis of Marine Scrubber Technologies*, 2013., *A HS system operating in open loop mode*)



Slika 25: prikaz hibridnog sustava u zatvorenom načinu rada (izvor: Shih-Tung Shu: *A Life Cycle Cost Analysis of Marine Scrubber Technologies*, 2013., *A HS system operating in closed loop mode*)

Hibridni scrubber sustav karakteriziraju dvije procesne pumpe, jedna koja koristi morsku vodu za otvoreni način rada, te druga koja koristi kemijski tretiranu slatku vodu za zatvoreni način rada. Od ostalih značajki sustava koje se tiču pumpe, vrijedi istaknuti da je pumpa za pražnjenje vode korištena za apsorpciju van broda samo jedna, te da joj snaga iznosi 200 KW. Općenito govoreći o potrošnji energije unutar sustava, važan podatak za brodere je da hibridni scrubber sustav troši znatno više energije kada radi u otvorenom načinu rada. Od ostalih specifičnosti u konstrukciji hibridnog scrubber sustava tu su dva spremnika za obradu vode, jedan za otvoreni način rada, te drugi za zatvoreni način rada. Spremnik za obradu vode u otvorenom načinu rada, veći je od onog za zatvoreni način. Pumpe pumpaju medij za apsorpciju do tornja koji je zajednički i za otvoreni i za zatvoreni način rada. Toranj je kod hibridnog scrubbera opremljen sa tri seta mlaznica koje prskaju medij za apsorpciju po onečišćenim plinovima. Četvrti dodatni set mlaznica nalazi se u području odvajača kapljica i služi da bi osigurao čistoću odvajača.⁵² Brojne korisne modifikacije tokom rada koje hibridni scrubber sustav dopušta, omogućuje čak da se tokom zatvorenog načina rada jedan set mlaznica stavi u takozvani *shut off mode*, sa

⁵² marineinsight.com. A Guide To Scrubber System On Ship URL: <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>

svrhom da bi se uštedila električna energija.⁵³ Cijevi kroz koje tlačeni medij prolazi do tornja scrubbera izrađene su od stakloplastike. Sustav je također opremljen s cijelim nizom sigurnosnih ventila.

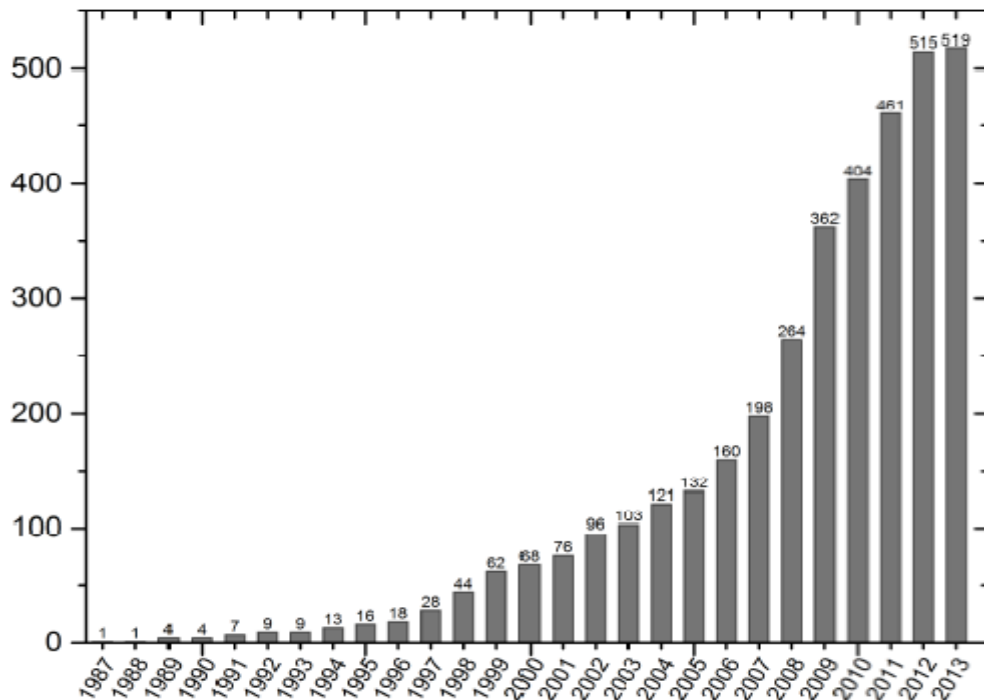
7. SELEKTIVNA KATALITIČKA REDUKCIJA- SCR (*SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION*)

Tehnologija selektivne katalitičke redukcije nije neka nova inovativna tehnologija, to jest možemo reći da se radi o već ustaljenoj i razvijenoj tehnologiji. Kao takvu, struka je smatra da će biti najčešće korištena metoda za smanjivanje emisija NO_x u budućnosti. Radi se o tehnologiji za kontroliranje emisija NO_x spojeva koja se već duže vrijeme koristi u industrijskim postrojenjima na kopnu, kao i u kopnenom transport. Tehnologija je ovo koja je svijetlo dana prvi puta ugledala 70-tih godina 20. stoljeća u Japanu, a svoju potpunu afirmaciju doživjela je 10-tak godina kasnije u SAD-u (otprilike tada kreće i njezina uporaba na brodu). Kod kopnenog transporta, metodu SCR-a vežemo uz njegov katalizator, danas često spominjani AdBlue kojeg je moguće nabaviti na svakoj benzinskoj crpki. Selektivna katalitička redukcija spada pod sekundarne metode za smanjivanje emisija štetnih tvari s broda, jer se za primarne metode drže preinake na sustavu izgaranja, sustavu za dovod zraka te izravno ubrizgavanje vode, recirkulacija ispušnih plinova, korištenje emulzije vode i goriva kao i sustav zajedničkog cjevovoda. Premda se vodi kao sekundarna metoda smanjivanja štetnih emisija brodskih ispušnih plinova, istina je da se radi o najučinkovitijoj metodi za odstranjivanje NO_x spojeva. Govoreći o primjeni u pomorstvu, ova metoda svoj ekspanzivni rast doživljava već nekih 20-tak godina. Naglasio sam da je u pomorstvu uporaba SCR tehnologije krenula krajem 80-tih godina. Konkretno, bilo je to na dva korejska broda za prijevoz rasutog tereta.⁵⁴ O kvaliteti SCR sustava dovoljno govori podatak da neki brodovi na sebi imaju još uvijek prvotno ugrađene SCR katalizatore s kraja 80-tih godina. SCR je korišten pretežito kod teretnih brodova, trajekata i tegljača. Metoda je ovo koja se pretežito koristi na brodovima sa četverotaktnim srednjohodnim i brzohodnim motorima i čije su ispušne temperature iznad 300 °C. Iako mnogo manje korištena kod dvotaktnih motora SCR tehnologija u posljednje vrijeme i na tom području doživljava značajan rast. Prema posljednjim podacima svjetskim morima plovi na desetke stotina brodova sa ugrađenim SCR sustavom, od kojih je 1250 ugrađeno u proteklom desetljeću. Na prvom grafikonu na kojeg nailazimo u ovom poglavlju moguće je

⁵³ Wärtsilä Finland, 2017. *Wärtsilä Scrubber Product Guide*

⁵⁴ Steen Riis Christensen, 2018. *Selective Catalytic Reduction of NO_x on ships*, DTU Chemical Engineering, Lyngby

vidjeti kako se potražnja za ugradnjom SCR sustava razvijala od njegove prve pojave pa do 2013. godine.



Grafikon 3: razvoj ugradnje SCR sustava na brodove u periodu 1987.-2013. (izvor: Steen Riis Christensen, 2018., *Selective Catalytic Reduction of NO_x on Ships*)

SCR manje se primjenjuje kod sporohodnih motorima s križnom glavom iz razloga što ta vrsta motora ima veći stupanj iskoristivosti, što je posljedica nižih ispušnih temperatura. Ovakva uporaba proizlazi iz činjenice da je nastajanje dušikovih emisija ponajprije vezano uz tip motora, a ne uz gorivo koje motor koristi, kao što je to slučaj kod sumporovih emisija.

Dušikovi oksidi izuzetno su učestali spojevi kod izgaranja brodskih uređaja pogonjenih dizelskim gorivom, što smo ustvrdili već na *Slika 3* u trećem poglavlju ovog rada. Štoviše u *Poglavlju 3* smo zaključili da su dušikovi oksidi najzastupljeniji zagađivači u ispušnom plinu brodskih uređaja, sa zastupljenošću u cjelokupnom plinu sa 0.25 %. Nažalost dugi niz godina, u brodskoj industriji (za razliku od kopnene), količina ispuštenog NO_x je u konstantnom porastu. Brodovi su tokom 2007. godine ispustili u atmosferu 25 000 000 tona NO_x što čini udio od 15% ukupnih antropogenih emisija.⁵⁵ Tri su vrste NO_x kod motora s unutarnjim izgaranjem. Radi se o termalnom NO_x, NO_x nastalom iz goriva i potaknutom NO_x. Dodatno ćemo tvrdnju o zastupljenosti štetnih dušikovih spojeva u ispušnim plinovima motora

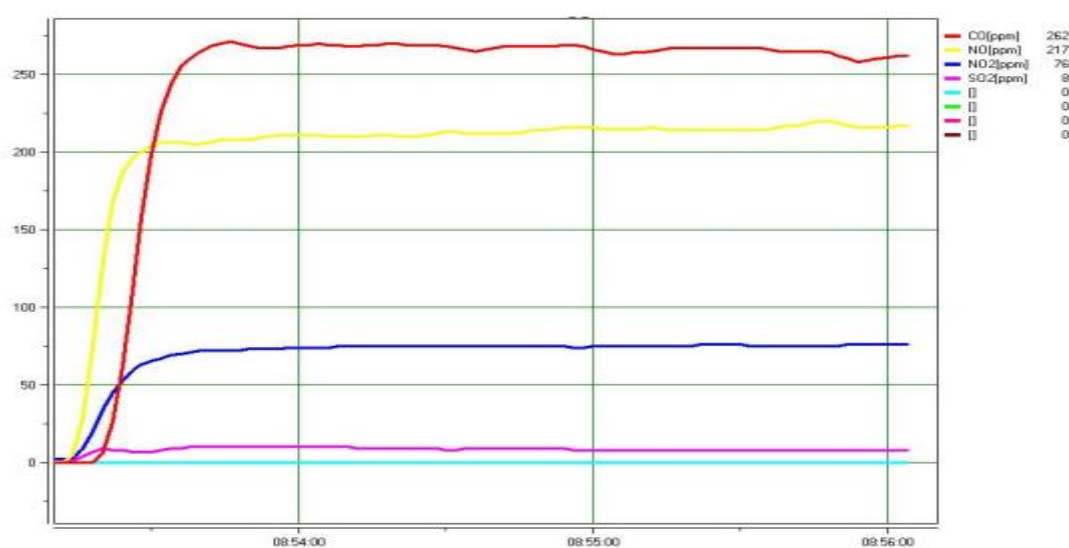
⁵⁵ airclim.org. SCR can cut ship NO_x emissions URL: <https://www.airclim.org/acidnews/scr-can-cut-ship-nox-emissions>

potkrijepiti rezultatima istraživanjem koje se tiče mjerenje ispušnih emisija brodskog motora, provedenih od strane jednog studenta Pomorskog fakulteta u Splitu u sklopu njegovog diplomskog rada.

| Mjerna komponenta | Vrijednost | | Mjerna jedinica |
|-------------------|--------------|-------------|-----------------|
| | Lijevi motor | Desni motor | |
| O ₂ | 19.25 | 19.38 | % |
| CO ₂ | 1.3 | 2.3 | % |
| CO | 252 | 561 | ppm |
| NO | 220 | 113 | ppm |
| NO _x | 295 | 189 | ppm |
| NO ₂ | 75 | 76 | ppm |
| SO ₂ | 7 | 29 | ppm |
| NO _x | 1808 | 1251 | mg/MJ |

Tablica 9: vrijednosti izmjerenih emisija ispušnih plinova na brodu *DBM-82 Krka* (izvor: Duje Zoko, 2018, *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora*)

Student Zoko provodio je svoje istraživanje na brodu Hrvatske ratne mornarice *DBM-82 Krka* koji ima dva dizelska motora marke *Burmeister & Wain Alpha 10V23L-VO* ukupne snage 2240 KW. Zbog toga je u tablicama i grafovima preuzetima iz rada naglašeno da je mjerenje vršeno na lijevom i desnom motoru. Naglasimo još da je mjerenje provedeno dok je brod bio na vezu.



Grafikon 4: prikaz izmjerenih vrijednosti CO, NO, NO₂ i SO₂ za lijevi motor broda *DBM-82 Krka* (izvor: Duje Zoko, 2018., *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora*)



Grafikon 5: prikaz izmjerenih vrijednosti CO, NO, NO₂ i SO₂ za desni motor broda *DBM-82 Krka* (izvor: Duje Zoko, 2018., *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora*)

SCR sustav sastoji se od sljedećih šest komponenti:

- crpna jedinica za transferiranje redukcijske supstance iz skladišta
- jedinica za doziranje redukcijske supstance
- kolektor za miješanje
- kućište reaktora
- jedinica za čišćenje pepela i čađe
- jedinica za kontrolu emisije NO_x

Metoda pomoću koje SCR uklanja dušikove spojeve iz ispušnih plinova brodski uređaja zasniva se na ubrizgavanju amonijaka (kemijske formule: NH₃) u emisiju ispušnih plinova pri temperaturi od 300 do 400 °C.

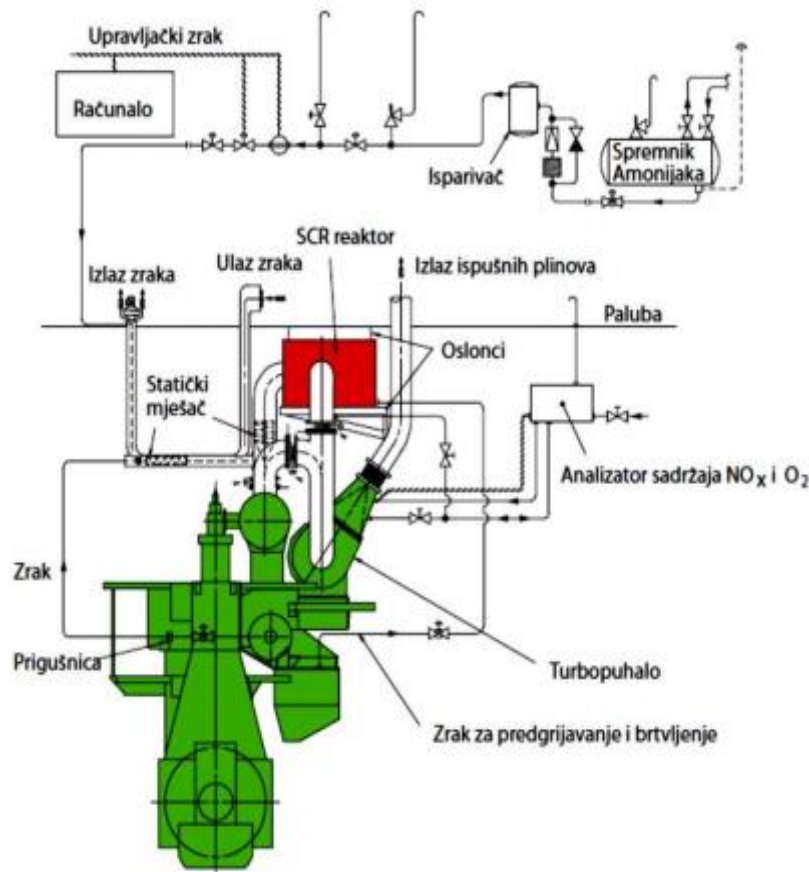
U sustavu je ugrađen računalni program koji će prema količina proizvedene emisije NO_x odrediti količinu ubrizganog amonijaka. Informaciju o stanju NO_x unutar sustava jedinica za doziranje redukcijske supstance, dobiti će od jedinice za kontrolu emisije NO_x. Činjenica jest da su SCR sustavi visoko automatizirani, no svejedno preko kontrolne jedinice treba pratiti parametre kao što su temperatura i protok ispušnih plinova, kao i povratni tlak.

Amonijak je sadržan u organskom spoju ureje koja se u sustavu nalazi u obliku vodene otopine bez boje i mirisa. Ovaj tip ureje naziva se još i dizelskom ispušnom tekućinom. Amonijak je hidrolizom ureje. Kod primjene SCR tehnologije u pomorskoj struci ureja se

koristi da bi se izbjeglo direktno rukovanje s amonijakom, koje može biti opasno. Ista ta ureja se na brod dostavlja s kopna ili već unaprijed zamiješana u bačvama ili se miješanje može odraditi i na brodu od strane posade. Način na koji se miješanje odvija na brodu jest da se granule ureje pomiješaju sa slatkom vodom. Na ukupni maseni udio vode ide 30-40% ureje. U svakom slučaju vodena otopina mora biti dobivena.

Vodena otopina ureje se s pomoću pumpe, posebno namijenjene za njezino transferiranje, prebacuje iz tanka u kojem je uskladištena do jedinice za doziranje. S obzirom da ureja ima visoku točku smrzavanja, njezin tank opremljen je sustavom za grijanje kako se ista ta ureja nebi stvrdnula. Jedinica za doziranje, kao što je ranije naglašeno, odrediti količinu redukcijske supstance potrebne za pročišćivanje. Neka optimalna potrošnja ureje kod SCR sustava kreće se oko 20-25 g/kWh.⁵⁶ U specijalno dizajniranom kolektoru za miješanje ispušnih plinova i redukcijske supstance nalaze se mlaznice. Mlaznice će prskati ispušne plinove brodskih uređaja amonijakom, za vrijeme njihovog prolaska kroz kolektor do reaktora. Reaktor je može biti postavljen vertikalno ili horizontalno, ovisno o konstrukcijskim zamislima i željama broдача. U reaktoru se ustvari događa ono najbitnije za kompletni proces selektivne katalitičke redukcije. Ulaskom tako *poprskanih* plinova u kućište reaktora, koje se sastoji od nekoliko slojeva katalizatora (obično dva ili tri, ovisno već o konstrukciji), kreće proces redukcije NO_x preko. Slojeve katalizatora podupire čelična konstrukcija, dok je kućište reaktora kompletno je izrađeno od čelika te ima za sebe spojene dvije cijevi koje služe kao ulaz i izlaz. Materijal samog katalizator ovisi o radnoj temperaturi, no nekako su se u zadnje vrijeme, kako u kopненоj tako i u pomorskoj praksi ustalili katalizatori na bazi vanadija. Katalizatori izrađeni od materijala na bazi vanadija vrlo dobro podnose visoke temperature na kojima SCR sustavi obično rade. Uspješna redukcija za rezultat će imati razbijanje NO_x na čisti i za okoliš bezopasni kisik i dušik. Tvari su to koje se ionako nalaze u zraku kojega svakodnevno udišemo.

⁵⁶ Kristijan Lenac, 2005. *Metode smanjivanja emisije štetnih tvari s brodova*



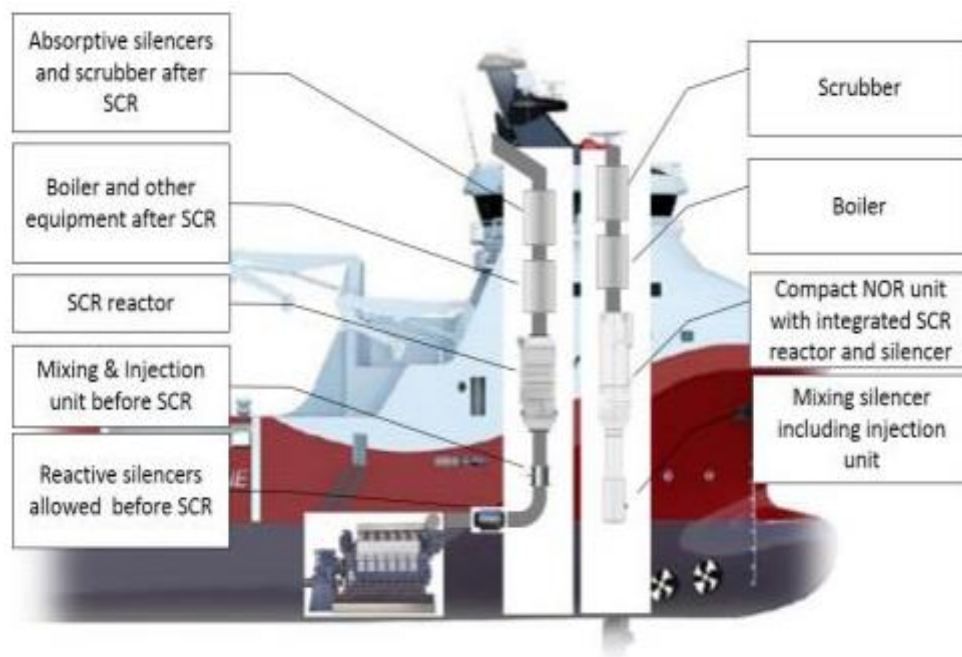
Slika 26: SCR sustav ugrađen na brodski motor (izvor: Branko Lalić: *Optimiziranje rada brodskog porivnog dizelskog motora u svrhu ispunjenja novih zahtjeva o ispušnim emisijama*, 2013., *Shematski prikaz Selektivnog katalitičkog reaktora SCR*)

Sustav je ovo s visokom učinkovitošću, s kojim se postiže nivo NO_x od 2 g/kWh. Postotak uklonjenog NO_x zavisi će od količini ubrizgane redukcijske supstance.⁵⁷ Još jedna metoda pomoću koje je moguće pospešiti postotak uklonjenog NO_x jest povećanje volumena katalizatora. Kemijska reakcija koja prethodi reakciji u katalizatoru, odvija se u kolektoru za miješanje, gdje se mješavina ureje i ispušnih plinova razlaže na amonijak i izocijansku kiselinu. Metoda selektivne katalitičke redukcije učinkovita je jedino pod uvjetom ispravnog rada katalizatora, što zahtjeva njegovo konstantno održavanje i čišćenje. Stoga je reaktor, u čijem se kućištu katalizator nalazi, opremljen sustavom za otklanjanje čađe i pepela. Ako dođe do bilo kakvih poteškoća ili zastoja u radu katalizatora, to će se odraziti na povratnom tlaku, većoj potrošnji goriva, pa čak i u habanju motora. Životni vijek katalizatora je tri do pet godina za slučaj da se koristi tekuće gorivo, a u slučaju korištenja zemnog plina može biti i duži. Kakogod proizvođači SCR sustava preporučivanju zamjenu katalizatora svakih 20 000

⁵⁷ Kristijan Lenac, 2005. *Metode smanjivanja emisije štetnih tvari s brodova*

radnih sati.⁵⁸ Kompletan jedan SCR sustav, ugrađen na brodski dizelski motor moguće je vidjeti na prethodnoj slici.

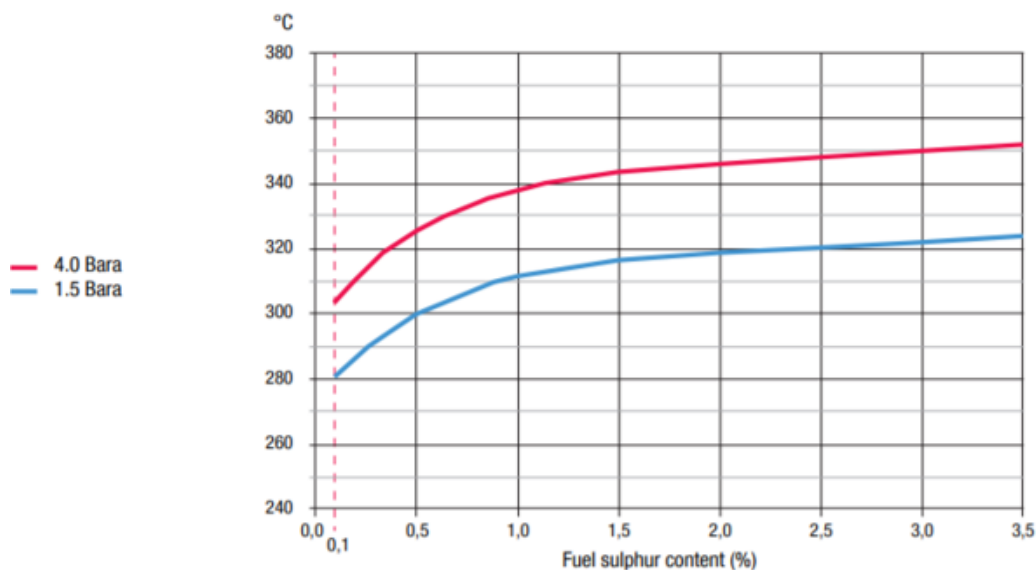
Nekakvo je uvriježeno pravilo da na svaki brodski motor, to jest na njegovu ispušnu cijev ide jedan SCR. Također postoji opcija da se SCR sustav ugradi u sklopu scrubber sustava, što smo nakratko spomenuli objašnjavajući *Slika u 11 u Poglavlju 5*. Takvom ugradnjom postiže se bolja ukupna pročišćenost brodskih plinova. Također kod takve ugradnje postoji zahtjev da scrubber mora biti uvijek ugrađen iznad SCR sustava. Kako izgleda kombinirana ugradnja SCR sustava zajedno sa scrubber sustavom moguće je vidjeti na idućoj slici.



Slika 27: prikaz načina rada i uređaja hibridnog sustava (izvor: Marko Buršić & Kristijan Lenac: *Exhaust Gas Cleaning System*, 2020., *SCR system with boiler and scrubber*)

Temperatura je najvažniji parametar kod SCR tehnologije, a ona je vezana uz tlak. Na slijedećem grafu moguće je vidjeti potrebne temperature SCR sustava i njihovu vezu s tlakom.

⁵⁸ Shih-Tung Shu, 2013. *A Life Cycle Cost Analysis of Marine Scrubber Technologies*, University of Rostock, Rostock



Grafikon 6: potrebne temperature kod SCR-a i njihova veza s tlakom (izvor: Matej Radić, 2019., *Metode smanjenja onečišćenja zraka štetnim ispušnim plinovima*)

Više-manje svi proizvođači SCR sustava u svojoj ponudi nude dvije vrste selektivne katalitičke redukcije:

- visokotlačni sustav
- niskotlačni sustav

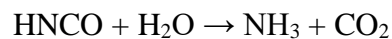
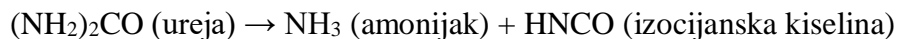
Prema tome i dvije krivulje na *Grafikon 6* prikazuju visokotlačni (crvena), odnosno niskotlačni (plava) sustav. Visokotlačni sustav koristi se za goriva i sa niskim i sa visokim udjelom sumpora, dok se niskotlačni sustav koristi isključivo za goriva s niskom razinom sumpora. Koje bi bile ostale razlike između visokotlačnog i niskotlačnog sustava ?

Visokotlačni sustav ima reaktor prije turbopunjača. Ispušni plin u reaktoru je na većem tlaku i temperaturi nego što je to slučaj kod niskotlačnog sustava. Radi se o tlaku od maksimalno 4 bar. Kod niskotlačnog sustava reaktor je ugrađen iza turbopunjača. Uz nižu temperaturu ispušnog plina u reaktoru, tlak istog tog ispušnog plina nije veći od 0.6 bar. Od dodatnih dijelova niskotlačni sustav ima jedinicu za razgradnju amonijaka, plamenik, puhalo kao i tri kontrolna ventila. Osim toga, uobičajeno je da se visokotlačni sustavi ugrađuju u samoj strojarnici, dok se niskotlačni ugrađuju izvan strojarnice. Najčešće u brodskom dimnjaku.

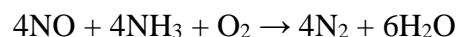
Izuzetno je bitno da temperaturni raspon bude u zadatom intervalu, jer ako je temperatura ubrizgavanja nešto veća od intervala (recimo iznad 400 °C) NH_3 će izgorjeti, neće se dogoditi željena reakcija sa dušikovim monoksidom i dioksidom te će redukcija biti ništava. Kod previsokih temperatura postoji realna opasnost od stvaranja SO_3 spoja, koji u kontaktu s

vodom može formirati neželjenu sumpornu kiselinu. Isto tako, ako je temperatura ispod 300 °C, SCR metoda neće dati zadovoljavajuće smanjenje emisija NO_x, a može doći i do uništenja katalizatora.⁵⁹ Do uništenja katalizatora dolazi tako što se sumporna kiselina neutralizira amonijakom, a kao produkt te reakcije javlja se amonijak bisulfat. Amonijak bisulfat je vrlo ljepljiva smjesa koja se potom hvata za elemente SCR-a. Zbog toga je nužno kotao na ispušne plinova (naravno, u slučaju da ga brod uopće posjeduje) smjestiti iza SCR-a. Pozitivna je strana međutim, što SCR tehnologija uopće ne utječe na proces izgaranja, nego se primjenjuje u SCR reaktoru koji je naknadno instaliran na ispuh brodskog motora. Konkretno reaktor se nalazi nakon turbopunjača i plamenika, čija je svrha povećanje temperature ispuha na potrebnu razinu. Amonijak koji je redukcijska supstanca kod ove tehnologije se u SCR sustav dodaje u obliku vodenaste pare. Između ostaloga radi sigurnosnih razloga. Kasnije se ta amonijačna vodena para prilikom ubrizgavanja u isparivač, razlaže na amonijak i ugljikov dioksid.

Osnovne kemijske formule na kojima se zasniva primjena selektivne katalitičke redukcije na brodu date su ispod:



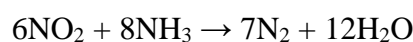
Prethodno prikazana kemijska reakcija je ona prva reakcija koja se odvija u kolektoru za miješanje. Potom slijedi glavna reakcija u reaktoru sustava iz koje slijedi:



Za slučaj da je omjer NO₂ i NO 1:1 reakcija će se odviti na slijedeći način:



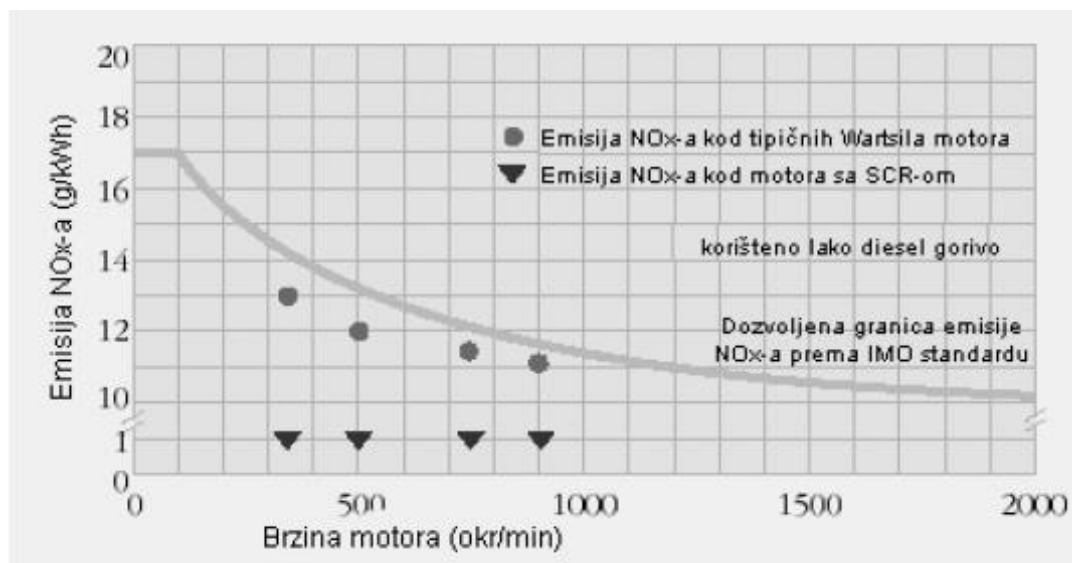
Pri većim omjerima, višak NO₂ reagira sporije u katalizatoru iz čega slijedi da:



Uporaba SCR sustava i tehnologije koju donosi sa sobom dovodi do smanjenja emisija NO_x od čak 90%, a neke studije kažu da je moguće čak doći i do razine od 99% smanjena štetnih

⁵⁹ Duje Zoko, *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora*

dušikovih emisija. Nadalje SCR smanjuje ugljikovodike i ugljikov monoksid za 80-90%, a čađu za 30-40%.⁶⁰



Grafikon 7: razlika između standardnog brodskog motora i motora s ugrađenom SCR (izvor: Kristijan Lenac, 2005., *Metode smanjivanja emisija štetnim tvari s brodova*)

Istraživanje sprovedeno od strane neprofitne organizacije *Air Clim* tvrdi da korištenje ovog sustava značajno može smanjiti potrošnju brodskog goriva što je još jedan veliki poticaj za ugradnju SCR u vidu financijske isplativosti. Cijena ugradnje uistinu jest velika, a sama ugradnja za sobom vuče i potrebu za nabavom redukcijske supstance koja je isto skupa. Uz to što ima dosta visoku cijenu, ureju nije jednako jednostavno nabaviti u svakom kutku Svijeta. Tako postoje iskustva brodara koji tvrde da se ureja jako teško nabavlja izvan sjeverne Europe.

Isti izvori iz *Air Clim* koji tvrde da SCR smanjuje potrošnju brodskog goriva, predviđaju da će s vremenom i cijena ugradnje sustava i cijena redukcijskog sredstva padati. Naglasimo još jedno da se radi o tehnologiji sa uvjerljivo najvećom uspješnošću uklanjanja štetnih dušikovih emisija, te da njezin fenomenalan postotak uspješnosti naprosto ne možemo zanemariti.

Troškove tokom životnog vijeka SCR sustava prikazati ćemo za kraj jednom tablicom u kojoj su prikazana procjena *Međunarodnog udruženja za katalitičku kontrolu brodskih emisija u zraku* (eng. *International Association for Catalytic Control of Ship Emissions to Air-IACCSEA*). Naglasimo da je procjena rađena na brodu nosivosti 20 000 tona, opremljenim

⁶⁰ Zoko Duje, 2018. *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora*, diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Split.

motorom 10 MW koji provodi 1500 sati godišnje u NECA zonama (zone sa posebnom kontrolom NO_x emisija)

| <u>IACCSEA PROCJENA</u> | |
|--|--------------|
| STAVKA | IZNOS |
| Kapitalni troškovi uključujući i instalaciju | 500 000 \$ |
| Operativni troškovi potrebni za zadovoljavanje IMO III standarda u periodu od 25 godina | 950 000 \$ |
| Trošak nadopunjavanja sustava redukcijском supstancom | 450 000 \$ |
| Trošak održavanja sustava | 150 000 \$ |
| Potencijalna kazna zbog protutlaka uzrokovana SCR sustavom | 175 000 \$ |
| Ušteda goriva u periodu od 25 godina | 425 000 \$ |
| Ukupni trošak SCR sustava umanjen za uštedu goriva | 1 825 000 \$ |
| Prosječni godišnji trošak na SCR sustav | 73 000 \$ |

Tablica 10: procjena troškova SCR sustava (izvor: <https://www.iaccsea.com/marine-scr/cost-benefit-analysis/>, *Marine SCR – Cost-Benefit Analysis*)

8. NAJČEŠĆI KVAROVI BRODSKIH SCRUBBER SUSTAVA

Kao i svaki sustav, stroj ili uređaj ne samo na brodu, već u svojoj ljudskoj praksi i scrubber sustav podložan je kvarovima. Svakome je jasno da je kvar nešto što pod svaku cijenu nastojimo izbjeći u svakom aspektu života, stoga ni pomorska struka nije izuzetak. Bilo kakav kvar ne samo da će nas na određeno vrijeme ostaviti bez komponente koja je u kvaru, već može dovesti i do većih zastoja, potom i do ozbiljnih problema u izvođenju pomorskog poduhvata, što za krajnji rezultat može imati smanjenu uspješnost istog. Logično manja uspješnost (ili u drastičnom slučaju potpuni neuspjeh) u obavljanju pomorskog putovanja odraziti će se na njegovu financijsku isplativost, a pomorski biznis se kao i svaki drugi ponajprije vrti oko financijske isplativosti. Zato da bi ostvarili željenu financijsku korist, u cilju nam je što bolje prikladno održavati sve brodske komponente da bi se kvarovi u što većoj mjeri izbjegli.

Nas konkretno u ovom radu interesira održavanje brodskih scrubber sustava, te kvarovi kojima su oni podložni. Posada broda koji je opremljen bilo kojim tipom scrubber sustava mora voditi

računa da ispunjava barem dati minimum održavanja propisan od strane scrubber proizvođača u vodiču za održavanje. U vodiču za održavanje ćemo između ostaloga pronaći potencijalne kvarove sustava, te način na koji ih otkloniti. Neki su kvarovi pokriveni garancijskim ugovorom i za njih se dužan pobrinuti sam proizvođač, no ako je kvar uzrokovan na bilo koji način nemarom posade broda, sav trošak popravka pada na leđa broдача. Kakogod bilo, za slučaj da se radi o garantnom ili van garantnom kvaru do određenog zastoja će doći, a tu se vraćamo na prvotnu misao s početka poglavlja: u cilju nam je izbjeći bilo kakav zastoj da se to nebi odrazilo na konačnoj isplativosti pomorskog poduhvata. Ozbiljne brodske kompanije stoga imaju takozvani *sustav planskog održavanja* u kojemu se nalazi opis i raspored održavanja svake brodske komponente pa tako i naših scrubbera. U današnje doba plansko održavanje sadržano je u računalnim programima od kojih je uvjerljivo najpoznatiji AMOS-D, koji se pomorskom svijetu predstavio 1984. godine. Sustav planskog održavanja podložan je pregledu bilo koje inspekcije koja vrši uviđaj na brodu. Ozbiljne brodske kompanije, ne samo da će u svoj sustav planskog održavanja uvrstiti minimalne zahtjeve proizvođača određene komponente, već će ga nadopuniti sa prijašnjim iskustvima posade te svim dodatnim korisnim informacijama.

Nažalost dodatnih informacija i iskustava sa scrubber uređajima nema odveć. Iako smo dali do znanja da je to tehnologija na ovaj ili onaj način preko 140 godina, ipak se radi o tehnologiji koja je značajniji razvoj doživjela u proteklih 20-tak godina, nakon što su donesene strože MARPOL regulative koje se tiču emisija brodskih ispušnih plinova. Tako su se znanja o ovoj tehnologiji, u svijetu pomorstva, krenula paralelno širiti tek s njezinom naglom ekspanzijom u posljednje vrijeme. Nije rijetkost stoga, da na brodu s ugrađenom scrubber tehnologijom, imamo veći dio posade koji se s njom nikada nije susreo.

Često to neiskustvo, u kombinaciji s činjenicom da su scrubberi izuzetno kompleksni, za posljedicu ima povećani broj kvarova unutar samog scrubber sustava. U većini slučajeva kod scrubber sustava neće doći do kvara u samoj jedinici za apsorpciju, jer njezini dijelovi nisu podložni kvarovima. Izuzetak su mlaznice. Obično do kvara dolazi na sporednim komponentama sustava kao što su cjevovodi, ventili, pumpe te druga oprema za podršku. Kvarovi i problemi. Na prvu bih smo rekli da tu nema neke osobite razlike, no ona je itekako značajna. Problem u sustavu brodske scrubbera manje je neugodan događaj. Radi se događaju na nekoj od komponenti scrubber sustava, unatoč kojoj će scrubber i dalje moći nastaviti raditi,

ali će problem utjecati na njegov rad i performanse. Primjer je nizak tlak i protok ispirne vode.⁶¹ Bez obzira što sustav problemu unatoč i dalje može raditi, uzrok problema potrebno je što prije otkloniti. Kvar je pak puno neugodniji događaj. Radi se o fizički neispravnom stanju kompletnog scrubber uređaja ili neke od komponenti uređaja. Uzročno posljedično sustav ili komponenta nema više funkciju. Postoji i ovdje mogućnost da se nastavi s radom, ovisno već o prirodi kvara. Svakako ovaj režim rada odraziti će se na kvalitetu izvedbe procesa pročišćavanja onečišćenih plinova. Stvar je u tome da nije svaka komponenta jednako bitna za funkcioniranje sustava kao cjeline. Primjerice kvar senzora za gustoću vode neće zaustaviti rad sustava, međutim donijeti će sa sobom velike probleme, stoga nije preporučljiv duži period rada dok je neka komponenta u kvaru, već je pokvarenu komponentu potrebno što prije zamjeniti.⁶² Naročito iz razloga što su iskustva pokazala da rad sustava s komponentom u kvaru, često za posljedicu ima kršenje MARPOL propisa, što može dovesti do značajnih financijskih kazni. Problem ili kvar ne mora nužno biti direktno u samom scrubber sustavu. Scrubber je naime kompleksan sustav koji je u svezi s više drugih brodskih sustava. Tako će problem ili kvar kod nekog brodskog sustava potencijalno imati utjecaja na scrubber. Za primjer ćemo dati sustav brodske destilacije ili evaporacije. Poznato je da se voda dobivena iz ovog sustava često koristi za nadopunu izgubljene vode u scrubber sustavu zatvorene petlje. U slučaju kvara neke od komponenti evaporatora, sustav zatvorene petlje neće moći nadoknaditi izgubljenu vodu za apsorpciju, te isti neće moći funkcionirati jer neće moći ispuniti traženu količinu vode unutar sustava.

Koji se konkretno kvarovi javljaju kod brodskih scrubber sustava ? Krenimo na jedan pregled.

Problem s protokom i tlakom vode za ispiranje se javlja kada se počnu javljati prvi problemi s vodenim pumpama, do kojih dolazi već nakon par godina rada scrubber sustava ili u slučaju da postoji neko propuštanje u sustavu. Propuštanje ili curenje neke od cijevi ispirne vode opasnija je pojava i može dovesti do naplavlivanja. Ugrađeni su stoga u scrubber sustavu brojni alarmi koji bacaju sustav u *shut off* u slučaju naplavlivanja. Problemi i kvarovi vodenih pumpi unutar scrubber sustava odraziti će se na scrubber na način da protok neće biti dostatan, kao ni tlak na ulazu vode za ispiranje scrubbera. Inače parametar tlaka i protoka ispirne vode od izuzetne je važnosti za funkcioniranje scrubber sustava. Kvarovi pumpi javljaju se radi

⁶¹ Lukačević Pavo, 2020. *Održavanje i kvarovi uređaja za ispiranje ispušnih plinova (Scrubber uređaja)*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

⁶² Lukačević Pavo, 2020. *Održavanje i kvarovi uređaja za ispiranje ispušnih plinova (Scrubber uređaja)*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

potrošnje određenih dijelova pumpe. Primjerice impeler pumpe može izgubiti svoju funkciju zbog kavitacije koja je česta pojava kod pumpi. Pojavu potrošnje pumpnih dijelova dodatno ubrzava korozija koja se kod zatvorenih sustava može javiti radi korištenja kaustične sode i pojave sumpora. Što se tiče sustava otvorene petlje, najčešće se događa prljanje filtera na mjestu gdje se more iz okoliša crpi u sustav.

Kvarovi s pokretanjem scrubber sustava najčešće su povezani s temperaturom plinova na izlazu iz scrubbera ili pak sa nezadovoljavajućom razinom u tanku kaustične sode. Opcija s previsokom temperaturom ispušnih plinova moguća je ako se dogodi rad na suho, to jest ako se ne dogodi ispiranje plinova medijem za apsorpciju. Tada će najvjerojatnije temperatura ispušnih plinova na izlazu iz scrubber jedinice biti preko 140 °C i sustav će se odbiti pokrenuti.⁶³ Opcija kada imamo nedovoljnu razinu kaustične sode u njenom tanku za posljedicu će imati aktiviranje sigurnosne sklopke i nemogućnost pokretanja scrubber sustava. Brod tokom svog puta doživljava razne promjene položaja uslijed djelovanja valova i morskih struja. Zna se tako dogoditi da se nagne pa da razina kaustične sode u tanku padne ispod zadate razine, pa se sigurnosna sklopka praktički aktivira bez razloga.

Pojava korozije u scrubber sustavu uzrokovana je radi visoke kiselosti i jakog korozivnog djelovanja vode za ispiranje. Morska voda takva je sama po sebi, a ta njezina svojstva dodatno će pogoršati visoke temperature ispušnih plinova s kojima radi. Do korozije će najprije doći u cjevovodima scrubber sustava, gdje se mogu javiti curenja. Propadanje cijevi povezanih sa scrubberom najčešći su kvarovi unutar ovog sustava. Povratne informacije brodarka proizvođačima scrubber sustava kažu da se propadanje cjevovoda kod scrubber sustava zna javljati već nakon šest mjeseci od instalacije scrubbera.⁶⁴

Problem s emisijom ispušnih plinova izuzetno je bitan problem, koji zahtjeva da posebno obratimo pažnju na njega tokom navigacije. Posebno je učestao kod scrubbera s Venturijevom cijevi. Ovaj problem direktno je vezan uz parametar emisije sumpora na izlazu iz scrubber sustava, a taj je parametar najvažniji parametar kod ovakvih sustava. Osim za problem ispušnih plinova, parametar emisije ispušnih plinova na izlazu vezan je i uz količinu i kvalitetu vode za ispiranje te vrijednost sumpora u gorivu. Moguće je da se problem s emisijom ispušnih plinova javi radi neispravnog senzora emisije.

⁶³ Lukačević Pavo, 2020. *Održavanje i kvarovi uređaja za ispiranje ispušnih plinova (Scrubber uređaja)*, diplomski rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik.

⁶⁴ standard-club.com. Article: Exhaust Gas Cleaning System (Scrubber) Guidance URL: <https://www.standard-club.com/knowledge-news/article-exhaust-gas-cleaning-systems-scrubber-guidance-1234/>

Kvarovi senzora za nadziranje ispušnih emisija za posljedicu mogu imati pogrešne podatke usmjerene prema upravljačkoj jedinici sustava. Na pogrešne podatke senzora, upravljačka jedinica odgovoriti će neadekvatnim režimom rada. Najbolji primjer je kada radi kvara senzor javi upravljačkoj jedinici da su emisije plinova unutar granica. Ako uslijedi kontrola od strane ovlaštenih tijela, utvrditi će se da su emisije ustvari van granica i kompanija će dobiti izuzetno veliku globu. U nekim zemljama postoji čak i mogućnost da odgovorni časnici završe u zatvoru.

Problemi s kvalitetom ispuštene vode za ispiranje prema proizvođačima scrubber sustava dolaze radi problema koji se javljaju u svezi sa sensorima ispuštene vode za ispiranje. U slučajevima gdje su vrijednost PAH-a, pH i zamućenosti izvan dozvoljenih granica, proizvođača savjetuje rekalkibraciju senzora.⁶⁵

Bio je ovo pregled najuobičajenijih problema i kvarova brodskih sustava. Činjenica da je scrubber tehnologije još uvijek u razvoju, kao i to da je za svaki brod specifična te da je vrijeme za njeno testiranje izuzetno kratko neki su od razloga za pojavu neočekivanih kvarova. Ništa nikada nije moguće 100% predvidjeti, pa tako ni kvarove u svezi scrubber sustava. Osim ovih ranije nabrojanih postoji cijeli niz neočekivanih i rjeđih kvarova koji se mogu javiti tokom navigacije. Ti su kvarovi ujedno i puno opasniji po sustav iz razloga što su neočekivani i nanose puno više štete od uobičajenih kvarova. Navesti ćemo neke od njih:

- začepljeni hladnjaci za recikliranu vodu za ispiranje
- visok PAH tijekom otvorenog načina rada
- rad sa visokom gustoćom reciklirane vode za ispiranje
- kvar senzora gustoće vode
- neadekvatna vrijednost pH vode za ispiranje tijekom promjena opterećenja
- puknuća i curenja na cijevima uređaja za analiziranje kvalitete ispuštene vode

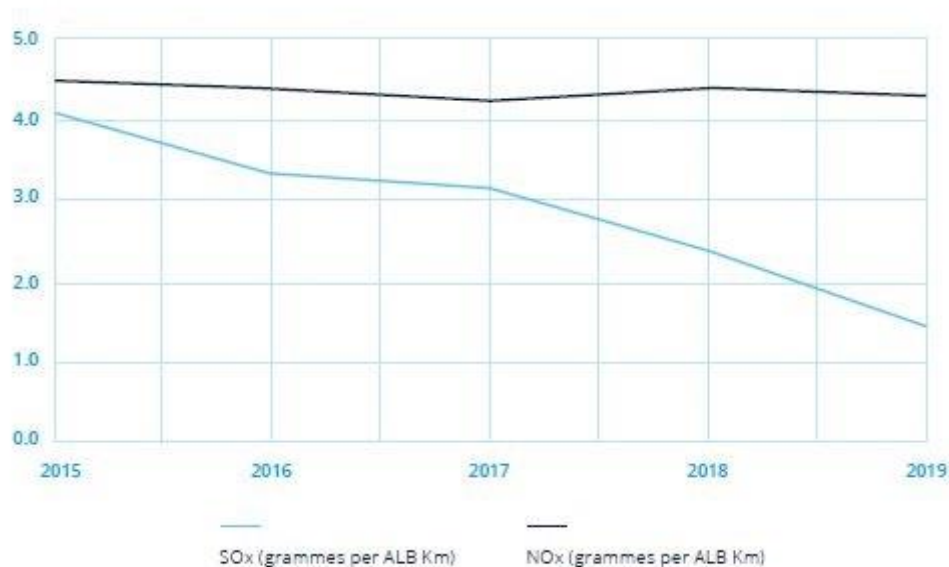
Bez obzira radilo se o problemu ili kvaru, o onom učestalom ili u potpunosti nenadanom ključ za nošenje s njim ili u najboljem scenariju njegovom potpunom izbjegavanju je u planiranju i analiziranju. Stoga je dobar sustav planskog održavanja od krucijalne važnosti kada pričamo o kvarovima i problemima. Kada je održavanje i kontrola redovita i kada se poštuju zahtjevi proizvođača vezani za način rada, problemi i kvarovi scrubber sustava trebali bi u pravilu biti smanjeni na minimum. Jednako je važno propisno i stalno educirati posadu koja sa sustavom

⁶⁵ Wärtsilä Moss AS, 2019. *EGC system-Technical Manual for Sheme B*

rukuje, kako bi uvijek bila u toku sa načinom rada i svim novitetima vezanima uz sustav skrubiranja. Educiranje, prenošenje znanja i iskustva između posade stavke su koje će samo olakšati rukovanje scrubber sustavom, a time lančano i cijeli pomorski poduhvat.

9. OCJENA SCRUBBER SUSTAVA

Tehnologija scrubber sustava iako je u široj uporabi u pomorskoj industriji tek zadnjih 10-20 godina isprofilirala se kao vodeća tehnologija za smanjenje emisije ispušnih plinova brodskih uređaja. Na svom značaju još je više dobila nakon stupanja na snagu IMO-vih vrlo strogih regulativa koje se tiču ispušnih emisija, a koje se stupile na snagu s prvim danom 2020. Uvodne tvrdnje potkrijepiti ćemo još jednim grafikonom u ovom radu, kojeg je izradila pomorska kompanija MSC, a tiče se jednog njihovog broda na kojemu je ugrađen scrubber sustav. Na grafikonu je vidljiv očit pad emisija NO_x i SO_x od ugradnje scrubbera na brod 2015. pa do kraja 2019. godine kada je istraživanje završeno. Na grafikonu crna linija označava dušikove emisije, a plava sumporove. Pad sumporovih emisija je izraženiji iz razloga što je scrubber tehnologija pretežito tehnologija za uklanjanje sumporovih emisija iz ispušnih plinova, dok se za dušikove emisije na brodovima pretežito koristi SCR tehnologija koja na ovom području ima puno veću uspješnost od scrubbera.



Grafikon 8: prikaz pada NO_x i SO_x emisija nakon ugradnje scrubbera na brod (preuzeto: <https://www.msckrstarenja.com/hr-hr/About-MS/MS/Odrzivost/Planet.aspx> Nitrogen Oxides and Sulphur Oxides Emissions Intensity)

Iako u praksi dokazana ovu tehnologiju i dalje prati skepsa od strane dijela brodara ponajviše zbog visokih početnih troškova, glomaznosti sustava, te potrebe za kaustičnom sodom i skladištenjem vode kod verzije sustava s zatvorenom petljom. Kod otvorenog tipa scrubbera brodare od njegove ugradnje odbijaju regulative pojedinih zemalja vezane s ispuustom otpadne vode, o čemu se naširoko govorilo u *Potpoglavlju 6.2.1*. Razlozi su ovo zašto ova inovativna tehnologija nije uzela još više maha u pomorskoj industriji.

Ipak od početka 2020. pred brodarima se pojavljuje izazov dali žele koristiti LSFO gorivo ili znatno povoljnije HFO gorivo. Ako žele i dalje koristiti jeftinije gorivo za svoj pogon, scrubberi im preostaju kao jedina mogućnost. Upravo će cjenovna razlika između HFO i LSFO biti ključna u daljnjoj ekspanziji scrubber sustava na međunarodno pomorsko tržište. Poanta je naime da ako razlika između ova dva tipa goriva ne bude prevelika, vlasnici brodova vrlo vjerojatno će se radije odlučivati za prebacivanje na LSFO nego na ugradnju kompleksnih i vrlo skupih scrubber sustava. Međutim ako razlika u cijeni bude značajna, gotovo je pa sigurno da će brodari prigrliti scrubber sustave. Ne možemo prognozirati kako će se ponašati svjetsko tržište naftnim derivatima, jer je ono podložno promjenama iz dana u dan, kao i nenadanim događajima koji konstantno pogađaju naš planet (najbolji je primjer pandemija COVID 19), no zasad je razlika u cijeni između lakog i teškog goriva dosta izražena pa sve upućuje da će scrubberi postati još popularniji na brodovima nego što već jesu.

| <u>ISPLATIVOST SCRUBBERA</u> | | |
|---|-----------------------------|------------------------|
| | KORIŠTENJE SCRUBBERA | KORIŠTENJE LSFO |
| Cijena održavanja opreme | 31 378 \$ | 0 \$ |
| Cijena zbrinjavanja otpadne vode | 5502 \$ | 0 \$ |
| Cijena kaustične sode | 47 852 \$ | 0 \$ |
| Cijena LSFO | 0 \$ | 3 829 479 \$ |
| Cijena HFO | 5 167 290 \$ | 2 550 000 \$ |
| Ukupno (USD/god) | 5 252 022 | 6 379 479 |

Tablica 11: usporedba troškova scrubber sustava i goriva s niskom udjelom sumpora (izvor: Aron Tasin; Wärtsilä North America, 2015, *Introduction to Scrubber Technologies*)

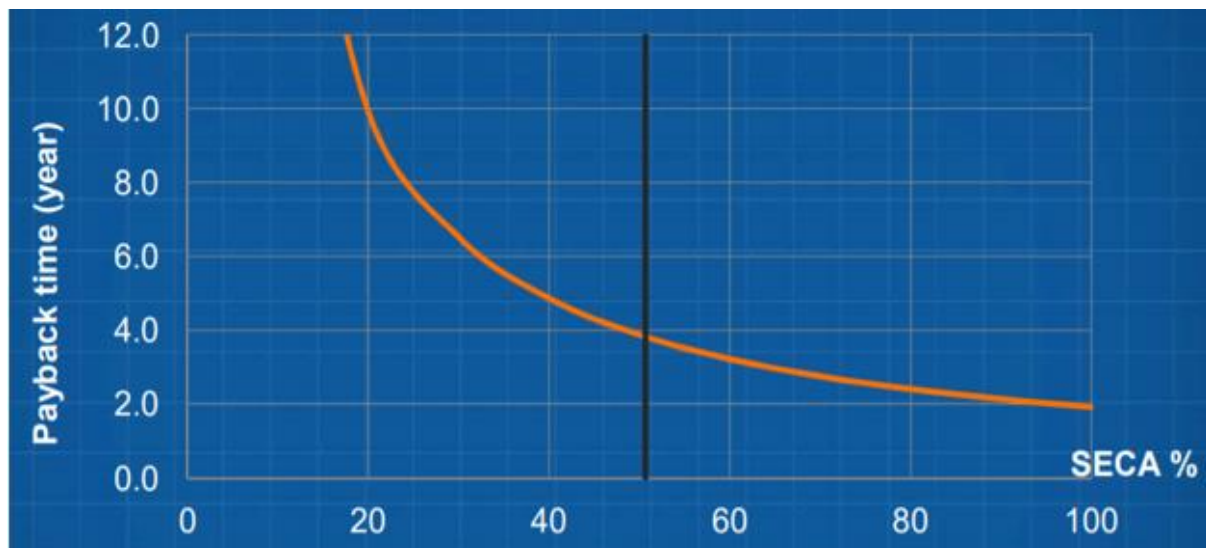
Podaci iz prethodne tablice preuzeti su od strane sjevernoameričke podružnice Wärtsilä, a u njima je dana usporedba broda koji koristi LSFO gorivo i broda koji koristi scrubber. Iz tablice se može iščitati da brod sa ugrađenim scrubber sustavom ostvari godišnju uštedu od cca 1 127 460 \$.

| | | <u>PUTNIČKI</u> | <u>TANKER</u> | <u>KONTEJNERSKI</u> | <u>RO-PAX</u> |
|---|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | Mjerna jedinica | | | | |
| Snaga motora | MW | 16 | 10 | 36 | 12 |
| Nosivost broda | T | 7 500 | 37 000 | 60 000 | 27 000 |
| Teretni kapacitet | TEU | - | - | 4 000 | 1 500 |
| Putnički kapacitet | osoba | 2 500 | - | - | 40 |
| Prosječno opterećenje motora | % MCR | 90 | 80 | 80 | 90 |
| Provedeno vrijeme u ECA zonama | % | 70 % | 50 | 30 | 100 |
| Dani kontinuiranog rada u ECA zonama | dan | 2 | 5 | 3 | 1 |
| Broj dana u plovidbi tokom godine | dan | 270 | 270 | 270 | 270 |
| Životni vijek scrubbera | godina | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Datum instalacije | - | 2014. | 2014. | 2014. | 2014. |
| Potrošnja goriva | g/kWh | 173 | 173 | 173 | 173 |
| Ukupna godišnja količina potrošenog goriva | T | 11 300 | 4484 | 9686 | 12 107 |
| Trošak HFO | USD/T | 591 | 591 | 591 | 591 |
| Trošak LSFO | USD/T | 925 | 925 | 925 | 925 |
| Razlika u trošku između HFO i LSFO | USD | 334 | 334 | 334 | 334 |
| Ušteda (cca) | USD | 3 774 200 | 1 497 660 | 3 235 120 | 4 043 740 |

Tablica 12: procjena uštede goriva na četiri različita tipa broda sa scrubber sustavom (izvor: Shu Shih-Tung, 2013, *A Life Cycle Cost Analysis of Marine Scrubber Technologies*)

Još opširnija analiza, koja daje još impresivnije podatke u korist scrubber sustava, data je u *Tablica 12* koju je izradio student Shu Shih-Tung sa sveučilišta u Rostocku u svom magistarskom radu. On je prilikom procjene uštede goriva zbog korištenja scrubber sustava u obzir uzeo četiri različita tipa broda: putnički, tanker, kontejnerski i Ro-Pax brod (brod za prijevoz putnika, koji ujedno prevozi vozila te ostali teret). Procjena je rađena za period od jedne godine i to pod pretpostavkom da sva četiri tipa broda imaju jednak broj dana u plovidbi, potrošnju goriva, kao i životni vijek scrubber sustava.

Isplativost ugradnje scrubbera naročito se očituje u kontrolnim područjima SO_x emisije, takozvanim SECA (eng. Sulfur Emission Control Areas) zonama. Moguće je to uvidjeti na posljednjem grafikonu o ovom radu datom ispod.



Grafikon 9: isplativost scrubber sustava ovisno o vremenu provedenom u SECA zonama (izvor: Aron Tasin; Wärtsilä North America, 2015, *Introduction to Scrubber Technologies*)

Dati argumenti u prethodnom grafikonu i dvije tablice su neoborivi i definitivno govore u korist scrubber sustava kada je riječ o uštedi goriva. Ušteta je na godišnjem nivou toliko značajna da bi rade nje brodari zanemarili i visoke početke troškove ugradnje scrubbera. Ono što novac dobiven na uštedi goriva još uvijek ne može nadomjestiti jeste njegova glomaznost te neke druge konstrukcijske značajke. Imaju na umu da je scrubber tehnologija unatoč svemu još uvijek mlada, još se uvijek razvija. Na njenom razvoju rade najveće svjetske kompanije za proizvodnju brodski uređaja i strojeva te njihovi najbolji inženjeri. To je toliki skup znanja na jednom mjestu da je sasvim realno za očekivati u doglednoj budućnosti da će se s određenim konstrukcijskim rješenjima doskočiti i ovim zasad postojećim manama.

10. ZAKLJUČAK

Ispušni plinovi nezaobilazan su nusprodukt svakog područja u kojem se javljaju motori s unutarnjim izgaranjem, a oni su u industriji nezaobilazni. U svakoj industriji, pa tako i u pomorskoj. Ispušni plinovi iz goriva koje izgara u motorima, za posljedicu imaju stvaranje štetnih emisija, ponajprije onih sumporovih i dušikovih. Da bi smo očuvali planet Zemlju i život na njoj potrebno je konstantno smanjivati štetne emisije u zraku i dovesti ih na najnižu moguću razinu. Pomorska industrija je među prvim granama industrije koja je počela poduzimati konkretne korake na tom planu. Predvođena je IMO organizacijom, najvišim autoritetom u svijetu pomorstva. Prema regulativama IMO-a, opisanih u Prilogu VI MARPOLA postavljen je limit sumpora u brodskom gorivu na 0.5 %. Uređaji za smanjivanje emisije ispušnih plinova, bolje znani pod angliziranim imenom *scrubberi*, su jedini uređaji dosad na tržištu adekvatni uređaji koji su se spremni nositi sa najnovijim IMO regulativama koje se tiču brodskih emisija ispušnih plinova. Ponajprije tu mislimo na mokri tip scrubber koje je najadekvatniji za primjenu na brodu. Sve dosad napisano u ovom završnom radu, potkrepljeno argumentima i podacima iz raznih istraživanja govori tome u prilog. Nebitno o kojoj se vrsti mokrih scrubbera radi, dali su to sustavi s otvorenom ili zatvorenom petljom ili pak hibridni sustavi. Oni svi naravno posjeduju određene mane. Prije svega misli se na visoke početne troškove ugradnje. Potom, mane ovih sustava očituju se kod otvorenih sustava u negativnom publicitetu (koji je, dokazali smo u radu, neopravdan) i zabrani rada u određenim područjima (što je isto posljedica negativnog publiciteta, ne nekih konkretnih studija), a kod zatvorenih sustava u visokoj cijeni kaustične sode i potrebom za skladištenjem vode. Unatoč tim manama scrubber sustavi su sustavi koji rade s tehnologijom koja daje vrhunske rezultate i još jednom naglašavam jedina omogućuje rad s dosta povoljnijim HFO gorivom, pa je njenim korištenjem moguće ostvarti značajnu financijsku uštedu. Nikako ne smijemo zaboraviti ni na SCR sustave, čija je tehnologija bez premca kada je u pitanju uklanjanje štetnih dušikovih emisija iz ispušnih plinova. Scrubber tehnologija i SCR tehnologija mogu se i kombinirati.

Uporabom scrubbera u pomorstvu ne samo da dobijemo visoko kvalitetnu tehnologiju, koja uz odlične operativne rezultate ostvaruje i značajnu uštedu u pogledu potrošnje goriva, već dobivamo i tehnologiju čiji rad pospješuje kvalitetu zraka kojega svi svakodnevno udišemo i koja doprinosi očuvanju čitave naše planete.

LITERATURA

- UNFCCC, REPORT OF INCFCCC, 1992.
- FKIT-UNIZG, PREDAVANJE 5/SKRUBIRANJE, 2020.
- Wärtsilä Finland, WARTSILA SCRUBBER PRODUCT GUIDE, 2014.
- Wärtsilä Finland OY, WARTSILA HYBRID AND INLINE SCRUBBERS OPERATION, 2017.
- Alfa Laval, UNDERSTANDING EXHAUST GAS TREATMENT SYSTEMS, 2012.
- Aarhus School of Marine and Technical Engineering, COMPARING WET AND DRY EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS, 2013.
- Alfa Laval, COMPARISON OF SO_x SCRUBBER TECHNOLOGIES, 2012.
- Wärtsilä Moss AS, WARTSILA I-SO_x HYBRID SCRUBBER PROCESS DESCRIPTION, 2018.
- Wärtsilä Moss AS, EGC SYSTEM-TECHNICAL MANUAL FOR SCHEME B, 2019.
- The Glosten Associates, EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS SELECTION GUIDE, 2011.
- Duje Zoko, MJERENJE ISPUŠNIH EMISIJA BRODSKOG MOTORA, 2018.
- Damir Potrebica, PRILOG VI MARPOLA I STRATEŠKE PRILAGODBE BRODARA, 2019.
- Ivan Vučina, PROČISTAČI ISPUŠNIH PLINOVA, 2019.
- Branka Milošević-Pujo & Nataša Jurjević, ONEČIŠĆENJE MORA IZ ZRAKA EMISIJOM ISPUŠNIH PLINOVA, 2004.
- Marko Šećer, METODE SMANJENJA EMISIJA ŠTETNIH PLINOVA IZ BRODSKIH GENERATORA PARE, 2019.
- Franjo Nižić, PROČISTAČI ISPUŠNIH PLINOVA NA BRODOVIMA, 2017.
- Mikhail Sofiev i grupa znanstvenika, CLEANER FUELS FOR SHIPS PROVIDE PUBLIC HEALTH BENEFITS WITH CLIMATE TRADEOFFS, 2018.
- Doug Woodyard, POUNDER'S MARINE DIESEL ENGINES AND GAS TURBINES, 2009.
- Ivan Komar & Branko Lalić, CURRENT AIR QUALITY ISSUES, 2015.
- Pavo Lukačević, ODRŽAVANJE I KVAROVI UREĐAJA ZA ISPIRANJE ISPUŠNIH PLINOVA (SCRUBBER UREĐAJA), 2020.

- Matej Radić, METODE SMANJENJA ONEČIŠĆENJA ZRAKA ŠTETNIM ISPUŠNIM PLINOVIMA, 2019.
- Marko Buršić & Kristijan Lenac, EXHAUST GAS CLEANING SYSTEM, 2020.
- Aron Tasin, INTRODUCTION TO SCRUBBER TECHNOLOGIES, 2015.
- Johanna Snickars-Nykamb, TREATMENT OF WASHWATER FROM OPEN LOOP SCRUBBERS, 2017.
- Shih-Tung Shu, A LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF MARINE SCRUBBER TECHNOLOGIES, 2013.
- Steen Riis Christensen, SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION OF NO_x ON SHIPS, 2018.
- Kristijan Lenac, METODE SMANJIVANJA EMISIJE ŠTETNIH TVARI S BRODOVA, 2005.
- Branko Lalić, OPTIMIZIRANJE RADA BRODSKOG PORIVNOG DIZELSKOG MOTORA U SVRHU ISPUNJENJA NOVIH ZAHTJEVA O ISPUŠNIM EMISIJAMA, 2013.
- enciklopedija.hr
- hr.wikipedia.org
- clearseas.org
- en.wikipedia.org
- emsa.europa.eu
- intechopen.com
- clean-carbonenergy.com
- reasrcharge.net
- msckrstarenja.com
- globalmaritimehub.com
- pacificgreen-group.com
- vesselfinder.com
- youtube.com
- marineinsight.com
- egcs.com
- officerofthewatch.com
- ship-technology.com

- hellenicshippingnews.com
- wartsila.com
- camachem.com
- airlim.org
- iaccsea.com
- standard-club.com