

Ispušni sustav motora SUI

Terlević, Vlado

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:952874>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

VLADO TERLEVIĆ

ISPUŠNI SUSTAV MOTORA SUI

Diplomski rad

U Puli, kolovoz 2025. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

VLADO TERLEVIĆ

ISPUŠNI SUSTAV MOTORA SUI

Diplomski rad

JMBAG: 0665589088, vanredni student

Studijski smjer: Energetika i inženjerstvo okoliša

Predmet: Toplinski strojevi

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Znanstvena grana: Termodinamika

Mentor: Doc. dr. sc. Igor Kegalj, dipl. ing.

U Puli, kolovoz 2025. godine



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Vlado Terlević, kandidat za magistra inženjera strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Diplomskog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student: Vlado Terlević

Matični broj: 0069059046

U Puli, kolovoz 2025. godine



IZJAVA
o korištenju autorskog djela

Ja, Vlado Terlević dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom

ISPUŠNI SUSTAVI MOTORA SUI

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

Student: Vlado Terlević
Matični broj: 0069059046

U Puli, kolovoz 2025. godine

Sažetak

Ovaj rad bavi se analizom ispušnih sustava dvotaktnih dizelskih sporohodnih motora s unutarnjim izgaranjem, koji se primjenjuju u pomorskoj industriji. Poseban naglasak stavljen je na ispitivanje učinkovitosti sustava za pročišćavanje ispušnih plinova, poznatih kao scrubberi, s ciljem smanjenja emisija štetnih tvari poput sumporovih oksida (SO_x), dušikovih oksida (NO_x) i lebdećih čestica (PM).

U uvodnom dijelu rada opisani su osnovni sustavi koji omogućuju funkcionalnost broda, dok se središnji dio bavi tehničkim karakteristikama dvotaktnih sporohodnih dizelskih motora te njihovim ekološkim utjecajem. Posebna pažnja posvećena je raznim vrstama scrubbera (mokri, suhi i elektrostatički precipitatori), njihovim radnim principima te regulatornim zahtjevima koje postavlja Međunarodna pomorska organizacija (IMO 2020). Rad također uključuje numeričke proračune tlaka u sustavu mokrog scrubbera te analizu ekonomskih aspekata njegove primjene, uključujući usporedbu troškova različitih goriva i povrat investicije. Kritički su analizirani ekološki izazovi i tehnička ograničenja scrubber sustava, kao i potencijalne inovacije poput hvatanja i skladištenja ugljika (CCS) te primjene naprednih materijala i digitalizacije u sustavima filtracije.

Zaključno, rad naglašava važnost optimizacije ispušnih sustava u pomorskoj industriji s ciljem smanjenja ekološkog otiska i usklađivanja s međunarodnim regulativama, uz istovremeno osiguravanje ekonomske isplativosti brodarskih operacija.

Ključne riječi:

ispušni sustav, dvotaktni dizelski motor, ispušni plinovi, scrubber, sumporovi oksidi (SO_x), dušikovi oksidi (NO_x), lebdeće čestice (PM), pomorska industrija, regulativa IMO 2020, pročišćavanje plinova, ekonomičnost, održivost.

Abstract

This paper analyzes the exhaust systems of two-stroke slow-speed diesel engines used in the maritime industry. Special emphasis is placed on examining the efficiency of exhaust gas cleaning systems, known as scrubbers, to reduce emissions of harmful substances such as sulfur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x), and particulate matter (PM).

The introductory section describes the fundamental systems that enable ship functionality, while the central part focuses on the technical characteristics of two-stroke slow-speed diesel engines and their environmental impact. Special attention is given to different types of scrubbers (wet, dry, and electrostatic precipitators), their operating principles, and the regulatory requirements set by the International Maritime Organization (IMO 2020).

The paper also includes numerical pressure calculations in a wet scrubber system and an analysis of the economic aspects of its application, including a comparison of fuel costs and return on investment. Environmental challenges and technical limitations of scrubber systems are critically analyzed, as well as potential innovations such as carbon capture and storage (CCS) and the application of advanced materials and digitalization in filtration systems.

In conclusion, the paper highlights the importance of optimizing exhaust systems in the maritime industry to reduce environmental impact and comply with international regulations while ensuring the economic viability of shipping operations.

Keywords:

exhaust system, two-stroke diesel engine, exhaust gases, scrubber, sulfur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x), particulate matter (PM), maritime industry, IMO 2020 regulation, gas purification, cost-effectiveness, sustainability.

Sadržaj

1.	UVOD	1
2.	SUSTAVI NA BRODU.....	2
2.1	Prema funkcijama sustavi na brodu dijele se na:.....	2
2.2	Prema lokaciji na brodu.....	3
2.3	Prema vrsti energije:.....	4
3.	Opis vrste sustava koji se koristi na projektiranom brodu	5
3.1	Vrsta pogona broda koji se koristi u ovom prikazanom proračunu.....	5
3.2	Stupnjevi rada dvotaktnog motora.....	7
3.2.1	Prvi takt	7
3.2.2	Drugi takt rada	8
3.2.3	Treći stupanj hoda	9
3.2.4	Fazni dijagram	10
3.3	Sustav goriva na brodu	12
3.3.1	Pumpa za gorivo i ubrizgivači motora	13
3.3.2	Ventil za kontrolu tlaka	14
3.4	Scrubber sustav - sustav čišćenja dimnih plinova	14
3.4.1	Podjela onečišćujućih tvari zraka prema agregatnom stanju:	15
3.4.2	Ugljikov dioksid (CO₂)	15
3.4.3	Ugljikov monoksid (CO)	16
3.4.4	Sumporni oksidi (SOX)	17
3.4.5	Dušikovi oksidi (NOX)	17
3.4.6	Lebdeće čestice (PM – particulate matter)	18
3.5	Emisije prikazane statistički	20
3.6	Vrste scrubera koje postoje	23
3.6.1	Mokri scruberi	24
3.6.2	Suhi scruberi	25
	Vrste Sorbenata u suhim scrubber sustavima:	25
3.6.3	Elektrostatički precipitatori	27
3.7	Trenutno važeća pravna regulativa	28
3.8	Lokalni i regionalni zakoni.....	29
3.9	Vrste Scrubber sistema prema izmjeni medija sa okolinom.....	31
3.9.1	Scrubber sustavi otvorenog kruga	31
3.9.2	Scrubber Sustavi zatvorenog Kruga	33
3.9.3	Hibridni Scrubber Sustavi	35

3.10	Proračun pada tlaka u sustavu mokrog SCRUBBERA	37
3.10.1	Pad tlaka na ispušnim cijevima glavnog motora	40
3.10.2	Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 1.....	43
3.10.3	Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 2.....	46
3.10.4	Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 3.....	49
3.10.5	Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 4.....	52
3.11	Postoci smanjenja emisija u more i zrak	55
3.11.1	Emisije u zrak	55
3.11.2	Emisije u more	55
3.12	Cjenovna usporedba MGO i HFO.....	56
3.13	Povrat investicije.....	57
4.	Budućnost Scrubber sustava	59
4.1.1	Sustavi za hvatanje i skladištenje ugljika (CCS)	59
4.1.2	Napredni materijali i dizajn scrubbera	59
4.1.3	Automatizacija i digitalizacija	59
4.2	Kritička analiza.....	59
5.	Zaključak	62

1. UVOD

U ovome radu govoriti ćemo o ispušnim sustavima motora sa unutarnjim izgaranjem, točnije o specifičnome motoru kao što je dvotaktni dizel sporohodni motor. Dotaknuti ćemo se svih sustava koji se koriste kako bi jedan brod mogao normalno funkcionirati. U proračunima će se spominjati isključivo ispušni sustav te će se kasnije opisati i mokri sustav Scrubbera koji zadržava čestice SOX,PM sa velikom efikasnošću (preko 60%) te neznatno čađu, da bi emisija zadovoljavala ekološke norme.

Sektor pomorske industrije važan je za globalnu trgovinu jer ekonomski povezuje, olakšava putovanje i transport robe između kontinenata. Međutim, zbog oslanjanja industrije na fosilna goriva za pogon, sve se više obraća pojam na ekološke utjecaje, posebno u pogledu emisija stakleničkih plinova i zagađenja zraka. Kako svijest o okolišu i regulativni zahtjevi rastu, operateri i vlasnici brodova prisiljeni su tražiti načine za poboljšanje održivosti i smanjenje emisija u pomorskoj industriji. Instalacija sustava za čišćenje ispušnih plinova na brodovima jedno je od mogućih rješenja. Sustavi za čišćenje ispušnih plinova smanjuju emisije dušikovih oksida (NO_x), sumporovog dioksida (SO₂) i čestica (PM) koje su dio ispušnih plinova koje motor broda emitira nakon izgaranja. Sustavi za čišćenje ispušnih plinova nude učinkovite načine za ispunjavanje propisa o emisijama, istovremeno smanjujući ekološki utjecaj pomorskih uređaja filtracijom ispušnih plinova prije nego što budu pušteni u atmosferu.

Ovaj rad istražuje različite sustave pročišćavanja ispušnih plinova na brodovima te analizira jedan takav sustav, s ciljem pružanja boljeg razumijevanja njegovog rada. Uvođenje Regulacije o emisijama sumpora (IMO 2020) od strane Međunarodne pomorske organizacije potaknulo je vlasnike brodova da se zainteresiraju za sustave za čišćenje ispušnih plinova kako bi mogli ispuniti propise. Važno je napomenuti da sustav dolazi s operativnim ograničenjima, ekološkim učincima i složenom tehnologijom o kojima će se raspravljati u ovome radu. Vlasnici brodova moraju se prilagoditi i biti pažljivi prema izazovima i prilikama koje ovaj sustav pruža. Svrha sustava je pridonijeti održivijem načinu rada i čistijem pomorskom prijevozu u budućnosti. Ovaj rad ima za cilj pružiti korisne informacije o ulozi sustava za čišćenje ispušnih plinova analizirajući činjenice iz izvještaja industrije i akademskih istraživanja provedenih u prošlosti.

2. SUSTAVI NA BRODU

Brodski sustavi predstavljaju skup neovisnih jedinica, pri čemu svaka jedinica autonomno izvršava svoju specifičnu funkciju te osigurava održavanje relevantnih parametara unutar definiranih operativnih granica. Svaki od ovih sustava istovremeno je podsustav koji se može upravljati fizičkim, elektromotornim ili verbalnim putem s komandnog mosta.

2.1 Prema funkcijama sustavi na brodu dijele se na:

- Nautički sustav: uključuje sve što je povezano s navigacijom broda, poput:
 - Global Positioning System koji služi za lakše određivanje točne pozicije točke na koju želimo stići ili kako bi nas ostali lakše pronašli u slučaju kvara.
 - Sonar je sustav koji emitira određenu frekvenciju u more preko sonde te mjeri vrijeme povratka frekvencije. Uz pomoć dobivenih vrijednosti, na ekranu učitava sliku podmorja. Ovisno o frekvenciji postoji širi, ali površni spektar te užji, ali puno točniji spektar.
 - Radar (Radio Detection and Ranging) je elektronički sustav koji koristi elektromagnetske valove, obično radio valove, za otkrivanje, praćenje i identifikaciju objekata i površina u okolini. Osnovni princip rada radara je slanje radio valova prema cilju i mjerenje vremena koje je potrebno da se ti valovi reflektiraju i vrate natrag do radara.
- Propulzijski sustav: čine svi dijelovi brodskog sustava koji omogućuju kretanje broda.
 - Motor: postoji više vrsta motora na brodu ovisno o namjeni broda. Za teretne brodove najviše se koriste sporohodni dizel 2T motori koji većinom koriste mazut za pogon. Za brodove koji su u službi države, gdje je potrebna velika brzina putanje i brz odaziv, koriste se benzinski 4T motori, često uz turbine za povećanje snage. U krajnjim slučajevima znaju se koristiti i plinske turbine koje imaju iznimno veliku snagu, ali i iznimno veliku potrošnju. Na brodicama za normalni promet putnika i osobne potrebe koriste se 4T Otto motori i 2T Otto motori.
- Električni sustav: obuhvaća sve električne komponente broda,
 - Generatore - sustave koji pretvaraju toplinsku/kemijsku energiju putem posrednika u istosmjernu.

- Baterije - sustave za skladištenje energije pri pretvorbi ili za pomoć pri paljenju sistema.
- Električnu mrežu - mreža za napajanje cijelog broda do svih mikro pozicija gdje je to potrebno.
- Rasvjetu - sustav za umjetno svjetlo u dijelovima broda gdje/kad prirodno svjetlo ne dopire.
- Sustave alarma - sustave koji obavještavaju kada su određeni parametri van normalnih vrijednosti te u slučaju nezgode za obavijestiti vođitelje stroja da se opasnost što prije ukloni te da se pristupi što prije rješavanju ozljede bilo kakvog stupnja.
- Sigurnosni sustav:
 - Protupožarnih sustava - sustavi za sprječavanje početka i zaustavljanje širenja gorenja raznih tekućina, plinova i tvari.
 - Protuprovalnih sustava - sustava za sprječavanje neovlaštenog ulaza te počinjenja štete, bilo materijalne, bilo intelektualne.
 - Sustav kamera - skup naprava za snimanje i reprodukciju video sadržaja kad nam je potreban uvid u neki određeni događaj.
 - Sustav Detektora dima - elektronički sklop uređaja koji se koristi za otkrivanje prisutnosti dima u okolini.
- Komunikacijski sustav:
 - Sustavi koji omogućuju komunikaciju između posade, drugih brodova, obale, te različitih kontrolnih i upravljačkih centara.
- Potrošni sustav: obuhvaća sve što troši resurse poput:
 - Vode - pitke, tehničke, balasta
 - Goriva - glavnog pogonskog
 - Sustav pripreme zraka
 - Uključujući sustave za filtriranje, pročišćavanje vode, sustave za skladištenje goriva, sustave klimatizacije, itd..

2.2 Prema lokaciji na brodu

- Sustav na palubi: sustavi koji su instalirani na otvorenom dijelu broda
 - Sustav kormila - sustavi za usmjerenje putanje broda
 - Sustavi sidra - sustavi za zaustavljanje broda na određenom mjestu
 - Sustavi vitlova - sustavi za zatezanje broda na pristaništu i podizanje lanca sidra na palubu
 - Sustavi čvorova - sustavi za privezivanje brodova na pristaništu te za vezanje potrebne opreme na brodu i razne opreme

- Sustav u unutrašnjosti: obuhvaća sve sustave koji su smješteni unutar trupa broda
 - Sustav spavaćih kabina - kabine su mjesta di posada odmara i spava
 - Sustav kuhinje - mjesta gdje se priprema hrana za posadu
 - Sustav radionice - mjesta gdje se vrše popravci i nadgradnje sustava
 - motornog prostora itd.
- Sustavi na mostu: su sustavi koji su smješteni u dijelu broda gdje se nalazi upravljačka kabina i navigacijska oprema.

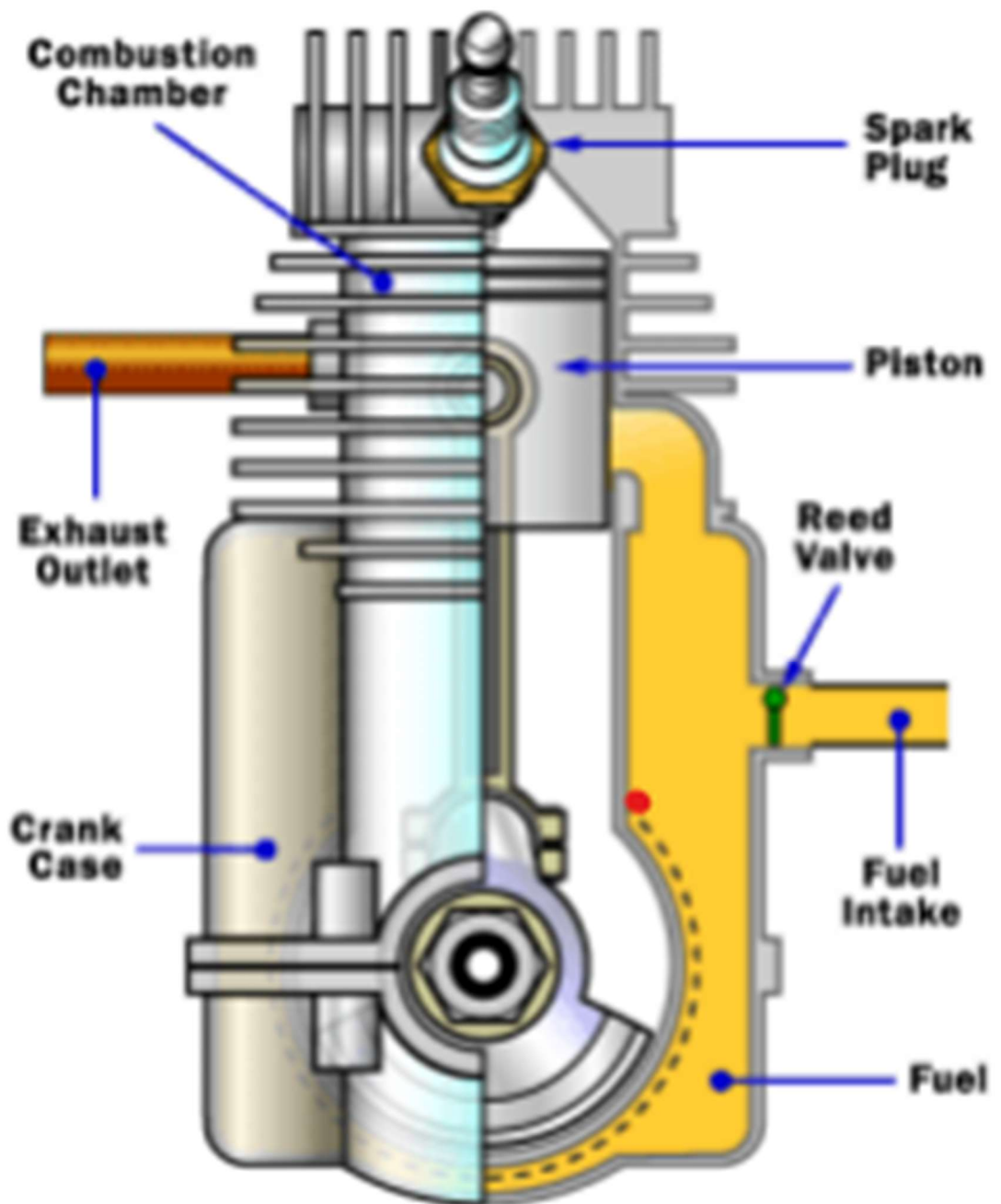
2.3 Prema vrsti energije:

- Mehanički sustavi: Sustavi koji koriste mehaničku energiju poput:
 - motora - sustava prijenosa kinetičke u propulzijsku snagu
 - prijenosnika snage - razni reduktori multiplikatori
 - propelera - vijka koji pretvara vrtnju u propulziju
- Električni sustavi: Sustavi koji koriste električnu energiju poput:
 - električnih motora - svih mogućih vrsta
 - generatora - pretvornika kinetičke u električnu energiju
 - rasvjete - sustav za umjetno svjetlo u dijelovima broda gdje/kad prirodno svjetlo ne dopire
- Hidraulički sustavi: Sustavi koji koriste hidrauličku energiju, poput sustava za:
 - upravljanje kormilom - jednoradni cilindri, dvoradni cilindri
 - vitlova - sustavi za zatezanje broda na pristaništu i podizanje lanca sidra na palubu

3. Opis vrste sustava koji se koristi na projektiranom brodu

3.1 Vrsta pogona broda koji se koristi u ovom prikazanom proračunu

Sustav rada i primjena brodskog dizel dvotaktnog sporohodnog stapajnog motora temelji se na termodinamičkim principima dizel ciklusa, a specifična arhitektura ovog tipa motora omogućuje visoku efikasnost, pouzdanost i trajnost u primjeni na velikim trgovačkim brodovima. Dvotaktni ciklus znači da motor obavlja kompletan radni ciklus u dva hoda klipa: prvi hod (usisni i kompresijski takt) i drugi hod (ekspanzijski i ispušni takt). Dizel princip: mješavina zraka i goriva se pali kompresijom, pri čemu dolazi do samozapaljenja goriva uslijed visoke temperature zraka u cilindru (bez potrebe za svjećicama, kao kod benzinskih motora). Sporohodni motori (eng. low-speed engines) imaju radne brzine obično u rasponu od 60 do 150 okretaja u minuti (RPM), što ih čini pogodnima za pogon velikih brodskih propelera pri optimalnoj brzini okretanja. Stapajni sustav se odnosi na način spajanja klipa i radilice. Kod sporohodnih motora klip se kreće unutar dugog hoda, a povezivanje klipa s radilicom odvija se pomoću stapa (tzv. crosshead), koji odvaja okomito gibanje klipa od kružnog gibanja radilice. To smanjuje opterećenje na klipnjaču i klip, povećavajući trajnost. Visoku efikasnost dvotaktnih dizel sporohodnih stapajnih motora postizemo zahvaljujući visokom omjeru kompresije i optimalnom radu pri nižim brzinama, što smanjuje gubitke zbog trenja. Sporiji radni ritam znači manje mehaničkog trošenja, što produljuje radni vijek motora. Dvotaktni dizel sporohodni stapajni motori su idealni za izravan pogon velikih brodskih propelera, koji također zahtijevaju niske brzine okretanja. Još jedna prednost dvotaktnih dizel sporohodnih stapajnih motora je da mogu koristiti jeftinija, viskozna goriva (poput teškog loživog ulja), što smanjuje operativne troškove broda.



The 2 stroke petrol engine

Slika 1. Dvotaktni benzinski motor (Vlačić, 2006)

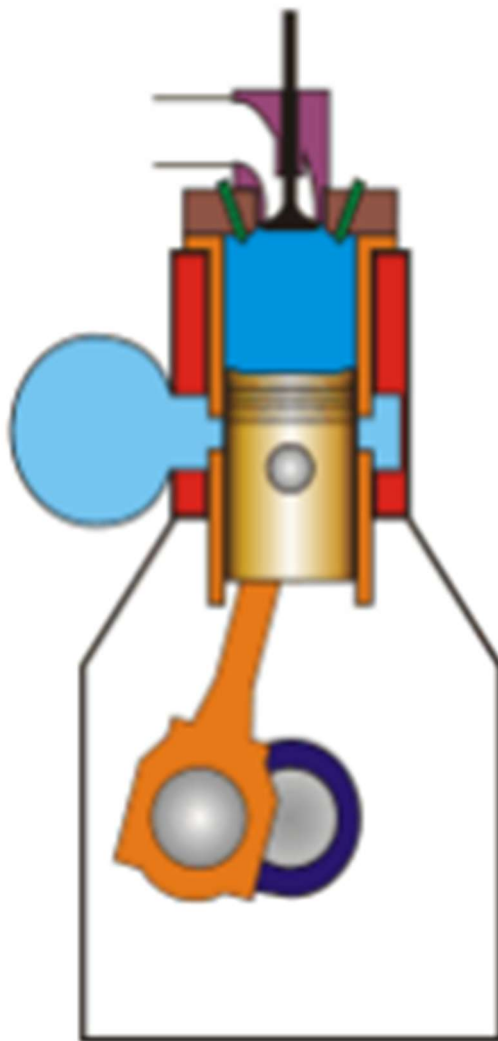
Dizelski dvotaktni sporohodni stapajni motor miješa gorivo i ostatak ulja sa zrakom te se samozapaljuje pod visokim tlakom. Ležajevi radilice podmazuju se pod tlakom ulja na isti način kao kod četverotaktnog motora. Dvotaktni ciklus nazvan je tako jer za potpunu pretvorbu energije iz goriva u rad treba dva takta klipa. Budući da je motor recipročan, klip se mora kretati gore i dolje u cilindru, a time se i radilica mora okrenuti jednom.

(Vlačić, 2006)

3.2 Stupnjevi rada dvotaktnog motora

3.2.1 Prvi takt

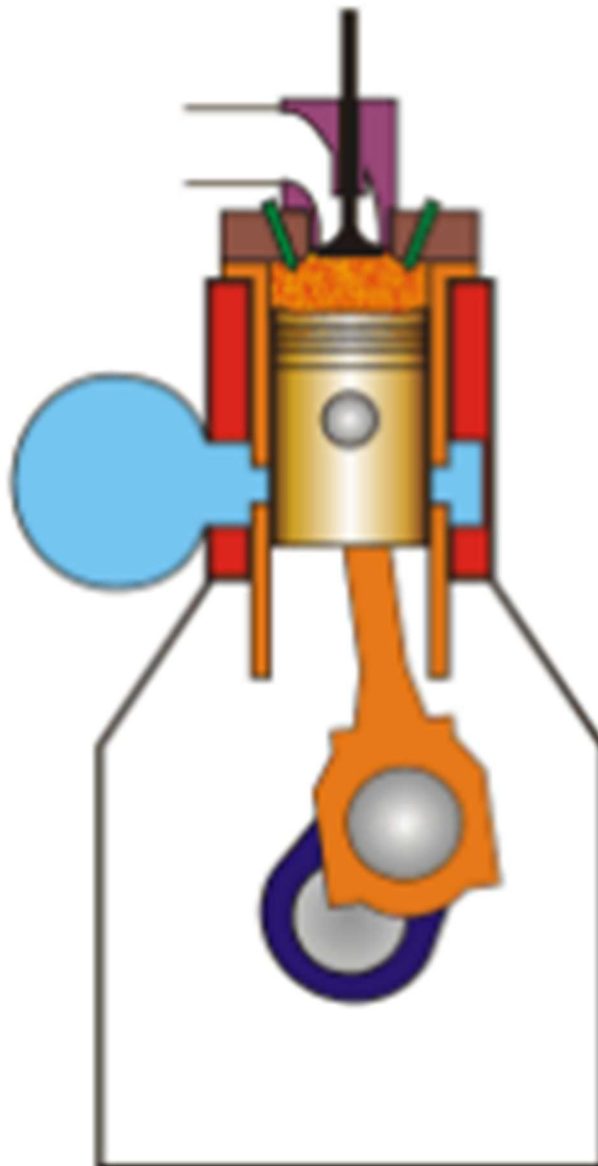
Radilica se okreće u smjeru kazaljke na satu kod desnokretnih motora (kod lijevokretnih u suprotnom smjeru), a klip se kreće prema gore u cilindru, komprimirajući napunjeni zrak. Budući da se energija prenosi u zrak, njegov pritisak i temperatura rastu. Do trenutka kada klip doseže vrh cilindra (poznat kao Gornja mrtva točka GMT), pritisak je iznad 100 bara, a temperatura preko 500°. (Vlačić, 2006)



Slika 2. Prvi takt rada 2T motora (Vlačić, 2006)

3.2.2 Drugi takt rada

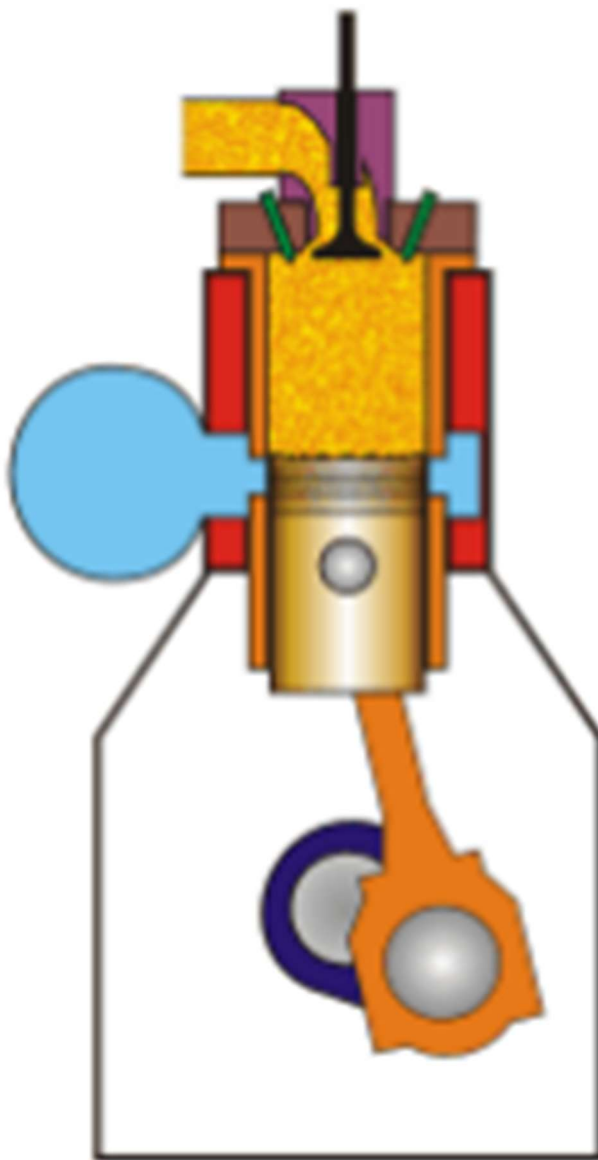
Neposredno prije GMT-a gorivo se ubrizgava u cilindar pomoću sustava ubrizgavanja goriva. Gorivo se "atomizira" u male kapi. Budući da su vrlo male, ove kapi se vrlo brzo zagrijavaju i počinju gorjeti dok klip prolazi preko GMT-a. Proširenje plina iz goriva koje gori u kisiku gura klip prema dolje po cilindru, okrećući radilicu. Tijekom ovog takta u motor se unosi radna energija; tijekom uspona klipa, motor obavlja posao. (Vlačić, 2006)



Slika 3. Drugi takt rada 2T motora (Vlačić, 2006)

3.2.3 Treći stupanj hoda

Dok klip kreće prema dolje cilindrom, korisna energija izgorjelog goriva se troši. Otprilike 110° nakon GMT-a otvara se ispušni ventil i vrući ispušni plinovi (sastavljeni većinom od dušika, ugljičnog dioksida, vodene pare i neiskorištenog kisika) počinju napuštati cilindar. (Vlačić, 2006)

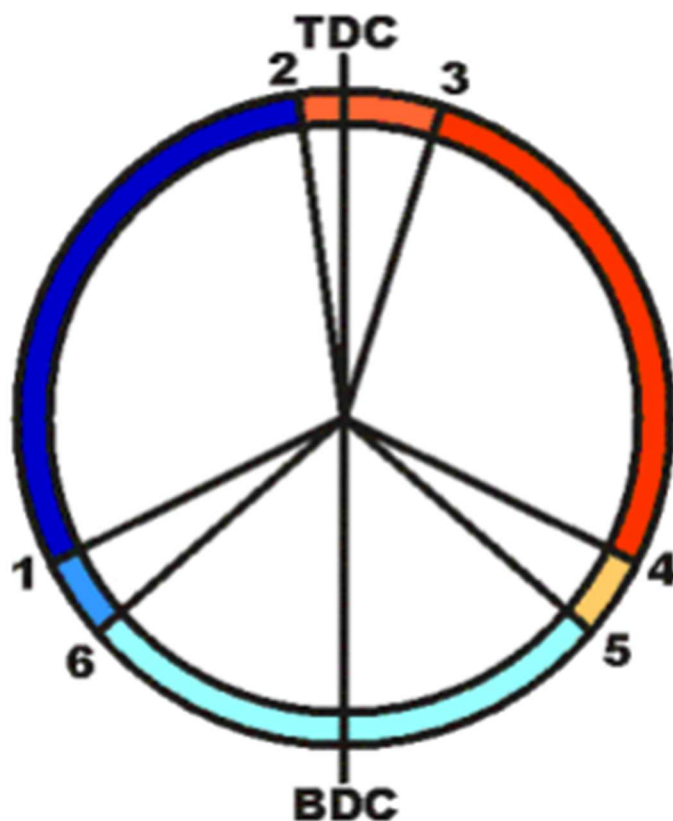


Slika 4. Treći stupanj hoda 2T motora (Vlačić, 2006)

3.2.4 Fazni dijagram

Otprilike 140° nakon GMT-a klip otkriva skup lučnih otvora poznatih kao scavenge portovi. Pod tlakom zrak ulazi u cilindar kroz ove otvore i gura preostale ispušne plinove iz cilindra u procesu poznatom kao "scavenge". Klip sada prolazi donju mrtvu točku i počinje se kretati prema gore cilindrom, zatvarajući scavenge portove. Ispušni ventil se zatim zatvara i počinje kompresija. (Vlačić, 2006)

Dijagram kutnog pomaka:



Slika 5. Fazni dijagram motora (Vlačić, 2006)

1-2 Kompresija

2-3 Ubacivanje goriva

3-4 Ekspanzija

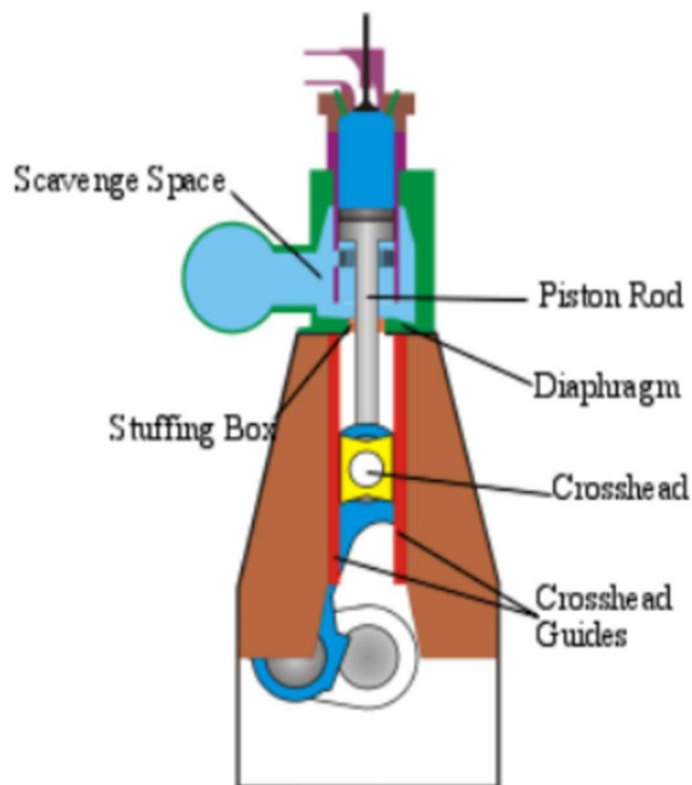
4-5 Izbacivanje ispušnih plinova

5-6 Čišćenje

6-1 Nakon čišćenja

1. približno 110° prije GMT
2. približno 10° prije GMT
3. približno 12° nakon GMT
4. približno 110° nakon GMT
5. približno 140° nakon GMT
6. približno 140° prije GMT

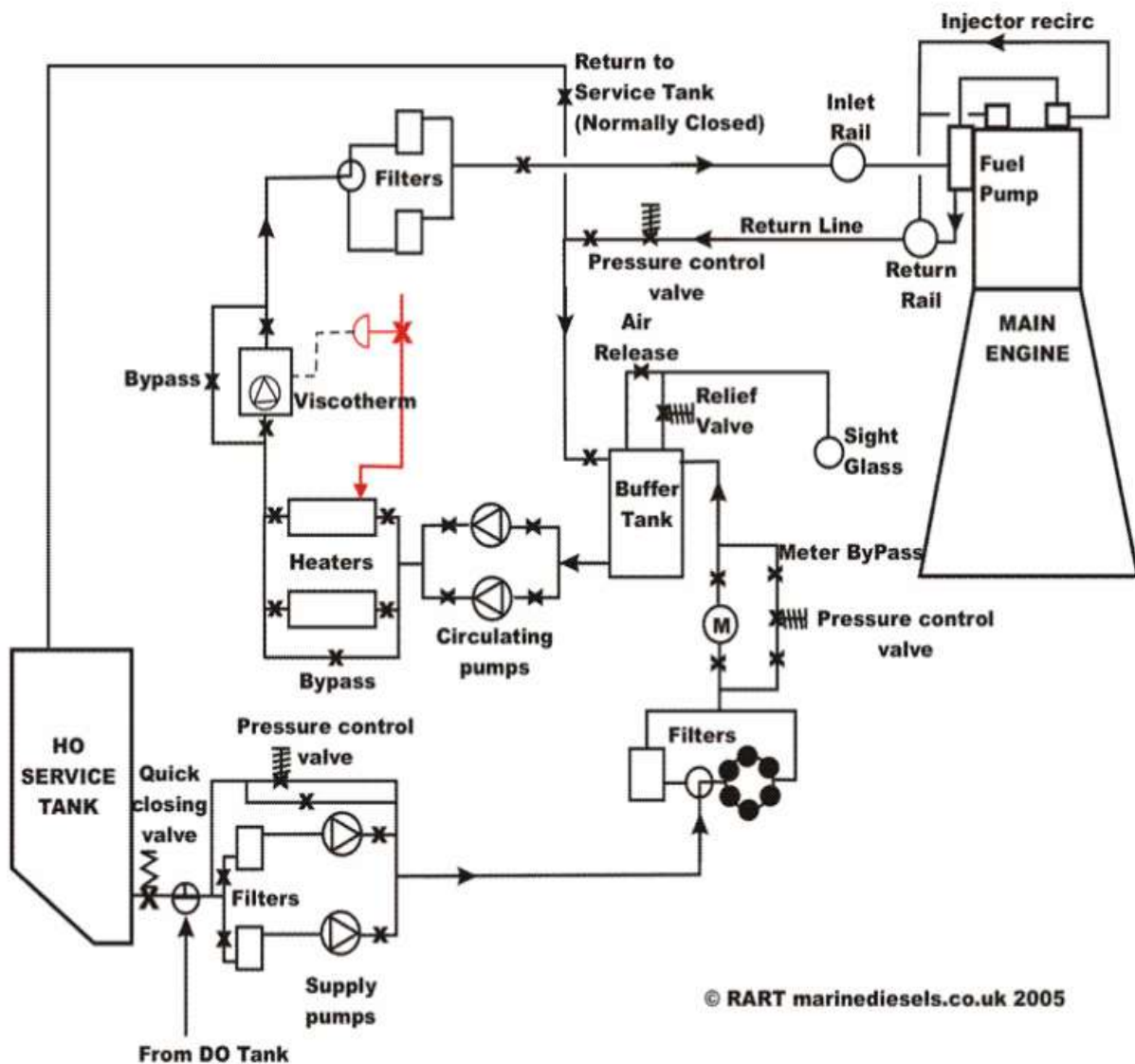
U ovom proračunu korišten je primjer rada dvotaktnog stapajnog motora, to je motor koji radi na istom 2T principu kao ostali motori ali je viši zbog toga šta je inače za podmazivanje cilindra tokom rada korišteno ulje koje bi se u ovom slučaju pri radu prebacilo u usisni port te tamo samozapalilo. Da bi se taj problem riješio stavljena je brtva na kućištu motora između radilice i cilindra te je rotacijsko gibanje pretvoreno preko stapa (dodavši jedan zglob) u pravocrtno radi boljeg brtvljenja. Tako su nastali 2T stapajni motori. Još uvijek postoji rizik od samozapaljenja pa se zbog toga dodaje aditiv koji će zaustaviti samozapaljenje (Vlačić, 2006)



Slika 6. 2T dizel stapajni motor (Vlačić, 2006)

3.3 Sustav goriva na brodu

Većina brodskih dizelskih porivnih motora dizajnirana je za sagorijevanje teškog rezidualnog goriva. To je gorivo koje je sastavljeno od ostataka nakon što su lakša i skuplja goriva te plinovi izdvojeni iz sirove nafte u rafineriji. Dijagram ispod prikazuje sustav opskrbe gorivom za veliki 2-taktni stapajni motor, međutim, shema sustava je tipična za bilo koji sustav goriva za brodski dizelski motor koji radi na teškom rezidualnom gorivu (*eng. heavy bunker fuel*). Zanimljivo je da je to gorivo pri normalnom atmosferskom tlaku te sobnoj temperaturi tako čvrsto i gusto da se jednostavno ne može pumpati nego je potrebno dovesti ga u stadij transporta. Iz tog razloga se svi cjevovodi griju na 50°C te se tek tada gorivo može pumpati do mjesta gdje će krenuti u pred pripravu. U sljedećim slikama pokušat ću objasniti i opisati par stanica koje su od velike važnosti za cijeli sistem. (Vlačić, 2006)



Slika 7. Opis sustava goriva na brodu (Vlačić, 2006)

3.3.1 Pumpa za gorivo i ubrizgivači motora

Iz glavne ulazne cijevi goriva koja iz „nekog tanka goriva“ dovodi pripremljeno (centrifugirano, filtrirano i na određenu temperaturu zagrijano gorivo – ovisno o vrsti goriva) gorivo, gorivo ulazi u svaku pumpu (po jedna po cilindru). VTP pumpa za gorivo isporučuje gorivo pod visokim tlakom (250 bara +) do „injektora“ raspršivača goriva. (Vlačić, 2006)



Slika 8. Pumpa goriva i injektori (Vlačić, 2006)

Donja veza na pumpi za gorivo je povrat goriva. Kako se cilindru isporučuje više goriva nego što mu je potrebno višak se recirkulacijom vraća u spremnik za miješanje. Injektori goriva zatvorenog tipa koji se ovdje koriste isporučuju atomizirano gorivo u cilindar. Injektori su tako napravljeni da kada ne isporučuju gorivo u cilindar, gorivo recirkuliraju u spremnik za miješanje. (Vlačić, 2006)

3.3.2 Ventil za kontrolu tlaka

Da bi se održao tlak goriva na potrebnoj vrijednosti (na ovom sustavu oko 8 bara), postavljen je ventil za kontrolu protutlačnog tlaka na povratnoj liniji. (Vlačić, 2006)



Slika 9. Ventil za kontrolu tlaka (Vlačić, 2006)

3.4 Scrubber sustav - sustav čišćenja dimnih plinova

Ljudi su uzrokovali zagađenje zraka čak i u drevnim društvima, ali s Industrijskom revolucijom problem je postao mnogo izraženiji. Industrijski procesi koji su unaprijedili svijet također su donijeli neke negativne posljedice. Tek u drugoj polovici 20. stoljeća SAD je počeo prepoznavati ozbiljnost problema i poduzimati mjere za smanjenje količine toksina koji se ispuštaju u zrak. Scruberi su bili ključni u pomaganju industrijskim postrojenjima da dramatično smanje polutante koje ispuštaju u okoliš. Rezultat je čišći zrak koji je zdraviji za planet i za ljude.

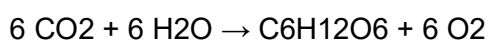
3.4.1 Podjela onečišćujućih tvari zraka prema agregatnom stanju:

„Emisije onečišćujućih tvari zraka (onečišćivača zraka) dijele se prema agregatnom stanju na suspendirane čvrste čestične tvari ili aerosole (lebdeće čestice i dimovi) i suspendirane čestice u kapljevina (sprejevi i maglice), i plinovite spojeve (organske i anorganske). Osim navedenih, postoje i neki manje značajni čimbenici koji utječu na kvalitetu zraka kao što su toplina, ionska radijacija, zvuk, elektromagnetska polja uslijed distribucije i upotrebe električne energije. Razlikujemo primarne i sekundarne onečišćivače zraka. Primarni onečišćivači izravno se emitiraju iz različitih izvora u okoliš, a uključuju lebdeće čestice različitih dimenzija i plinovite polutante. Plinoviti primarni polutanti predstavljaju 90% svih emisija u atmosferu, a u te spojeve ubrajamo najznačajnije: spojeve sumpora (uglavnom sumporni dioksid SO₂), dušikove okside (NO_x; x = 1 ili 2) i ostale dušikove spojeve (kao što su N₂O, NH₃, HCN), ugljikove spojeve (CO i CO₂), hlapljive organske spojeve (HOS), čestice olova, halogenih metala i teških metala. Emisije primarnih onečišćivača u atmosferu izravno utječu na nastanak sekundarnih onečišćivača te tako uvećavaju razinu onečišćenja nad širim područjem oko njihovih izvora.

Čvrste čestične tvari za razliku od plinova, uključuju krutu i tekuću fazu. Raspršivanjem čestica u atmosferi, nastaje suspenzija koja se naziva aerosol. Aerosoli uključuju TSP (total suspended particles) čestice potpuno suspendirane u zraku, čestice sa srednjim aerodinamičnim promjerom manjim od 10 μm (PM₁₀), čestice sa srednjim aerodinamičnim promjerom manjim od 2,5 μm (PM_{2,5}), sitne i ultra sitne čestice, ispušne čestice od dizel goriva, mineralne prašine (npr. vapnenačka, cementna, ugljena prašina), metalne prašine i pare (npr. željezna, olovna, cinkova, bakrena, prašina), lebdeći ugljeni pepeo, kisele maglice (npr. sumporne kiseline), pigmenti boja, fluoridne čestice, pesticidne maglice i mnoge druge (Trozzi, 2012). Aerosoli u većini slučajeva nastaju u atmosferi što ih čini sekundarnim onečišćivačima, dok tek njihov manji dio (primarnih onečišćivača) ulazi u atmosferu iz prizemnih izvora.“ (Kegalj, 2015)

3.4.2 Ugljikov dioksid (CO₂)

„U svom ciklusu, koji je jedan od najvažnijih ciklusa na Zemlji, ugljik u atmosferu dolazi uglavnom u obliku CO₂ i izravno utječe na održavanje života na Zemlji. Ugljik sudjeluje u procesima fotosinteze u kojima se djelovanjem autotrofnih organizama (biljke, fitoplankton) sintetiziraju organski spojevi (glukoza i ostali ugljikohidrati):



Do kruženja ugljika u prirodi dolazi zbog različitih kemijskih, fizičkih, geoloških i bioloških procesa. Biljke i životinje (heterotrofni organizmi) koriste ugljikohidrate nastale fotosintezom, a procesom staničnog disanja (respiracije) dolazi do otpuštanja CO₂ u atmosferu. Dio CO₂ u atmosferu dospijeva zbog razgradnje biljnih i životinjskih ostataka, spaljivanjem organskih

materijala (biomasa, fosilna goriva i dr.), oslobađanjem CO₂ otopljenog u oceanima, vulkanskim erupcijama i drugim procesima. U oceane CO₂ dospjeva procesom difuzije, a nakon otapanja u morskoj vodi, CO₂ može ostati u nepromijenjenom obliku ili se pretvara u karbonatni (CO₃²⁻) ili hidrogenkarbonatni oblik (HCO₃⁻). Djelovanjem morskih organizama vežu se bikarbonat i Ca²⁺ i nastaje kalcijev karbonat (CaCO₃) od kojeg nastaju ljušturice i drugi dijelovi morskih organizama (koralji, školjke, neke alge i dr.). Uginuli morski organizmi akumuliraju se u karbonatne depozite, koji se tijekom dugih geoloških razdoblja fizičkim i kemijskim procesima provode u sedimentne stijene. U litosferi se ugljik nalazi u anorganskom i organskom obliku. Anorganski oblici ugljika uključuju fosilna goriva i karbonatne sedimentne stijene (npr. vapnenac). Organski oblici odnose se na organsku tvar i humus koji se nalaze u tlu. Dio se CO₂ oslobađa iz unutrašnjih slojeva litosfere putem vulkanskih erupcija (Garrison, 1996).

Ugljikov dioksid je plin bez boje i mirisa koji nije otrovan osim u postocima većim od 5% kada smanjuje koncentraciju kisika. Također je produkt izgaranja goriva na bazi ugljikovodika. Posvećuje mu se posebna pozornost kao osnovnom uzroku stvaranja efekta staklenika te je drugi po količini staklenički plin u atmosferi, nakon vodene pare. Ugljik (IV)-oksid čini gotovo 80% antropogenih stakleničkih plinova. Budući da je kemijski inertan, CO₂ izravno ne utječe na kemijske reakcije u atmosferi (Climate Change, 2001). U atmosferskim uvjetima iz plinovitog stanja na određenim temperaturama izravno prelazi u kruto stanje (Ross & Amter, 2010).

Do promjena u ciklusu ugljika dolazi zbog raznih oblika antropogenih aktivnosti koje su uzrokom velikog porasta emisija CO₂ u atmosferu, a za to uz ostale, najznačajniji su procesi izgaranja fosilnih goriva, proizvodnja cementa i deforestacija (sječa šuma).

Danas se sa sigurnošću može ustvrditi da se koncentracija CO₂ u posljednjem stoljeću značajno povećala te da je navedeno povećanje izravna posljedica ljudske aktivnosti, naročito sagorijevanja fosilnih goriva. Od početka industrijalizacije do danas, koncentracija ugljikova dioksida u atmosferi porasla je za 32%, metana za 110%, N₂O za 15%. Smanjiti emisiju ugljikovog dioksida po jedinici proizvedenog mehaničkog rada je istovjetno povećanju stupnja djelovanja motora, a upravo je to jedna od glavnih prednosti koja je uvjetovala veliku zastupljenost dizelskih motora (Tao, 2003). Motori s visokim stupnjem iskoristivosti i uporaba goriva s niskim udjelom ugljika preduvjet su da se smanje te emisije.“ (Kegalj, 2015)

3.4.3 Ugljikov monoksid (CO)

„Ugljikov monoksid je produkt nepotpunog izgaranja goriva i u motoru nastaje uslijed nedostatka kisika ili nepotpunog miješanja zraka i goriva. Današnji motori imaju vrlo malu emisiju ugljikovog monoksida radi visoke koncentracije kisika i efikasnoga procesa izgaranja. Budući da dizelski motor radi uz veliki pretičak zraka, ugljikov monoksid i neizgoreni ugljikovodici se uspješno eliminiraju, te kod ispravnog rada motora ne predstavljaju značajniji problem. CO utječe na

stvaranje smoga i ozonskih rupa. To je plin bez boje, okusa i mirisa. Osim što sudjeluje u stvaranju smoga i ozonskih rupa, vrlo je otrovan jer se veže na hemoglobin u crvenim krvnim zrnima radije nego kisik. U manjim koncentracijama uzrokuje probleme sa srcem, dok u većim koncentracijama djeluje na centralni živčani sustav, uzrokuje probleme s vidom, smanjuje sposobnost učenja i okretnost. U koncentracijama većim od 1% je smrtonosan. Neizgoreni ugljikovodici (HC) nastaju kao produkt nepotpunog izgaranja goriva i ulja. Vrlo su štetni za zdravlje ljudi i okoliš jer stvaraju efekt staklenika.“ (Kegalj, 2015)

3.4.4 Sumporni oksidi (SOX)

„Sumporni dioksid poznat je kao „kiseli“ plin jer se njegovom transformacijom, u reakciji s vodom i vodenom parom, stvara sumporasta i sumporna kiselina, te nastaje pojava izdvajanja iz atmosfere u obliku kiselih kiša koje uništavaju šume. Emisija ovisi izravno o kvaliteti goriva, tj. sadržaju sumpora u njemu. Sumporni oksidi nastaju izgaranjem sumpora sadržanog u gorivu. Čestice sumpora u zraku smanjuju vidljivost te zajedno sa sumpornim dioksidom uzrokuju poteškoće u disanju i srčane probleme. Otapanjem u vlazi na sluznici kože stvaraju se kiseline koje iritiraju sluznicu te uzrokuju kašalj i pojačano lučenje suza. Emisija sumpornih oksida ovisi direktno o količini sumpora u gorivu. Činjenica je da je gorivo s manjim sadržajem sumpora skuplje. Sumporne okside moguće je ukloniti iz ispušnih plinova procesom ispiranja vodom u uređajima za pročišćavanje plina, ali to predstavlja veliku investiciju. Najefikasnije rješenje je korištenje goriva s manjim sadržajem sumpora propisano zakonom.“ (Kegalj, 2015)

3.4.5 Dušikovi oksidi (NOX)

„Dušikovi oksidi su spojevi dušika i kisika u različitim atomarnim omjerima, a nastaju oksidacijom molekularnog dušika i zraka izgaranjem na visokim temperaturama i oksidacijom dušika u gorivu. Što je viša temperatura tijekom dužeg vremena, nastat će više tzv. termalnog-a dijela koji je glavni nositelj ukupne emisije, dok emisija nastala oksidacijom iz goriva sudjeluje samo s 10-20%. Izgaranjem goriva u dizelskom motoru, emisija dušikovitih oksida sastoji se od najvećeg udjela dušikovog (II) oksida (NO) ili dušikovog monoksida i dušikovog (IV) oksida ili dušikovog dioksida, koji nastaju pri izgaranju u motoru u zanemarivim volumnim udjelima (Trozzi, 2012).

Emisija dušikovitih oksida u troposferi sudjeluje u nastanku smoga i kiselih kiša, a s ostalim hlapivim i reaktivnim organskim spojevima i plinovima u atmosferi uz sunčevo zračenje, sudjeluje u stvaranju prizemnog ozona. Kao posljedica izgaranja bilo kojega tekućeg goriva, emisije dušikovitih oksida neprestano rastu povećanjem svih vrsta prometa i industrijskih postrojenja (Woodyard, 2009).

Dušikov monoksid (NO) je otrovan bezbojni plin, koji je pri izgaranju zastupljen s gotovo 90% volumnim udjelom. Njegovo djelovanje na čovjeka slično je djelovanju ugljikovog monoksida koji ima vrlo veliki afinitet vezivanja na hemoglobin u krvi. Unosom dušikova monoksida u ljudsko tijelo sprječava se razgradnja ugljikohidrata i masti, jer onemogućava kisiku normalnu opskrbu stanica ljudskog organizma.

Dušikov dioksid ili dušikov (IV) oksid je smeđecrveni plin s jakim nadražujućim mirisom, te spada u jake krvne otrove. Izaziva pad imunoloških sposobnosti organizma, povećava sklonost oboljenjima od bakterijskih i virusnih infekcija, smanjuje broj T-limfocita. Također uzrokuje promjene na makrofagima, stanicama u plućima koje imaju funkciju čišćenja pluća, a kod dužeg djelovanja razara tkivo pluća i dovodi do smrti (Hellen & Ristimaeki, 2007). Otprilike je četiri puta toksičniji od dušikova monoksida. Maksimalna dopuštena koncentracija u radnom prostoru za ugljikov monoksid je 30 ppm, a za dušikov dioksid je 3 ppm. Dušikov dioksid zastupljen je s oko 5%-tnim volumnim udjelom svih plinova. Iako se u motoru uglavnom stvara dušikov monoksid, pri atmosferskim uvjetima, kada se postigne kemijska ravnoteža nastaje pretežno dušikov dioksid.“ (Kegalj, 2015)

3.4.6 Lebdeće čestice (PM – particulate matter)

„Lebdeće čestice materija (PM – particulate matter) kompleksna su mješavina čestica uglavnom nehomogenog kemijskog sastava, različitih veličina, oblika, kemijskih, fizikalnih i termodinamičkih osobina, najčešće krutog ugljikovog materijala, ne izgorenih ugljikovodika i anorganskih spojeva. PM može uključivati i sulfate, nitrate, amonijak, vodikove ione, suspenzije finih čestica u vodi, elementarni ugljik, niz organskih spojeva te mineralnu prašinu, pepeo, čađu, dim, čestice minerala i silikata. Najfinije čestice raspršuju veću količinu sunčeve svjetlosti nego grublje čestice i time utječu na smanjenje vidljivosti u zraku.

Veličine čestica izražavaju se pomoću aerodinamičkog promjera. Najmanje suspendirane lebdeće čestice su veličine 0,002 μm (2 nm), za razliku od molekula plina čije su veličine 0,0001 – 0,001 μm (tj. 0,1-1 nm). Općenito, suspendirane čestice dijele se prema veličini u tri skupine: grube čestice veličine 2,5 – 10 μm (PM10), fine čestice veličine < 2,5 μm (PM2,5) i ultrafine čestice veličine < 0,1 μm (PM0,1). Zbog toga što su vrlo male mogu ostati disperzirane u struji ispušnih plinova tijekom dužeg vremenskog razdoblja, te im je to važna značajka. Također, zbog nemogućnosti da se relativno brzo istalože ili zgrušaju u skupine, ultrafine i fine čestice imaju najduže rezidentno vrijeme u atmosferi. Čestice manjih promjera od većeg su značaja za onečišćenje okoliša i ljudsko zdravlje (Woodyard, 2009). Prema tome, definirane su veličine PM10, za čestice do 10 μm , i PM2,5 za fine čestice do 2,5 μm .

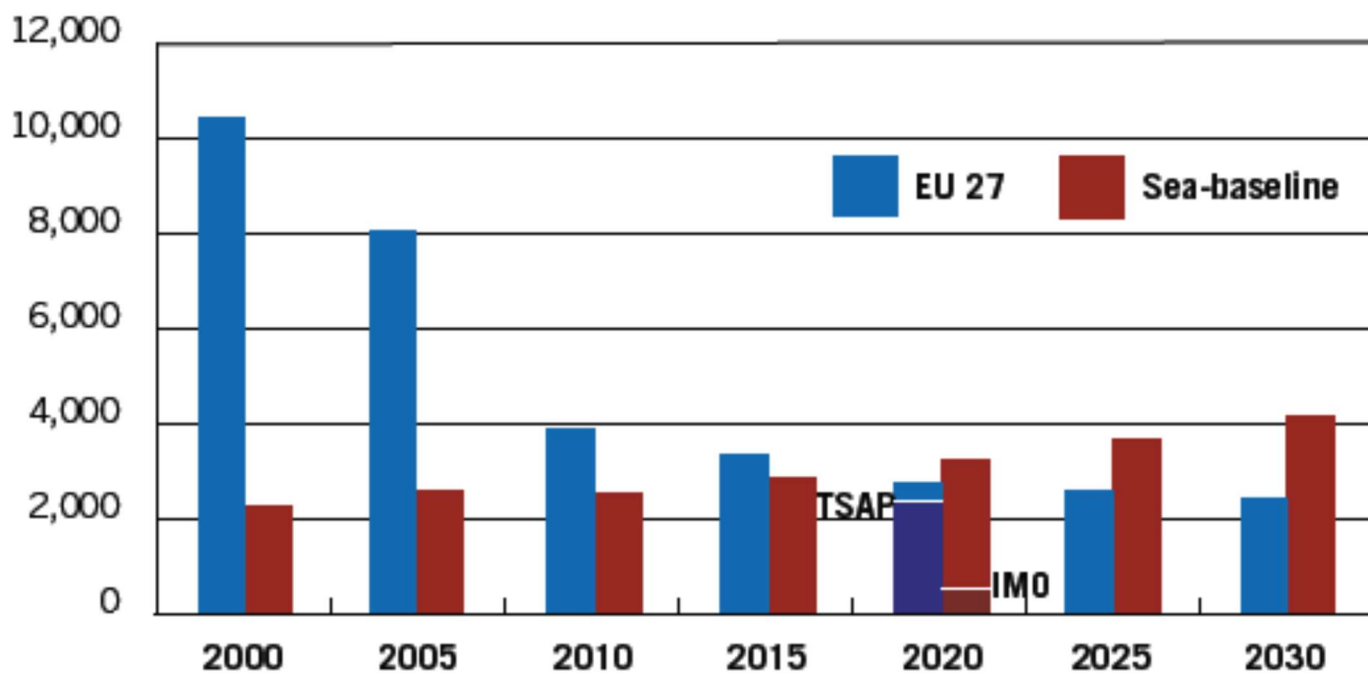
Većina sekundarnih čestica su fine čestice PM2,5, a nastaju najčešće kondenzacijom sulfatnih, dušikovih i organskih parovitih produkata atmosferskih kemijskih procesa. Nastanak

PM_{2,5} ovisi i o atmosferskim uvjetima, uključujući intenzitet sunčevog zračenja i relativnu vlažnost te o interakciji prekursora i postojećih čestica s oblacima ili maglom. PM ugljikove čestice, kao i čestice elementarnog ugljika uglavnom su sekundarne čestice koje utjecajem emisija primarnih plinova iz biogenih i antropogenih izvora nastaju u atmosferi. Pri niskom tlaku, kemijskim reakcijama u kojima sudjeluju lebdeći organski spojevi HOS-a, stvaraju organske spojeve sa svojstvom brzog kondenziranja. Također, oksidacijom HOS-a nastaju radikali koji nukleacijom dovode do nastanka novih čestica. PM sulfati isključivo su sekundarne čestice, a predstavljaju polovicu ukupne atmosferske koncentracije PM_{2,5} koja uglavnom nastaje tijekom dana u oblacima. Zrakom nošen SO₂ prodire u oblake, veže se na vodene kapljice oblaka, te oksidira stvarajući pri tome sulfatne čestice. Fotokemijske oksidacije NO_x i HOS-a značajno utječu na koncentraciju sulfata u atmosferi, posebno za ljetnog razdoblja koje pospješuje oksidativne procese u oblacima. PM nitrati, kao i sulfati isključivo su sekundarne čestice i nastaju u potpunosti u atmosferi reakcijama s dušikovim dioksidom NO₂. PM nitrati mogu nastati tijekom dana oksidacijom NO₂ uz prisustvo hidroksilnih radikala, a tijekom noći s ozonom i dušikovim radikalima. U oba slučaja nastaje dušična kiselina (HNO₃) koja reakcijom s amonijakom stvara čestični amonijev nitrat (Hellen & Ristimaeki, 2007).

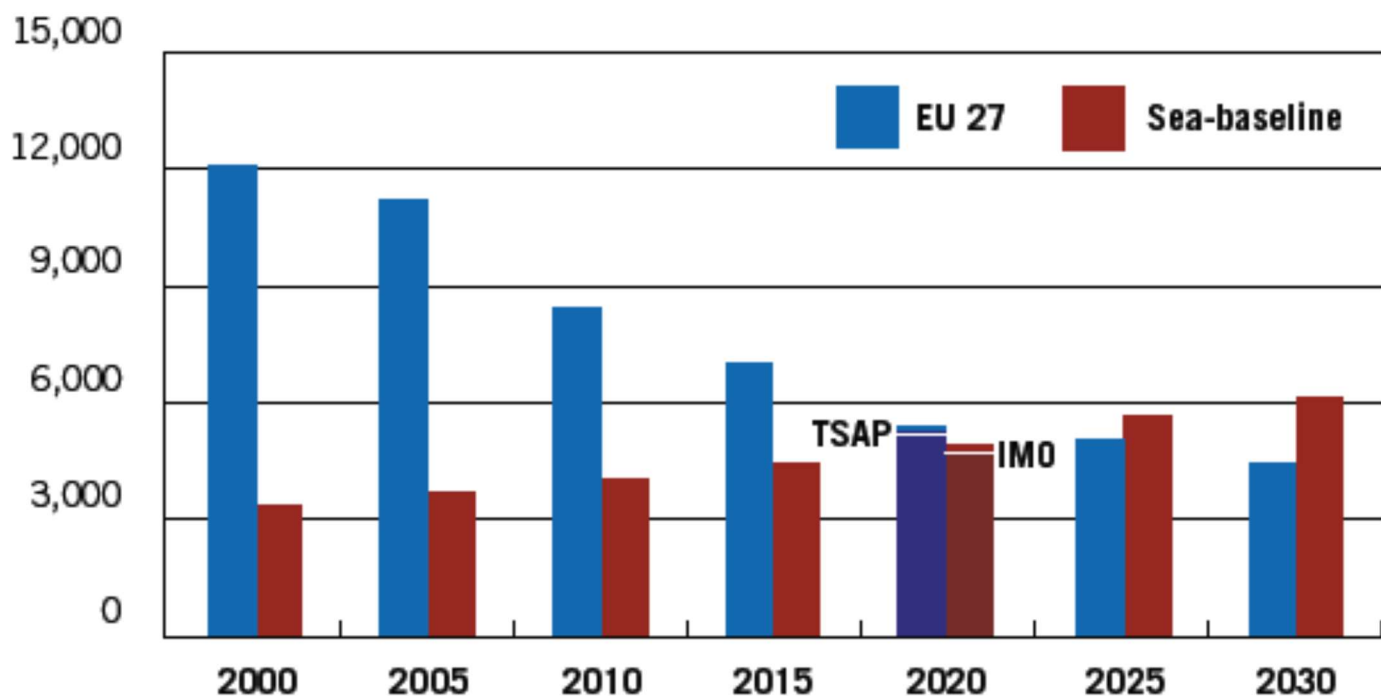
Sastav čestica u ispuhu iz dizelskog motora dijeli se na topivi organski udio, anorganski udio i čađu. Topivi organski udio uglavnom se sastoji od ne izgorelih ugljikovodika iz goriva i iz ulja za podmazivanje. Anorganski udio sastoji se uglavnom od sumporne kiseline, kondenziranih sulfata, vode, pepela, ostataka aditiva i habanja. Na anorganski udio nemoguće je utjecati vođenjem procesa izgaranja, već on direktno ovisi o svojstvima goriva i mazivog ulja, od kojih su najznačajniji sadržaj sumpora i pepela te aditiva. Čađa je produkt nepotpunoga izgaranja goriva i sastoji se uglavnom od trodimenzionalnih ugljikovih struktura (Mollenhauer & Tschoeke, 2010). Čađa može biti natopljena neizgorenim ugljikovodicima. Udjeli pojedinih sastojaka u česticama variraju jer ovisi o vrsti motora, opterećenju, korištenom gorivu, ali i o načinu mjerenja. Čađa iz motora može uzrokovati razne poteškoće. Sitne čestice promjera manjeg od 10 μm u atmosferi povezuju se s kroničnim plućnim oboljenjima, rakom pluća, srčanim smetnjama, influencom, astmom i porastom smrtnosti. Neka istraživanja svjedoče kako su ove posljedice više povezane sa sitnijim česticama promjera manjeg od 2,5 μm ili čak 0,1 μm jer ovakve čestice mogu prodrijeti dublje u pluća te direktno u krvotok. Štetnost čađe se također pripisuje činjenici da je često natopljena kancerogenim policikličkim aromatskim ugljikovodicima (PAU). Nadalje, čađa se uslijed taloženja u ispušnim kolektorima i kanalima može zapaliti i tako izazvati havariju. Ona onečišćuje površine i smanjuje vidljivost. Osim štetnosti za zdravlje, tvorba čađe smanjuje efikasnost motora jer se uslijed prijenosa topline zračenjem s čađe na stijenke motora smanjuje temperatura i tlak plinova u cilindru. Ova pojava nije zanemariva i iznosi 20-35% ukupnog prijenosa topline. Osim toga, kemijska energija se iz goriva ne iskoristi u potpunosti radi nastanka čađe (Hellen & Ristimaeki, 2007).“ (Kegalj, 2015)

3.5 Emisije prikazane statistički

„Kako je već prethodno navedeno, od ukupnih SO_x emisija nastalih u prometu oko 60% dolazi iz pomorskog prometa. Od ukupnih emisija NO_x nastalih svjetskim prometom roba i tereta, brodovi su odgovorni za oko 40%, te 15% svih svjetskih antropogenih NO_x emisija (Trozzi, 2012). Procijenjeno je da su emisije s brodova u međunarodnom pomorskom prometu u morima oko Europe (Baltičko more, Sjeverno more, sjeveroistočni dio Atlantika, Sredozemno more i Crno more) iznosile 2,3 milijuna tona SO₂, 3,3 milijuna tona NO_x i 250 000 tona PM 2000. godine. Ukoliko se pomorski promet nastavi istim intenzitetom, očekuje se da će se emisije s brodova SO₂ i NO_x povećati za 40-50% između 2000. i 2020. godine, te da će do 2020. godine biti jednake ili čak nadmašiti ukupne emisije iz kopnenih izvora svih 27 zemalja članica EU (Slika 4).“ (Kegalj, 2015)



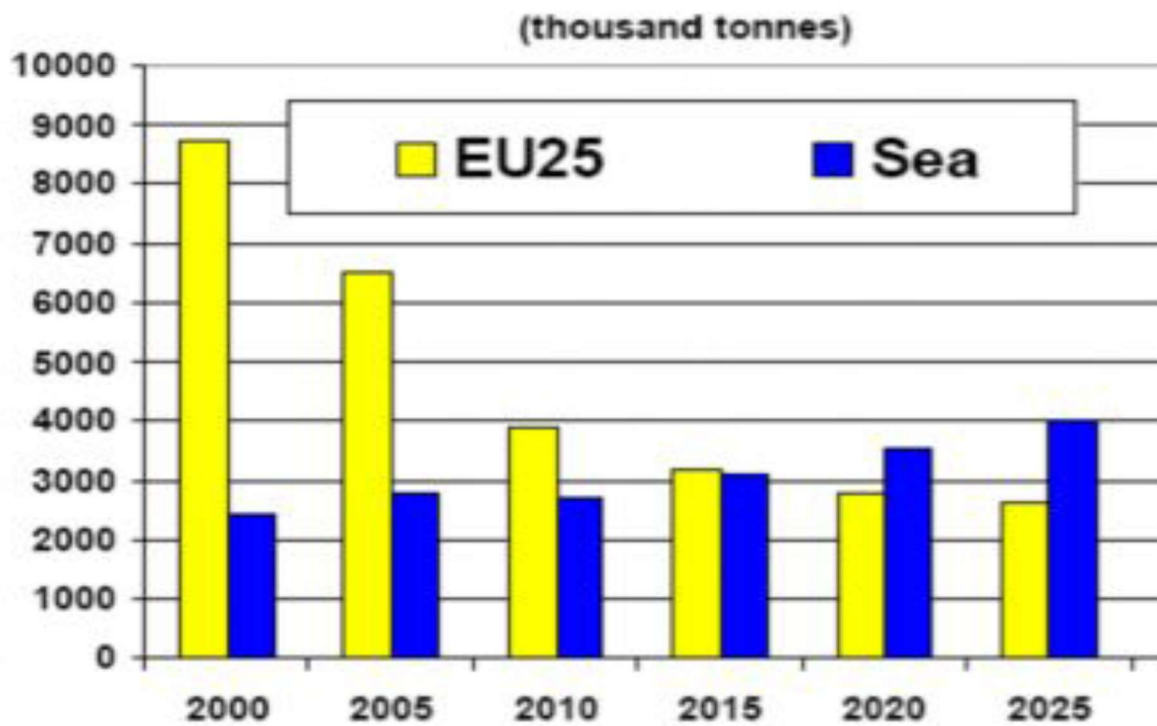
Slika 10. Grafikon emisije SO₂ u EU 27 između 2000. i 2030. godine (u tisućama tona godišnje) (Kegalj, 2015)



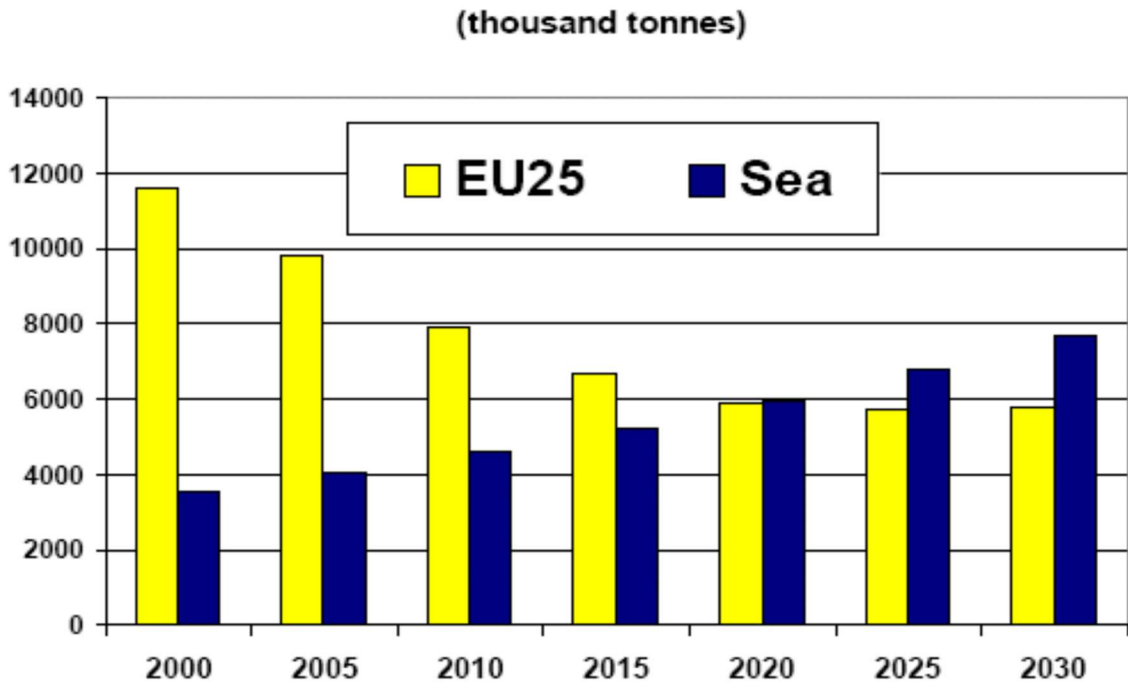
Slika 11. Grafikon emisije NOx u EU 27 između 2000. i 2030. godine (u tisućama tona godišnje) (Kegalj, 2015)

„Trebalo se naglasiti da se ove brojke, koliko god se čine velikima, odnose samo na brodove u međunarodnom prometu, tj. ne uključuju emisije iz nacionalnog pomorskog prometa i prometa unutarnjim kopnenim vodama, a za koje su podaci o količinama sadržani u nacionalnim statistikama (AirClim, 2011).

Emisije SO₂ i NO_x iz međunarodnog pomorskog prometa u Europi iznosile su 2000. godine otprilike 30% kopnenih emisija u EU-25. Dok postoji važeće zakonodavstvo za kontrolu emisija iz međunarodnog brodarstva, očekivani porast količine kretanja brodova poništiti će pozitivne učinke tih mjera na okoliš, te će dovesti do daljnjeg povećanja emisija u pomorskom prometu (Slika 5). Emisije iz pomorskog prometa trenutno su odgovorne za 10 do 20% onečišćenja sumporom u obalnim područjima, ali se očekuje porast do više od 30% do 2020. godine u većim područjima Europe, te do 50% u obalnim područjima (Optimar, 2010). „(Kegalj, 2015)



Slika 12 Grafikon emisije SO₂ s kopna u odnosu na pomorski promet (2000-2030)
(Kegalj, 2015)



Slika 13. Grafikon emisije NOx s kopna u odnosu na pomorski promet (2000-2030) (Kegalj, 2015)

Izvor: (Ortmanns, 2007)

„Procjenjuje se da je smrtnost u Europi uzrokovana onečišćenjem emisijama s brodova u međunarodnom prometu, dosegla u 2000. godini približno 49 500 ljudi, te da će godišnje broj umrlih rasti za prosječno 4%, pa se procjenjuje da će 2020. godine broj umrlih porasti na približno 53 200. Onečišćenje zraka emisijama s brodova koji plove u međunarodnom pomorskom prometu u Sjevernom i Baltičkom moru odgovorno je za godišnja zdravstvena oštećenja procijenjena na 22 milijarde eura 2000. godine, a smanjenje u 2020. godini predviđa se na 14,1 milijarde eura, kao rezultat primjene strogih standarada koje propisuje Međunarodna pomorska organizacija (IMO, 2008).“ (Kegalj, 2015)

3.6 Vrste scrubera koje postoje

Najveća razlika između vrsta scrubera je u tome što koriste za uklanjanje polutanata. Originalni tip scrubera, mokri scruberi, koriste tekućinu za ispiranje ispušnih struja. Suhi scruberi koriste suhi medij umjesto toga, dok elektrostatički precipitatori koriste električni naboj za uklanjanje čestica iz zraka.

3.6.1 Mokri scruberi

Prvi industrijski scruberi bili su mokri scruberi, i oni su i danas popularna opcija. Mokri scruberi su metalni ili kompozitni spremnici koji sadrže tekućinu. Kako plinska struja prolazi kroz spremnik, polutanti se vežu za vodu i ostaju u spremniku. Pročišćeni plin tada napušta scruber. Svi mokri scruberi koriste tekućinu za pročišćavanje, ali ta tekućina može varirati ovisno o primjeni i vrsti zagađivača koje treba ukloniti. Voda je učinkovita za uklanjanje mnogih polutanata, ali se može koristiti i druga vrsta tekućine. Kemijski sastav i električni naboj tekućine određuju koje polutante može ukloniti iz plinske struje. Mokri scruberi koriste prilično jednostavnu, ali učinkovitu tehnologiju. Inženjeri su otkrili da povećanje površine tekućine u mokrom scruberu omogućuje učinkovitije pročišćavanje. Također su otkrili da agitacija otopine u scruberu pomaže održavanju temeljitijeg miješanja plina i scruber tekućine.

Prednosti mokrih scrubera uključuju:

- Svestranost: mokri scruberi mogu ukloniti mnoge polutante, uključujući plinove i čestice. Također su prikladni za visoko temperaturne i visoko vlažne plinske struje, za razliku od ESP-ova i nekih drugih sustava filtracije. Vlaženje polutanata omogućava sigurno rukovanje zapaljivim i eksplozivnim materijalima.
- Visoka učinkovitost sakupljanja: mokri scruberi imaju iznimno visoke stope učinkovitosti sakupljanja. Mnogi moderni mokri sustavi mogu ukloniti do 95% polutanata.
- Kompaktna veličina: mokri scruberi su manji od nekih drugih vrsta scrubera. To ih čini pogodnima za instalaciju u postojeće industrijske objekte bez ometanja drugih strojeva.

Kao i svaka tehnologija, mokri scruberi također imaju neke nedostatke, uključujući:

- Komplikacije s odlaganjem: mokri scruberi proizvode koncentriranu mulj iz polutanata koje hvataju, i taj otpadni tok mora biti pravilno zbrinut. Netoksični muljevi nisu previše komplicirani za zbrinjavanje, ali toksični otpad mora se tretirati i zbrinuti u skladu sa smjernicama za zbrinjavanje opasnog otpada.
- Troškovi rada: stacionarni sustavi mokrih scrubera zahtijevaju velike konjske snage motora i pad tlaka u sustavu, što može značiti veće operativne troškove. Također mogu zahtijevati više održavanja jer se čvrste tvari mogu skupljati oko suho-vlažnog sučelja, a kisele muljevi mogu biti vrlo korozivni.

3.6.2 Suhi scrubberi

Sustavi za pročišćavanje ispušnih plinova, poznati kao scrubberi, predstavljaju ključnu tehnologiju za smanjenje emisije sumpornih oksida (SO_x) iz brodskih dvotaktnih sporohodnih dizel motora, u skladu s propisima Međunarodne pomorske organizacije (IMO). Uvođenje strogih regulacija o emisijama SO_x (npr. IMO 2020) zahtijeva od brodovlasnika korištenje goriva s niskim sadržajem sumpora ili implementaciju scrubber sustava. Suhi scrubberi omogućuju uklanjanje sumpornih oksida korištenjem čvrstih sorbenta, što eliminira potrebu za velikim količinama vode te predstavlja alternativu mokrim scrubberima.

Vrste Sorbenata u suhim scrubber sustavima:

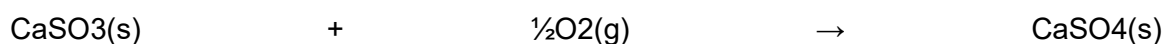
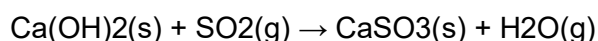
- Kalcijev hidroksid (Ca(OH)₂): Poznat kao hidratizirano vapno, koristi se zbog visoke reaktivnosti s SO_x plinovima.
- Kalcijev karbonat (CaCO₃): Vapnenac ili dolomit, prirodno dostupan i ekonomski povoljan, ali manje reaktivan u odnosu na kalcijev hidroksid.
- Natrijev bikarbonat (NaHCO₃): Koristi se u specifičnim sustavima zbog visoke topljivosti i učinkovitosti u reakcijama pri nižim temperaturama

Kriteriji za odabir sorbenta Odabir sorbenta u suhim scrubber sustavima ovisi o nekoliko faktora:

- Reaktivnost: Brzina reakcije sorbenta s SO₂ i SO₃ ključna je za postizanje visoke efikasnosti.
- Temperaturni raspon: Sorbent mora biti stabilan i funkcionalan pri visokim temperaturama ispušnih plinova (350–600 °C).
- Ekonomska isplativost: Dostupnost i cijena materijala važni su za operativnu ekonomiku sustava.
- Utjecaj na okoliš: Nusprodukti reakcije moraju biti ekološki prihvatljivi ili jednostavni za zbrinjavanje.

Kemijski mehanizmi sorpcije SO₂ sa sorbentima:

- Kalcijev hidroksid:



Oksidacija kalcijevog sulfita (CaSO₃) do kalcijevog sulfata (CaSO₄) stvara stabilan produkt poznat kao gips.

- Kalcijev karbonat:
 $\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{SO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CaSO}_3(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ Reakcija se odvija pri povišenim temperaturama gdje dolazi do termalne razgradnje CaCO_3 .
- Natrijev bikarbonat:
 $2\text{NaHCO}_3(\text{s}) + \text{SO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + 2\text{CO}_2(\text{g})$ Natrijev bikarbonat se razgrađuje u prisutnosti topline i reagira sa sumpornim oksidima stvarajući natrijev sulfat (Na_2SO_4).

Fizička i kemijska svojstva sorbenta:

- Veličina čestica- Finoća sorbenta utječe na njegovu reaktivnost. Manje čestice imaju veću specifičnu površinu, ali prekomjerna finoća može uzrokovati probleme s transportom i rukovanjem.
- Toplinska stabilnost- Sorbenti moraju biti stabilni pri visokim temperaturama ispušnih plinova kako bi se osigurala učinkovita reakcija.
- Poroznost -Veća poroznost povećava kapacitet sorbenta za adsorpciju SO_x plinova.
- Učinkovitost sorbenta
- Postotak uklanjanja SO_x Suhi scrubberi mogu postići efikasnost uklanjanja SO_x iznad 90% uz pravilno dimenzioniranje sustava i odabir sorbenta.
- Količina potrebnog sorbenta Potrošnja sorbenta ovisi o sadržaju sumpora u gorivu, temperaturi ispušnih plinova i kapacitetu scrubbera.

Utjecaj na okoliš

Suhi scrubberi generiraju čvrsti otpad (npr. gips ili natrijev sulfat) koji se može koristiti u industrijske svrhe (npr. proizvodnja cementa) ili sigurno zbrinuti. Emisije prašine Tijekom rukovanja sorbentom može doći do stvaranja prašine, što zahtijeva sustave za kontrolu emisija čestica. Suhi scrubberi postali su sve češća opcija uz mokre scrubere. Oni nude neke prednosti u odnosu na mokre scrubere, ali također imaju neka ograničenja. Kao što ime sugerira, suhi scrubberi koriste suhe sorbente. To je glavna razlika između mokrih i suhih industrijskih scrubbera. Inače, ovi uređaji dijele nekoliko sličnosti. Kao i mokri, suhi scrubberi mogu ukloniti štetne plinove i čestice iz ispušne struje. Suhi scrubberi uglavnom se koriste za uklanjanje kiselih komponenata iz plinskih ispušnih plinova koji nastaju procesima izgaranja. U tim sustavima, suhi sorbent je alkalna kaša. Kada se plin pomiješa s alkalnom tvari, dolazi do adsorpcije, učinkovito neutralizirajući pH plina. Nečistoće se pretvaraju u čvrste soli, koje uređaj za kontrolu čestica uklanja iz sustava. Postoje dvije osnovne metode koje suhi scrubberi mogu koristiti:

- Injekcija suhog sorbenta: neki suhi scruberi ubrizgavaju sorbent s kojim se plin izravno miješa dok prolazi kroz njega. Ova injekcija i rezultirajuća reakcija mogu se dogoditi na različitim mjestima u procesu.
- Metoda apsorpcije sprej sušilicom: drugi suhi scruberi prskaju alkalnu kašu u plinsku struju dok prolazi kroz njega. Toplina ispušnog plina uzrokuje isparavanje kapljica vode, tako da pročišćeni plin koji napušta sustav nije zasićen. Ovi scruberi su poznati kao sprej sušilice, sprej apsorberi ili polusuhi scruberi.

Suhi scruberi su stekli popularnost zbog nekih prednosti koje nude, uključujući:

- Jednostavnije zbrinjavanje otpada: u usporedbi s mokrim scruberima, suhi nude jednostavnije zbrinjavanje otpada. Umjesto rukovanja mokrim muljem, potrebno je zbrinuti samo suhe čestice.
- Niže održavanje: ovi sustavi obično zahtijevaju manje održavanja od mokrih scrubera, što pojednostavljuje rad s manje zastoja.
- Kompaktna veličina: suhi scruberi imaju mali otisak, što olakšava njihovu instalaciju u industrijskom postrojenju.

Suhi scruberi također imaju neke nedostatke, uključujući:

- Ograničena učinkovitost: manje su učinkoviti od mokrih scrubera, pa mogu dopustiti da više polutanata pobjegne u okoliš.
- Potrebni reaktanti: suhi scruberi zahtijevaju posebne reaktante za rad, što znači da ih je potrebno imati na raspolaganju u svakom trenutku.

Zaključak Suhi scruberi predstavljaju pouzdano rješenje za smanjenje emisija SO_x u brodskim dvotaktnim sporohodnim dizel motorima. Pravilnim odabirom sorbenta, uzimajući u obzir reaktivnost, troškove i utjecaj na okoliš, moguće je postići visoku učinkovitost uz minimalne operativne troškove. Daljnja istraživanja trebaju biti usmjerena na optimizaciju svojstava sorbenta i smanjenje količine otpada.

3.6.3 Elektrostatički precipitatori

Elektrostatički precipitatori su jedinstveni u usporedbi s mokrim i suhim scruberima jer su bezfiltreni uređaji. Umjesto korištenja nekog materijala za apsorpciju štetnih zagađivača, elektrostatički precipitatori koriste električno polje za privlačenje polutanata i njihovo hvatanje unutar uređaja. Električno polje daje česticama pozitivan ili negativan naboj. Čestice se zatim privlače na ploče u uređaju s suprotnim nabojem. Elektrostatički precipitatori koriste se za

uklanjanje čestica poput prašine i dima. Mokri scruberi također mogu koristiti električni naboj za privlačenje polutanata, ali kod elektrostatičkih precipitatora to je jedina metoda pročišćavanja.

Elektrostatički precipitatori nude neke prednosti u odnosu na alternativne tehnologije, uključujući:

- Visoka učinkovitost sakupljanja: kada je riječ o česticama, elektrostatički precipitatori nude impresivnu učinkovitost sakupljanja koja može premašiti 99%.
- Veliki kapacitet: elektrostatički precipitatori mogu rukovati vrlo velikim protokom plina i velikim opterećenjima prašine s niskim gubicima tlaka.
- Niski operativni troškovi: elektrostatički precipitatori obično zahtijevaju malo održavanja i ne zahtijevaju medije za filtraciju.

Nedostaci elektrostatičkih precipitatora:

- Veliki potreban prostor : elektrostatički precipitatori zauzimaju veliki prostor, što otežava njihovo postavljanje u postojeće objekte.
- Nemogućnost filtriranja plinova: elektrostatički precipitatori mogu učinkovito uklanjati čestice, ali ne mogu ukloniti plinovite zagađivače.

3.7 Trenutno važeća pravna regulativa

Međunarodna pomorska organizacija (IMO) propisuje da sadržaj sumpora u gorivu koje koriste brodovi bude ograničen na 0,50% širom svijeta i 0,10% m/m u područjima kontroliranja emisija (Emission Control Areas; Sjedinjene Američke Države, Kanada, Baltičko more i sjeverno more). Protokol iz 1997. godine Međunarodne konvencije za sprječavanje onečišćenja s brodova (MARPOL), koji uključuje MARPOL Prilog VI, bio je prvi korak IMO-a u reguliranju sumpornih oksida (SOx) iz brodova. Brodovi su obavezni biti opremljeni uređajima za pročišćavanje ispušnih plinova u skladu s globalnim propisima. Korištenjem sustava za pročišćavanje ispušnih plinova ili alternativnih tehnoloških tehnika, ukupne emisije sumpora glavnog pogonskog motora broda i pomoćnih motora trebaju se smanjiti na manje ili jednako 6,0 g SOx/kWh. (Sargun, 2021.) Prema IMO-u, korištenje uređaja za pročišćavanje ispušnih plinova ispravan je način osiguravanja da brodovi zadovoljavaju MARPOL Prilog VI i smanjuju svoje emisije sumpora. Rezolucija MEPC.259(68) je drugačiji smjernik koji sažima zahtjeve za testiranje, certifikaciju, verifikaciju sustava za pročišćavanje ispušnih plinova kao i kriterije za ispuštanje otpadnih voda u more. (Fernandez & Sarkar, 2021.) Smanjenje emisije čestica je cilj istog propisa koji postavlja ograničenje na sadržaj sumpora u morskom gorivu. (Resources, 2020)

Dozvoljene razine emisija čestica nisu kvantificirane, ali ovise o smanjenju emisija čestica s sadržajem sumpora u gorivu, što je ključna razlika od sumpornog ograničenja. Kao rezultat toga, ne postoji postavljen standard mjerenja ili zajedničko ograničenje za broj čestica koje se

oslobađaju nakon pročišćavanja ispušnih plinova. Uspoređujući s korištenjem rafiniranog goriva, poput MGO-a (LAKO POMORSKO GORIVO), instalacija i rad uređaja za pročišćavanje ispušnih plinova na brodovima općenito su zanimljivija alternativa.

3.8 Lokalni i regionalni zakoni

Unatoč naporima za instalaciju sustava za pročišćavanje ispušnih plinova, ispuštanje otpadnih voda iz otvorenog ciklusa pročišćavanja zabranjeno je ili ograničeno u nekoliko obalnih država i luka koje su uspostavile vlastite zahtjeve. Trenutno su te luke, države i područja prepoznata kao mjesta s lokalnim zakonima koji kontroliraju ispuštanje ispušnih plinova iz sustava za pročišćavanje. U nastavku su navedena neka od tih područja, iako se ne smije pretpostaviti da je popis potpun.

Belgijski federalni zakon propisuje da se ispuštanje otpadnih voda može obavljati samo s udaljenosti od najmanje tri nautičke milje od obale, kako u priobalnim vodama tako i u otvorenim vodama. Ciljevi Okvirne direktive EU o vodama postavljeni 2016. godine ne smiju biti ugroženi ispuštanjem. Luka i unutrašnje vode su zabranjene za ispuštanje prema flamskom regionalnom zakonu 26/3/176.

Od 1. siječnja 2019. godine, ispuštanje otpadnih voda iz sustava za pročišćavanje zabranjeno je u unutarnjim područjima kontrole emisija (ECAs (regulativa o korištenju sumpora)) u Kini, vodama Bo Hai zaljeva i lučkim vodama obalnih domaćih (ECAs), u skladu s "Obavijesti o reguliranju provedbe nadzora i upravljanja područjima kontrole emisija zagađivača zraka na brodovima" Ministarstva prometa (MOT).

Njemačke unutarnje plovne putove poput kanala, Rajne i luke unutarnjih plovnih putova zabranjeno je ispuštanje (prema člancima 1 i 3 Konvencije o CDNI).

Irska luka Dublin objavila je (Obavijest mornarima br. 37 2018. godine), kojom se zabranjuje ispuštanje ispušnih voda iz sustava za pročišćavanje ispušnih plinova i dalje objašnjava kako se zabranjuje ispuštanje vode za pranje u vodama pod nadležnosti luke Dublin. Nadležnost luke Dublin proteže se na vode istočno od mosta Matt Talbot Memorial, protežući se kroz bove North i South Burford, Sorrento Point i liniju od svjetionika Baily.

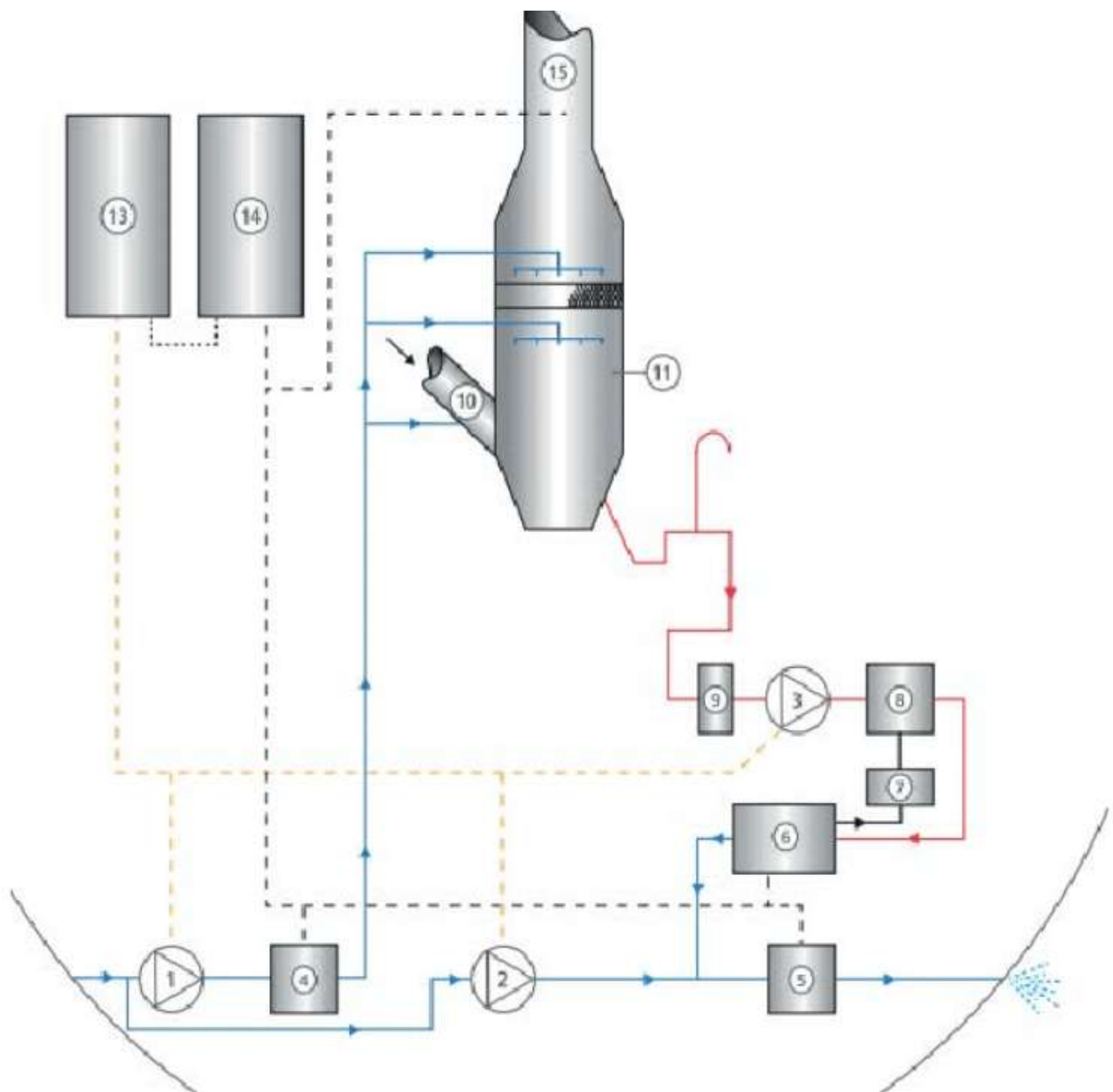
SAD ima nekoliko država koje također imaju stroge lokalne zakone, granice ispuštanja za pranje sustava za pročišćavanje pokrivene su odjeljkom (2.2.26 2013. godine Općeg dozvole za plovila (VGP)), što je donekle različito od smjernica (IMO-a MEPC 259(68)). Kalifornija, savezna država SAD-a, kako bi se uskladila s propisima o emisijama zraka, Kalifornijski odbor za resurse zraka

(CARB) zabranio je upotrebu sustava za pročišćavanje unutar 24 nautičke milje od obale Kalifornije. U siječnju 2020. godine, objavljena je (CARB MN 2020-1) kao podsjetnik na zahtjev.

Havaji, pozivajući se na odjeljak 6.7. 2013. godine VGP, ispuštanje vode za pranje na Havajima dopušteno je pod uvjetnim odjeljkom 401 WQC (certifikacija kvalitete vode), pod uvjetom da se ispune određeni zahtjevi navedeni u sličnom odjeljku 2013. godine VGP. Na područjima gdje je ispuštanje otpadnih voda zabranjeno, posada broda mora osigurati da se zadovolje sumporni limiti. Kao alternativa korištenju otvorenog sustava za pročišćavanje, preporučuje se korištenje usklađenog goriva ili konverzija otvorenog ciklusa u zatvoreni ciklus ili hibridni sustav, ili inače operatori mogu odabrati rad u zatvorenom ciklusu sustava. Svaka promjena treba biti dovršena dovoljno prije ulaska broda u područja gdje postoje ograničenja ispuštanja otpadnih voda ili zabrane. To će olakšati prepoznavanje bilo kakvih operativnih problema koji se mogu pojaviti nakon promjene i dati dovoljno vremena za njihovo rješavanje prije dolaska broda.

3.9 Vrste Scrubber sistema prema izmjeni medija sa okolinom

3.9.1 Scrubber sustavi otvorenog kruga



Slika 14. Scrubber sustav otvorenog kruga (Research Gate, 2024)

Princip rada:

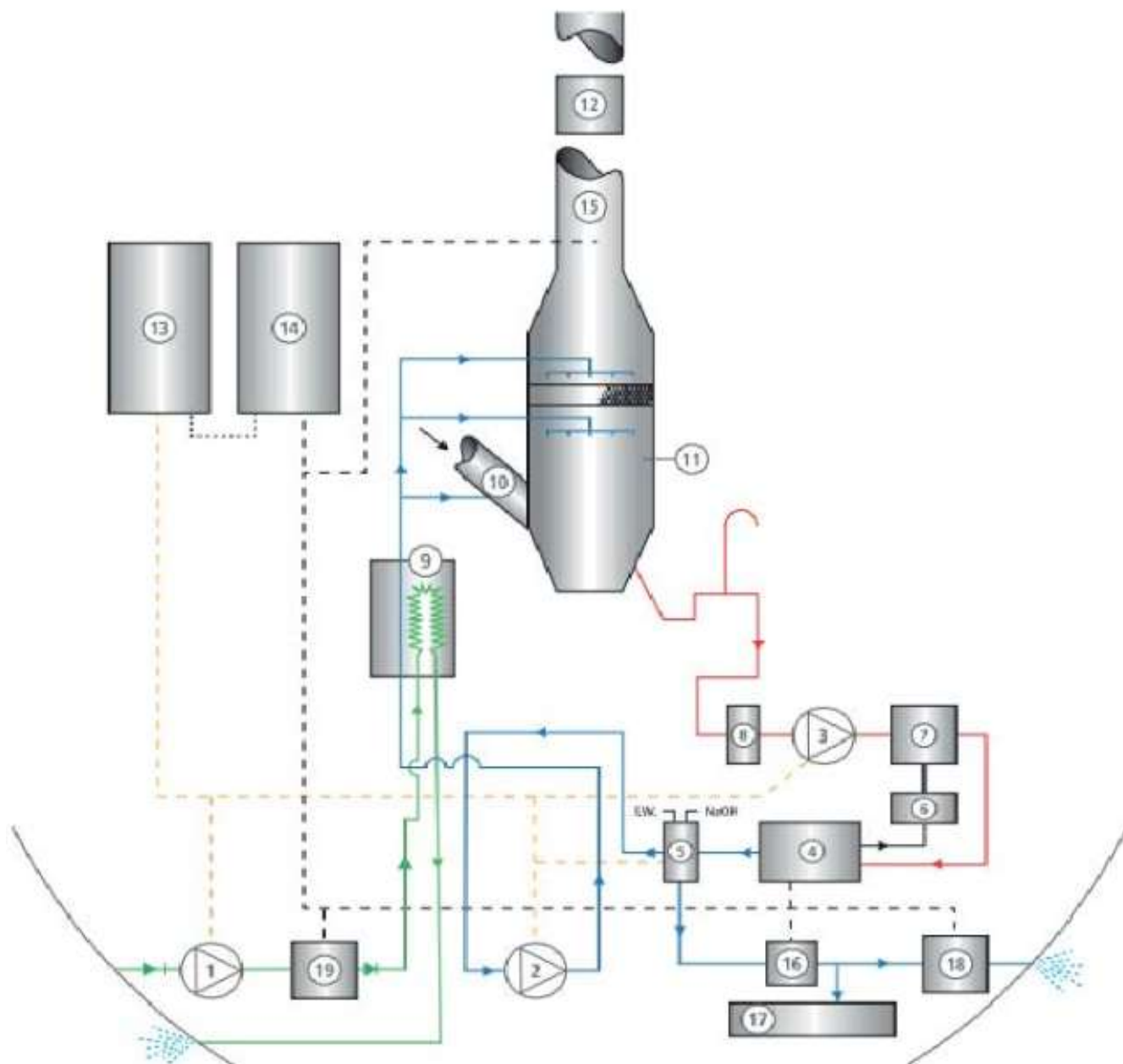
Scrubber sustavi otvorenog kruga koriste morsku vodu za ispiranje ispušnih plinova i uklanjanje sumpornih oksida. Ispušni plinovi prolaze kroz komoru za ovlaživanje gdje dolaze u kontakt s morskom vodom. Sumporni oksidi (SO_x) reagiraju s morskom vodom, stvarajući sumpornu kiselinu koja se neutralizira prirodnim alkalitetom morske vode. Nakon tretmana, voda se ispušta natrag u more.

Prednosti: jednostavniji dizajn i niži troškovi instalacije i održavanja. Korištenje prirodne morske vode eliminira potrebu za skladištenjem kemikalija.

Nedostaci: ograničena primjena u područjima gdje je ispuštanje prerađene vode strogo regulirano ili zabranjeno. Efikasnost čišćenja može biti ograničena alkalitetom morske vode.

Primjena: pogodni za brodove koji većinu vremena provode u otvorenim oceanima daleko od obalnih područja s ograničenjima ispuštanja.

3.9.2 Scrubber Sustavi zatvorenog Kruga



Slika 15. Scrubber sustav zatvorenog kruga (Research Gate, 2024)

Princip rada:

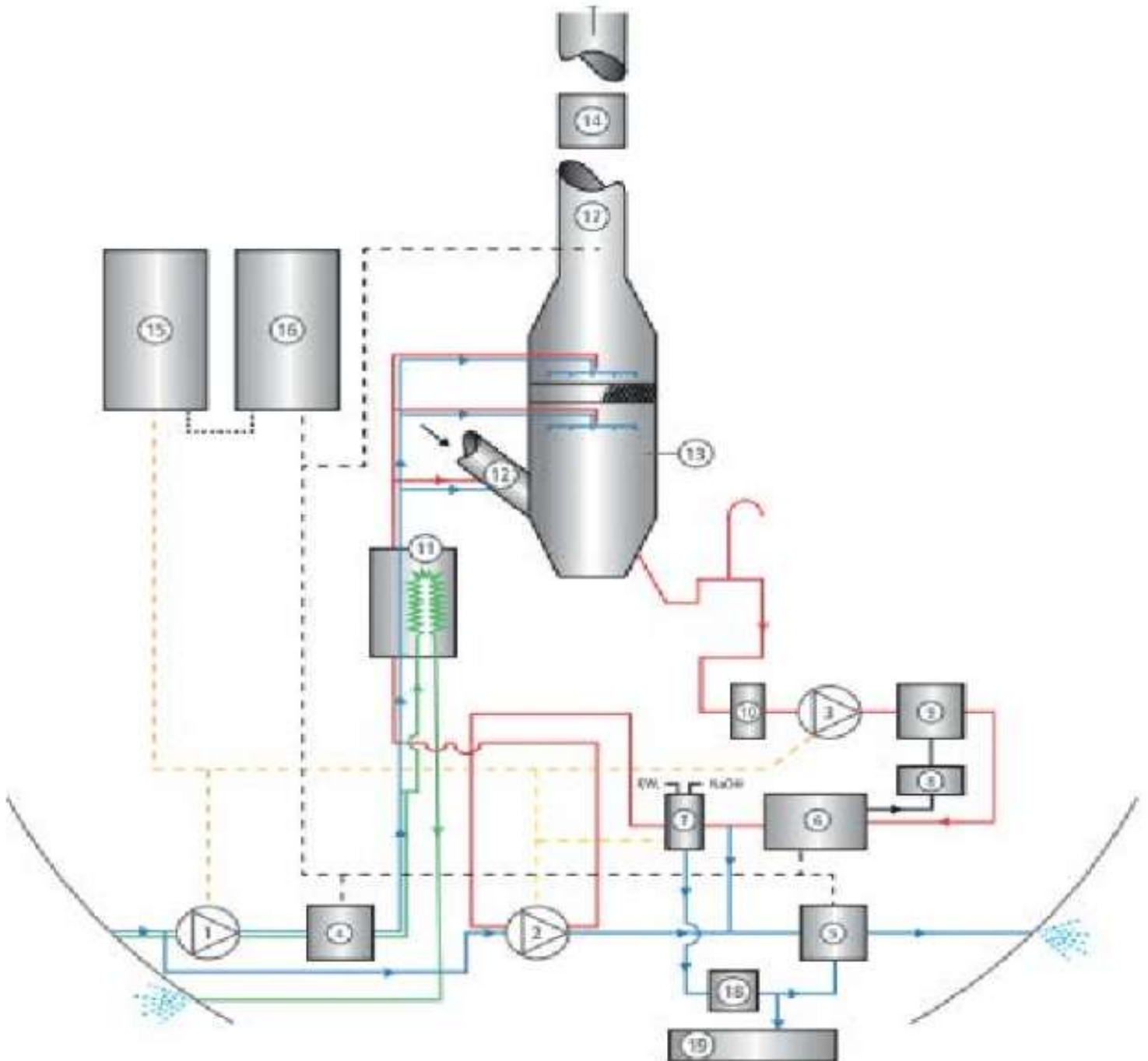
Scrubber sustavi zatvorenog kruga koriste slatku vodu obogaćenu alkalnim spojevima (npr. natrijev hidroksid) za neutralizaciju sumpornih oksida. Voda recirkulira unutar sustava, prolazeći kroz proces čišćenja i filtriranja prije ponovne upotrebe. Minimalna količina ispušne vode se tretira i zbrinjava prema propisima.

Prednosti: pogodni za upotrebu u obalnim područjima i lukama gdje je ispuštanje prerađene vode strogo kontrolirano. Visoka učinkovitost čišćenja bez obzira na alkalitet morske vode.

Nedostaci: složeniji dizajn i viši troškovi instalacije i održavanja. Potrebno skladištenje i rukovanje kemikalijama za neutralizaciju.

Primjena: idealni za brodove koji često pristaju u lukama ili plove u područjima s ograničenjima ispuštanja.

3.9.3 Hibridni Scrubber Sustavi



Slika 16. Hibridni scrubber sustav (Research Gate, 2024)

Princip rada:

Kombinacija otvorenog i zatvorenog kruga, omogućujući brodovima da prelaze između dva načina rada ovisno o uvjetima okoliša i propisima. Kada su u otvorenom moru, sustav može raditi u otvorenom krugu, a u obalnim područjima može se prebaciti na zatvoreni krug.

Prednosti: fleksibilnost u radu omogućava optimizaciju troškova i usklađenost s propisima. Mogućnost prilagođavanja različitim operativnim uvjetima i područjima plovidbe.

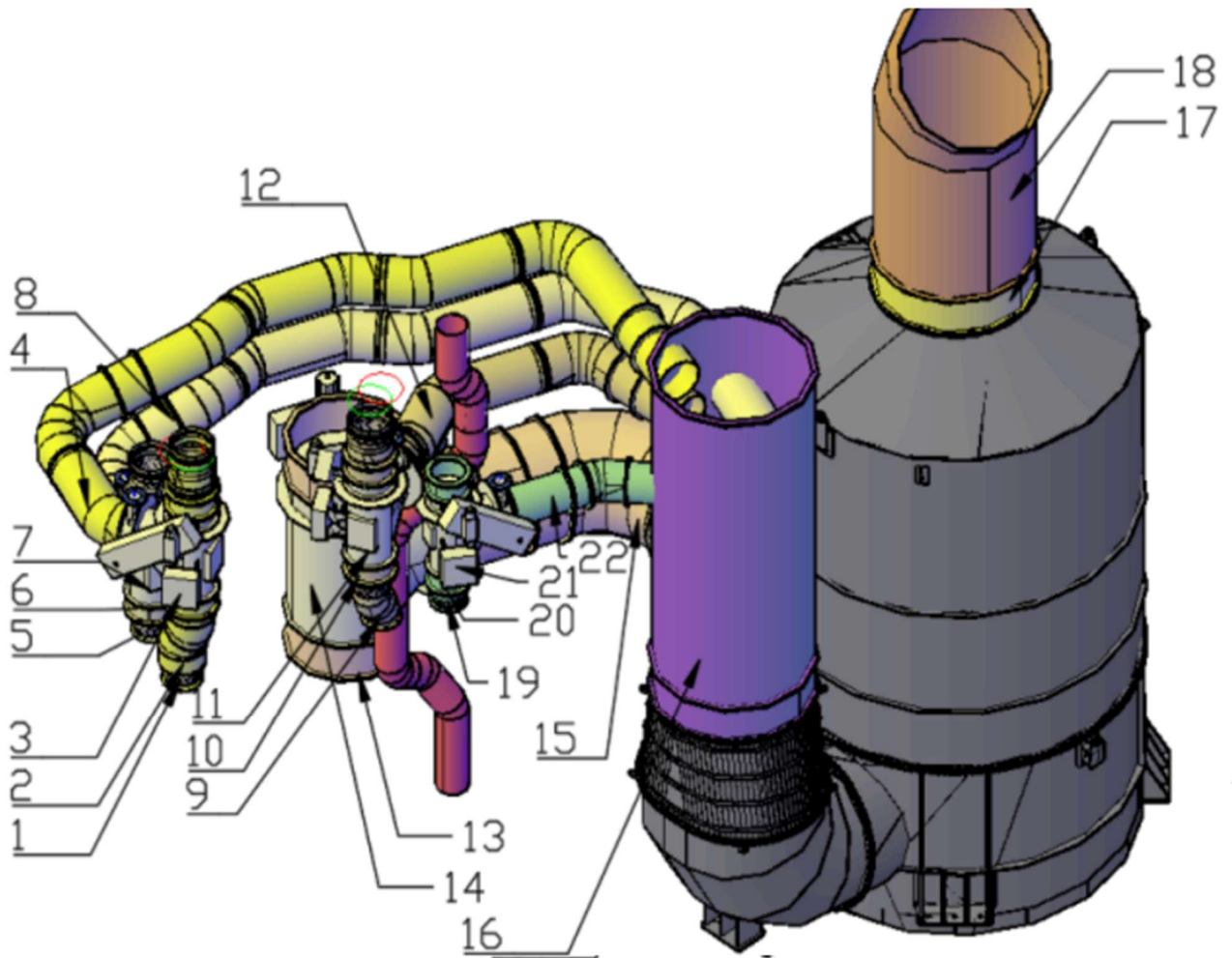
Nedostaci: složeniji sustav zahtijeva naprednije upravljanje i održavanje. Viši inicijalni troškovi instalacije.

Primjena: idealni za brodove koji operiraju u različitim područjima s promjenjivim propisima o ispuštanju.

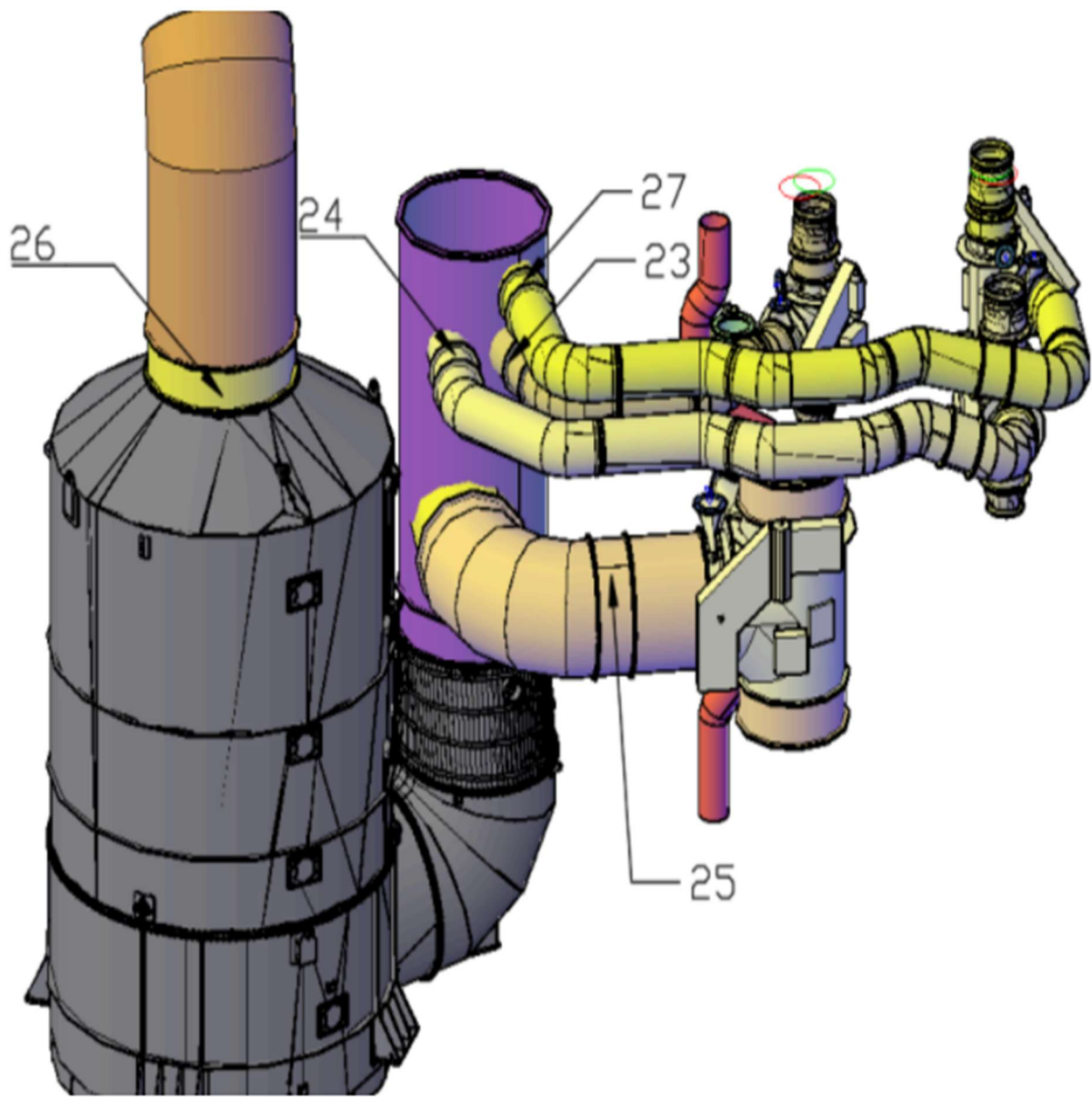
Scrubber sustavi igraju ključnu ulogu u smanjenju emisija sumpornih oksida (SOx) iz brodskih ispušnih plinova, omogućujući pomorskoj industriji da udovolji međunarodnim ekološkim propisima. Odabir odgovarajuće vrste Scrubber sistema ovisi o operativnim potrebama broda, geografskom području plovidbe i specifičnim ekološkim propisima. Otvoreni krug je jednostavan i ekonomičan, ali ograničen u primjeni zbog ekoloških propisa. Zatvoreni krug pruža visoku učinkovitost i prikladan je za obalna područja, ali je složeniji i skuplji. Hibridni sustavi nude najveću fleksibilnost, kombinirajući prednosti oba sustava, ali uz više troškove i složenost upravljanja.

3.10 Proračun pada tlaka u sustavu mokrog SCRUBBERA

U prilogu slika sustava scrubbera modela koji je napravljen za ovaj Diplomski rad



Slika 17. Sustav SCRUBBERA-prednji dio



Slika 18. Sustav SCRUBBERA-stražnji dio

Opis svih dijelova modela

1. Ekspanzija DN600/DN800
2. Ispušna cijev DN800
3. Prigušna zaklopka DN800
4. Ispušna cijev DN800
5. Ekspanzija DN600/DN800
6. Ispušna cijev DN800
7. Prigušna zaklopka DN800
8. Ispušna cijev DN800
9. Ispušna cijev DN600
10. Ekspanzija DN600/DN800
11. Prigušna zaklopka DN800
12. Ispušna cijev DN800
13. Ispušna cijev DN2000
14. Prigušna zaklopka DN2000
15. Ispušna cijev DN2000
16. Ispušna cijev DN2800
17. Fleksibilni kompenzator DN2800
18. Ispušna cijev DN2800
19. Ekspanzija DN650/DN550
20. Ispušna cijev DN650
21. Prigušna zaklopka DN650
22. Ispušna cijev DN650
23. Fleksibilni kompenzator DN650
24. Fleksibilni kompenzator DN800
25. Fleksibilni kompenzator DN2000
26. Fleksibilni kompenzator DN2000
27. Fleksibilni kompenzator DN800

(DN je oznaka unutrašnjeg promjera cijevi/kompenzatora/zaklopke)

Budući da je ovaj sustav projektiran da radi sa 1 glavnim motorom i 4 pomoćna motora, kao prilog navedene su tablice koje prikazuju padove tlaka u pojedinim elementima.

3.10.1 Pad tlaka na ispušnim cijevima glavnog motora

GUBITAK TLAKA U ISPUŠNIM CIJEVIMA OD GRANANJA DO IZLAZA S PROČIŠĆIVAČEM

ULAZ

PODACI O ISPUŠNIM PLINOVIMA

PRI 90% OPTEREĆENJA MOTORA

t=	350	°C
ρ =	0,575094438	kg/m ³
v=	0,00004213	M ² s ⁻¹
η =	2,42287E-05	Pa s
SG=	0,000575094	

DN2000

SADRŽAJ

VRIJEDNOST JEDINICE

unutarnji promjer	d=	2020	mm		
presjek	A=	3,204738666	m ²		
protok kroz cijev	Q=	407766,0718	m ³ /h	m=	234504 kg/h
brzina protoka	v=	35,3440218	m/s		
duljina cijevi		3,2			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
zbroj dn 2000	3,2 m				
	Re=	1694633,849	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm	ϵ/D =	7E-05
	f=	0,013	moody graf	19078	
	L=	3,2			
	ξ =	0,020594059			

$\Delta p = 7,397467502$ Pa

DN2800

SADRŽAJ

VRIJEDNOST JEDINICE

unutarnji promjer	d=	2804	mm		
presjek	A=	6,175127086	m ²		
protok kroz cijev	Q=	608352,2579	m ³ /h	m=	349860 kg/h
brzina protoka	v=	27,3657102	m/s		
duljina cijevi		2,026			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
SUM DN 2800	2,026 m				
	Re=	1821349,428	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm	ϵ/D =	5E-05
	f=	0,012	moody graf	19078	
	L=	2,026			
	ξ =	0,008670471			
		40			

$\Delta p =$	1,867090189	Pa			
DN2800					
SADRŽAJ		VRIJEDNOST	JEDINICE		
unutarnji promjer	d=	2804	mm		
presjek	A=	6,175127086	m ²		
protok kroz cijev	Q=	608352,2579	m ³ /h	m=	349860 kg/h
brzina protoka	v=	27,3657102	m/s		
duljina cijevi		6,135			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
SUM DN 2300	6,135	m			
	Re=	1821349,428	=	turbolentno	
	$\epsilon =$	0,15	mm	$\epsilon/D =$	5E-05
	f=	0,012	moody graf	19078	
	L=	6,135			
	$\xi =$	0,02625535			

$\Delta p =$	5,653799757	Pa			
PROMJER	TIP	KV	PAD TLAKA		
DN2000	T KOMAD OŠTRI H RUBOVA				
	PCS	1	K=	1	$\Delta p = 215,338964$ Pa
DN2000	KOLJENO 90 5 SEG R=D				
	PCS	1	K=	0,3	$\Delta p = 64,6016892$ Pa
DN2000	ISPUŠNI VENTIL OTVORENOG PADA TLAKA				
GA2533-01 rev B			mbar	5,69	$\Delta p = 569$ Pa
DN2000	FLEKSIBILNI MJEH				
	PCS	2	K=	1	$\Delta p = 430,677928$ Pa
DN2800	SCRUBBER				
			$\Delta p =$	150 mmwc	DAO PROIZVOĐAČ
					$\Delta p = 1470,99204$ Pa

UKUPNI PAD TLAKA NA ISPUŠNIM CIJEVIMA GLAVNOG MOTORA

UKUPNI GUBITAK TLAKA U ISPUŠNOJ CIJEVI OD RAČVE DO IZLAZA PRI 100% OPTEREĆENJU	2765,52898 Pa
	20,7431732 mmHg
	282,006521 mmWc

Pad tlaka u ispušnim cijevima glavnog motora ukazuje na otpore strujanja ispušnih plinova, koji direktno utječu na učinkovitost motora. Proračunom je utvrđena vrijednost pada tlaka od 2765,52 Pa iz čega se može viditi da je u pitanju Mokri Scrubber sustav. Uzrok ovog pada uključuje gubitke zbog trenja u cijevima, promjene brzine strujanja, te dodatne otpore pri kontaktu plinova s tekućinom unutar Scrubbera.

Preporuka za optimizaciju:

- Povećanje promjera ispušnih cijevi kako bi se smanjila brzina strujanja i otpornost.
- Korištenje materijala s manjim koeficijentom trenja unutar cijevi.
- Optimizacija geometrije cijevnih spojeva kako bi se smanjili lokalni gubici.

3.10.2 Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 1

GUBITAK TLAKA U ISPUŠNIM CIJEVIMA OD GRANANJA DO IZLAZA S PROČIŠĆIVAČEM

ULAZ

PODACI O ISPUŠNIM PLINOVIMA PRI 90% OPTEREĆENJA MOTORA

t= 350 °C
 ρ= 0,575094438 kg/m³
 v= 0,00004213 M²s⁻¹
 η= 2,42287E-05 Pa s
 SG= 0,000575094

DN650

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE		
unutarnji promjer	d= 647	mm		
presjek	A= 0,32877474	m ²		
protok kroz cijev	Q= 38873,61538	m ³ /h	m= 22356	kg/h
brzina protoka	v= 32,8438447	m/s		
duljina cijevi	2,591			
ekspanzijska cijev	0			
3*duljine cijevi				
SUM DN 2100	2,591 m			
	Re= 504390,3993	=	turbolentno	
	ε= 0,15	mm	ε/D=	0,00023184
	f= 0,016	moody graf	19078	
	L= 2,591			
	ξ= 0,064074189			

Δp= 19,8746856 Pa

DN2800

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE		
unutarnji promjer	d= 2804	mm		
presjek	A= 6,175127086	m ²		
protok kroz cijev	Q= 446639,6872	m ³ /h	m= 256860	kg/h
brzina protoka	v= 20,09134032	m/s		
duljina cijevi	3,675			
ekspanzijska cijev	0			
3*duljine cijevi				
SUM DN 2800	3,675 m			

Re= 1337197,205 = turbolent
 ε= 0,15 mm moody ε/D= 5,3495E-05
 f= 0,012 graf 19078
 L= 3,675
 ξ= 0,015727532

Δp= 1,82552411 Pa

DN2800

SADRŽAJ VRIJEDNOST JEDINICE

unutarnji promjer d= 2804 mm
 presjek A= 6,175127086 m²
 protok kroz cijev Q= 446639,6872 m³/h m= 256860 kg/h
 brzina protoka v= 20,09134032 m/s
 duljina cijevi 6,135
 ekspanzijska cijev 0
 3*duljine cijevi

SUM DN 2300 6,135 m

Re= 1337197,205 = turbolentno
 ε= 0,15 mm moody ε/D= 5,3495E-05
 f= 0,012 graf 19078
 L= 6,135
 ξ= 0,02625535

Δp= 3,04750759 Pa

PROMJER TIP KV PAD TLAKA

DN650 T KOMAD OŠTRIH RUBOVA

PCS 1 K= 1 Δp = 116,071873 Pa

DN650 KOLJENO 150 3 SEG R=D

PCS 1 K= 0,16 Δp = 18,5714997 Pa

DN650 FLEKSIBILNI MJEH

PCS 1 K= 0,02 Δp = 2,32143746 Pa

DN550/650 EKSPANZIJSKI ELEMENT

PCS 1 K= 0,025 Δp = 2,90179682 Pa

DN650 ISPUŠNI VENTIL OTVORENOG PADA TLAKA

GA2533-01

rev B mbar 4,63 Δp = 463 Pa

DN2800 SCRUBBER

Δp = 150 mmwc dao proizvođač

Δp = 1470,99204 Pa

UKUPNI PAD TLAKA NA ISPUŠNIM CIJEVIMA POMOĆNOG MOTORA 1

UKUPNI GUBITAK TLAKA U ISPUŠNOJ CIJEVI OD RAČVE DO IZLAZA PRI 100% OPTEREĆENJU	2098,60636	Pa
	15,7408422	mmHg
	213,999088	mmWc

Vrijednost pada tlaka od 2098,60636 Pa zabilježena u pomoćnom motoru 1 ukazuje na visoke lokalne otpore, što se može pripisati manjem protoku plinova u odnosu na glavni motor. Ovaj pad tlaka odgovara standardnim očekivanjima za pomoćne sustave, ali dodatni gubici mogu nastati zbog nakupljanja čestica i čađe unutar cijevi.

Preporuka za optimizaciju:

- Implementacija sustava za periodično čišćenje unutrašnjosti ispušnih cijevi.
- Analiza utjecaja temperature na viskoznost ispušnih plinova i prilagodba sustava za regulaciju protoka.

3.10.3 Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 2

GUBITAK TLAKA U ISPUŠNIM CIJEVIMA OD GRANANJA DO IZLAZA S PROČIŠĆIVAČEM

ULAZ

PODACI O ISPUŠNIM PLINOVIMA 90% OPTEREĆENJE MOTORA

t= 350 °C
 0,57509443
 ρ= 8 kg/m³
 v= 0,00004213 M²s⁻¹
 2,42287E-
 η= 05 Pa s
 0,00057509
 SG= 4

DN800

	VRIJEDNO	JEDINIC		
SADRŽAJ	ST	E		
unutarnji promjer	d= 804	mm		
	0,50769393			
presjek	A= 9	m ²		
protok kroz cijev	Q= 52144,4792	m ³ /h	m= 29988	kg/h
	28,5301368			
brzina protoka	v= 6	m/s		
duljina cijevi	5,4			
ekspanzijska cijev	0			
3*duljine cijevi				
SUM DN 2100	5,4 m			
	544463,091		turbolentno	
	Re= 3	=		
	ε= 0,15	mm	ε/D=	0,000186
		moody		57
	f= 0,016	graf	19078	
	L= 5,4			
	0,10746268			
	ξ= 7			

25,152118

Δp= 8 Pa

DN2800

	VRIJEDNO	JEDINIC		
SADRŽAJ	ST	E		
unutarnji promjer	d= 2804	mm		
	6,17512708			
presjek	A= 6	m ²		
protok kroz cijev	Q= 446639,687	m ³ /h	m= 256860	kg/h
	2			
		46		

brzina protoka $v = 20,0913403$ m/s
 duljina cijevi $4,85$
 ekspanzijska cijev 0
 3*duljine cijevi

SUM DN 2800 $4,85$ m
 $Re = 1337197,205 =$ turbolentno
 $\epsilon = 0,15$ mm moody graf 19078 $\epsilon/D = 5,3495E-05$
 $f = 0,012$
 $L = 4,85$
 $\xi = 0,020756063$

$\Delta p = 2,409195078$ Pa
 DN2800

SADRŽAJ	VRIJEDNO	JEDINICE
unutarnji promjer	$d = 2504$	mm
presjek	$A = 4,92445905$	m ²
protok kroz cijev	$Q = 446639,687$	m ³ /h
	$m = 256860$	kg/h
brzina protoka	$v = 25,1939509$	m/s
duljina cijevi	$6,135$	
ekspanzijska cijev	0	
3*duljine cijevi		

SUM DN 2300 $6,135$ m
 $Re = 1497404,538 =$ turbolentno
 $\epsilon = 0,15$ mm moody chart 19078 $\epsilon/D = 5,9904E-05$
 $f = 0,012$
 $L = 6,135$
 $\xi = 0,029400958$

$\Delta p = 5,366155079$ Pa

PROMJER	TIP	KV	PAD TLAKA
DN800			T KOMAD OŠTRIH RUBOVA
	PCS	$K = 1$	$\Delta p = 116,071873$ Pa
DN800			KOLJENO 135 3 SEG R=D
	PCS	$K = 0,34$	$\Delta p = 39,4644368$ Pa
DN800			FLEKSIBILNI MJEH

DN600/800	PCS	1	K=	1	$\Delta p =$	116,0718 73	Pa
EKSPANZIJA							
DN800	PCS	1	K=	0,03	$\Delta p =$	3,482156 18	Pa
GA2533-01	ISPUŠNI VENTIL OTVORENOG PADA TLAKA						
rev B			mbar	3,63	$\Delta p =$	363	Pa
DN800	KOLJENO 150 1 SEG R=D						
DN800	PCS	2	K=	0,16	$\Delta p =$	37,14299 93	Pa
KOLJENO 112 2 SEG R=D							
DN2800	PCS	1	K=	0,7	$\Delta p =$	81,25031 1	Pa
SCRUBBER							
			$\Delta p =$	150	mmwc	dao proizvođač	
					$\Delta p =$	1470,992 04	Pa

UKUPNI PAD TLAKA NA ISPUŠNIM CIJEVIMA POMOĆNOG MOTORA 2

UKUPNI GUBITAK TLAKA U ISPUŠNOJ CIJEVI OD RAČVE DO ZRAKA PRI 100% OPT.	2260,403155	Pa
	16,95441795	mmHg
	230,4978305	mmWc

Proračun je pokazao pad tlaka od 2260,403155 Pa, što sugerira da sustav koristi učinkovitu distribuciju protoka unutar cijevi. Međutim, mogući gubici se javljaju na spojevima cijevi i ventilima. Ova se pojava može dodatno istražiti pomoću računalne simulacije.

Preporuka za optimizaciju:

- Redizajn spojeva cijevi radi smanjenja vrtložnog strujanja.
- Ugradnja senzora za kontinuirano praćenje tlaka.

3.10.4 Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 3

GUBITAK TLAKA U ISPUŠNIM CIJEVIMA OD GRANANJA DO IZLAZA S PROČIŠĆIVAČEM

ULAZ

PODACI O ISPUŠNIM PLINOVIMA

ZA 90% OPTEREĆENJE MOTORA

t=	350	°C
ρ =	0,575094438	kg/m ³
v=	0,00004213	M ² s ⁻¹
η =	2,42287E-05	Pa s
SG=	0,000575094	

DN800

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE			
unutarnji promjer	d=	804	mm		
presjek	A=	0,507693939	m ²		
protok kroz cijev	Q=	52144,47925	m ³ /h	m=	29988
brzina protoka	v=	28,53013686	m/s		kg/h
duljina cijevi		15,338			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
SUM DN 2100	15,338	m			
	Re=	544463,0913	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm		ϵ/D = 0,00018657
	f=	0,016	moody	19078	
	L=	15,338	graf		
	ξ =	0,305233831			

Δp = 71,441333 Pa

DN2800

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE			
unutarnji promjer	d=	2804	mm		
presjek	A=	6,175127086	m ²		
protok kroz cijev	Q=	446639,6872	m ³ /h	m=	256860
brzina protoka	v=	20,09134032	m/s		kg/h
duljina cijevi		4,85			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
SUM DN 2800	4,85	m			
	Re=	1337197,205	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm		ϵ/D = 5,3495E-05
	f=	0,012	moody	19078	
	L=	4,85	graf		
	ξ =	0,020756063			

$\Delta p = 2,40919508 \text{ Pa}$						
DN2800						
SADRŽAJ		VRIJEDNOST	JEDINICE			
unutarnji promjer	d=	2804	mm			
presjek	A=	6,175127086	m ²			
protok kroz cijev	Q=	446639,6872	m ³ /h	m=	256860	kg/h
brzina protoka	v=	20,09134032	m/s			
duljina cijevi		6,135				
ekspanzijska cijev		0				
3*duljine cijevi						
SUM DN 2300	6,135	m				
	Re=	1337197,205	=	turbolentno		
	$\epsilon =$	0,15	mm	moody	$\epsilon/D =$	5,3495E-05
	f=	0,012	graf	19078		
	L=	6,135				
	$\xi =$	0,02625535				
$\Delta p = 3,04750759 \text{ Pa}$						
PROMJER	TIP		KV	PAD TLAKA		
DN800	T KOMAD OŠTRI H RUBOVA					
PCS	1	K=	1	$\Delta p =$	116,071873	Pa
DN800	FLEKSIBILNI MJEH					
PCS	1	K=	1	$\Delta p =$	116,071873	Pa
DN600/800	EKSPANZIJSKI ELEMENT					
PCS	1	K=	0,03	$\Delta p =$	3,48215618	Pa
DN800	KOLJENO 165 2 SEG R=D					
PCS	2	K=	0,08	$\Delta p =$	18,5714997	Pa
DN800	KOLJENO 135 3 SEG R=D					
PCS	2	K=	0,34	$\Delta p =$	78,9288735	Pa
DN800	KOLJENO 90 3 SEG R=D					
PCS	1	K=	0,37	$\Delta p =$	42,9465929	Pa
DN800	KOLJENO 147 1 SEG R=D					
PCS	1	K=	0,19	$\Delta p =$	22,0536558	Pa
DN800	KOLJENO 154 1 SEG R=D					
PCS	1	K=	0,128	$\Delta p =$	14,8571997	Pa
DN800	KOLJENO 150 1 SEG R=D					
PCS	2	K=	0,16	$\Delta p =$	37,1429993	Pa
DN800	ISPUŠNI VENTIL OTVORENOG PADA TLAKA					
GA2533-01 rev B		mbar	3,63	$\Delta p =$	363	Pa
DN2800	SCRUBBER					
		$\Delta p =$	150	mmwc	dobiveno od proizvođača	
				$\Delta p =$	1470,99204	Pa

UKUPNI PAD TLAKA NA ISPUŠNIM CIJEVIMA POMOĆNOG MOTORA 3

UKUPNI GUBITAK TLAKA U ISPUŠNOJ CIJEVI OD RAČVE DO IZLAZA PRI 100% OPT.	2361,0168 Pa
	17,7090823 mmHg
	240,757605 mmWc

Vrijednost pada tlaka od 2361,0168 Pa u ispušnim cijevima pomoćnog motora 3 ukazuje na dobro projektiran sustav s manjim otporima strujanja, ali povremeni gubici mogu nastati zbog taloženja čađe i promjena u temperaturi ispušnih plinova. Ovi faktori mogu uzrokovati povremene oscilacije u protoku.

Preporuka za optimizaciju:

- Redovito čišćenje cijevi kako bi se spriječilo taloženje čađe.
- Uvođenje izolacijskih materijala za stabilizaciju temperature ispušnih plinova.

3.10.5 Pad tlaka na ispušnim cijevima pomoćnog motora 4

GUBITAK TLAKA U ISPUŠNIM CIJEVIMA OD GRANANJA DO IZLAZA S PROČIŠĆIVAČEM

ULAZ

PODACI O ISPUŠNIM PLINOVIMA

ZA 90% OPTEREĆENJE MOTORA

t=	350	°C
ρ =	0,575094438	kg/m ³
v=	0,00004213	M ² s ⁻¹
η =	2,42287E-05	Pa s
SG=	0,000575094	

DN800

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE			
unutarnji promjer	d=	804	mm		
presjek	A=	0,507693939	m ²		
protok kroz cijev	Q=	52144,47925	m ³ /h	m=	29988 kg/h
brzina protoka	v=	28,53013686	m/s		
duljina cijevi		14,253			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
SUM DN 2100	14,253	m			
	Re=	544463,0913	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm	ϵ/D =	0,00018657
	f=	0,016	moody graf	19078	
	L=	14,253			
	ξ =	0,283641791			

$\Delta p = 66,3876202$ Pa

DN2800

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE			
unutarnji promjer	d=	2804	mm		
presjek	A=	6,175127086	m ²		
protok kroz cijev	Q=	446639,6872	m ³ /h	m=	256860 kg/h
brzina protoka	v=	20,09134032	m/s		
duljina cijevi		4,85			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					
SUM DN 2800	4,85	m			
	Re=	1337197,205	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm	ϵ/D =	5,3495E-05
	f=	0,012	moody graf	19078	
	L=	4,85			

$$\xi = 0,020756063$$

$$\Delta p = 2,40919508 \text{ Pa}$$

DN2800

SADRŽAJ	VRIJEDNOST	JEDINICE			
unutarnji promjer	d=	2804	mm		
presjek	A=	6,175127086	m ²		
protok kroz cijev	Q=	446639,6872	m ³ /h	m=	256860 kg/h
brzina protoka	v=	20,09134032	m/s		
duljina cijevi		6,135			
ekspanzijska cijev		0			
3*duljine cijevi					

SUM DN 2300	6,135	m			
	Re=	1337197,205	=	turbolentno	
	ϵ =	0,15	mm	$\epsilon/D=$	5,3495E-05
			moody		
	f=	0,012	graf	19078	
	L=	6,135			
	ξ =	0,02625535			

$$\Delta p = 3,04750759 \text{ Pa}$$

PROMJER	TIP	KV	PAD TLAKA
DN800	T KOMAD OŠTRIH RUBOVA		
DN800	PCS	1	$K=1$ $\Delta p = 116,071873 \text{ Pa}$
DN800	FLEKSIBILNI MJEH		
DN600/800	PCS	1	$K=1$ $\Delta p = 116,071873 \text{ Pa}$
DN800	EKSPANZIJSKI ELEMENT		
DN800	PCS	1	$K=0,03$ $\Delta p = 3,48215618 \text{ Pa}$
DN800	KOLJENO 137 1 SEG R=D		
DN800	PCS	1	$K=0,31$ $\Delta p = 35,9822806 \text{ Pa}$
DN800	KOLJENO 90 3 SEG R=D		
DN800	PCS	1	$K=0,37$ $\Delta p = 42,9465929 \text{ Pa}$
DN800	KOLJENO 150 1 SEG R=D		
DN800	PCS	3	$K=0,16$ $\Delta p = 55,714499 \text{ Pa}$
DN800	KOLJENO 95 3 SEG R=D		
DN800	PCS	1	$K=1,05$ $\Delta p = 121,875466 \text{ Pa}$
DN800	KOLJENO 154 1 SEG R=D		
DN800	PCS	1	$K=0,128$ $\Delta p = 14,8571997 \text{ Pa}$
DN800	ISPUŠNI VENTIL OTVORENOG PADA TLAKA		
GA2533-01 rev B		mbar	3,63 $\Delta p = 363 \text{ Pa}$
DN2800	SCRUBBER		

$$\Delta p = 150 \text{ mmwc} \quad \text{dobiveno od proizvođača}$$

$$\Delta p = 1470,99204 \text{ Pa}$$

UKUPNI PAD TLAKA NA ISPUŠNIM CIJEVIMA POMOĆNOG MOTORA 4

UKUPNI GUBITAK TLAKA U ISPUŠNOJ CIJEVI OD RAČVE DO IZLAZA PRI 100% OPT.	2412,8383 Pa
	18,0977756 mmHg
	246,041947 mmWc

Proračun pada tlaka u cijevima pomoćnog motora 4 pokazao je vrijednost od 2412,8383 Pa, što je nešto više od očekivanog zbog složenosti geometrije sustava i dodatnih lokalnih otpora na ventilima. Ova pojava zahtijeva dodatnu optimizaciju.

Preporuka za optimizaciju:

- Redizajn ventila kako bi se smanjili lokalni otpori.
- Uvođenje aerodinamičkih elemenata u konstrukciju cijevi radi boljeg strujanja plinova.

3.11 Postoci smanjenja emisija u more i zrak

3.11.1 Emisije u zrak

Sadržaj sumpora u gorivu smanjuje se s 3,5% na 0,1% uz učinkovitost smanjenja SO_x-a od 97,15% korištenjem sustava za čišćenje ispušnih plinova (Scrubber). Učinkovitost Scrubbera u smanjenju emisija SO_x-a izravno je povezana s vrstom goriva koja se koristi i uvjetima rada broda, da spomenemo samo neke. Brodovi koji koriste HFO (teško bunker gorivo) sa sadržajem sumpora od 2,6% sa Scrubberima obično emitiraju 31% manje SO₂ od brodova koji koriste MGO (lako brodsko gorivo) sa sadržajem sumpora od 0,07%. Emisije čestica su gotovo 70% veće kada se koristi HFO sa Scrubberom umjesto MGO. Emisija crnog ugljika povećava se za 81% kada se koristi HFO sa Scrubberom u srednje brzim motorima umjesto MGO. (Moldanová et al., 2020.) Dakle, kada je riječ o smanjenju ukupnih emisija onečišćenja zraka, Scrubberi nisu tako učinkoviti kao korištenje MGO-a ili ULSF-a (ekstra lakog broskog goriva), međutim Scrubberi su uspješno smanjili emisije sumpora, dušika i čestica. Osim toga, korištenje HFO-a sa Scrubberom rezultira 1,1% višim emisijama CO₂ tijekom cijelog životnog ciklusa u usporedbi s MGO-om, unatoč tome što HFO ima niže ozbiljne emisije. Uspoređujući emisije ugljičnog dioksida (CO₂) između HFO-a sa Scrubberom i MGO-a, emisije su 4% veće kod HFO-a. (Resources, 2020)

3.11.2 Emisije u more

Iscjedak iz Scrubbera u pokretnju otvorenog kruga utječe na morske organizme. Općenito, morski organizmi su oštećeni prevelikim ili premalim intenzivnim promjenama pH razine vode. Na primjer školjkaši su oštećeni kada je pH previše kiseo ili više alkalno, što negativno narušava ravnotežu morskih ekosustava. Metali poput nikla, olova i bakra talože se u moru kao dio iscjetka. Voda za čišćenje dobiva energiju iz vrućih ispušnih plinova što rezultira povećanjem temperature, ta topla voda se zatim ispušta u more uzrokujući termalni šok organizmima kao i utječući na termalnu ravnotežu mora. Dugotrajno ispuštanje Scrubber vode u more tijekom vremena može uzrokovati mutacije DNA u morskim organizmima kao i njihove ponašanje. Ova produljena izloženost ostavit će osjetljive vrste pod stresom ili oštećene. (Moldanová et al., 2020.)

Praćenje temperature i pH razine ispušne vode iz Scrubbera je bitno kako bi se smanjio negativan utjecaj na morski ekosustav. Stoga IMO (Međunarodna Pomorska Agencija)

smjernice postavljaju pH granicu od 6,5 za ispušnu more i ne smije premašiti temperaturu od 60°C. (Moldanová et al., 2020.)

Zamućenost se odnosi na to koliko je voda bistra. Zamućenost ispušne vode iz Scrubbera je vrlo visoka zbog pranja pepela iz ispušnih plinova i suspendiranih sedimenata ili čestica. Visoka zamućenost u moru ometa sposobnost morskih biljaka za fotosintezu jer smanjuje ili blokira količinu svjetla koja dopire do morske vode, te utječe na vid nekih vrsta. Prisustvo sedimenata ispušnih plinova u vodi može začepiti škrge riba, što utječe na njihovo disanje. Razine zamućenosti trebaju se pratiti i kontrolirati kako bi se izbjegli negativni učinci na morske organizme. Prema IMO-u, zamućenost ispušne vode ne bi trebala biti više od 25 FNUs (jedinica mjerenja zamućenosti) veća od zamućenosti ulazne vode. (Comer, 2020.)

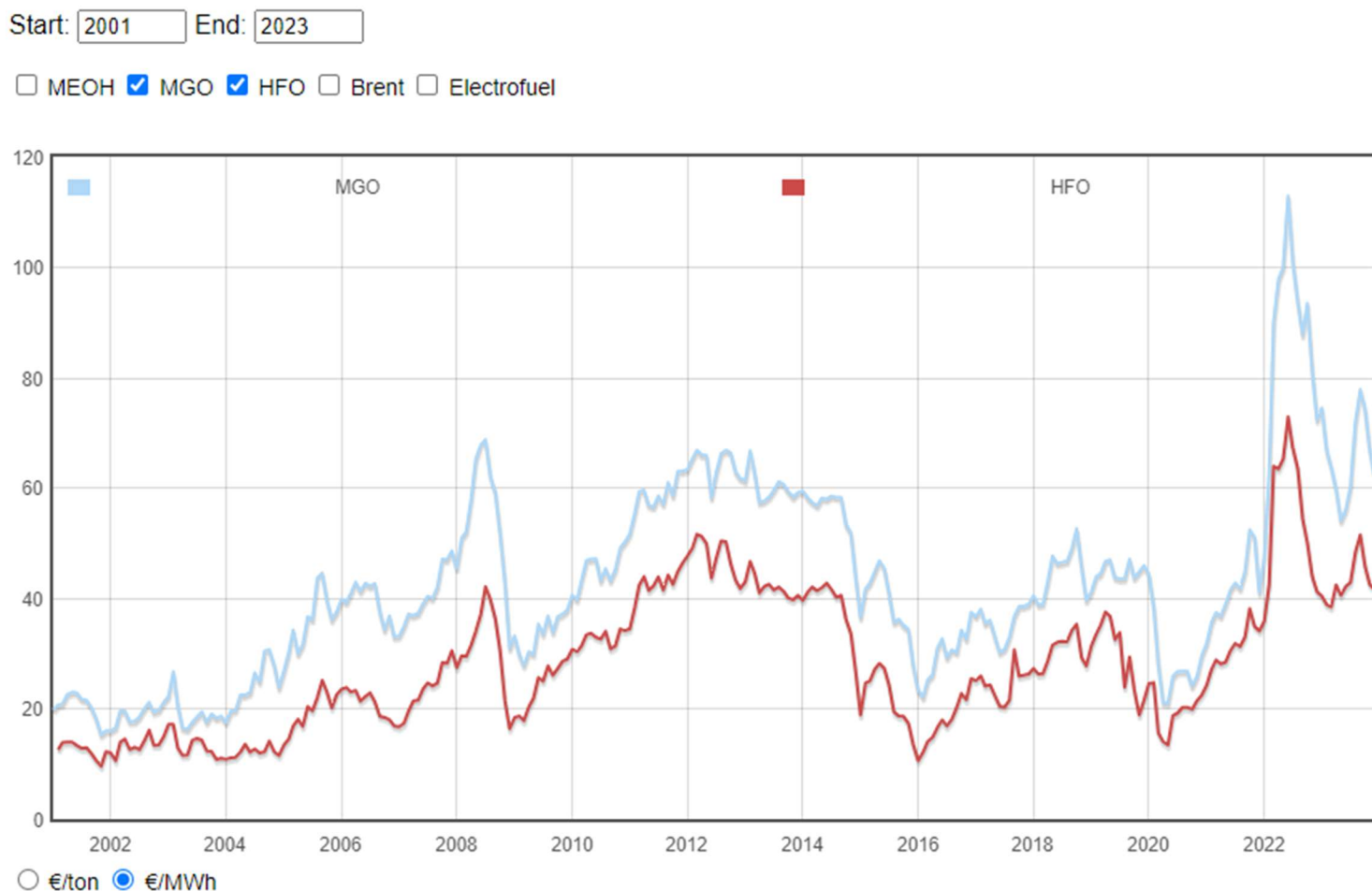
Polciklički aromatski ugljikovodici (PAH) u vodi za pranje iz Scrubbera su štetni za morski život, a zagađivači su poznati po svom opasnom potencijalu. PAH se akumuliraju u sedimentima nakon što se ispuštaju u ocean, što ima brojne negativne posljedice. Izloženost višim koncentracijama PAH, morski organizmi će pretrpjeti negativne posljedice što rezultira oštećenjem DNA, reproduktivnim problemima i razvojnim abnormalnostima. Nadalje, PAH imaju sposobnost bioakumulacije u prehrambenom lancu, ugrožavajući ribe i morske sisavce. (Osipova et al., 2021.)

Kako bi se smanjilo ispuštanje PAH i njihov učinak na morske ekosustave, potrebno je strogo pridržavanje ekoloških propisa, učinkovito praćenje i odgovarajuće tretiranje vode za pranje iz Scrubbera. (Osipova et al., 2021.) Praćenjem pH, temperature, PAH, zamućenosti i drugih parametara, jedinica za praćenje vode ugrađena u Scrubbere jamči usklađenost i dosljednu kvalitetu tretirane vode. Plovila koja krše ograničenja ispuštanja vode za pranje iz Scrubbera mogu biti kažnjena ili im može biti zabranjen pristup lukama. (Resources, 2020)

3.12 Cjenovna usporedba MGO i HFO

Kako se navodi u naslovu na kraju se sve svodi na uloženo/dobiveno te bi svaki vlasnik broda trebao odabrati nešto što može dobiti za manju cijenu, ali da istovremeno uz određeni sustav stvori uvjete koji će po zakonskoj regulativi biti prihvaćeni da se mogu koristiti. Slijedeća slika

(Slika 19) pokazuje kretanje cijena u E/MWh MGO je srednje teško gorivo koje se ne treba koristiti sa Scrubber sistemima dok je HFO teško gorivo koje se mora koristiti.



Slika 19. Cjenovna usporedba MGO i HFO (Marine Methanol, 2024)

3.13 Povrat investicije

Da bismo ilustrirali važnost razlike u cijenama, pretpostavljamo da košta 6 milijuna USD da se ugrade Scrubber na VLCC. Životni vijek Scrubera je 15 godina. U donjoj tablici prikazujemo četiri scenarija gdje se cijene LSFO i HSFO (i razlika između njih) razlikuju. Kada je razlika u cijeni 20 posto (scenarij 1) i cijena HSFO je relativno visoka, razdoblje povrata ulaganja u Scrubber je samo 3,3 godine. Ako cijena HSFO padne, ali razlika u cijeni ostane ista (20 posto), povrat ulaganja se produžuje na 4,2 godine. Ako razlika u cijeni naraste na 50 posto, povrat se smanjuje na 1,3 godine (scenarij 3); a ako nema razlike u cijeni između HSFO i LSFO, tada nema cjenovne prednosti i stoga nema povrata ulaganja (scenarij 4).

	Scenario 1: Base case	Scenario 2: Lower conventional fuel cost	Scenario 3: Higher low- sulphur fuel cost	Scenario 4: Lower low- sulphur fuel cost
Scrubber installation cost	\$6.000.000	\$6.000.000	\$6.000.000	\$6.000.000
Bunker fuel cost per ton	\$450	\$350	\$450	\$450
Low-sulphur fuel cost per ton	\$540	\$420	\$675	\$450
Difference	\$90 (20%)	\$70 (20%)	\$225 (50%)	\$0 (0%)
Cost saving (lifecycle/interval of 15 years)	\$27.216.000	\$21.168.000	\$68.040.000	\$0
Annual saving	\$1.814.400	\$1.411.200	\$4.536.000	\$0
Payback	3.3 years	4.2 years	1.3 years	0

Slika 20. Tablica Povrata investicije (Marine Methanol, 2024)

4. Budućnost Scrubber sustava

S obzirom na sve strože ekološke propise i potrebu za smanjenjem emisija u pomorskoj industriji, razvoj novih tehnologija u sustavima za pročišćavanje ispušnih plinova ("scrubberima") postaje sve važniji. Neke od najnovijih tehnologija koje bi mogle biti implementirane u budućnosti uključuju:

4.1.1 Sustavi za hvatanje i skladištenje ugljika (CCS)

Tehnologija zadržavanja ugljika na brodovima omogućuje hvatanje emisija CO₂ iz ispušnih plinova brodskih motora i njihovo pohranjivanje na brodu do dolaska u luku, gdje se CO₂ dalje skladišti ili koristi za industrijske svrhe. Ova tehnologija može smanjiti emisije CO₂ za 70-90%, što je čini ključnim prijelaznim rješenjem dok se alternativna goriva ne usavrše.

4.1.2 Napredni materijali i dizajn scrubbera

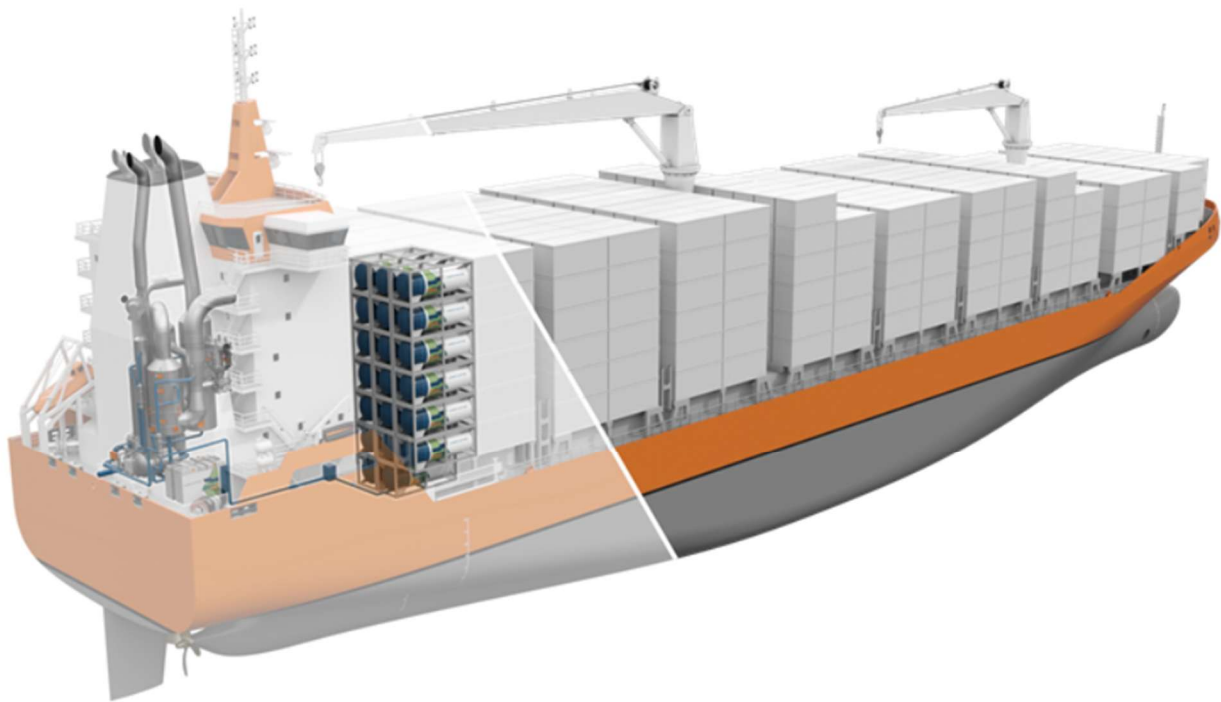
Primjena novih materijala otpornih na koroziju i visoke temperature može poboljšati trajnost i učinkovitost scrubber sustava. Upotreba kompozitnih materijala i naprednih legura može smanjiti težinu sustava, što doprinosi manjoj potrošnji goriva i emisiji CO₂.

4.1.3 Automatizacija i digitalizacija

Uvođenje senzora i sustava za praćenje u stvarnom vremenu omogućuje optimizaciju rada scrubbera, prilagođavajući ga trenutnim uvjetima rada broda. Digitalizacija također olakšava održavanje prediktivnim analizama, smanjujući neplanirane zastoje i troškove.

4.2 Krićka analiza

Iako ove tehnologije nude znaćajna poboljšanja, njihova implementacija suoćava se s izazovima. Integracija CCS tehnologije zahtijeva znaćajna početna ulaganja i prilagodbu postojećih brodova. Nadalje, učinkovitost CCS tehnologije još uvijek je predmet istraživanja, s trenutnim stopama hvatanja CO₂ do 70%, a komercijalna održivost tek treba biti dokazana. Automatizacija i digitalizacija donose dodatne složenosti u upravljanju i održavanju sustava, zahtijevajući dodatnu obuku posade i prilagodbu operativnih procedura. Također, upotreba novih materijala može povećati troškove proizvodnje i zahtijevati prilagodbu postojećih proizvodnih procesa.



Slika 21. Prikaz CSS sustava skladištenja (Wartsila, 2025)

Tehnološka grupa Wärtsilä primila je svoju prvu narudžbu za sustave za pročišćavanje plinova spremne za hvatanje i skladištenje ugljika – CCS-Ready scrubbers – objavljeno je na stranicama tvrtke.

Četiri kontejnerska broda kapaciteta 8.200 T, koji se grade u neimenovanom brodogradilištu u Aziji, bit će opremljena Wärtsilä CCS-Ready 35MW sustavima za pročišćavanje plinova u otvorenom krugu.

Ovi sustavi nazivaju se CCS-Ready jer će, kao dio njihove instalacije, Wärtsilä provesti dodatne dizajnerske i inženjerske radove kako bi osigurala da su buduće nadogradnje za puni CCS sustav na brodovima već uzete u obzir tijekom faze gradnje novih plovila.

Wärtsilä će poduzeti mjere kako bi osigurala dovoljan prostor za buduću instalaciju CCS sustava, ugraditi rješenja za smanjenje opterećenja u stanju mirovanja i optimizaciju korištenja resursa te pripremiti sustav upravljanja i automatizacije u skladu s tim. CCS-Ready sustavi također će biti dizajnirani za integraciju s filtrom za čestice (Particulate Matter filter).

Posjedovanje rješenja CCS-Ready osigurava da neimenovani vlasnik broda danas zadovoljava regulatorne zahtjeve za emisije sumpornih oksida (SO_x), dok istovremeno omogućuje jednostavnu buduću primjenu CCS sustava.

Instalacijom sustava za pročišćavanje plinova koji su dizajnirani s prostorom i mogućnošću dodavanja CCS jedinice, Wärtsilä omogućava vlasnicima brodova da osiguraju dugoročnu vrijednost svoje postojeće flote, dok ostaju konkurentni i u skladu s regulativama.

Wärtsilä trenutno testira svoj CCS sustav s postotkom hvatanja od 70%, a pilot instalacija predviđena je unutar sljedećih dvanaest mjeseci. (Wartsila, 2025)

5. Zaključak

Ispušni sustavi motora s unutarnjim izgaranjem igraju ključnu ulogu u učinkovitosti i održivosti modernog pomorskog sektora. Osobito se to odnosi na dvotaktne sporohodne dizelske motore, koji predstavljaju srž pogonskih sustava za teretne brodove i plovila dugog dometa. Ovaj rad fokusira se na analizu njihovih tehničkih aspekata, ekoloških utjecaja i regulacijskih zahtjeva, te detaljno razmatra Scrubber sustave kao rješenje za smanjenje štetnih emisija poput sumpornih oksida (SO_x), dušikovih oksida (NO_x) i lebdećih čestica (PM). Rad pruža detaljan tehnički pregled Scrubber sustava, uključujući njihove ključne komponente, način rada i podjelu na mokre, suhe i elektrostatičke sustave. Mokri Scrubber, primjerice, koriste morsku vodu za ispiranje ispušnih plinova, učinkovito uklanjajući SO_x s učinkovitosti od preko 90%, dok suhi Scrubber koriste alkalne sorbente za neutralizaciju kiselih plinova. Elektrostatički precipitatori, iako učinkoviti u uklanjanju lebdećih čestica, ne mogu smanjiti emisije plinova poput NO_x i SO_x, što ih čini manje prikladnima za ispunjavanje svih regulatornih zahtjeva.

Pomorski promet odgovoran je za približno 60% ukupnih emisija sumpornih oksida iz globalnog transporta, dok 40% emisija dušikovih oksida dolazi iz istog sektora. Ove emisije predstavljaju ozbiljan problem u obalnim regijama, pridonoseći zagađenju zraka, smogu i stvaranju kiselih kiša. Prepoznavši ovu prijetnju, Međunarodna pomorska organizacija (IMO) donijela je IMO 2020 regulativu, kojom se ograničava sadržaj sumpora u gorivima na 0,5% globalno, odnosno 0,1% u područjima kontrole emisija (ECA). Kao odgovor na ove zahtjeve, vlasnici brodova sve češće implementiraju sustave za pročišćavanje ispušnih plinova (Scrubber) koji omogućuju nastavak korištenja jeftinijih goriva s višim udjelom sumpora, uz smanjenje emisija.

Na temelju analiza, ključno je smanjiti gubitke u sustavu optimizacijom geometrije ispušnih cijevi, redovitim održavanjem, te korištenjem naprednih materijala za smanjenje trenja. Specifične mjere uključuju povećanje promjera cijevi, redizajn spojeva, te implementaciju periodičnog čišćenja za smanjenje nakupljanja čađe i čestica. U slučaju pomoćnih motora 3 i 4, dodatni naglasak treba staviti na stabilizaciju temperature i smanjenje lokalnih otpora. Uvođenje sustava za praćenje tlaka u stvarnom vremenu omogućilo bi precizniju kontrolu rada ispušnog sustava i dodatno povećanje učinkovitosti. Ove preporuke pridonose smanjenju energetske gubitaka i poboljšanju ekološke održivosti brodskih motora.

Financijski aspekti primjene Scrubbera detaljno su obrađeni kroz usporedbu troškova goriva s niskim sadržajem sumpora (MGO) i teškog loživog ulja (HFO). Unatoč visokim početnim investicijama, povrat ulaganja u Scrubber sustave može se ostvariti u roku od 1,5 do 3 godine, ovisno o veličini broda i intenzitetu korištenja. Scrubber sustavi omogućuju brodarima dugoročne uštede, zadržavajući pristup jeftinijem gorivu dok istovremeno ispunjavaju sve ekološke norme.

Uz tehničke i financijske aspekte, rad se bavi i pravnim izazovima. Primjerice, određene zemlje, poput Belgije, Kine i Sjedinjenih Američkih Država, imaju stroge regulative koje ograničavaju ispuštanje otpadnih voda iz Scrubbera u obalnim područjima. Takva ograničenja dodatno potiču razvoj zatvorenih i hibridnih sustava, koji smanjuju rizik od ekoloških incidenata recirkulacijom ispirne vode unutar sustava.

Zaključno, rad pokazuje da Scrubber sustavi predstavljaju ključnu tehnologiju u prijelazu pomorskog sektora prema održivijem poslovanju. Oni ne samo da zadovoljavaju regulativne zahtjeve već i doprinose očuvanju okoliša smanjenjem emisija štetnih tvari. Međutim, njihova implementacija zahtijeva stručno planiranje, razumijevanje tehničkih ograničenja i usklađivanje s lokalnim zakonodavstvom. U budućnosti, daljnje inovacije u tehnologiji pročišćavanja plinova bit će ključne za postizanje potpune održivosti u pomorskom sektoru, čime će se osigurati čišći i ekološki prihvatljiviji promet.

Ključne riječi : Scrubber, Ispušni sustavi, Dvotaktni brodski sporohodni motor, Mokri sustav zatvorenog kruga.

LITERATURA:

- [1] -Handbook of air pollution from internal combustion Engines-ERAN SHER
- [2] -THE LEARNING RESOURCE FOR MARINE ENGINEERS- MARKO VLAČIĆ
- [3] -Wikipedia
- [4] -Kegalj I 2015. -Procjena utjecaja lučkih procesa na okoliš formiranjem okolišnog indeksa
- [5] pomorski promet. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024.

Web Stranice:

-<https://www.hempel.com/markets/marine/technical-articles/the-scrubber-dilemma-and-the-impact-of-selecting-the-optimum-hull-coating>

- <https://marinemethanol.com/?nav=meohp>

https://www.researchgate.net/figure/Open-Loop-Scrubber-System_fig7_320868163

https://www.researchgate.net/figure/Closed-Loop-Scrubber-System_fig8_320868163

https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-Scrubber-System_fig9_320868163

<https://www.enciklopedija.hr/clanak/pomorski-promet>

<https://www.wartsila.com/media/news/08-03-2023-wartsila-to-deliver-its-first-ccs-ready-scrubber-systems-3236385>

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Dvotaktni benzinski motor</i>	6
<i>Slika 2. Prvi takt rada 2T motora</i>	7
<i>Slika 3. Drugi takt rada 2T motora</i>	8
<i>Slika 4. Treći stupanj hoda 2T motora</i>	9
<i>Slika 5. Fazni dijagram motora</i>	10
<i>Slika 6. 2T dizel stapajni motor</i>	11
<i>Slika 7. Opis sustava goriva na brodu</i>	12
<i>Slika 8. Pumpa goriva i injektori</i>	13
<i>Slika 9. Ventil za kontrolu tlaka</i>	14
<i>Slika 10. Grafikon emisije SO₂ u EU 27 između 2000. i 2030. godine (u tisućama tona godišnje)</i>	20
<i>Slika 11. Grafikon emisije NO_x u EU 27 između 2000. i 2030. godine (u tisućama tona godišnje)</i>	21
<i>Slika 12 Grafikon emisije SO₂ s kopna u odnosu na pomorski promet (2000-2030)</i>	22
<i>Slika 13. Grafikon emisije NO_x s kopna u odnosu na pomorski promet (2000-2030)</i>	23
<i>Slika 14. Scrubber sustav otvorenog kruga</i>	31
<i>Slika 15. Scrubber sustav zatvorenog kruga</i>	33
<i>Slika 16. Hibridni scrubber sustav</i>	35
<i>Slika 17. Sustav SCRUBBERA-prednji dio</i>	37
<i>Slika 18. Sustav SCRUBBERA-stražnji dio</i>	38
<i>Slika 19. Cjenovna usporedba MGO i HFO</i>	57
<i>Slika 20. Tablica Povrata investicije</i>	58
<i>Slika 21. Prikaz CSS sustava skladištenja</i>	60