

Sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova

Verbanac, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:270470>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

MARTIN VERBANAC

**SPRJEČAVANJE ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE S
POMORSKIH BRODOVA**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**SPRJEČAVANJE ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE S
POMORSKIH BRODOVA
PREVENTION OF ATMOSPHERIC POLLUTION FROM
NAVAL SHIPS**

**ZAVRŠNI RAD
BACHELOR THESIS**

Kolegij: Zaštita mora i morskog okoliša

Mentor: dr. sc. Radoslav Radonja, izv. prof.

Student: Martin Verbanac

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112078063

Rijeka, studeni 2024.

Student: Martin Verbanac

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112078063

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom
Sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova

izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Radoslava Radonje.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



(potpis)

Martin Verbanac

Student: Martin Verbanac

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112078063

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student



(potpis)

Martin Verbanac

SAŽETAK

Rad se bavi analizom i istraživanjem postojećih mjera i strategija za sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova. Proučavaju se primarni i sekundarni izvori onečišćenja, uključujući emisije dušikovih oksida (NO_x), sumporovih oksida (SO_x), čestica i stakleničkih plinova, te se razmatraju tehničke i regulativne mjere za smanjenje tih emisija. Ističe se značaj međunarodnih sporazuma kao što je MARPOL konvencija i njezin prilog VI. Ovi uvidi naglašavaju potrebu za daljnjim razvojem i implementacijom inovacija kako bi se postiglo značajno smanjenje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova.

Ključne riječi: onečišćenje atmosfere, pomorski brodovi, emisije, regulative, tehnologije, MARPOL, prilog VI.

SUMMARY

This paper examines the existing measures and strategies for preventing atmospheric pollution from maritime ships. It explores primary and secondary sources of pollution, including emissions of nitrogen oxides (NO_x), sulphur oxides (SO_x), particulate matter, and greenhouse gases, and evaluates both technical and regulatory measures for reducing these emissions. The significance of international agreements such as the MARPOL Convention and Annex VI. These insights emphasize the need for further development and application of innovations to achieve a substantial reduction in atmospheric pollution from maritime vessels.

Keywords: atmospheric pollution, maritime vessels, emissions, regulations, technologies, MARPOL, Annex VI.

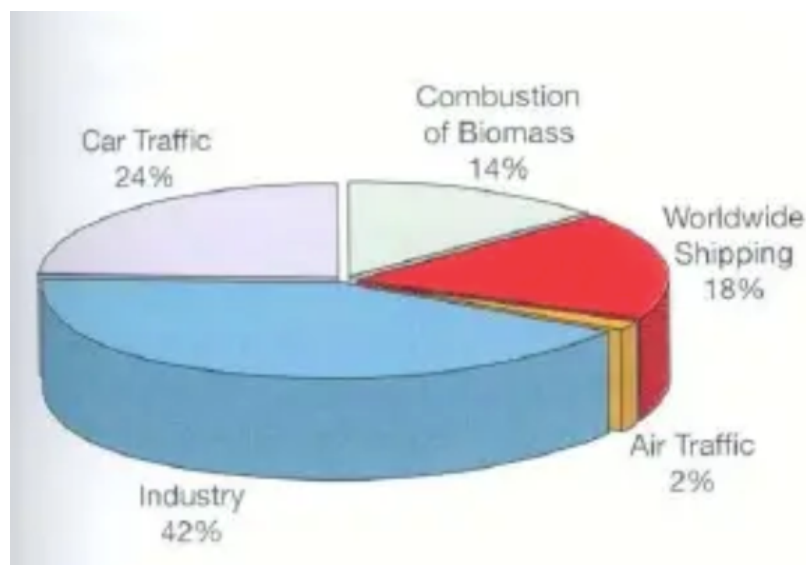
SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	I
1. UVOD	1
2. IZVORI ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE.....	3
2.1. Emisije ispušnih plinova	5
2.2. Primarni izvori onečišćenja s pomorskih brodova.....	6
2.2.1. Sumporovi oksidi.....	6
2.2.2. Emisije dušikovih oksida.....	7
2.3. Sekundarni izvori onečišćenja s pomorskih brodova.....	9
3. METODE ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE.....	12
3.1. Tehnološke metode	12
3.1.1. Sustavi za ispiranje ispušnih plinova – „skraber“.....	13
3.1.2. Selektivna katalitička redukcija.....	14
3.1.3. Sustavi za recirkulaciju ispušnih plinova.....	16
3.1.4. Sustavi za filtriranje čestica.....	18
3.2. Upravljanje gorivom i motorom	19
3.3. Alternativne tehnologije.....	20
4. LEGISLATIVNI ZAHTJEVI ZA SPRJEČAVANJE ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE S BRODOVA.....	23
4.1. MARPOL konvencija.....	23
4.2. PRILOG VI KONVENCIJE	26
5. BUDUĆNOST I DALJNJE MOGUĆNOSTI RAZVOJA ISTRAŽIVANJA.....	30
LITERATURA:.....	36
POPIS SLIKA:	38

1. UVOD

U završnom radu pisat ću o problemu onečišćenja atmosfere, rješavanju tog problema te pravilima i konvencijama vezanim za onečišćenje atmosfere s pomorskih brodova. Kako je opće poznato da je problem onečišćenja atmosfere aktualna stvar koja nas se svih tiče tako da je ona uglavnom posljedica djelovanja samog čovjeka.

Počevši s 1. industrijskom revolucijom te daljnjim napretkom čovjeka odnosno prometa, izgradnje te proizvodnje, čovjek je koristio Zemljine resurse kojima je jedan od nus-produkta onečišćenja atmosfere. S time se postepeno javila i svijest da treba voditi računa o onečišćenju Zemlje kako ne bi uništili planet gdje živimo te da ga mogu naslijediti i buduće generacije. Utjecaja pomorskih brodova na onečišćenje atmosfere možemo vidjeti sa službenih stranica IMO-a, [26]. 2020. provedeno je istraživanje [27], koje govori o povećanju onečišćenja emisijama CO₂ (slika 1). Od 2012. godine sa 701 milijuna tona, povećana je emisija na 740 milijuna tona u 2018. te možemo vidjeti da brodovi sudjeluju s 2,5 % u globalnim emisijama.



Slika 1. Uzroci onečišćenja, [6]

Cilj ovog istraživanja je identificirati učinkovitost postojećih mjera za sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova te predložiti potencijalne poboljšanja i inovativne pristupe koji bi mogli doprinijeti smanjenju emisija. Rad će se baviti analiziranjem regulative i rješenja koja postoje na globalnoj razini. Istraživanje teži razumijevanju kako se regulative i tehnologije mogu integrirati kako bi se postigla održiva i ekološki prihvatljiva pomorska industrija.

Također, bitno je utvrditi postoje li nedostaci u postojećem sustavu te kako se ti nedostaci mogu adresirati kroz integraciju novih tehnologija, strožih regulativa i promjena u operativnim praksama.

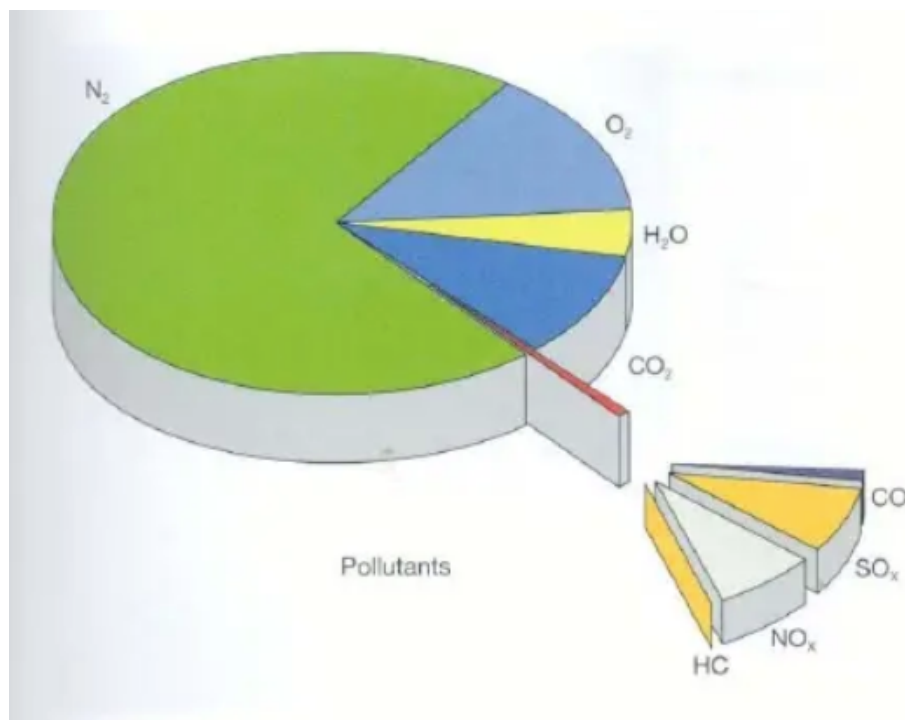
2. IZVORI ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE

Onečišćenje atmosfere predstavlja jedan od izazova s kojima se suočava suvremeno društvo, a razumijevanje izvora tog onečišćenja ključno je za razvoj i implementaciju učinkovitih strategija za njegovo smanjenje. U teoriji i literaturi, onečišćenje zraka definira se kao odstupanje od njegova normalnoga sastava zbog prisutnosti stranih tvari (onečišćivača) u koncentraciji u kojoj one u kraćem vremenu ne uzrokuju izravnu štetu za zdravlje ljudi ili drugih živih organizama. [1]

Potrebno je razmotriti pojam "normalni sastav zraka". Atmosfera se sastoji od mješavine plinova, prvenstveno dušika (78%), kisika (21%), argona (0,93%) i ugljikovog dioksida (0,04%), zbroj svih volumnih udjela mora biti je 1 (ili 100%), uz prisutnost tragova drugih plinova i čestica, [2]. "Normalan" sastav zraka podrazumijeva prirodnu ravnotežu tih elemenata, koja je održavana kroz milijune godina evolucije Zemlje. Upravo je ovo ključni element, koji je omogućio razvijanje života na zemlji. Međutim, zbog ljudskih aktivnosti, ta se ravnoteža sve više narušava, dovodeći do povećane koncentracije određenih plinova, poput ugljikovog dioksida i metana, koji imaju značajan utjecaj na klimatske promjene, [2]. Također, uvode se nove, sintetičke tvari koje ranije nisu bile prisutne u atmosferi, što dodatno komplicira pojam "normalnog" sastava.

Onečišćivači zraka su brojni i raznoliki. Postoji nekoliko različitih kriterija važnosti prema kojima su izdvojeni ključni onečišćivači zraka, s obzirom na okolnosti iz kojih nastaju i štetne posljedice koje izazivaju. Određeni autori smatraju da su glavni onečišćivači zraka aerosoli i lebdeće čestice, poput dima, čađe, prašine, čestica teških metala i njihovih spojeva, ulja, soli, te oksida ugljika, sumpora i dušika. Postoji razlog zašto se ove tvari smatraju glavnim onečišćivačima zraka. Naime, one u velikoj mjeri ugrožavaju ljudsko zdravlje. Osim navedenih, tu su i razni ugljikovodici, poput metana, butana i benzena, te fotokemijski produkti, kao što je ozon u nižim slojevima atmosfere. Uz to, zrak može biti onečišćen drugim anorganskim spojevima poput sumporne i dušične kiseline, sumporovodika i amonijaka, kao i organskim spojevima, uključujući organske kiseline i alkohole, te radioaktivnim tvarima. Mnogi od ovih onečišćivača potječu iz prirodnih izvora, poput vulkanskih erupcija i bioloških procesa organizama, [3]. Pored navedenih izvora, koji se ističu u literaturi, trebalo bi napraviti osvrt i na ključne onečišćivače koji su kao takvi određeni od strane relevantnog organa, koji se bavi standardizacijom. U ovom slučaju, to je Europska agencija za okoliš. Kao glavne izvore onečišćenja zraka Europska agencija za okoliš navodi dušikove okside (NO_x), ne-metanske

hlapljive organske spojeve (engl. Non-Methane Volatile Organic Compounds – u daljnjem tekstu NMVOC), sumporov dioksid (SO_2), amonijak (NH_3) i fine čestice ($\text{PM}_{2.5}$) [4]. Ovi onečišćivači, iako se često pojavljuju u niskim koncentracijama, imaju kumulativne i značajne negativne učinke na ljudsko zdravlje i okoliš. Ipak, njihov utjecaj nije zanemariv.



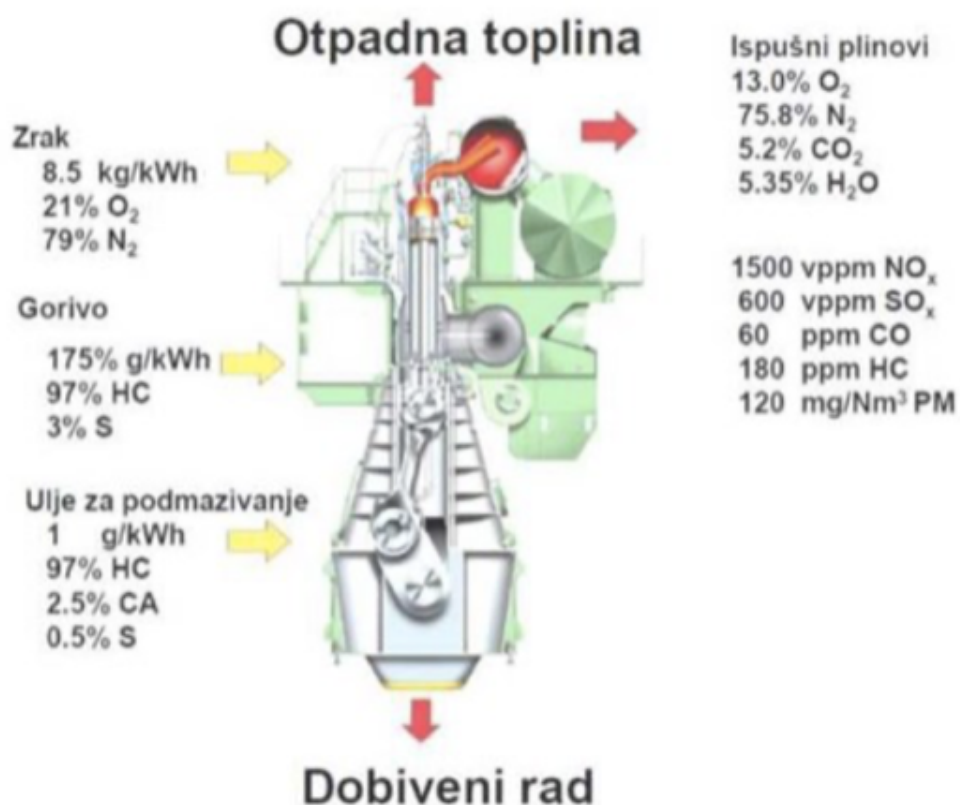
Slika 2. Glavni onečišćivači zraka, [6]

Razlog zašto su ove tvari navedene kao glavni izvori onečišćenja zraka jesu posljedice do kojih one dovode. Kako je u pitanju složena pojava, na ovom mjestu u radu osvrćemo se na fundamentalne posljedice koje u najvećoj mjeri ugrožavaju okoliš. Ključne posljedice, koje nastaju uslijed djelovanja ovih čestica u zraku navodi se: staklenički učinak, ozonske rupe, fotokemijski i industrijski smog, te kisele kiše [4]. Posebno su štetne posljedice kiselih kiša.

Ono što društvo prihvaća kao "prihvatljivu" razinu onečišćenja često je određeno političkim, ekonomskim i društvenim čimbenicima, a ne samo znanstvenim. Ove vrijednosti mogu varirati između različitih regija i država, ovisno o lokalnim zakonima, ekonomskim prioritetima i razini svijesti o okolišnim pitanjima.

2.1. Emisije ispušnih plinova

Kvaliteta goriva koje se koristi ima značajan utjecaj na sastav emisije ispušnih plinova. Također, brzina vrtnje motora je jedan od ključnih faktora koji utječe na količinu dušikovih oksida (NO_x) u ispušnim plinovima. Na slici 3. prikazan je tipičan sastav emisije ispušnih plinova kod dvotaktnog sporookretnog dizel motora [7].



Slika 3. Sastav emisije ispušnih plinova sporookretnog dvotaktnog dizelskog motora, [8]

Emisija SO_x nastaje uslijed prisustva sumpora u gorivu, dok CO zavisi od temperature izgaranja i količine prisutnog zraka. CO₂ se formira tijekom procesa izgaranja. Pored toga, emisije HC i čestica čađe su povezane s neizgorjelim gorivom i mazivima, kao i s konstrukcijom motora. Emisija NO_x ovisi o graničnim temperaturama izgaranja, trajanja samog procesa izgaranja i sadržaja kisika [7].

2.2. Primarni izvori onečišćenja s pomorskih brodova

Primarni izvori onečišćenja s pomorskih brodova značajan su dio ukupnog atmosferskog onečišćenja, te imaju dubok utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi. Ovaj dio rada detaljno istražuju glavne izvore emisija štetnih tvari s pomorskih brodova, uključujući izgaranje goriva, isparavanje goriva i nusproizvode iz postrojenja za obradu otpadnih voda.

Glavni plinovi koji dolaze s broda u zrak su: kisik (O₂), dušik (N₂), ugljikov dioksid (CO₂), vodena para (H₂O), sumporov dioksid (SO₂) i dušikovi oksidi (NO_x). Iako svi ovi plinovi prirodno postoje u atmosferi, njihova povećana koncentracija zbog ljudskih aktivnosti može dovesti do ozbiljnih ekoloških i zdravstvenih problema. Jedan od najvećih izvora onečišćenja s pomorskih brodova su emisije stakleničkih plinova (engl. Greenhouse Gases - GHG), prvenstveno ugljikov dioksid (CO₂), [5]. Spaljivanje fosilnih goriva, kao što su teška lož ulja i dizel, u brodskim motorima rezultira velikim količinama CO₂, što doprinosi globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama. Brodovi koji koriste teška goriva, zbog visokog sadržaja ugljika, emitiraju značajne količine CO₂, a globalna brodarska industrija čini približno 2,5% ukupnih svjetskih emisija CO₂ [6]. Iako se na prvi pogled ta brojka može činiti relativno niskom, u kontekstu kumulativnog učinka na okoliš i klimu, emisije iz pomorskog sektora imaju značajan utjecaj.

2.2.1. Sumporovi oksidi

Sumporovi oksidi (SO_x) uključuju sumporov monoksid (SO), sumporov dioksid (SO₂) i sumporov trioksid (SO₃) [8]. Od njih, sumporov trioksid (SO₃) ima veliki afinitet prema vodi. Kada su temperature ispod točke rosišta, SO₃ se spaja s vodom i stvara sumpornu kiselinu (H₂SO₄) prema sljedećoj reakciji [8].:



Sumporna kiselina uzrokuje koroziju u motorima i jedan je od glavnih razloga za kontrolu izgaranja sumpora, uz onečišćenja okoliša.

Prilikom izgaranja goriva koje sadrži elementarni sumpor ili spojeve sumpora, dominantni produkt izgaranja je sumporov dioksid (SO₂). Ovaj SO₂ reagira s kisikom i nastaje sumporov trioksid (SO₃) prema reakciji:



Konverzija sumporovog dioksida (SO_2) u sumporov trioksid (SO_3) ovisi o nekoliko ključnih faktora [3]:

- **Količina kisika:** Kada je omjer kisika iznad stehiometrijske točke, daljnje povećanje kisika ne dovodi do značajnog rasta proizvodnje sumporovog trioksida. Međutim, povećanje kisika unutar raspona od 0 do 1% uzrokuje značajan porast u formiranju SO_3 , dok dodatni porast kisika nema veliki utjecaj na daljnji porast SO_3 .
- **Sadržaj sumpora u gorivu:** Niži sadržaj sumpora u gorivu rezultira manjom količinom sumporovog dioksida (SO_2), ali može povećati konverziju u sumporov trioksid (SO_3). Važno je napomenuti da konverzija SO_2 u SO_3 nije izravno povezana s početnom koncentracijom SO_2 .
- **Katalitičke tvari:** U procesu izgaranja, vanadij pentoksid (V_2O_5) igra ključnu ulogu kao katalizator u oksidaciji SO_2 u SO_3 . Naslage pepela i drugih čestica mogu potaknuti proizvodnju SO_3 , dok njihovo uklanjanje smanjuje konverziju.

Formiranje sumpornih oksida (SO_x) u ispušnim plinovima nastaje oksidacijom sumpora u gorivu, pri čemu se stvaraju sumporov dioksid (SO_2) i sumporov trioksid (SO_3). Količina ovih oksida izravno ovisi o sadržaju sumpora u gorivu. Da bi se smanjila proizvodnja sumporovih oksida, potrebno je smanjiti sadržaj sumpora u gorivu. Međutim, goriva s niskim sadržajem sumpora (engl. Low Sulphur Fuel Oil - LSFO) često su skuplja od standardnih goriva, a postoji i minimalni sadržaj sumpora potreban za očuvanje mazivosti, što može dovesti do povećanog trošenja komponenti poput visokotlačnih pumpi i rasprskaca [3].

Osim smanjenja sadržaja sumpora u gorivu, desumporifikacija ispušnih plinova također se može postići mokrom filtracijom. Ispušni plinovi se najprije hlade u prigušniku do temperature zasićenja, a zatim se sumporovi oksidi (SO_x) neutraliziraju pomoću vezanog kalcija u vapnenom mlijeku, [3]. Iako sumporovi oksidi u ispušnim plinovima mogu uzrokovati koroziju, djelomično su neutralizirani aditivima u cilindarskom ulju. U atmosferi, sumporovi oksidi reagiraju s vlagom stvarajući sumpornu kiselinu (H_2SO_4), koja se potom izlučuje kroz kiselu kišu. [3]

2.2.2. Emisije dušikovih oksida

Dušikovi oksidi (NO_x) obuhvaćaju dušikov monoksid (NO) i dušikov dioksid (NO_2) [9]. Dušikov dioksid (NO_2) je posebno važan zbog svoje uloge u onečišćenju zraka i štetnim učincima na ljudsko zdravlje i okoliš. On se u atmosferi može pretvoriti u dušičnu kiselinu

(HNO₃) koja pridonosi stvaranju kiselih kiša. Ključna kemijska reakcija koja opisuje ovu transformaciju je:



Ova reakcija pokazuje kako NO₂, u prisutnosti vode, može stvoriti kisele spojeve koji uzrokuju koroziju i negativno utječu na ekosustave.

U procesu izgaranja goriva, dušikovi oksidi nastaju reakcijama između dušika i kisika pri visokim temperaturama. Dominantni produkti izgaranja su dušikov monoksid (NO) i dušikov dioksid (NO₂), pri čemu se NO može dalje oksidirati u NO₂ prema reakciji:



Stvaranje dušikovih oksida (NO_x) u ispušnim plinovima ovisi o nekoliko ključnih čimbenika [10]:

- **Temperatura izgaranja:** Visoke temperature u procesima izgaranja pogoduju formiranju dušikovih oksida. Naime, pri većim temperaturama, dušik iz zraka reagira s kisikom kako bi nastali NO i NO₂. Povećanje temperature izgaranja izravno povećava koncentraciju NO_x u ispušnim plinovima.
- **Sadržaj kisika:** Višak kisika može povećati stvaranje NO_x. Ako je količina kisika u plamenu viša od stehiometrijske vrijednosti, nastanak NO_x će biti povećan, jer višak kisika omogućuje dodatne reakcije između dušika i kisika.
- **Vrsta goriva i njegova kvaliteta:** Goriva s različitim kemijskim sastavom mogu utjecati na emisije NO_x. Na primjer, goriva s većim sadržajem dušika doprinose većoj proizvodnji NO_x. Također, goriva koja omogućuju postizanje visoke temperature izgaranja često rezultiraju većim emisijama NO_x.

Da bi se smanjile emisije dušikovih oksida, primjenjuju se različite tehnologije. Jedan od učinkovitih metoda je primjena sustava za selektivnu katalitičku redukciju (SCR), gdje se NO_x smanjuje reakcijom s amonijakom u prisutnosti katalizatora. Također, postoje metode za smanjenje temperature izgaranja, kao što su rekonstrukcija izgaranja i dodavanje posebnih aditiva koji mogu smanjiti emisije NO_x -a. [10]

Uz tehnologije kontrole, smanjenje sadržaja dušika u gorivima i primjena alternativa gorivima također mogu doprinijeti smanjenju emisija NO_x. Nažalost, ove metode često

uključuju dodatne troškove i tehničke izazove, ali su nužne za postizanje standarda zaštite okoliša i zdravlja.

U atmosferi, dušikovi oksidi mogu reagirati s vlagom i drugim kemikalijama stvarajući kisele spojeve kao što su dušična kiselina (HNO_3) i ozon (O_3), koji doprinose kiselim kišama i onečišćenju zraka. Ove reakcije dodatno naglašavaju važnost kontrole i smanjenja emisija NO_x kako bi se zaštitili ekosustavi i zdravlje ljudi. [10]

2.3. Sekundarni izvori onečišćenja s pomorskih brodova

Sekundarni onečišćivači zraka predstavljaju tvari koje se ne ispuštaju direktno u atmosferu, već nastaju kao produkti kemijskih reakcija između primarnih onečišćivača. Jedan od najznačajnijih sekundarnih onečišćivača je ozon (O_3) [3]. Ozon se formira u donjim slojevima atmosfere, posebno u troposferi, kroz kompleksne kemijske procese koji uključuju različite reaktivne spojeve [11].

Ozon u troposferi nastaje kao rezultat fotokemijskih reakcija u kojima sudjeluju hlapivi organski spojevi (HOS) ili isparljive organski tvari (engl. Volatile Organic Compounds - VOC), dušikovi oksidi (NO_x) i drugi reaktivni spojevi, pod utjecajem sunčeve svjetlosti. Ključni kemijski proces može se opisati sljedećim reakcijama [11]:

1. Dušikov monoksid (NO) u prisutnosti sunčeve svjetlosti oksidira u dušikov dioksid (NO_2).
2. Dušikov dioksid (NO_2) se zatim razgrađuje pod utjecajem UV svjetlosti na dušikov monoksid (NO) i atomarni kisik (O).
3. Atomarni kisik (O) reagira s molekularnim kisikom (O_2) kako bi formirao ozon (O_3).

Ova serija reakcija omogućava stvaranje ozona u atmosferi, koji može imati značajan utjecaj na kvalitetu zraka i zdravlje ljudi.

Troposferski ozon je poznat kao glavna komponenta smoga, a njegove visoke koncentracije mogu uzrokovati brojne probleme. Ozon ima korozivne efekte na materijale i može oštetiti biljke, smanjujući njihove prinose i rast. Osim toga, ozon može izazvati iritacije dišnih puteva, pogoršati astmu i druge respiratorne bolesti te smanjiti plućnu funkciju [11].

S obzirom na negativne posljedice sekundarnih onečišćivača poput ozona, važno je usmjeriti napore na kontrolu primarnih onečišćivača koji doprinose njegovom stvaranju. Smanjenje emisija hlapivih organskih spojeva i dušikovih oksida može značajno smanjiti koncentraciju ozona u atmosferi. Primjena tehnologija za smanjenje emisija u industriji, kao i regulacija emisija u transportu, ključni su za postizanje poboljšanja kvalitete zraka.

Na osnovu navedenih čimbenika može se zaključiti da je ozon bitan sekundarni onečišćivač koji nastaje kao rezultat kemijskih reakcija u atmosferi pod utjecajem sunčeve svjetlosti. Kontrola emisija primarnih onečišćivača i razumijevanje procesa stvaranja ozona važni su koraci u očuvanju zdravlja ljudi i zaštiti okoliša.

Pored ozona, sekundarni izvori onečišćenja koji se javljaju s pomorskih brodova uključuju čestice fine prašine, kao što su PM2.5 i PM10, te aerosole. Ove čestice i aerosoli nastaju kao posljedica složenih kemijskih i fizičkih procesa nakon početnog ispuštanja primarnih onečišćivača u atmosferu i more [15]. Oni imaju značajan utjecaj na kvalitetu zraka, zdravlje ljudi i ekosustave.

Čestice PM2.5 i PM10 predstavljaju fine čestice koje se emitiraju iz brodskih motora i drugih izvora tijekom izgaranja goriva [12]. Čestice PM2.5 su promjera manjeg od 2.5 mikrometra, dok su PM10 čestice promjera manjeg od 10 mikrometara. Ove čestice mogu se zadržavati u atmosferi i raspršiti se na velike udaljenosti prije nego što padnu na tlo ili u more.

PM2.5: Ove čestice su dovoljno male da uđu u ljudske dišne puteve i pluća, uzrokujući respiratorne i kardiovaskularne probleme. U atmosferi, PM2.5 može reagirati s drugim kemikalijama stvarajući sekundarne onečišćivače, poput sekundarnih aerosola i kompleksnih organskih spojeva, koji dodatno pogoršavaju kvalitetu zraka.

PM10: Iako su PM10 nešto veće od PM2.5, još uvijek mogu uzrokovati zdravstvene probleme i utjecati na kvalitetu zraka. Čestice PM10 mogu sadržavati razne kontaminante, uključujući teške metale i kemikalije, te se mogu akumulirati u tlu i vodi, utječući na ekosustave.

Aerosoli su sitne čestice ili kapljice tekućine koje se nalaze u zraku i mogu nastati izravno iz brodskih ispušnih plinova ili kao sekundarni proizvodi kemijskih reakcija [15]. Aerosoli mogu uključivati različite vrste čestica, uključujući: sulfate, nitrare, i organske spojeve, koji nastaju reakcijom primarnih onečišćivača s vlagom u zraku. Također, analizirajući njihovu strukturu aerosoli se mogu definirati i na način da je riječ o krutim česticama koje se u atmosferi

nalaze u koloidnom raspršenju. Pojam aerosoli je latinskog porijekla (lat. *aero* = zrak i lat. *solvere* = rastaviti). Izvori aerosola mogu biti i prirodni i ljudski (umjetni), [3]. Aerosoli mogu biti organskog ili anorganskog podrijetla. Prirodni uvjeti atmosfere nikada ne omogućuju da ona bude potpuno suha i čista.

Sulfatne aerosoli: Nastaju kada sumporni oksidi (SO_x) reagiraju s vodom u atmosferi, stvarajući sulfate.

Nitratne aerosoli: Slični su sulfatnim aerosolima, ali nastaju kada dušikovi oksidi (NO_x) reagiraju s vodom i drugim kemikalijama u atmosferi.

Organske aerosoli: Ove aerosoli mogu nastati iz isparljivih organskih spojeva (VOC) koje brodovi ispuštaju.

3. METODE ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE

Onečišćenje atmosfere predstavlja jedan od najvećih globalnih izazova današnjice, s ozbiljnim posljedicama za okoliš i ljudsko zdravlje. Kako bi se negativna djelovanja spriječila, bilo je potrebno osmisliti različite metode djelovanja. Razvijene su razne metode i pristupi za smanjenje emisija štetnih tvari u atmosferu. Uključuju tehnološka rješenja, regulativne mjere, te promjene u ponašanju i poslovnim praksama.

3.1. Tehnološke metode

Tehnološke inovacije su od presudne važnosti za smanjenje emisija s pomorskih brodova. Ključne tehnologije u ovom području uključuju napredne sustave za kontrolu emisija specifične za pomorski sektor, kao što su filteri za čestice, katalizatori i sustavi za ispiranje ispušnih plinova.

Filteri za čestice učinkovito uklanjaju krute čestice iz ispušnih plinova, dok katalizatori omogućuju oksidaciju štetnih plinova kao što su dušikovi oksidi (NO_x) u manje štetne tvari. Uređaji za ispiranje ispušnih plinova (engl. scrubber – u daljnjem tekstu „skraber”) smanjuju količinu sumpornih oksida (SO_x) u ispušnim plinovima. Ove tehnologije značajno doprinose smanjenju emisije onečišćujućih tvari u atmosferu, čime pomažu u očuvanju okoliša i poboljšanju kvalitete zraka.

Emisija NO_x - a smanjuje se s pomoću triju glavnih tehnika: obradom goriva prije uporabe, unutarnjim ili primarnim metodama, i sekundarnim metodama. Obrada goriva uključuje denitraciju, odnosno smanjenje dušika u gorivu. Dušik, iako inertan na niskim temperaturama, u proces izgaranja ulazi sa zrakom i oksidira na visokim temperaturama, što rezultira formiranjem NO_x-a. [3]

Unutarnje metode, koje uključuju promjene u konfiguraciji motora, direktno djeluju na proces izgaranja, smanjujući emisiju NO_x - a za 10% do 50%, ovisno o tipu motora i metodi koja se koristi. Jedan od načina za smanjenje emisije je smanjenje tlaka izgaranja, što usporava ubrizgavanje goriva i snižava temperature izgaranja, čime se smanjuje stvaranje NO_x-a. Međutim, to također povećava potrošnju goriva. [3]

Smanjenje emisija može se postići i prilagodbom sapnica rasprskavača, jer različiti tipovi rasprskavača značajno utječu na stvaranje NO_x-a, CO-a i na potrošnju goriva. Također,

uštrcavanje vode ili vlaženje predstavlja još jedan učinkovit način smanjenja emisija. Voda se može ubrizgavati direktno u komoru za izgaranje, bilo kroz odvojene sapnice ili slojevitim uštrcavanjem vode i goriva iz istog rasprskaa. Ovaj sustav, koji omogućava ubrizgavanje vode i goriva, smanjuje emisiju NO_x - a za 50% do 60%, bez negativnog utjecaja na performanse motora. Sigurnosni sustav omogućava trenutani prestanak ubrizgavanja vode u slučaju prekomjernog protoka ili curenja, a sustav vode je potpuno odvojen od sustava goriva, što omogućava normalan rad motora i nakon isključenja sustava vode. [3]

Vrijeme početka i trajanje ubrizgavanja vode kontrolira se elektronski s pomoću kontrolne jedinice, a tlak vode koja se ubrizgava kreće se između 210 i 400 bara, ovisno o tipu motora. Takav tlak postiže se s pomoću visokotlačne pumpe, dok niskotlačna pumpa osigurava dovoljnu količinu vode. Prednosti ovog sustava uključuju smanjenje emisije NO_x - a za 50% do 60%, minimalni potreban prostor za ugradnju, niske troškove i mogućnost da motor radi bez ubrizgavanja vode, kad god je to potrebno. [3]

Selektivna katalitička redukcija (engl. Selective Catalytic Reduction - SCR) NO_x - a je vrlo učinkovita metoda za smanjenje razine dušikovih oksida u ispušnim plinovima.

Oksidacijski katalizator djeluje tako što ugljikovodike (HC) i ugljični monoksid (CO) oksidira u prisutnosti kisika iz ispušnih plinova, pretvarajući ih u ugljični dioksid (CO₂) i vodu (H₂O). Tako se smanjuje količina štetnih tvari koje nastaju uslijed nepotpunog izgaranja goriva. Redukcijski katalizator ima za cilj smanjiti količinu NO_x plinova u ispušnim plinovima [20]. Ovi plinovi, koji se formiraju pri visokim temperaturama izgaranja, mogu se smanjiti do 90% u katalizatoru, gdje NO_x molekule gube kisik i pretvaraju se u bezopasni dušik (N₂) i kisik (O₂). Moderni katalizatori često kombiniraju oba prethodno opisana procesa i nazivaju se trostrukim katalizatorima (three-way catalysts). Ovi katalizatori istovremeno smanjuju emisiju CO, HC, i NO_x, [21]. Ključna značajka trostrukih katalizatora je da optimalno djeluju unutar određenog omjera zrak-gorivo, koji se mora održavati kako bi se postigla maksimalna efikasnost u smanjenju emisija.

3.1.1. Sustavi za ispiranje ispušnih plinova – „skraber“

Skraber su uređaji koji omogućuju kontakt onečišćenog plina s odgovarajućom tekućinom, što rezultira stvaranjem većih nakupina čestica, koje se zatim lakše uklanjaju iz plinova.

Ovaj proces uključuje prolazak onečišćenog plina kroz vodenu zavjesu ili tanki sloj tekućine, pri čemu se čvrste čestice vežu za kapljice, povećavajući njihovu veličinu i olakšavajući njihovo izdvajanje. Nakon što se čestice vežu za kapljice, plin se odvodi kroz gornji dio uređaja, dok se kapljevina s česticama (mulj) odvodi kroz donji dio. Važno je napomenuti da brzina strujanja plina ne smije biti prevelika (1-5 m/s) kako kapljice ne bi bile nošene zajedno s plinom. [3]

Različiti su načini raspršivanja kapljevine, uključujući mlaznice, rotirajuće diskove i sudaranje mlazova tekućine sa strujom zraka. Skraber se mogu razlikovati ovisno o načinu uvođenja tekućine, poput kolonskih skrabela, ciklonskih skrabela i Venturijevih skrabela [13]. Venturijevi skraber su posebno učinkoviti, jer koriste načelo ubrzavanja strujanja plina kroz suženi dio cijevi, što povećava brzinu i omogućava bolje raspršivanje tekućine. Ovi uređaji se koriste za uklanjanje plinovitih komponenti poput SO₂, NH₃, H₂S i VOC-a, kao i za uklanjanje vrlo sitnih krutih čestica, obično manjih od 2-3 µm. [13]

Postoji više različitih izvedbi sustava za ispiranje ispušnih plinova (skrabela), [14]:

Otvoreni sustavi: Koriste morsku vodu za ispiranje ispušnih plinova. Morska voda se vraća u more nakon ispiranja, s određenim ograničenjima na količinu sumpornih spojeva.

Zatvoreni sustavi: Koriste slatku vodu s dodatkom kemikalija (npr. natrijev hidroksid) koja se recirkulira unutar sustava. Onečišćena voda se pročišćava i ponovno koristi, a čvrsti otpad se skladišti i odlaže na odgovarajući način.

Hibridni sustavi: Kombiniraju otvorene i zatvorene sustave, omogućujući brodu da koristi oba načina ovisno o okolišnim uvjetima i propisima.

3.1.2. Selektivna katalitička redukcija

Sustavi selektivne katalitičke redukcije (engl. Selective Catalytic Reduction systems – u daljnjem tekstu: SCR sustavi) smanjuju emisiju dušikovih oksida (NO_x) iz ispušnih plinova brodskih motora. Proces uključuje ubrizgavanje amonijaka ili uree u ispušne plinove, koji

zatim prolaze kroz katalizator. Katalizator omogućava kemijsku reakciju koja pretvara NO_x u bezopasni dušik (N₂) i vodu (H₂O). [15]

Prednosti SCR sustava su:

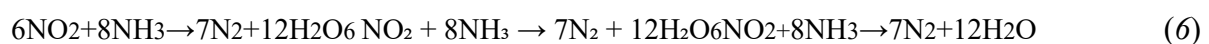
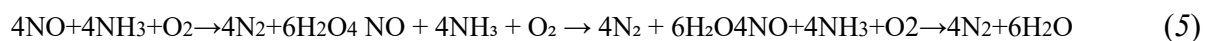
- Visoka učinkovitost u smanjenju NO_x emisija, često preko 90%.
- Pogodan za upotrebu s različitim vrstama goriva.

Nedostaci SCR sustava su:

- Ne mogu se koristiti kod niskog opterećenja motora i niskih temperatura izgaranja (stvaranje naslaga na katalizatoru).
- Nisu učinkoviti kod visokih temperatura izgaranja (izgaranje amonijaka bez redukcijskog učinka).

SCR radi na načelu ubrizgavanja amonijaka (NH₃) kao redukcijskog sredstva u ispušne plinove pri temperaturama između 300 i 400°C. Nakon ubrizgavanja, smjesa prolazi preko katalizatora, što omogućava reakciju koja smanjuje koncentraciju dušikovih oksida. Važno je da se ovaj proces odvija unutar navedenog temperaturnog opsega. Na višim temperaturama (iznad 490°C), amonijak će izgorjeti prije nego što dođe u kontakt s NO i NO₂, čime se gubi njegova efikasnost. S druge strane, pri nižim temperaturama, smanjenje NO_x-a je manje efikasno, a postoji i rizik od kondenzacije amonijevog sulfata, što može oštetiti katalizator.

Kada se reakcija odvija unutar propisanih temperaturnih granica, amonijak (NH₃) reagira s dušikovim dioksidom (NO₂), što rezultira stvaranjem dušika (N₂) i vode (H₂O) prema sljedećim reakcijama, [9]:



Količina amonijaka (NH₃) koja se ubrizgava u ispušne plinove regulira se računalnim sustavom koji prati količinu dušikovih oksida (NO_x) u odnosu na opterećenje motora. [9]

3.1.3. Sustavi za recirkulaciju ispušnih plinova

Sustavi za recirkulaciju ispušnih plinova (engl. Exhaust Gas Recirculation systems – u daljnjem tekstu: EGR sustavi) smanjuju emisije NO_x tako što dio ispušnih plinova vraćaju natrag u motor. Ova recirkulacija smanjuje temperaturu izgaranja u cilindrima, što smanjuje stvaranje NO_x. Nakon uklanjanja čađe i sumpornih oksida, određeni dio ispušnih plinova se ponovo miješa sa svježim zrakom prije nego uđe u hladnjak ispirnog zraka. Ovaj postupak povećava toplotni kapacitet smjese zbog veće koncentracije ugljikovog dioksida (CO₂) i vode (H₂O). Kako dolazi do smanjenja koncentracije kisika (O₂), motor mora dobiti veću količinu mješavine pročišćenih ispušnih plinova i svježeg zraka kako bi se osiguralo potpuno izgaranje iste količine goriva. Povećanjem toplotnog kapaciteta i mase smjese, vršna temperatura izgaranja se smanjuje, jer se toplota izgaranja raspršuje na veću količinu plinova s nižom ukupnom vršnom temperaturom izgaranja. To rezultira nižim koncentracijama dušikovih oksida (NO_x) u emisijama ispušnih plinova. [15]

Snizavanje vršne temperature izgaranja ključno je za smanjenje formiranja dušikovih oksida (NO_x), budući da se NO_x intenzivno formira pri visokim temperaturama (>2000°C) kroz reakciju dušika (N₂) i kisika (O₂) iz zraka prema Zeldovich-evom mehanizmu [16]:



S nižim temperaturama izgaranja, brzina ovih reakcija se značajno smanjuje, što rezultira manjom proizvodnjom (NO_x). Za razliku od SCR sustava, koji zahtijevaju dodatak reducensa poput amonijaka (NH₃) ili uree ((NH₂)₂CO) za kemijsku redukciju NO_x na dušik (N₂) i vodu (H₂O), EGR postiže smanjenje NO_x isključivo manipulacijom procesa izgaranja bez potrebe za dodatnim kemikalijama. [16]

EGR sustavi dizajnirani su tako da se mogu relativno lako integrirati u postojeće dizelske motore bez značajnih modifikacija osnovne strukture motora. To se postiže dodavanjem EGR ventila, hladnjaka ispušnih plinova i odgovarajućih cjevovoda koji preusmjeravaju dio ispušnih plinova natrag u usisni sustav. Prostorni zahtjevi EGR sustava su obično manji u usporedbi sa SCR sustavima, što je posebno važno na brodovima gdje je prostor ograničen i dragocjen. Manje komponente i jednostavniji cjevovodi olakšavaju ugradnju i održavanje sustava. Integracija EGR sustava ne zahtijeva složene modifikacije elektroničkih

sustava upravljanja motorom. Većina modernih motora već ima sustave upravljanja koji mogu podržati funkcioniranje EGR-a uz minimalne prilagodbe softvera.

EGR sustavi su dokazano pouzdani s dugim vijekom trajanja i zahtijevaju relativno nisko održavanje. Budući da nema potrebe za rukovanjem kemikalijama, smanjuje se kompleksnost operativnih postupaka i mogućnost ljudske pogreške. Sustavi su manje osjetljivi na varijacije u kvaliteti goriva, što je posebno korisno u pomorskom sektoru gdje se često koriste različite vrste i kvalitete goriva. U slučaju potrebe za servisom ili popravkom, dijelovi EGR sustava su općenito dostupni i zamjenjivi bez većih poteškoća, što smanjuje vrijeme zastoja broda i povećava operativnu učinkovitost. [17]



Slika 4. Druga generacija EGR sustava brodskog motora, [31]

Na slici 4. prikazana je druga generacija EGR sustava proizvođača MAN Diesel & Turbo na kojoj su narančastom bojom prikazane komponente EGR sustava integrirane u motor.

3.1.4. Sustavi za filtriranje čestica

Sustavi filtra dizelskih čestica (engl. Diesel Particulate Filters – u daljnjem tekstu DPF sustavi) koriste se za uklanjanje čvrstih čestica iz ispušnih plinova. Filtri zadržavaju čestice čađe i drugih čvrstih tvari, sprječavajući njihovo oslobađanje u atmosferu. DPF sustavi su dizajnirani kako bi smanjili emisije tih čestica u atmosferu, čime se smanjuje onečišćenje zraka i ispunjavaju stroži međunarodni standardi.

DPF sustav se sastoji od poroznog keramičkog ili metalnog filtra koji fizički zadržava čestice čađe (ugljik, C) iz ispušnih plinova. Dok ispušni plinovi prolaze kroz filtar, čestice čađe ostaju zarobljene na površini filtra. S vremenom, kako se sve više čestica nakuplja, otpor protoku ispušnih plinova raste, što smanjuje učinkovitost motora. Da bi se održala optimalna učinkovitost sustava, potrebno je periodično obaviti regeneraciju filtra.

Regeneracija je proces uklanjanja nakupljenih čestica čađe s filtra kako bi se obnovila njegova sposobnost filtriranja. Postoje dvije vrste regeneracije: pasivna i aktivna. [17]

- *Pasivna regeneracija:* Ovaj proces se odvija spontano tijekom normalnog rada motora pri visokim temperaturama ispušnih plinova (iznad 600°C). Čađa (C) reagira s kisikom (O₂) i oksidira u ugljikov dioksid (CO₂).
- *Aktivna regeneracija:* Aktivna regeneracija se koristi kada temperatura ispušnih plinova nije dovoljno visoka da potakne pasivnu regeneraciju. Ovaj proces obično uključuje ubrizgavanje dodatnog goriva u ispušni sustav kako bi se povećala temperatura i omogućila oksidacija čađe. Reakcija je ista kao kod pasivne regeneracije, ali se potiče umjetno povećanom temperaturom.

DPF sustavi postali su nezaobilazni dio moderne brodske tehnologije, posebice s obzirom na sve strože regulative o emisijama štetnih tvari iz brodskih motora.

Primarna prednost DPF sustava leži u njegovoj sposobnosti da učinkovito smanji emisiju čestica čađe i drugih krutih tvari iz ispušnih plinova. Ovo je posebno važno za brodove koji koriste teška goriva, koja su poznata po visokom sadržaju nečistoća. Međunarodne regulative, kao što su one postavljene od strane IMO-a, sve više zahtijevaju smanjenje emisija štetnih tvari iz brodskih motora. DPF sustavi omogućuju brodovima da ispune ove standarde, čime se izbjegavaju potencijalne kazne i ograničenja operacija u određenim područjima, poput ekološki osjetljivih zona ili područja s visokim stupnjem nadzora emisija. Osim smanjenja emisija u

atmosferu, DPF sustavi također poboljšavaju kvalitetu zraka unutar broda. Filtriranje čestica iz ispušnih plinova smanjuje mogućnost da štetne čestice dospiju u strojarnicu ili druge zatvorene prostore na brodu, čime se osigurava sigurnije i zdravije radno okruženje za posadu. [17]

Iako DPF sustavi predstavljaju značajan korak naprijed u smanjenju emisije štetnih čestica iz brodskih motora, njihova primjena nosi određene izazove. Visoki troškovi, složenost operacija i potencijalni problemi s učinkovitosti motora zahtijevaju pažljivo planiranje i upravljanje. Unatoč ovim izazovima, prednosti koje DPF sustavi donose u smislu zaštite okoliša, usklađenosti s regulativama i poboljšanja kvalitete zraka na brodu čine ih neophodnim za moderne brodove koji teže održivoj i odgovornoj plovidbi.

3.2. Upravljanje gorivom i motorom

Implementacija pokazatelja ili indikatora intenziteta ugljika (engl. Carbon Intensity Indicator - u daljnjem tekstu CII pokazatelj) od strane Međunarodne pomorske organizacije (engl. International Maritime Organization – u daljnjem tekstu IMO) 1. siječnja 2023. godine označila je prekretnicu u regulaciji emisija CO₂ u pomorskom sektoru. Ovaj pokazatelj, kao ključna komponenta održivog pomorskog prometa, ima za cilj smanjenje ukupnog intenziteta ugljikovih emisija iz pomorstva. U tom kontekstu, upravljanje gorivom i motorom postaje ključna strategija za vlasnike i zakupce brodova, kako bi se uskladili s novim standardima i istovremeno optimizirali operativni troškovi. [18]

Jedna od najučinkovitijih metoda za smanjenje emisija ugljikovog dioksida s brodova je smanjenje brzine plovidbe. Prema studiji [31] smanjenje brzine za 10%, 20%, i 30% dovodi do smanjenja emisija CO₂ za 27,1%, 48,8% i 65,7%, dok se intenzitet ugljika umanjuje za 19%, 36% i 51%. Ovi rezultati ukazuju na značajnu ulogu optimizacije potrošnje goriva u smanjenju ukupnih emisija, što je posebno relevantno za veće brodove gdje je efekt smanjenja brzine još izraženiji.

Upravljanje gorivom i motorom u okviru CII regulacije podrazumijeva kompleksnu ravnotežu između postizanja ekoloških ciljeva i ekonomske isplativosti. Naime, smanjenje brzine, iako efikasno u smanjenju emisija, može utjecati na dinamiku fiksnih troškova, što dovodi do različitih potreba za prilagođavanjem strategije upravljanja gorivom u zavisnosti od tipa broda i trenutnih tržišnih uvjeta. Kada su cijene vozarina visoke, preporučuje se povećanje brzine kako bi se postigao maksimalan profit, dok se u uvjetima niskih cijena vozarina sugerira smanjenje brzine kao optimalna strategija. Ova prilagođavanja imaju direktan utjecaj na

performanse motora i potrošnju goriva, što zauzvrat utječe na usklađenost s CII regulacijom. [26]

Za vlasnike brodova, posebno onih s većim plovilima, upravljanje gorivom i motorom postaje kritična točka u postizanju ekonomske održivosti pod CII regulacijom. Upravljanje brzinom plovidbe i optimizacija rada motora ne samo da pomažu u smanjenju emisija, već direktno utječu i na smanjenje kazni koje proizlaze iz CII regulacije. Ovo je od posebnog značenja u kontekstu tržišnih promjena, gdje izbor između većih i manjih brodova postaje stratezijska odluka temeljena na trenutnim tržišnim kretanjima i ekonomskoj održivosti. Upravljanje gorivom i motorom, kao integralni dio operativne strategije broдача, igra ključnu ulogu u ispunjavanju ekoloških ciljeva i regulative, dok istovremeno omogućava optimizaciju profita u promjenjivim tržišnim uvjetima. [26]

3.3. Alternativne tehnologije

Vjetar je jedan od najstarijih i prirodnih izvora energije, a u pomorskom sektoru, tehnologije za pomoć pri propulziji vjetrom (engl. Wind Assisted Propulsion System – u daljnjem tekstu WAPS) predstavljaju inovativni pristup smanjenju potrošnje goriva i emisija. WAPS uključuju različite sustave poput rotorskih jedara, tvrdih jedara, usisnih krila, zmajeva (engl. kite sails) mekih jedara i tehnologije trupa koja koristi vjetar za generiranje dodatne potisne snage. Iako ovi sustavi nude značajan potencijal za smanjenje potrošnje goriva, njihova primjena varira ovisno o vrsti broda i razini tehnološke zrelosti. Ova tehnologija može značajno doprinijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova, a razvoj novih i poboljšanih rješenja u ovom području je aktivan. [22]

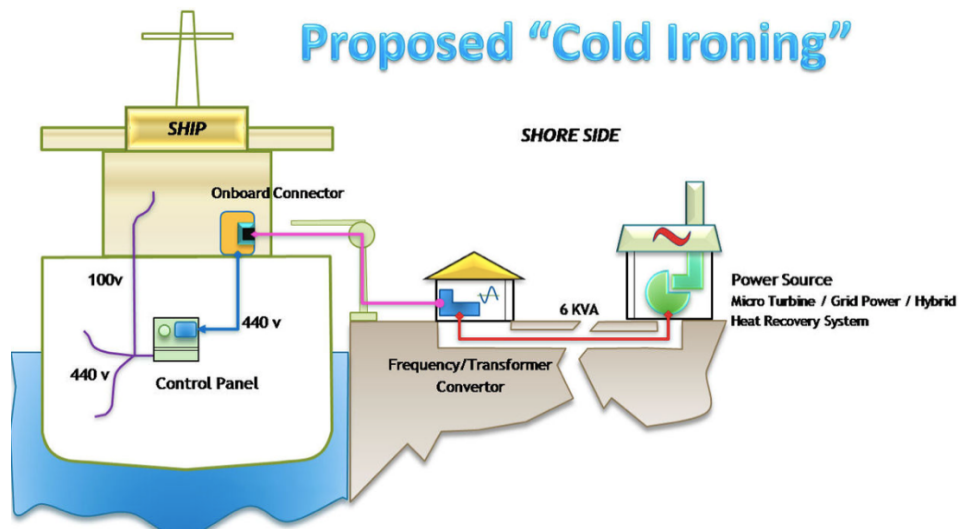
Vodik, posebno onaj proizveden s pomoću obnovljivih izvora energije (zeleni vodik), predstavlja gotovo gorivo bez emisija. Njegova upotreba u pomorstvu suočava se s izazovima kao što su niska gustoća energije, visoki troškovi opreme i potreba za razvijanjem globalne infrastrukture za proizvodnju i distribuciju zelenog vodika. Unatoč tim izazovima, vodik nudi značajne prednosti kao gorivo koje može doprinijeti značajnom smanjenju emisija ako se pravilno implementira. Razvoj tehnologije motora i sustava za gorivo na bazi vodika je u tijeku, a uspjeh ove tehnologije ovisit će o daljnjem napretku u ovim područjima. [22]

Metanol predstavlja inovativno rješenje u skladu s globalnim nastojanjima za smanjenjem emisija štetnih plinova i prelaskom na održivije izvore energije u pomorskom prijevozu. Metanol, kao alternativno gorivo, nudi brojne prednosti, uključujući niže emisije ugljikovog dioksida i gotovo potpuno izostanak emisija sumpornih oksida, što ga čini izuzetno ekološki prihvatljivim. Može se proizvoditi iz obnovljivih izvora, što dodatno poboljšava njegovu održivost. Brodovi opremljeni motorima prilagođenim za metanol pokazuju poboljšanu operativnu učinkovitost i smanjenje troškova održavanja. Mnoge poznate kompanije već imaju brodove koje koriste metanol. S obzirom na sve veći pritisak međunarodnih pomorskih regulatora na smanjenje emisija, razvoj i implementacija brodova na metanol predstavlja ključni korak ka transformaciji industrije i postizanju ciljeva održivog razvoja. [22]

Bio goriva, uključujući tekuće i plinovite varijante, predstavljaju srednjoročna i dugoročna rješenja za smanjenje emisija ugljika u pomorskom sektoru. Njihova uporaba moguća je bez značajnih modifikacija postojećih motora i sustava za gorivo, što može omogućiti brzu implementaciju (engl. „drop in“ fuel). Bio goriva su derivati bioloških izvora, a njihova upotreba može značajno smanjiti emisije CO₂ ako se poštuju kriteriji održivosti. Iako se tržište biogoriva brzo razvija, ključni izazovi uključuju potrebu za usklađivanjem proizvodnje, infrastrukture za skladištenje i distribuciju, te analizu njihovih dugoročnih ekonomskih i sigurnosnih aspekata. [22]

Amonijak (NH₃) predstavlja dugoročno rješenje s potencijalom za nulte ili gotovo nulte emisije ugljika. Iako postoji malo pomorskog iskustva s korištenjem amonijaka kao goriva, opsežna iskustva iz industrija poput petrokemije i proizvodnje gnojiva mogu poslužiti kao osnova za njegovu primjenu u pomorstvu. Glavni izazov u primjeni amonijaka leži u njegovoj toksičnosti i potrebi za prilagodbom dizajna brodova kako bi se osigurala sigurnost. Ipak, amonijak nudi prednosti u pogledu energetske gustoće i potencijala za smanjenje emisija ako se pravilno upravlja njegovim skladištenjem i distribucijom. [22]

Na slici 5. prikazana je uporaba električne energije s obale dok se brod nalazi u luci (engl. Cold Ironing). Ovo uključuje tehnologije poput punjenja baterija, zamjene baterija i mikro generiranja energije. Tehnološki i sigurnosni izazovi povezani s implementacijom ovih sustava uključuju potrebu za razvojem infrastrukture u lukama i osiguranje kompatibilnosti s postojećim sustavima brodova. Električna energija s obale može značajno smanjiti emisije dok su brodovi privezani u lukama, a njezina primjena može doprinijeti sveukupnoj dekarbonizaciji pomorskog sektora. [22]



Slika 5. Brodski priključak električne energije s kopna, [28]

Svaka od ovih tehnologija i goriva nudi specifična rješenja za izazove s kojima se suočava pomorski sektor u kontekstu dekarbonizacije. Njihova primjena će ovisiti o daljnjem razvoju tehnologija, regulatornim okvirima i ekonomskim uvjetima, ali svi oni predstavljaju ključne korake prema održivijem i klimatski neutralnom pomorskom sektoru.

4. LEGISLATIVNI ZAHTJEVI ZA SPRJEČAVANJE ONEČIŠĆENJA ATMOSFERE S BRODOVA

Onečišćenje atmosfere predstavlja jedan od najvećih ekoloških izazova s kojima se suočava čovječanstvo u 21. stoljeću. Industrijalizacija, urbanizacija i rastuća potražnja za energijom rezultirali su drastičnim povećanjem emisija štetnih tvari u zrak, što ima negativne posljedice na zdravlje ljudi, ekosustave i globalnu klimu. U cilju smanjenja i kontrole ovih emisija, doneseni su brojni propisi na međunarodnoj, nacionalnoj i lokalnoj razini.

Pitanje pravne regulative koja se odnosi na zaštitu morskog okoliša relativno je novo. Iako je problem onečišćenja prisutan već dugi niz godina, podizanje svijesti o zaštiti okoliša dovelo je do tog da se otvori pitanje mogućnosti njegovog sprječavanja.

Do razvoja pravne regulative u pitanju zaštite morskog okoliša došlo je relativno brzo, jer su problemi koji su pogađali čovječanstvo zahtijevali visoku razinu efikasnog djelovanja. Ključni trenutak za razvoj međunarodnog prava okoliša bio je Konferencija UN-a o čovjekovom okolišu koja je održana 1972. godine u Stockholmu. Ova konferencija značajno je doprinijela razvoju međunarodnog zakonodavstva za zaštitu okoliša i podržala osnivanje Ekološkog programa UN-a. Na konferenciji je usvojena Deklaracija o čovjekovom okolišu, koja uključuje 26 načela za očuvanje okoliša, kao i Akcijski plan (engl. Action Plan) sa 109 preporuka. Istaknute su dvije ključne odgovornosti država: zaštita okoliša unutar vlastitih granica i sprječavanje štete okolišu drugih država. Naglašena je i važnost međunarodne suradnje u implementaciji postojećih ugovora i kreiranju novih. Osamdesetih godina 20. stoljeća, ekološka politika počela je sustavno nadzirati kvalitetu okoliša kroz tehnologiju. U devedesetim godinama, pojavila su se nova razvojna načela koja su nastojala zadovoljiti potrebe sadašnjeg i budućeg stanovništva, naglašavajući važnost visoke suradnje među zemljama. Danas, ključnu ulogu u zaštiti okoliša, uključujući i smanjenje štetnih emisija s brodova, igra MARPOL konvencija.

4.1. MARPOL konvencija

Međunarodna konferencija o onečišćenju mora održana je 1973. godine u Londonu pod pokroviteljstvom IMO-a. Na ovoj konferenciji usvojena je Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova, (engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – u daljnjem tekstu, skraćeno, MARPOL konvencija ili samo

Konvencija). Postoji nekoliko razloga zašto je Konvencija donijeta baš u tom trenutku. Razvoj industrije, povećanje brodskog prometa i nesreće s brodovima rezultirali su značajnim ispuštanjem štetnih tvari u more, što je počelo ugrožavati morski ekosustav i zdravlje ljudi. Stoga je bilo ključno uspostaviti međunarodne standarde i pravila za sprječavanje takvog onečišćenja, što je rezultiralo donošenjem MARPOL konvencije koja je trebala adresirati te izazove i osigurati bolju zaštitu morskog okoliša.

Nakon toga, 1978. godine usvojena su dva Protokola koja su pridodana konvenciji te je izmijenjen njezin naziv u MARPOL 73/78 konvencija koji podrazumijeva tako nastali sveobuhvatni dokument.

Konvencija se kontinuirano unapređuje od svog donošenja, kako kroz usvajanje novih priloga, tako i kroz amandmane na postojeće. Ovi dodaci i izmjene poboljšavaju mjere zaštite okoliša i prilagođavaju se novim izazovima.

MARPOL konvenciju je do sada potpisalo ukupno 136 država među kojima je i Republika Hrvatska.

MARPOL konvencija se kontinuirano ažurira i dopunjuje. Novi propisi koji se dodaju konvenciji ne čekaju više na ratifikaciju država, već automatski stupaju na snagu godinu dana nakon odluke IMO-a. Međutim, ove izmjene neće stupiti na snagu ako se trećina država koje posjeduju barem polovicu globalne tonaže usprotivi.

Osim osnovnog teksta, MARPOL konvencija uključuje šest priloga [28]:

1. Prilog I: Pravila za sprječavanje onečišćenja uljima.
2. Prilog II: Pravila za kontrolu onečišćenja tekućim tvarima koje se prevoze u rasutom/razlivenom stanju.
3. Prilog III: Pravila za sprječavanje onečišćenja štetnim tvarima u pakiranom obliku.
4. Prilog IV: Pravila za sprječavanje onečišćenja brodskim sanitarnim otpadnim vodama.
5. Prilog V: Pravila za sprječavanje onečišćenja smećem i otpadom s brodova.
6. Prilog VI: Pravila za sprječavanje onečišćenja zraka s brodova.

MARPOL konvencija odnosi se na,[22]:

- **Brodove pod zastavom stranke ugovornice Konvencije:** ovo su brodovi koji su registrirani pod zastavom države koja je potpisala Konvenciju. Te države su odgovorne za nadzor i provedbu propisa Konvencije na tim brodovima.
- **Brodove koji nisu pod zastavom stranke ugovornice, ali plove pod njenom vlašću:** ovo su brodovi koji, iako nisu registrirani pod zastavom države članice, plove pod upravom te države. U tom slučaju, država koja upravlja brodom također je odgovorna za provedbu propisa Konvencije.

Sprječavanje onečišćavanja zraka određeno je precizno Konvencijom. Kako bi se pojam sadržajno upotpunio i objasnio, propisano je da je sprječavanje u ovom slučaju obuhvaća sljedeće mehanizme djelovanja, [22]:

- nadzor nad ispuštanjem dušikovih oksida u ispušnim plinovima motora snage iznad 130 kW
- nadzor nad ispuštanjem tvari koje uništavaju ozon
- nadzor nad ispuštanjem sumporovih oksida u ispušnim plinovima motora
- nadzor nad ispuštanjem hlapljivih organskih spojeva s tankera
- nadzor rada brodskih incineratora.

Ova konvencija regulira emisiju dušikovih oksida iz brodskih motora s izlaznom snagom većom od 130 kW [22] Također, Konvencija postavlja ograničenja na ispuštanje tvari koje doprinose uništavanju ozonskog sloja [22]. Ova odredba zahtijeva od inženjera da identificiraju i eliminiraju upotrebu štetnih tvari u brodskim sustavima, poput rashladnih i aerosolnih sredstava. Implementacija alternativnih, ekološki prihvatljivih materijala i tehnologija postaje obaveza, što može povećati kompleksnost dizajna i troškove materijala.

Nadzor nad emisijama sumpornih oksida (SO_x) iz brodskih motora ključan je za očuvanje kvaliteta zraka i minimiziranje utjecaja pomorskog prometa na životnu sredinu. U sklopu međunarodnih standarda, posebno MARPOL konvencije, nadzor nad emisijama SO_x provode

različite nadležnosti, uključujući države zastave, države luke i obalne države, pri čemu svaka od njih ima specifične odgovornosti i ovlasti. [22]

Država zastave igra centralnu ulogu u nadzoru i provedbi propisa o emisijama SO_x. Ova odgovornost uključuje osiguranje da brodovi pod njihovom zastavom udovoljavaju međunarodnim standardima. Države zastave uspostavljaju nacionalne regulative koje se usklađuju s međunarodnim standardima i provode redovne inspekcije brodova kako bi potvrdile da brodski motori koriste goriva s niskim sadržajem sumpora ili da su instalirani i pravilno korišteni sustavi za smanjenje emisija SO_x – a. Također, ove države osiguravaju da brodovi posjeduju potrebne svjedodžbe i dokumentaciju koja potvrđuje usklađenost. Ako brodovi ne ispunjavaju ove standarde, države zastave imaju ovlasti za izricanje kazni, uključujući novčane sankcije ili zabranu plovidbe dok se ne postigne usklađenost. [22]

Države luke imaju svoju ulogu u nadzoru emisija SO_x, posebno za brodove koji ne plove pod njihovom zastavom. Kada brodovi pristaju u luku, države luke provode inspekcije kako bi provjerile usklađenost s propisima. Ove inspekcije mogu uključivati pregled brodske opreme, dokumentacije i, u nekim slučajevima, uzimanje uzoraka goriva za laboratorijsku analizu. Ako se otkrije neusklađenost, države luke mogu poduzeti prisilne mjere, uključujući novčane kazne ili zabranu daljnjeg kretanja broda dok se ne ispune svi zahtjevi. Ova nadležnost omogućava državama luke da osiguraju da brodovi u njihovim lukama zadovoljavaju propisane standarde i time doprinose globalnim naporima za smanjenje onečišćenja zraka. [22]

Nadzor nad emisijama SO_x također uključuje kontrolu kvalitete goriva koje brodovi koriste. Inspektori često provode testiranje goriva u lukama kako bi se osiguralo da gorivo ispunjava standarde o sadržaju sumpora. Pored toga, brodovi su obavezni voditi detaljnu dokumentaciju o vrsti i količini goriva koje koriste, kao i o radu sustava za kontrolu emisija. [22]

4.2. PRILOG VI KONVENCIJE

Prilog VI MARPOL konvencije usmjeren je na pravila koja se odnose na sprječavanje onečišćenja zraka s brodova. Ovaj dio Konvencije strukturiran je u 19 pravila, koja su grupirana u tri osnovna poglavlja, svaki s različitim aspektima regulacije.

Prvo poglavlje Priloga VI bavi se osnovnim pitanjima primjene, definicijama, iznimkama i konceptom jednakovrijednosti. Odredbe ovog poglavlja primjenjuju se na sve brodove, osim u specifičnim slučajevima kada su propisane iznimke. [27]

Iznimke se odnose na situacije kada ispuštanje onečišćivača može biti opravdano zbog određenih okolnosti. Na primjer, ako ispuštanje onečišćivača nastaje zbog hitne situacije koja se odnosi na sigurnost broda ili spašavanje života na moru, takvo ispuštanje može biti izuzeto od standardnih pravila. Isto tako, u slučaju oštećenja broda ili njegove opreme, kada je ispuštanje rezultat tih oštećenja, postoje iznimke pod uvjetom da su nakon nastanka štete poduzete sve potrebne mjere kako bi se spriječilo ili smanjilo daljnje ispuštanje. [27]

Međutim, ove iznimke ne vrijede ako se utvrdi da je vlasnik broda ili zapovjednik namjerno izazvao štetu ili je bio nesmotren, znajući da bi šteta mogla nastati. Drugim riječima, iznimke se ne primjenjuju ako je namjera ili znanje o mogućoj šteti postojalo, a mjere za sprječavanje ispuštanja nisu bile poduzete.

Drugo poglavlje koje se bavi pregledima i izdavanjem te potvrđivanjem svjedodžbi i sredstvima nadzora usmjereno je na regulaciju postupaka vezanih za verifikaciju usklađenosti brodova s pravilima o sprječavanju onečišćenja zraka. Ova odredba obuhvaća zahtjeve za inspekciju brodova kako bi se osigurala njihova sukladnost sa standardima za emisije onečišćivača, [27]. Također, opisuje procedure za izdavanje i potvrđivanje svjedodžbi koje potvrđuju usklađenost brodova s relevantnim propisima. Sredstva nadzora, uključujući tehničke i administrativne mjere, osiguravaju pravilno praćenje i kontrolu ispunjavanja zahtjeva iz Priloga VI MARPOL konvencije.

Prema Prilogu VI, svaki brod od 400 bruto tona ili veći, kao i svaka fiksna i plutajuća platforma, mora proći nekoliko vrsta pregleda. Prvi od njih je osnovni pregled koji se obavlja prije nego što brod ili platforma započne s radom ili prije prvog izdavanja potrebne svjedodžbe. Ovaj pregled ima za cilj potvrditi da svi relevantni sustavi i oprema u potpunosti ispunjavaju zahtjeve definirane Prilogom VI [27]. Nakon osnovnog pregleda, brodovi i platforme moraju biti podložni redovnim pregledima koji se provode u razmacima koje određuje nadležna uprava, ali koji ne smiju biti dulji od pet godina. Ovi redovni pregledi osiguravaju da oprema i sustavi i dalje zadovoljavaju primjenjive standarde. Osim toga, zahtijeva se međupregled koji se obavlja unutar tri mjeseca prije ili poslije drugog i trećeg datuma godišnjice svjedodžbe. Ovi međupregledi služe za dodatnu provjeru da su svi sustavi i oprema u ispravnom stanju i

udovoljavaju svim zahtjevima. Svake godine obavlja se godišnji pregled. Mogu se obavljati i dodatni pregledi.

Za brodove ispod 400 bruto tona, nadležna uprava može odrediti odgovarajuće mjere za osiguranje [22]. Pregledi moraju provoditi službenici uprave, no uprava može delegirati ovu odgovornost ovlaštenim stručnjacima ili priznatim organizacijama. Ove organizacije moraju slijediti smjernice koje je usvojila organizacija, a u slučaju da se otkriju značajni nedostaci, stručnjaci ili organizacije moraju poduzeti odgovarajuće mjere i obavijestiti nadležne vlasti, uključujući i vlasti luke u kojoj se brod nalazi. Ova pravila i zahtjevi imaju za cilj osigurati da brodovi i platforme ostanu u skladu sa standardima za sprječavanje onečišćenja zraka te da se pravovremeno otklone bilo kakvi nedostaci ili problemi koji bi mogli utjecati na učinkovitost i sigurnost brodskih operacija.

Međunarodna svjedodžba o sprečavanju onečišćenja zraka izdaje se nakon osnovnog ili redovnog pregleda brodovima od 400 bruto tonaže ili većim, kao i platformama i postrojenjima za bušenje koja se kreću prema lukama ili terminalima pod kontrolom drugih država ugovornica. Ova svjedodžba mora se izdati i starijim brodovima, odnosno onima izgrađenim prije stupanja na snagu Priloga VI 1997., najkasnije do prvog planiranog suhog dokovanja nakon što Prilog VI stupi na snagu, ali ni u kojem slučaju kasnije od tri godine nakon tog datuma. [23]

Zabranjeno je namjerno ispuštanje tvari koje uništavaju ozon, kao što su Halon 1211, Halon 1301, CFC-11, CFC-12, i druge tvari navedene u Montrealskom protokolu, [23]. Namjerno ispuštanje uključuje radnje poput održavanja, servisiranja, popravaka ili uklanjanja sustava, ali ne uključuje najmanje emisije povezane s recikliranjem tih tvari. Na brodovima su zabranjeni novi uređaji koji koriste te tvari, osim onih koji koriste HCFC (klorofluorouglikovodike), koji su dopušteni do 1. siječnja 2020. Kad se uklone s broda, tvari i oprema moraju biti predane odgovarajućim postrojenjima za obradu.

Pravila o NO_x emisijama primjenjuju se na svaki dizelski motor s izlaznom snagom većom od 130 kW na brodovima izgrađenima nakon 1. siječnja 2000. ili na motorima koji su nakon tog datuma značajno preinačeni. Pravila se ne primjenjuju na motore za hitne slučajeve, motore na brodicama za spašavanje ili na opremu za hitne situacije, kao ni na motore na brodovima koji plove isključivo u teritorijalnim vodama države čiju zastavu vijore, pod uvjetom da su ti motori podložni alternativnim mjerama za kontrolu NO_x emisija. Izuzeci se

mogu primijeniti na motore ugrađene ili preinačene prije stupanja Priloga VI na snagu, ako brod plovi isključivo unutar države čiju zastavu vijori. Različiti zahtjevi se primjenjuju ovisno o datumu izgradnje broda. [23]

Gorivo koje se koristi na brodovima mora ispunjavati određene zahtjeve:

- Mora biti mješavina ugljikovodika dobivena rafiniranjem nafte, bez anorganskih kiselina i bez štetnih dodataka koji bi mogli ugroziti sigurnost broda, rad strojeva, osoblje, ili pridonijeti onečišćenju zraka.

- Ako je gorivo proizvedeno drugim postupcima, mora zadovoljiti određene uvjete u vezi sa sadržajem sumpora, emisijama NO_x, i sigurnosnim standardima.

Podaci o gorivu koje se koristi na brodu moraju biti upisani u dostavnicu goriva koja se mora čuvati na brodu najmanje tri godine. Ovlaštene osobe nadležnih vlasti mogu pregledati i provjeriti dostavnice goriva, a inspekcije moraju biti obavljene brzo kako ne bi došlo do nepotrebnog zadržavanja broda. Uz dostavnicu mora biti priložen uzorak goriva, zapečaćen i potpisan od strane dobavljača i predstavnika broda, koji se čuva najmanje 12 mjeseci. Stranke Priloga VI iz 1997. obavezne su voditi registre dobavljača goriva i osigurati da oni ispunjavaju sve propisane zahtjeve. Također, moraju prijaviti slučajeve kada gorivo ne ispunjava propisane standarde, kako bi se poduzele odgovarajuće mjere. Na kraju, stranke Priloga 6 su obavezne prijaviti slučajeve neusklađenosti goriva s pravilima i osigurati zamjenu neodgovarajućeg goriva odgovarajućim.

5. BUDUĆNOST I DALJNJE MOGUĆNOSTI RAZVOJA ISTRAŽIVANJA

Pomorska industrija ulaže velike napore kako bi doprinijela očuvanju morskog okoliša. Na svim razinama, od proizvodnje do administracije, koriste se najnovije tehnologije kako bi se osiguralo da novi brodovi minimalno doprinose globalnom zatopljenju. Dizajniranje broda danas predstavlja izazovan zadatak jer brodovi moraju u potpunosti zadovoljiti nove ekološke norme i propise. Nekoliko ključnih tehnologija već je razvijeno s ciljem izgradnje "zelenijeg broda" budućnosti, koji ne samo da će biti usklađen s ekološkim standardima, već će ostaviti i minimalni CO₂ otisak. [24]

Kako je praktično nemoguće potpuno eliminirati korištenje konvencionalnih goriva na brodovima, smanjenje emisije sumpora (SO_x) iz ispušnih plinova predstavlja rješenje koje će se široko koristiti u budućnosti. Ovo se može postići instaliranjem sustava za pročišćavanje ispušnih plinova, gdje se sumpor ispire iz ispušnih plinova motora, što rezultira smanjenjem emisije SO_x do 98%, kao i drugih štetnih čestica. Dobro dizajniran propeler i strujno oblikovano kormilo mogu smanjiti potrošnju goriva do 4%, što rezultira manjom emisijom. Napredni dizajni propelera i kormila ne samo da smanjuju potrošnju goriva, već i poboljšavaju brzinu plovila. [24]

Brzinske mlaznice (engl. speed nozzles) obično se koriste na malim brodovima za opskrbu i tegljenje, kako bi se osigurala snaga plovila. U kombinaciji s novim dizajnerskim značajkama trgovačkih brodova, mogu poboljšati učinkovitost pogona broda uz uštedu energije do oko 5% [24]. Još jedan važan faktor koji može smanjiti potrošnju goriva broda, a time i emisije, jest poboljšanje svojstava trupa. Nanošenje odgovarajuće boje na odgovarajući dio trupa može smanjiti otpor trenja broda, što rezultira uštedom goriva od 3-8%. Ovaj sustav koristi se već duže vrijeme, ali njegova dodatna učinkovitost može drastično smanjiti potrošnju goriva broda do 14% ukupne potrošnje. Otpadna toplina iz ispušnih plinova može se koristiti za grijanje i stvaranje pare, koja se dalje koristi za grijanje prostora za teret, smještaj itd. [24]

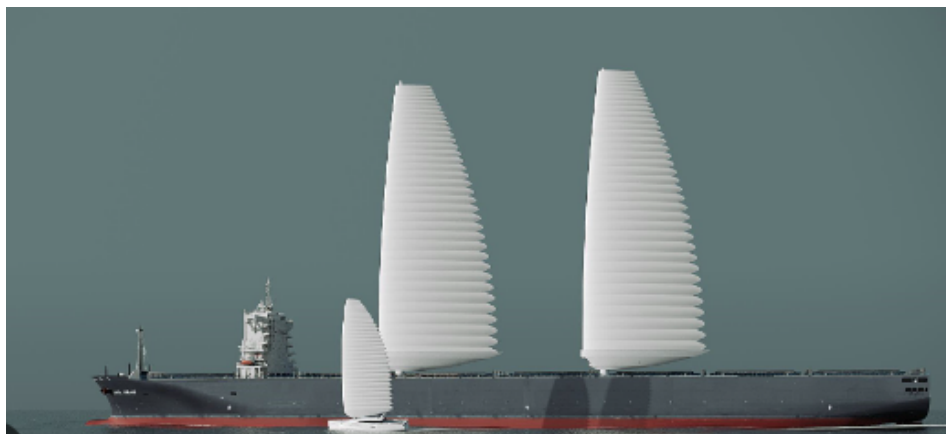
U EGR sustavu, emisija NO_x iz motora smanjuje se recirkulacijom ispušnih plinova iz cilindra motora s usisnim zrakom, čime se snižava temperatura u komori za izgaranje. Dio ispušnog zraka recirkulira se i dodaje usisnom zraku motora, što smanjuje sadržaj kisika u

usisnom zraku zajedno s temperaturom u cilindru za izgaranje. Na ovaj način, može se postići smanjenje emisije NOx do 80%. [24]

Sustav pogona jedrima i zmajevima predstavlja inovativni pristup smanjenju potrošnje goriva i emisija. Korištenje ovih sustava u kombinaciji s konvencionalnim pogonskim sustavom može rezultirati smanjenjem emisija NOx, SOx i CO2 do 35%, [24]. Ova tehnologija ne samo da smanjuje emisije štetnih plinova, već također poboljšava energetske performanse broda.



Slika 6. Pogon jedrima, [29]



Slika 7. Pogon zmajevima, [30]

Pogon na gorivne članke i solarne panele nudi značajna poboljšanja u smanjenju emisije stakleničkih plinova. Korištenjem kombinacije gorivnih članka, solarnih panela i baterijskih sustava, ova tehnologija omogućuje brodovima značajno smanjenje emisije CO₂. Energija proizvedena ovim sustavima doprinosi održivom razvoju pomorske industrije.

Sustav „sendvič” ploča (engl. Sandwich Plate System – u daljnjem tekstu SPS) predstavlja naprednu tehnologiju koja koristi spajanje dvaju metalnih ploča s poliuretanskim elastičnim jezgrom. Ova metoda smanjuje potrebu za čelikom, koji zahtijeva dodatno ojačanje, čime se smanjuje težina strukture i njezina sklonost koroziji. SPS tehnologija pruža superiornu izvedbu i smanjeno održavanje tijekom životnog vijeka broda, što je korisno za održivost i reciklažu brodova. [24]

Razvoj i implementacija ovih inovativnih tehnologija igra ključnu ulogu u stvaranju održivih brodova budućnosti. Svaka od navedenih tehnologija nudi specifična rješenja za smanjenje ekološkog otiska brodova i poboljšanje njihove energetske učinkovitosti. Ove tehnologije, kada se primjenjuju zajedno, mogu značajno doprinijeti postizanju ciljeva održivosti u pomorskoj industriji. Daljnje istraživanje i razvoj ovih tehnologija bit će ključni za budući napredak i očuvanje okoliša. [24]

Pomorska industrija odgovorna je za približno 2,5% globalnih emisija stakleničkih plinova (GHG) prema podacima iz 2018. godine. Kako se globalna trgovina očekuje da će rasti, emisije iz pomorskog prometa mogle bi se povećati za 90% do 130% u odnosu na razine iz 2008. godine do 2050., ovisno o ekonomskim uvjetima. U Kanadi, pomorski sektor proizveo je 4.2 milijuna tona GHG emisija u 2020. godini, što predstavlja oko 0.6% ukupnih kanadskih GHG emisija. Ove emisije doprinose smanjenju kvalitete zraka, zdravstvenim problemima i ekološkim oštećenjima, što rezultira značajnim ekonomskim troškovima. [25]

IMO je 2018. godine usvojila početnu strategiju za smanjenje GHG emisija iz brodskih izvora, s ciljem smanjenja ukupnih godišnjih emisija za najmanje 50% u odnosu na razine iz 2008. godine do 2050. godine. Strategija je revidirana u srpnju 2023. godine, kada je IMO obvezao pomorsku industriju na postizanje neto nulte emisije do oko 2050. godine. Ova strategija uključuje provjerene točke za praćenje napretka prema ciljevima smanjenja emisija. [25]

Regulacije su pozitivno utjecale na kvalitetu zraka u Kanadi, gdje su emisije većine onečišćivača značajno smanjene od 1990. godine. Uvođenjem područja kontroliranih emisija (engl. Emission Control Area – u daljnjem tekstu ECA) od 2012. godine, IMO je postavio ograničenja za NO_x, SO_x i krute čestice (PM) u određenim područjima, uključujući atlantske i pacifičke obale Kanade. Do 2020. godine, emisije iz brodova u cijelom sjevernoameričkom ECA smanjene su za 36% za NO_x, 78% za SO_x i 15% za čestice. [25]

Ograničenja sadržaja sumpora u gorivu rezultirala su značajnim smanjenjem emisija sumpora i čestica. Prema procjenama, smanjenje emisija u Sjevernoameričkoj ECA-i donijelo je zdravstvene koristi kao što su: 75% smanjenje dana simptoma astme, 66% smanjenje hospitalizacija, 55% smanjenje mortaliteta i 49% smanjenje slučajeva akutnog bronhitisa kod djece do 2020. godine. Ove regulacije također su rezultirale uštedom od oko jedne milijarde dolara godišnje u zdravstvenim koristima za Kanadu. [25]

Pomorske kompanije i luke provode niz praktičnih mjera za smanjenje onečišćenja zraka. Ove mjere uključuju upotrebu alternativnih izvora energije, modifikacije brodskih komponenti i povećanje operativne učinkovitosti. Uvođenje inovacija poput sustava za smanjenje NO_x emisija, poboljšanja hlađenja, te upotreba gorivnih članaka i solarnih panela doprinosi smanjenju emisija i poboljšanju energetske učinkovitosti brodova.

6. ZAKLJUČAK

U kontekstu globalnih napora za očuvanje okoliša, sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova predstavlja značajan izazov, ali i priliku za transformaciju pomorskog sektora prema održivijem modelu. Pomorski promet, kao ključna komponenta svjetske trgovine, značajno doprinosi emisijama stakleničkih plinova, dušikovih i sumporovih oksida, kao i drugih onečišćivača. Emisije doprinose globalnim klimatskim promjenama i onečišćenju zraka.

Analizom postojeće regulative, koja uključuje međunarodne standarde kao što su MARPOL konvencija, jasno je da je ostvarivanje smanjenja emisija moguće samo uz usklađivanje globalnih i lokalnih politika. Ovi propisi, iako složeni, postavljaju temelje za primjenu naprednih tehnologija i alternativnih goriva, što je ključ za smanjenje utjecaja brodskog prometa na okoliš.

Tehnološki napredak u ovom sektoru nudi značajna rješenja. Implementacija sustava za filtriranje ispušnih plinova, kao što su „skraber“i, predstavlja jedan od najizravnijih načina za smanjenje emisija sumporovih oksida. Nadalje, alternativa tradicionalnim fosilnim gorivima, uključujući LNG, biogoriva, metanol, vodik i amonijak, pokazuje veliki potencijal u smanjenju stakleničkih plinova. Također, razvoj električnog pogona i korištenje obnovljivih izvora energije nude dugoročnu perspektivu za ekološki prihvatljiviji pomorski sektor.

Međutim, usvajanje ovih tehnologija suočava se s brojnim izazovima. Visoki troškovi ulaganja, potreba za prilagodbom infrastrukture i nedostatak usklađenih sigurnosnih standarda predstavljaju značajne prepreke. Da bi se uspješno implementirale ove tehnologije, nužno je povećati globalnu suradnju i koordinaciju između brodara, regulatora i industrijskih partnera. Također, postojeći sustavi za nadzor i provedbu trebaju biti unaprijeđeni kako bi podržali prelazak na ekološki prihvatljive prakse.

Sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova zahtijeva integrirani pristup koji uključuje regulatorne, tehnološke i obrazovne aspekte. Ključne preporuke uključuju unapređenje infrastrukture za distribuciju alternativnih goriva, poticanje inovacija u tehnologiji, pružanje financijske podrške za prelazak na ekološki prihvatljive tehnologije, te

obuku i obrazovanje stručnjaka u industriji. Ovi koraci su neophodni za smanjenje utjecaja pomorskog sektora na atmosferu i osiguranje održivog razvoja u pomorskom transportu.

LITERATURA:

1. Europska agencija za okoliš (<http://www.eea.europa.eu/hr/themes/air/intro>), Onečišćenje zraka, (2.12.2024.)
2. Martinčić, M. (2023). *Kemijski sastav atmosfere* (Doctoral dissertation, University of Rijeka. Faculty of Physics).
3. Čleković, H. (2019). *Sprječavanje onečišćenja atmosfere s pomorskih brodova* (Doctoral dissertation, University of Rijeka. Faculty of Maritime Studies, Rijeka. Department of Marine Engineering and Ship Power Systems).
4. Europska agencija za okoliš, dostupno na <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution> (2.12.2024.)
5. Ivandić, I. (2018). *Sustav goriva brodskih dizelskih motora* (Doctoral dissertation, University of Split. Faculty of Maritime Studies. Department of marine engineering).
6. Kuiken, K. (2012). *Diesel Engines: for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW*. Target Global Energy Training.
7. Rušić, L. (2023). *Sprječavanje zagađenja zraka s brodova* (Doctoral dissertation, University of Rijeka. Faculty of Maritime Studies, Rijeka. Department of Navigation and Nautical Studies).
8. Lalić, B.: Optimiranje rada brodskog porivnog dizelskog motora u svrhu ispunjenja novih zahtjeva o ispušnim emisijama, Doktorski rad, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2013.
9. Tunjić, M. (2017). *Sprječavanje onečišćenja zraka s pomorskih brodova* (Doctoral dissertation, University of Rijeka. Faculty of Maritime Studies, Rijeka. Department of Marine Engineering and Ship Power Systems).
10. Paić, Š. (2023). *Sprječavanje onečišćenja mora uljima i ispušnim plinovima* (Doctoral dissertation, University of Split. Faculty of Maritime Studies. Department of marine engineering).
11. Čavrak, M. (2006). Modeliranje i simulacija onečišćenja zraka nad širim riječkim područjem. *Magistarski rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka.*
12. Prokopec, D. (2020). *Analiza mjerenih koncentracija lebdećih čestica u urbanim i ruralnim područjima u Istočnoj Slavoniji* (Doctoral dissertation, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Department of Chemistry).
13. https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/predavanje_5.pdf

14. Levanat, I. (2021). *Uređaji za smanjivanje emisije ispušnih plinova na brodu* (Doctoral dissertation, University of Dubrovnik. Department of Maritime Transport).
15. Zoko, D. (2018). *Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora* (Doctoral dissertation, University of Split. Faculty of Maritime Studies. Department of nautical studies).
16. Mulc, V. (2024). *UTJECAJ PRIMJENE ALTERNATIVNIH GORIVA NA GRADNJU I EKSPLOATACIJU BRODA* (Doctoral dissertation, University of Rijeka. Faculty of Engineering).
17. Sun, L., Wang, X., Lu, Y., & Hu, Z. (2023). Assessment of ship speed, operational carbon intensity indicator penalty and charterer profit of time charter ships. *Heliyon*, 9(10).
18. Šundov, M. (2020). *Analiza efekata korozijskog djelovanja u radnom cilindru brodskog dvotaktnog sporohodnog dizelskog motora* (Doctoral dissertation, University of Split. Faculty of Maritime Studies. Department of marine engineering).
19. Smolić, D. (2020). *Tehnička rješenja za smanjenje štetnih ispušnih plinova kod četverotaktnih motora* (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Transport and Traffic Sciences. Division of Transport. Department of Road Transport).
20. Kim, D. (2023). Exploring the Impact of Palladium Loading on Pd-Based Three-Way Catalyst Performance and Propane Reactivity for Emission Reduction in Liquefied Petroleum Gas Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2187.
21. Sustainable Shipping - Alternative Sources of Power - EMSA - European Maritime Safety Agency (europa.eu)
22. Međunarodna konvencija o sprječavanju zagađivanja s brodova MARPOL
23. Milošević-Pujo, B., & Radovan, H. (2005). Sprječavanje onečišćenja mora po MARPOL-Konvenciji. *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo*, 52(5-6), 231-234.
24. 14 Technologies to Make the Ultimate Green Ship (marineinsight.com)
25. Air Pollution – Centre for Responsible Marine Shipping (clearseas.org)
26. Međunarodna pomorska organizacija, dostupno na <https://www.imo.org/>
27. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-GHG-studies.aspx>
28. https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_ironing (2.12.2024.)
29. <https://www.cargo-partner.com/trendletter/issue-10/sails-and-kites-support-cargo-ships> (2.12.2024.)
30. <https://edition.cnn.com/2023/06/30/travel/airseas-giant-kites-ships-slash-carbon-emissions-scnc-climate-spc/index.html> (2.12.2024.)

31. Izvor: „Understanding exhaust gas treatment systems -Guidance for shipowners and operators” Llyod Register
32. “ENTEC UK Limited: UK Ship Emission Inventory, Final Report,” Defra, 2010.

POPIS SLIKA:

Slika 1. Uzroci onečišćenja	1
Slika 2. Glavni onečišćivači zraka	4
Slika 3. Sastav emisije ispušnih plinova sporookretnog dvotaktnog dizelskog motora	5
Slika 4. Druga generacija EGR sustava brodskog motora	17
Slika 5. Brodski priključak električne energije s kopna	22
Slika 6. Pogon jedrima	31
Slika 7. Pogon zmajevima	31