Mjerenje ispušnih emisija brodskog motora

Zoko, Duje

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:164:521262

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

Repository - Faculty of Maritime Studies - Split - Repository - Faculty of Maritime Studies Split for permanent storage and preservation of digital resources of the institution

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

POMORSKI FAKULTET U SPLITU

DUJE ZOKO

MJERENJE ISPUŠNIH EMISIJA BRODSKOG MOTORA

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2018.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

POMORSKI FAKULTET U SPLITU

STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE TEHNOLOGIJE

MJERENJE ISPUŠNIH EMISIJA BRODSKOG MOTORA

DIPLOMSKI RAD

MENTOR:

dr. sc. Gojmir Radica

STUDENT:

Duje Zoko

(MB: 0171240381)

SPLIT, 2018.

SAŽETAK

Sve veći broj brodova koji plove u međunarodnim vodama doveo je do povećanja emisija ispušnih plinova koji su produkt izgaranja goriva unutar brodskih dizel motora. Kako bi se količina štetnih plinova smanjila, Međunarodna pomorska organizacija (IMO) je izdala posebne odredbe kojima se prati i ograničava emisija ispušnih plinova od strane brodskih motora. Zbog toga proizvođači brodskih motora moraju razvijati nove tehnologije kojima bi rad motora bio u granicama određenim od strane IMO-a. Uz to se razvijaju i uređaji kojima se mogu izravno na brodu ili s kopna analizirati emisije ispušnih plinova kako bi se pratilo poštivanje ovih odredbi. U radu su razmotrene metode smanjenja emisija ispušnih plinova iz brodskih dizel motora, razrađene su metode mjerenja ispušnih emisija, te su obavljenja mjerenja i analizirane emisije ispušnih plinova brodskog dizel motora.

Ključne riječi*: emisija ispušnih plinova, brodski dizel motor, tehnike smanjenja emisija, uređaji za analizu*

ABSTRACT

Increase in the number of ships that sail in international waters has led to an increase in exhaust gas emissions, which are products of fuel combustion within marine diesel engines. In order to minimize the emission of such gases, the International Maritime Organization (IMO) has issued specific regulations on the reduction of exhaust gas emissions from marine engines. For this reason, marine engine manufacturers have to develop new engine technologies in order to comply with IMO's regulations. In addition, specific monitoring devices are developed that can be used to analyze exhaust gas emissions directly on a ship or from land. This paper discusses the methods of reducing exhaust gas emissions from marine diesel engines, exhaust gas emission measurement methods were developed and the measurements and analyzes of the exhaust gas emission from the diesel engine were performed.

Keywords: *exhaust gas emissions, marine diesel engine, exhaust gas emission reduction techniques, analyzing devices*

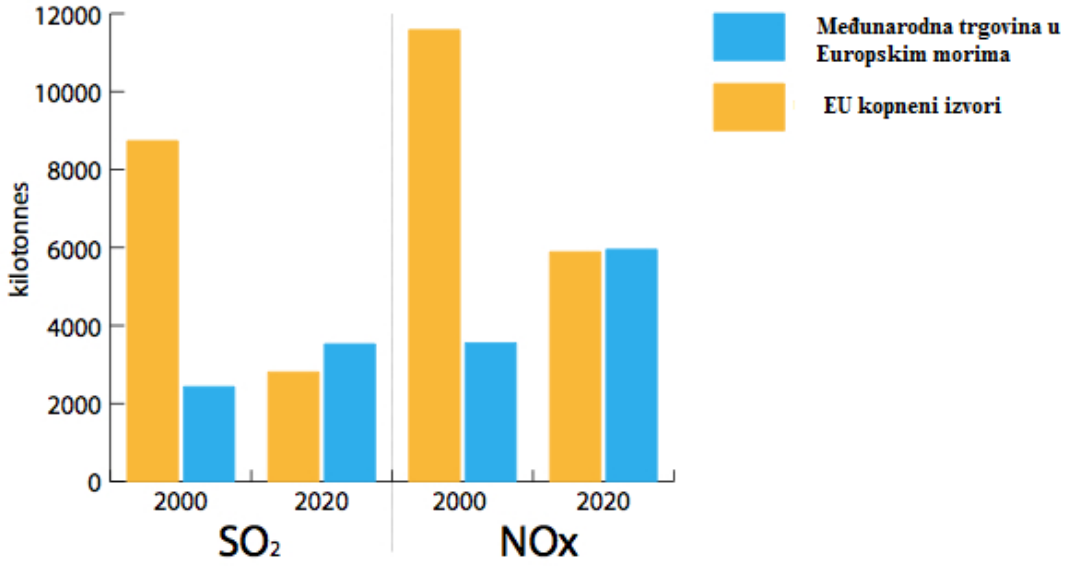
SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. MEĐUNARODNA REGULATIVA O ONEČIŠĆENJU ZRAKA IZ TRGOVAČKE FLOTE 2
2.1. ODREDBA 13 O DUŠIKOVIM OKSIDIMA 3
2.1.1. Razred I (*Tier I*) 3
2.1.2. Razred II (*Tier II*) 4
2.1.3. Razred III (*Tier III*) 4
2.2. ODREDBA 14 O SUMPOROVIM OKSIDIMA 4
2.3. PODRUČJA ZA KONTROLU EMISIJA (ECA) 5
3. BRODSKI MOTORI 6
3.1. VRSTE GORIVA ZA BRODSKI DIZEL MOTOR 7
4. STVARANJE ŠTETNIH ISPUŠNIH PLINOVA TIJEKOM PROCESA IZGARANJA U BRODSKOM DIZEL MOTORU 9
4.1. DUŠIKOVI OKSIDI (NO_X) 10
4.1.1. Stvaranje termičkog NO 10
4.1.2. Brzo stvaranje NO 11
4.1.3. Goriva koja su izvori nastajanja NO 11
4.2. SUMPOROVI OKSIDI (SO_X) 12
4.3. UGLJIKOV MONOKSID (CO) 12
4.4. UGLJIKOVODICI (CH) 13
4.5. KRUTE ČESTICE 13
4.6. UGLJIKOV DIOKSID (CO_2) 14
5. TEHNIKE SMANJENJA ŠTETNE EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA 16
5.1. PRIMARNE METODE SMANJENJA ŠTETNIH ELEMENATA U EMISIJI ISPUŠNIH PLINOVA 16
5.1.1. Optimizacija rada motora 16
5.1.2. Ovlaživanje ispirnog zraka (SAM) 23
5.1.3. Emulzifikacija goriva vodom (WIF) 23
5.1.4. Elektronski regulirano podmazivanje cilindarskih košuljica 25

5.1.5. Recirkulacija ispušnih plinova (EGR) 26
5.2. SEKUNDARNA METODA SMANJENJA ŠTETNIH ELEMENATA U EMISIJI ISPUŠNIH PLINOVA 27
5.2.1. Selektivna katalitička redukcija (SCR) 27
6. UREĐAJI ZA ANALIZU ISPUŠNIH PLINOVA 30
6.1. UREĐAJ E8500 MK 32
6.2. UREĐAJ TESTO 350 MARITIME 33
6.3. UREĐAJ VARIOPLUS INDUSTRIAL 34
6.3.1. Elektrokemijski senzor 38
6.3.2. NDIR senzor 40
6.3.3. MRU 32 Bit DataLogger 41
7. PRIMJER MJERENJA ISPUŠNIH EMISIJA BRODSKOG MOTORA 42
8. ZAKLJUČAK 48
LITERATURA 49
POPIS SLIKA 50
POPIS TABLICA 52
POPIS KRATICA 53

1. UVOD

U zadnjih nekoliko desetljeća brodarska industrija i pomorski promet brzo su se razvili. Trenutno ima više od 50 000 trgovačkih brodova koji plove u međunarodnim vodama i čine oko 90 % svjetske trgovine [1]. Povećanje brodskog prometa dovelo je do povećanja emisija ispušnih plinova kao što su dušikovi oksidi (NO_x), sumporovi oksidi (SO_x), krute čestice (engl. *particulate matter,* PM), ugljikovodici (CH_x), ugljikov monoksid (CO) i staklenički plin ugljikov dioksid (CO_2) koji su produkt izgaranja goriva unutar brodskih dizel motora. I dok se emisije štetnih tvari iz kopnenih izvora postepeno smanjuju (Protokol iz Kyota), emisije iz brodskog prometa se neprekidno povećavaju. Procijenjeno je da će do 2020. emisije NO_x i SO_x iz brodova unutar europskih mora biti jednake ili veće od kopnenih izvora emisija unutar Europske Unije (EU), vidi sliku 1Slika 1 [2].



Slika 1. Emisije SO_x i NO_x za kopnene izvore i međunarodnu plovidbu u EU [2]

Zbog toga je EU 29. travnja 2015. donijela Uredbe (EU) 2015/757 Europskog parlamenta i Vijeća o praćenju emisija CO_2 iz pomorskog prometa, izvješćivanju o njima i njihovoj verifikaciji te o izmjeni Direktive 2009/16/EZ, kako bi se smanjile emisije ispušnih plinova od strane brodova unutar EU-a [3].

U ovom radu prikazano je nastajanje emisija ispušnih plinova te su izložene metode za njihovo smanjenje i uređaji kojima se može izmjeriti i analizirati sastav tih plinova.

2. MEĐUNARODNA REGULATIVA O ONEČIŠĆENJU ZRAKA IZ TRGOVAČKE FLOTE

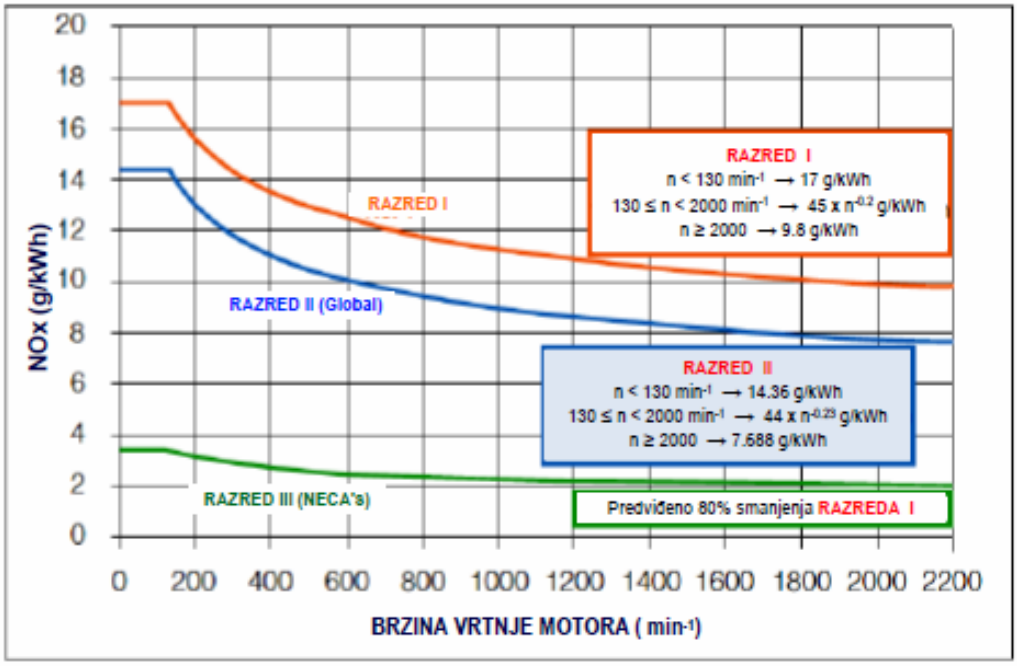
Propisi koji se odnose na onečišćenje zraka od trgovačkih brodova razvijaju se na globalnoj razini. Budući da je isporuka međunarodna, bitno je da brodarstvo podliježe jedinstvenim propisima o pitanjima kao što su emisije u zraku iz brodova. Brodarsku industriju prvenstveno regulira Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization*, IMO). IMO je agencija Ujedinjenih Naroda (UN) sa sjedištem u Londonu i odgovorna je za sigurnost života na moru i zaštitu morskog okoliša. IMO propisi o onečišćivanju brodova sadržani su u Međunarodnoj konvenciji o sprječavanju onečišćenja s brodova (engl. *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*), poznatoj pod nazivom MARPOL 73/78, koja predstavlja prvi skup propisa o emisiji ispušnih plinova. Izvorna MARPOL konvencija potpisana je 17. veljače 1973., ali nije tada stupila na snagu. Sadašnja konvencija je kombinacija konvencije iz 1973. i protokola iz 1978. godine. MARPOL 73/78 sadrži šest dodataka koji se odnose na sprječavanje različitih oblika onečišćenja mora s brodova:

- Prilog I. odnosi se na propise za sprječavanje onečišćenja naftom.
- Prilog II. opisuje kriterije pražnjenja i mjere za kontrolu onečišćenja štetnim tekućim supstancama koje se prenose u rasutom stanju.
- Prilog III. sadrži opće zahtjeve za izdavanje standarda o pakiranju, obilježavanju i označavanju.
- Prilog IV. sadrži zahtjeve za suzbijanje onečišćenja mora odvodnim vodama.
- Prilog V. se bavi različitim vrstama smeća, uključujući plastiku, i određuje udaljenosti gdje se određena vrsta smeća može baciti u more.
- Prilog VI. odnosi se na plinovite emisije brodskih motora i postrojenja. Konvencija regulira emisije sumporovih oksida, dušikovih oksida i krutih čestica iz ispušnih plinova i zabranjuje namjernu emisiju tvari koje oštećuju ozonski omotač. Također sadrži odredbe koje omogućuju stvaranje posebnih područja kontrole emisije (engl. *Emission Control Areas,* ECA) s još strožim nadzorom emisija onečišćujućih tvari u zraku. Prilog VI. isto tako zabranjuje (namjernu) emisiju tvari koja oštećuje ozon, kao što su haloni i klorofluorougljici (CFC_s), kao i svaka nova instalacija opreme koja koristi te plinove. Prilog VI. stupio je na snagu 19. svibnja 2005. godine. [4].

2.1. ODREDBA 13 O DUŠIKOVIM OKSIDIMA

Odredba 13 o dušikovim oksidima (NO_x) primjenjuje se na dizel motore snage iznad 130 kW koji se ugrađuju na brodove izgrađene 1. siječnja 2000. godine ili kasnije, osim onih koji se koriste isključivo u hitnim slučajevima, bez obzira na tonažu broda na koji su ugrađeni motori, kao što su generator za slučaj nužde, čamac/brodica za spašavanje, itd.

Tri različita razreda (engl. *Tiers*) za kontrolu NO_x (slika 2Slika 2) primjenjuju se na temelju datuma izgradnje broda.



Slika 2. Grafički prikaz razreda za kontrolu NO_x [5]

2.1.1. Razred I (*Tier I*)

Razred I pokriva eksploataciju brodskih motora koji su ugrađeni na brodovima izgrađenim poslije 1. siječnja 2000, s tim da će poslije 1. siječnja 2011. njihova uporaba biti potpuno zabranjena osim ako emisija dušikovih oksida ne prelazi zadane granice (MEPC.1/Circ.679):

a) 17.0 *g/kWh,* kad je broj okretaja motora manji od 130 *okr/min*.

b) $45.0 \cdot n^{(-0.2)}$ *g/kWh,* kad je broj okretaja motora veći od 130 *okr/min,* ali manji od 2000 *okr/min.*

c) 9.8 *g/kWh,* kad je broj okretaja motora veći od 2000 *okr/min.*

2.1.2. Razred II (*Tier II*)

Eksploatacija brodskih motora koji su ugrađeni na brodovima izgrađenim poslije 1. siječnja 2011. je u potpunosti zabranjena, osim ako emisija dušikovih oksida ne prelazi zadane granice:

a) 14.4 *g/kWh,* kad je broj okretaja motora manji od 130 *okr/min*.

b) $44.0 \cdot n^{(-0.23)}$ *g/kWh*, kad je broj okretaja motora veći od 130 *okr/min*, ali manji od 2000 *okr/min*.

c) 9.8 *g/kWh*, kad je broj okretaja motora veći od 2000 *okr/min*.

2.1.3. Razred III (*Tier III*)

Eksploatacija brodskih motora koji su ugrađeni na brodovima izgrađenim poslije 1. siječnja 2016., zabranjeno je da emisija dušikovih oksida iz brodskih motora prelazi zadane granice:

a) 3.4 *g/kWh,* kad je broj okretaja motora manji od 130 *okr/min*.

b) $9 \cdot n^{(-0.2)}$ *g/kWh,* kad je broj okretaja motora veći od 130 *okr/min*, ali manji od 2000 *okr/min*.

c) 2.0 *g/kWh*, kad je broj okretaja motora veći od 2000 *okr/min*.

2.2. ODREDBA 14 O SUMPOROVIM OKSIDIMA

Odredba 14 određuje razinu sumporovih okisda (SO_x). Kontrole emisije SO_x i čestica primjenjuju se na sva goriva, što znači za sve glavne i pomoćne motore, bojlere i generatore inertnog plina.

Koncetracija sumpora u gorivu van emisijski kontroliranih područja ECA ne smije premašiti sljedeće vrijednosti:

a) 4.50% m/m, do 1. siječnja 2012.

b) 3.50% m/m, poslije 1. siječnja 2012.

c) 0.50% m/m, poslije 1. siječnja 2020.

Koncentracija sumpora u gorivima unutar emisijski kontroliranih područja ne smije premašiti sljedeće vrijednosti:

a) 1.50% m/m, do 1. ožujka 2010.

b) 1.00% m/m, poslije 1. ožujka 2010.

c) 0.10% m/m, poslije 1. siječnja 2015.

2.3. PODRUČJA ZA KONTROLU EMISIJA (ECA)

Područja za kontrolu emisija – ECA, prikazana na slici 3, su morska područja u kojima su uspostavljene strože kontrole kako bi se smanjile emisije iz brodova kako je definirano Prilogom VI.

Postoje četiri ECA zone:

- Baltičko more – SO_x
- Sjeverno more – SO_x
- Područje Sjeverne Amerike [obale Sjedinjenih Američkih Država (SAD) i Kanade] – SO_x, NO_x, krute čestice
- Područje SAD-a u Karipskom moru – SO_x, NO_x, krute čestice [6]

Slika 3. Područja za kontrolu emisija ECA [7]

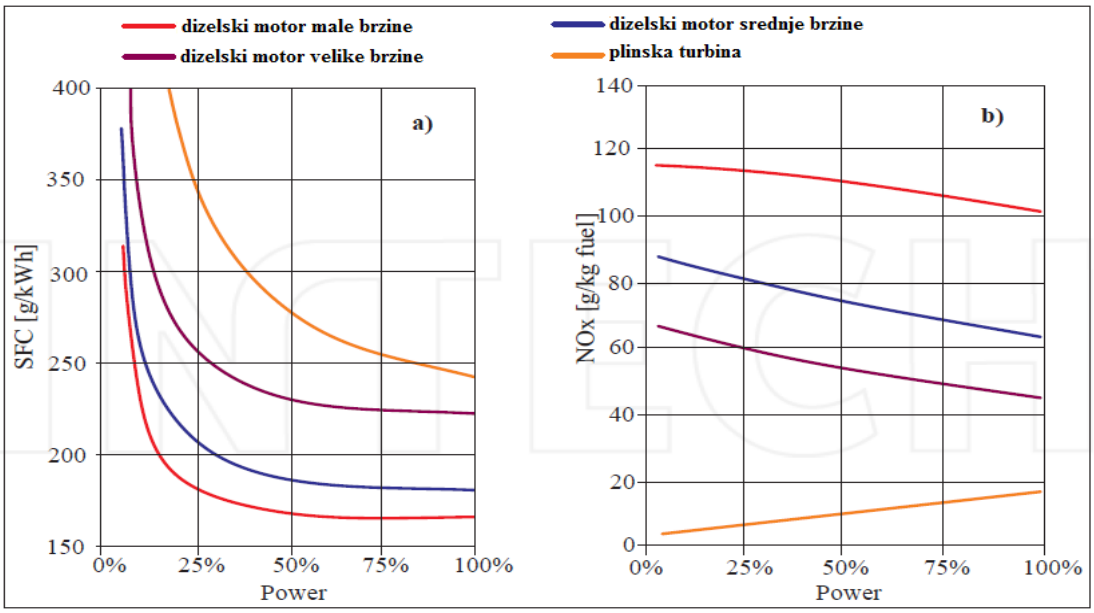
3. BRODSKI MOTORI

Snaga koja je potrebna na brodovima generira se kroz glavne i pomoćne motore koji se u literaturi često nazivaju glavni porivni strojevi. Mogu se podijeliti na: dizelski motor, plinsku turbinu, parnu turbinu i električni motor.

Dizelski motor najčešći je primarni porivni stroj trgovačke mornarice, uglavnom zbog svoje niske potrošnje goriva u usporedbi s ostalim porivnim strojevima. Snaga se kreće između 0.25 MW za najmanji motor velike brzine vrtnje i do 100 MW za najveće brodske dizel motore s malom brzinom vrtnje.

Glavne prednosti dizelskog motora su sljedeće: relativno je neosjetljiv na kvalitetu goriva; može raditi na brodsko dizelsko gorivo (MDO) i teška dizelska goriva (HFO), kao i lako gorivo; i ima visoku pouzdanost i visoku učinkovitost. S druge strane, glavni nedostaci dizelskog motora su emisije onečišćujućih tvari, mali omjer snage i težine u usporedbi s plinskom turbinom te vibracije i buka.

S gledišta primjene, dostupne su tri glavne vrste dizel motora: dizelski motori male brzine (o/min <200), dizelski motori srednje brzine (200 <o/min<1000) i dizelski motori velike brzine (o/min> 1000). S gledišta izgradnje mogu se razlikovati dva tipa: dvotaktni motori male brzine i četverotaktni motori (srednja ili velika brzina). Dizelski motori s malim brzinama dominantni su na tankerima te na brodovima za prijevoz rasutog tereta i kontejnera. Takvi tipovi motora koriste se kao brodski pogonski motori bez brodske spojke sa reduktorom, tj. izravno su spojeni na sustav propelerskog vratila. Ovi motori trenutno su najučinkovitiji u smislu specifične potrošnje goriva, ali razina emisije NO_x iz tih motora je vrlo visoka u usporedbi s brodskim dizel motorima srednje ili velike brzine (vidi sliku 4b). Dizelski motori imaju specifičnu potrošnja goriva oko 160-185 g/kWh, nasuprot 220-240 g/kWh kod plinskih turbina i 300 g/kWh kod parnih turbina (vidi sliku 4a).



Slika 4. a) Specifična potrošnja goriva porivnih strojeva b) Omjer emisije NO_x za porivne strojeve [8]

3.1. VRSTE GORIVA ZA BRODSKI DIZEL MOTOR

Brodski dizel motori koriste tri vrste tekućih goriva standardiziranih standardom goriva ISO 8217 za morska destilirana goriva: lako gorivo (engl. *gas oil,* GO) s maksimalnom gustoćom od 890 kg/m^3 pri 15°C, brodsko dizelsko gorivo (engl. *marine diesel oil,* MDO) s maksimalnom gustoćom od 890 do 900 kg/m^3 pri 15°C, i teško gorivo (engl. *heavy fuel oil,* HFO) s maksimalnom gustoćom od 920 do 1010 kg/m^3 pri 15°C.

Standard goriva ISO 8217 za morska destilirana goriva također definira vrijednosti bitnih svojstava svake vrste goriva. Najvažnija svojstva brodskih goriva su kako slijedi:

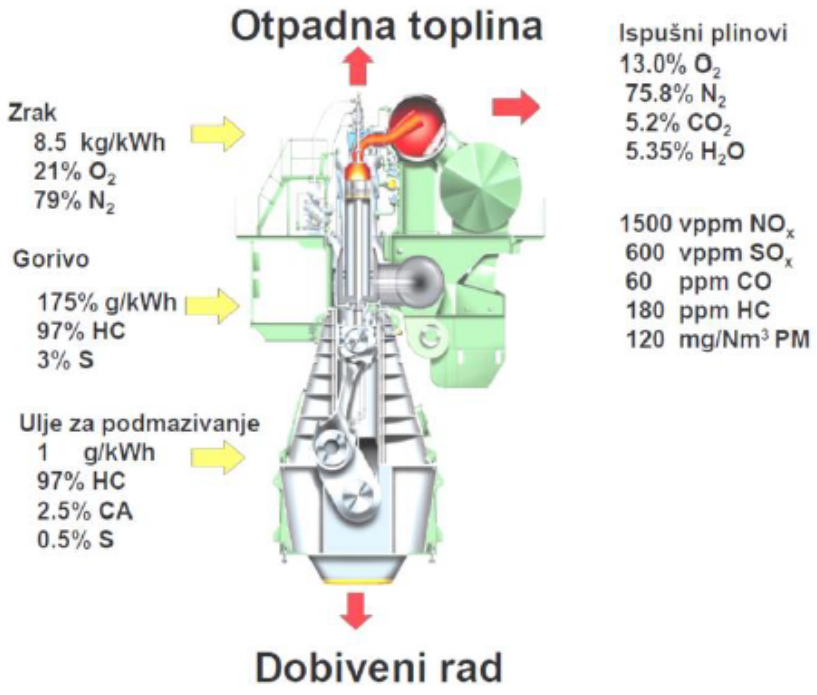
- kinematska viskoznost, izražena kao mm^2/s, mjera je za fluidnost goriva na 50°C. Viskozitet goriva se smanjuje s povećanjem temperature. U trenutku kada gorivo napusti mlaznice, viskoznost mora biti unutar granica koje je propisao proizvođač motora kako bi se dobio optimalan uzorak raspršivanja; inače, to će dovesti do slabog izgaranja, stvaranja depozita i gubitka energije.
- gustoća izražena kao kg/m^3 na 15°C je pokazatelj kakvoće paljenja posebno za niske viskoznosti HFO-a.
- sadržaj sumpora koji ovisi o podrijetlu sirove nafte i procesu rafiniranja. Kada gorivo izgori, sumpor se pretvara u sumporove okside koji imaju utjecaj na okoliš.

Maksimalni dopušteni sadržaj sumpora u brodskim gorivima objašnjen je u poglavlju 2.2.

- temperatura paljenja je temperatura na kojoj se pare goriva zapale. Minimalna točka paljenja za brodska goriva je 60°C prema IMO Međunarodnoj konvenciji o zaštiti ljudskih života na moru (engl. *Safety Of Life At Sea,* SOLAS).
- ugljikove ostatke određuje se laboratorijskim testom koji je proveden pod određenim smanjenim dovodom zraka. To daje naznaku količine ugljikovodika u gorivu koje teško izgara.
- voda u gorivu je kontaminant i ne daje nikakvu energiju. Postotak vode u gorivu može se prevesti u odgovarajući gubitak energije za kupca. Voda se uklanja na brodu centrifugalnim pročišćavanjem.
- sadržaj pepela je mjera metala prisutnih u gorivu (za GO i MDO maksimalno 0.01% mase i za HFO od 0.04 do 0.15% mase), bilo kao svojstvena gorivu ili kao onečišćenje.
- vanadij i nikal su elementi pronađeni u nekim molekulama teškog goriva. Nakon izgaranja formiraju se vanadijev oksidi, a neki imaju kritičnu temperaturu taljenja. Najkritičniji su dvostruki oksidi/sulfati s natrijem. Maksimalna dopuštena količina je 50 do 450 mg/kg.
- cetanski indeks (engl. *Cetan index*) je mjera kakvoće paljenja goriva u dizel motoru. Što je veća brzina motora, to je veći indeks cetana.
- vrijednost grijanja (kalorična vrijednost) definira se kao količina topline koja se oslobađa tijekom izgaranja 1 kg goriva. Pretpostavlja se da je nakon izgaranja sadržaj vode u gorivu prisutan kao para. Toplina kondenzacije nije uključena u toplinsku vrijednost i nazivana je kao neto kalorična vrijednost ili niža toplinska vrijednost. Standardna neto kalorična vrijednost za GO je 44.000 kJ/kg, za MDO 42.000 kJ/kg i za HFO 40.500 kJ/kg.

4. STVARANJE ŠTETNIH ISPUŠNIH PLINOVA TIJEKOM PROCESA IZGARANJA U BRODSKOM DIZEL MOTORU

Glavni zagađivači u ispušnim plinovima dizel goriva su izravni rezultat samog procesa izgaranja dizela. Na slici 5 prikazan je tipičan sastav emisije ispušnih plinova. Tipične koncentracije ispušnih plinova iz brodskog dizelskog motora u velikoj mjeri sadrže dušik (približno 76%), kisik (približno 13%), ugljični dioksid (približno 5%) i vodenu paru (približno 5%); s manjim količinama onečišćujućih tvari: dušikov oksid [približno 1500 ppm (engl. *parts per million*)], sumprov oksid (približno 600 ppm), ugljični monoksid (približno 60 ppm), djelomično reagirani i ne sagorijevani ugljikovodici (približno 180 ppm) i krute čestice (približno 120 mg/Nm^3). Sastav ove plinske mješavine, tekućina i krutih tvari koji se zapravo ispuštaju u zraku će varirati ovisno o vrsti motora, snazi motora, radnim uvjetima kao i o tipu goriva i ulja za podmazivanje, a također ovisi o tome je li sustav za kontrolu emisije prisutan.



Slika 5. Tipičan sastav emisije ispušnih plinova sporokretnog dvotaktnog motora tipa MAN B&W MC [5]

4.1. DUŠIKOVI OKSIDI (NO_x)

Dušikovi oksidi (NO_x) nastaju toplinski iz atmosferskog kisika i dušika u usisnom ili ispušnom zraku. Na oksidaciju atmosferskog dušika utječu lokalni uvjeti u komori za izgaranje kao što su maksimalni tlak cilindra, lokalne maksimalne temperature i omjer lokalnog zraka i goriva. Primarni proizvod reakcije je dušikov monoksid (NO) koji čini otprilike 90% volumena, no oko 5% se pretvara u dušikov dioksid (NO_2) kasnije u ciklusu izgaranja, tijekom ekspanzije i tijekom protoka kroz ispušni sustav. Istovremeno nastaje vrlo ograničen udio dušikovog (I) oksida (N_2O). Daljnja oksidacija NO u NO_2 se nastavlja na sobnoj temperaturi nakon što su ispušni plinovi prošli u atmosferu.

Dušikov oksid je od posebne važnosti zbog štetnih učinaka na disanje i biljni svijet i zbog značajnog doprinosa kiselim kišama. Osim toga, NO_x su zajedno s hlapivim organskim spojevima (engl. *volatile organic compounds,* VOC) uključeni u seriju fotokemijskih reakcija koje vode do porasta količine troposferskog ozona koji nepovoljno utječe na zdravlje ljudi i prirodnu vegetaciju. Takvi su problemi izraženi na kopnu, a posebno u urbanim područjima.

Analiza procesa sagorijevanja u cilindru i reakcije koje su uključene u stvaranje NO identificirale su tri glavna izvora NO, od kojih su neki, kao što je gore spomenuto, pretvoreni u NO_2 kako bi se dobila smjesa NO_x: stvaranje termičkog NO, brzo stvaranje NO i goriva koja su izvori nastajanja NO. Većinu emisije NO čine motori s unutarnjim izgaranjem kroz toplinski proces.

4.1.1. Stvaranje termičkog NO

Tijekom procesa sagorijevanja u dizel motoru postižu se visoke temperature. Temperature oko 1700 K i iznad, do 2500 K, prestavljaju dostatnu toplinsku energiju za disocijaciju kisika, dušika i drugih molekula nastalih tijekom procesa sagorijevanja. Rekombinacija elemenata dovodi do stvaranja NO. Reakcijski procesi su prilično spori, tako da se većina dušikovih oksida stvara tijekom miješanja stehiometrijskih plinova izgaranja s viškom zraka koji se nalazi u cilindru. U dizelskim motorima s malim i srednjim brzinama, daleko najvažniji dio NO_x nastaje u procesu termičkog NO.

Formiranje dušikovog oksida može se prikazati s tri kemijske reakcije temeljene na Zeldovichovom mehanizmu:

$$N_2 + O \rightarrow NO + N \tag{1}$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \tag{2}$$

$$N + OH \rightarrow NO + H \tag{3}$$

Prve dvije reakcije pokazuju stvaranje NO za siromašnu smjesu goriva, dok treća reakcija pokazuje stvaranje NO za bogatu smjesu goriva. Prva reakcija u ovom procesu predstavlja najsporiji stupanj u mehanizmu pretvorbe, zbog svoje vrlo visoke temperaturne aktivacije. Potrebna je visoka energija aktivacije da bi se raskinula trostruka veza u molekuli dušika (:N≡N:) koji se javlja pri visokoj temperaturi izgaranja; to se naziva termični dušikov monoksid (NO). Stopa stvaranja termičkog NO je praktički beznačajna ako je temperatura ispod 1700 K. S druge strane, ako se temperatura povisi, osobito iznad 2000 K, stvaranje termičkog NO jako se ubrzava. Nastajanje termičkog NO može se smanjiti snižavanjem i kontroliranjem temperaturnih maksimuma i minimaliziranjem ostataka dimnih plinova pri visokim temperaturama.

4.1.2. Brzo stvaranje NO

Dušikov monoksid može se odmah formirati na prednjem dijelu plamena zbog prisutnosti ugljikovodičnih radikala proizvedenih samo na prednjem dijelu plamena na relativno niskoj temperaturi. Dušikov monoksid koji se stvara putem ove rute naziva se „brzi dušikov monoksid (NO)“. Radikali ugljikovodika (CH) reagiraju s molekulama dušika sljedećim nizom reakcijskih koraka:

$$CH + N_2 \rightarrow HCN + N \tag{4}$$

$$HCN + N \rightarrow \cdots \rightarrow NO \tag{5}$$

Dušik reagira s CH radikalom čime nastaje cijanovoik (HCN). Daljnjim reakcijama HCN reagira s dušikom kako bi u konačnici nastao dušikov monoksid. Za razliku od mehanizama termičkog NO koji imaju temperaturu aktivacije iznad 1700 K, brzonastajući NO može se formirati na nižim temperaturama, počevši oko 1000 K.

4.1.3. Goriva koja su izvori nastajanja NO

Nastajanje NO iz goriva postaje važno pri korištenju teških goriva jer takva goriva sadrže više organskih dušika od brodskog dizelskog goriva i drugih destilacijskih goriva. Teško gorivo može sadržavati do 0.5% dušika što povećava ukupnu emisiju NO_x za čak 10%.

4.2. SUMPOROVI OKSIDI (SO_X)

Nastajanje SO_x u ispušnim plinovima uzrokovano je oksidacijom elementarnog sumpora u gorivu u sumporov monoksid (SO), sumporov dioksid (SO_2) i sumporov trioksid (SO_3) tijekom procesa sagorijevanja. Emisije SO_x u ispušnim plinovima dizel motora uglavnom se sastoje od SO_2 i male količine SO_3. Stabilni spojevi kao što su SO_2, sumporovodik (H_2S), ugljikov disulfid (CS_2) i disulfidi (S_2) nastaju tijekom izgaranja bogatih smjesa goriva.

Pri visokim temperaturama radikali SO reagiraju s kisikom (O_2) pri čemu nastaje SO_2. Količina emisije SO_2 ovisi o sumpornom sadržaju u korištenom gorivu i ne može se kontrolirati procesom sagorijevanja.

Nadalje, SO_3 ne može nastati izgaranjem u uvjetima s puno goriva, čak i kada je sagorijevanje blizu stehiometrijske točke. Međutim, ako postoji čak 1% viška zraka, količina SO_3 brzo raste. Obično SO_3 čini 5% količine sumporovih oksida (SO_2 i SO_3). Primjerice, ako gorivo sadrži 3% sumpora, količina nastalih SO_x je oko 64 kg po toni izgorenog goriva; a ako se koristi gorivo s 1% sumpora, količina emisije SO_x je oko 21 kg po toni izgorenog goriva.

SO_x nastali iz ispušnih plinova su korozivni i djelomično su neutralizirani mazivnim uljem motora koji se koristi kao tipična baza. Štoviše, SO_x reagiraju s vlagom pri čemu nastaje sumporna kiselina (H_2SO_4) koja se potom izlučuje u obliku kiselih kiša. Kisele kiše imaju štetan učinak na biljke i zdravlje ljudi, a osim toga oštećuju mnoge objekte, uključujući zgrade. Kod ljudi, sulfatne čestice mogu izazvati astmu, bronhitis i bolesti srca.

4.3. UGLJIKOV MONOKSID (CO)

Nastajanje ugljikovog monoksida (CO) rezultat je nepotpunog izgaranja organskog materijala, do čega dolazi ili zbog nedostatka kisika ili zbog niske temperature u nekim mjestima u komori za sagorijevanje. Isti razlozi dovode do stvaranja ugljikovodika (CH). Ugljikovodici također mogu nastati isparavanjem ulja za podmazivanje pri kraju procesa sagorijevanja.

U dizelskim motorima nastajanje CO određeno je smjesom zraka/goriva u komori za izgaranje, a budući da dizelsko gorivo ima konzistentno visok omjer gorivo-zrak i učinkovit proces sagorijevanja, stvaranje ovog otrovnog plina je minimalno. Ipak, može doći do nedovoljnog izgaranja ako su kapljice goriva u dizel motoru prevelike ili je razina

turbulencije nedovoljna ili se stvara vrtlog u komori za sagorijevanje. Kod spaljivanja teških goriva emisije ugljikovodika su niže nego kod izgaranja laganih goriva zbog manjeg nivoa isparavanja.

4.4. UGLJIKOVODICI (CH)

Emisije ugljikovodika (CH) su frakcija ispušnih plinova iz dizel motora. Uglavnom se sastoje od neizgorenog ili djelomično izgorenog goriva i ulja za podmazivanje kao rezultat nedovoljne temperature. To se često događa blizu zidova cilindra gdje je temperatura mješavine zraka/goriva znatno manja nego u sredini cilindra. U atmosferi ugljikovodici ulaze u fotokemijske reakcije s dušikovim oksidima i tvore prizemni ozon i smog. Emisije ugljikovodika predstavljaju ili ukupni ugljikovodici ili ne-metanski ugljikovodici.

4.5. KRUTE ČESTICE

Krute čestice predstavljaju smjesu organskih i anorganskih tvari koje u velikoj mjeri sadrže elementarni ugljik, minerale pepela, teške metale, kondenzirane sumporove okside, vodu i razne neizgorene ili djelomično izgorene ugljikovodične komponente goriva i mazivnih ulja. Više od polovice ukupne mase krutih čestica je čađa (anorganske čestice koje sadrže velike količine ugljika), čiji je vidljivi dokaz dim.

Neke čestice goriva ne gore u potpunosti i ispuštaju se kao kapljice teških tekućina ili materijala koji sadrži velike količine ugljika. Nepotpuno izgaranje rezultat je lokalno niskih količina zraka koji je u višku. Nepravovremeno ili na bilo koji način neispravno ubrizgavanja goriva i loše miješanje goriva unutar cilindra također rezultiraju nepotpunim sagorijevanjem i povećanjem emisija krutih čestica. Čestice čađe (neizgoreni – elementarni ugljik) nisu same po sebi toksične, ali mogu uzrokovati nakupljanje ugljikovodika topivih u vodi, a neki od njih se smatraju kancerogenima.

Krute čestice tvore najviše 0.003% ispušnih plinova motora. Gotovo cijelu masu dizelskih krutih čestica čine fine čestice u promjeru od 10 mikrona (PM_{10}) ili manje. Otprilike 94% mase ovih čestica je promjera manjeg od 2.5 mikrona ($PM_{2.5}$). Krute čestice dizela su poseban problem jer predstavljaju opasnost od nastanka raka pluća kod ljudi, kao i opasnost od razvijanja neželjenih respiratornih problema kao što je upala respiratornog trakta. Zbog male veličine čestice su lako udišu i mogu dospijeti u najmanje dišne puteve pluća, zajedno s adsorbiranim spojevima, od kojih su mnogi poznati ili se sumnja da su

mutageni i kancerogeni. Sekundarne reakcije NO_x i SO_x također mogu proizvesti krute čestice.

Najučinkovitija metoda smanjenja emisija krutih čestica je uporaba lakših destiliranih goriva; međutim, to dovodi do dodanih troškova. Dodatna smanjenja emisija krutih čestica mogu se postići povećanjem tlaka ubrizgavanja goriva kako bi se osiguralo postizanje optimalnog miješanja zraka/goriva. Treća metoda smanjenja emisija krutih čestica je korištenje ciklonskih separatora koji su učinkoviti za čestice veće od 0.5 μm.

4.6. UGLJIKOV DIOKSID (CO_2)

Ugljikov dioksid (CO_2) je jedan od osnovnih produkata izgaranja i nije toksičan; međutim, povezan je s „efektom staklenika“ i globalnim zagrijavanjem. Ispušni plinovi iz dizel motora sadrže CO_2 kao rezultat izgaranja ugljika i kisika. Maksimalna koncentracija CO_2 će se generirati tijekom stehiometrijskog izgaranja, tj. kada potpuna količina goriva reagira s kisikom iz zraka tijekom izgaranja. Stvarna koncentracija CO_2 ovisi o relativnom sadržaju ugljika (C), vodika (H) i ostalih gorivih elementa u gorivu. Maksimalne vrijednosti CO_2 za uobičajene vrste brodskog goriva prikazane su u tablici 1, pod pretpostavkom da je ispušni plin suh.

Tablica 1. Vrijednosti CO_2 za uobičajene vrste brodskog goriva (suhi ispušni plin) [8]

Gorivo	CO_2 max(%)
Prirodni plin	11.9
Lako gorivo	15.5
Teško gorivo	15.8

Maksimalna vrijednost ugljikovog dioksida (CO_2 max) može se izračunati prema sljedećim izrazima:

$$CO_2 \max = \frac{\text{broj molekula } CO_2 \text{ proizvedenih potpunim izgaranjem goriva}}{\text{ukupan broj molekula produkata izgaranja}} \tag{6}$$

Smanjenje emisije CO_2 može se postići smanjenjem potrošnje posebnih goriva (engl. *specific fuel oil consumption,* SFOC) jer je količina proizvedenog CO_2 izravno proporcionalna količini korištenog goriva, a time i učinkovitosti motora. Alternativa je korištenje goriva s niskim udjelom ugljika u odnosu na vodik, što uvelike povećava cijenu

brodskih goriva. Tablica 2 sažetak je informacija o prethodno opisanim zagađivačima i njihovim izvorima. [8]

Tablica 2. Sažetak o zagađivačima [8]

Emisija	Izvor
NO_x	Rezultat maksimalne temperature izgaranja, količine kisika i vremena zadržavanja (funkcija brzine motora u okretajima po minuti)
SO_x	Rezultat sadržaja sumpora u gorivu
CO	Rezultat viška omjera zraka, temperature izgaranja i mješavine zrak/gorivo
CH	Rezultat količine goriva i ulja za podmazivanje koja je ostala neizgorena tijekom procesa sagorijevanja
Krute čestice	Potječe od neizgorenog goriva kao i udjela pepela u gorivu i ulju za podmazivanje
CO_2	Rezultat izgaranja

5. TEHNIKE SMANJENJA ŠTETNE EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA

Regulativa Međunarodne pomorske organizacije glede koncentracije NO_x u emisiji ispušnih plinova je glavna razvojna vodilja proizvođača brodskih motora. Emisija NO_x se može smanjiti primarnim ili sekundarnim metodama ili kombinacijom obiju metoda. Primarnim metodama se nazivaju sve konstrukcijske promjene motora, a sekundarnim metodama se nazivaju sve metode obrade ispušnih plinova.

U najvažnije primarne metode smanjenja koncentracije NO_x u emisiji ispušnih plinova spadaju:

- Promjena parametara, tj. optimizacija rada motora (engl. *Performance adjustment*)
- Ovlaživanje ispirnog zraka (engl. *Scavenge Air Moistening,* SAM)
- Emulzifikacija goriva vodom (engl. *Water-in-Fuel emulsion,* WIF)
- Recirkulacija ispušnih plinova (engl. *Exhaust Gas Recirculation,* EGR).

U najvažnije sekundarne metode smanjenja koncentracije NO_x u emisiji ispušnih plinova spada selektivna katalistička redukcija (eng. *Selective Catalytic Reduction,* SCR).

5.1. PRIMARNE METODE SMANJENJA ŠTETNIH ELEMENATA U EMISIJI ISPUŠNIH PLINOVA

5.1.1. Optimizacija rada motora

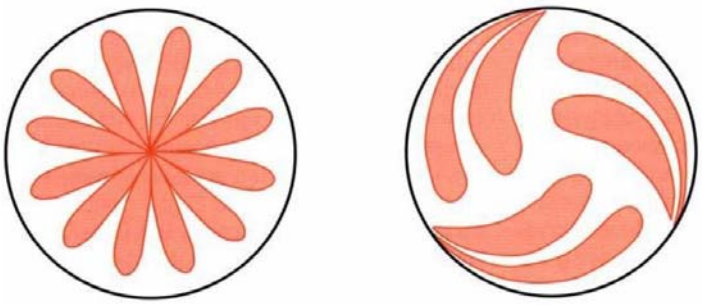
Koncept smanjenja koncentracije NO_x uslijed optimizacije rada motora podrazumijeva promjenu jednog ili više parametara kao što su: vrijeme ubrizgavanja goriva, sekvence ubrizgavanja goriva, vrijeme otvaranja ispušnog ventila, rasprskač goriva i oblik njegove sapnice, tlak ubrizgavanja goriva, omjer kompresije, te tlak i temperatura ispirnog zraka.

Navedeni parametri su podložni izmjenama kod svih velikih proizvođača brodskih dvotaktnih sporokretnih dizelskih motora kao što su MAN, Wärtsilä i Mitsubishi Heavey Industries Ltd., kako bi se zadovoljile zakonske odrednice.

Rasprskač goriva i oblik njegove sapnice

Današnji dvotaktni sporokretni brodski motori imaju dva ili tri rasprskača goriva koji se nalaze na samom rubu komore izgaranja. Svaki rasprskač ima sapnicu sa određenim

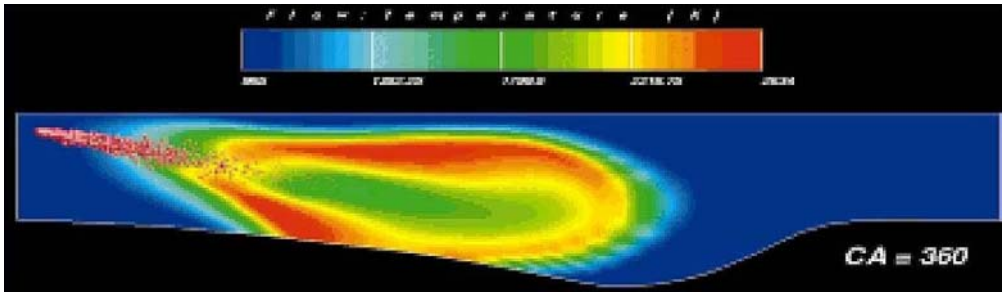
brojem rupica. Interakcija između pojedinih mlazeva goriva iz rupica pojedinih sapnica ima značajan utjecaj na količinu nastalog NO_x, pa tako postoji i optimalan broj rupica na svakoj sapnici uslijed koga dolazi do smanjenja količine nastalog NO_x. Na slici 6 je prikazana šablona formiranja mlaza goriva kod četverotaktnog i dvotaktnog motora.



Slika 6. Šablona formiranja mlaza goriva kod četverotaktnog i dvotaktnog motora [5]

Kod malog broja rupica na sapnici rasprskača zakašnjela interakcija visokih temperatura izgaranja i kisika u zonama između pojedinih mlazeva goriva dovodi do povećanja količine nastalog NO_x. Kod srednjeg broja rupica na sapnici rasprskača formiraju se zone visokih temperatura između pojedinih mlazeva goriva, ali su one bliže jedna drugoj pa preostaje manje kisika iz okolnih neizgorenih plinova. Kod velikog broja rupica na sapnici rasprskača pojedini mlazevi izgaraju ranije tvoreći visoke temperature izgaranja uslijed čega u tim zonama uzrokuju nastajanje velikih količina NO_x.

Prema provedenim istraživanjima tvrtke Wärtsilä Sulzer, položaj zone izgaranja u odnosu na metalne površine klipa i glave cilindra je od iznimne važnosti prilikom kontrole nastanka NO_x kod srednjohodnih motora. Na slici 7 se lako da uočiti da su najtoplija mjesta zone izgaranja upravo najbliža površini klipa i glave cilindra. Snižavanjem vršnih temperatura izgaranja poboljšanim hlađenjem klipa i glave cilindra postiže se redukcija sadržaja NO_x u emisiji ispušnih plinova. S druge strane pretjerano hlađenje dovodi do povećanja sadržaja čađe. Rezultat njihovog istraživanja je pokazao da se sa optimalnom redukcijom sadržaja NO_x postiže i optimalan sadržaj čađe u emisiji ispušnih plinova.

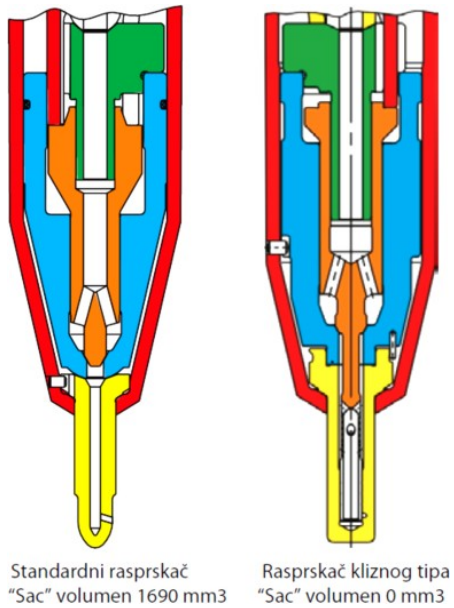


Slika 7. Raspored temperatura u zoni izgaranja srednjokretnog motora [5]

Tvrtka MAN Diesel danas kao standardne rasprskače na svim velikim dvotaktnim sporokretnim brodskim motorima koristi rasprskač kliznog tipa (engl. *slide-type injection valve*) čiji je volumen prostora unutar sapnice rasprskača (engl. *„sac“* – predstavlja prazni prostor ispod površine igle ventila i dna sapnika) sveden na nulu. Na ovaj način se onemogućava da gorivo ostaje unutar sapnice nakon izvršenja ubrizgavanja što direktno dovodi do redukcije koncentracije NO_x, CO i ugljikovodika. U tablici 3 je prikazan efekt uvođenja kliznog tipa rasprskača, a na slici 8 je prikazana razlika između standardnog i kliznog tipa rasprskača.

Tablica 3. Efekt promjene oblika rasprskača goriva [5]

Rezultati	NO_x	CO	Čađa	ΔSFOC
Mjerne jedinice	ppm/15%O_2	ppm/15%O_2	BSN_6	g/kWh
Standardni rasprskač / sapnica	1594	109	0,35	0,0
Sapnica sa 6 rupica	1494	108	0,23	+0,29
Klizni rasprskač	1232	87	0,18	+1,34
BSN_6 – Bosh-ov broj mjeren nakon 6 ubrizgavanja				



Slika 8. Prikaz razlike novog kliznog rasprskača i standardnog rasprskača za motor MAN B&W K98MC [5]

Testiranjem rada kliznog tipa rasprskača na svom motoru 12K90MC (55MW kod 94 o/min, 90% MCR), tvrtka MAN B&W Diesel je došla do spoznaje da se upotrebom ovog tipa rasprskača postiže 23%-tno smanjenje sadržaja NO_x u odnosu na stare standardne rasprskače goriva uz 1% povećanja specifične potrošnje goriva (SFOC).

Elektronski kontrolirani motori

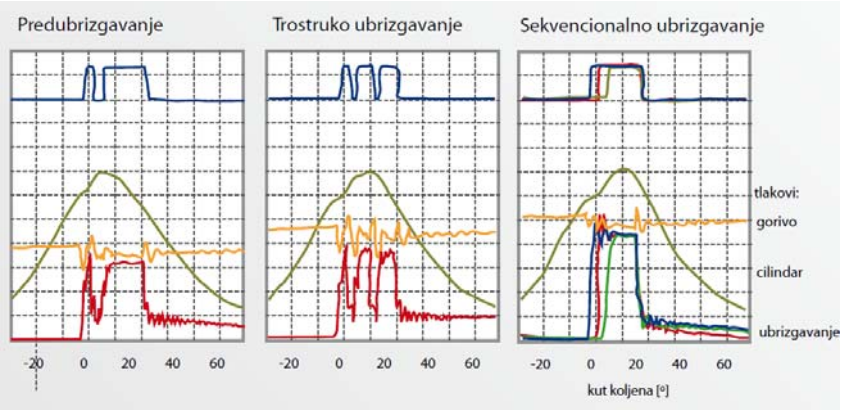
Novi elektronski kontrolirani motori omogućuju veliku fleksibilnost optimizacije procesa izgaranja duž cijelog režima rada. Neke značajke elektronski kontroliranih motora su dostupne i kod konvencionalnih motora, ali elektronski upravljani motori dopuštaju vrlo veliku operativnu fleksibilnost. Glavne značajke elektronski kontroliranih motora su kontrola kuta ubrizgavanja goriva (engl. *Variable Injection Timing,* VIT), oblik ubrizgavanja, kontrola tlaka ubrizgavanja i kontrola zatvaranja ispušnog ventila (engl. *Variable Exhaust valve Closing,* VEC). S kontrolom zatvaranja ispušnog ventila dobija se mogućnost promjene tlaka kompresije. Uz pomoć VIT-a i VEC-a omogućena je interakcija pomaka kuta ubrizgavanja i tlaka kompresije duž cijelog režima rada motora, tj. omogućeno je postizanje maksimalnih tlakova izgaranja pri malim opterećenjima, a izbjegavanje previsokih tlakova izgaranja pri velikim opterećenjima motora. Elektronski kontrolirani motori omogućuju visoke tlakove ubrizgavanja, a time i kvalitetno raspršivanje goriva čak i pri malim opterećenjima motora.

Početak ubrizgavanja goriva

Nastanku NO_x pogoduju maksimalne temperature izgaranja i dužina trajanja izgaranja. Ispušni plinovi nastali izgaranjem prije postizanja maksimalnog tlaka izgaranja se praktički komprimiraju uslijed porasta tlaka izgaranja sve dok tlak izgaranja ne postigne svoj maksimum. Što znači da ovi plinovi izgaranja ostaju pod utjecajem maksimalnih temperatura izgaranja relativno dug vremenski period u usporedbi sa preostalim vremenom izgaranja, a što u konačnici omogućuje više vremena za stvaranje NO_x. Odgađanje ubrizgavanja goriva dovodi do nižih maksimalnih tlakova i temperatura tijekom većeg dijela izgaranja. Odgađanje ubrizgavanja povećava specifičnu potrošnju goriva (SFOC) zbog kasnijeg završetka izgaranja i većih toplinskih gubitaka. Također dolazi i do povećanja sadržaja čađe uslijed nižih temperatura izgaranja i lošijeg izgaranja.

Oblikovanje procesa ubrizgavanja

Na slici 9 prikazana su tri načina ubrizgavanja elektronski kontroliranog dvotaktnog sporokretnog dizelskog motora RT-Flex tvrtke Wärtsilä.

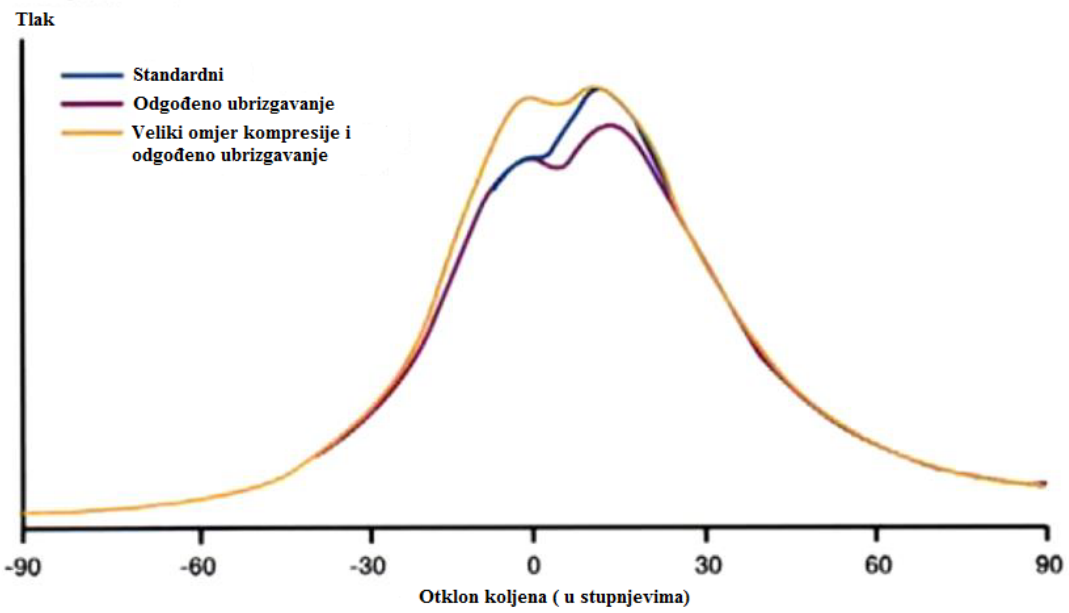


Slika 9. Tri načina ubrizgavanja goriva kod Wärtsilä RT-Flex motora [5]

Prilikom predubrizgavanja i trostrukog ubrizgavanja sva tri rasprskača su u funkciji i rade istovremeno, dok je kod sekvencijalnog ubrizgavanja moguće isključiti iz rada jedan ili dva rasprskača goriva. Prilikom predubrizgavanja jedan manji dio goriva se ubrizgava prije glavnog mlaza dok se prilikom trostrukog ili pulsirajućeg ubrizgavanja gorivo ubrizgava u odvojenim kratkim mlazevima. Kod sekvencionalnog načina ubrizgavanja svaka od tri mlaznice se aktivira neovisno. Sekvencionalno ubrizgavanje rezultira 20%-tnim smanjenjem koncentracije NO_x i sa 7%-tnim povećanjem specifične potrošnje goriva.

Omjer kompresije, vrijeme ubrizgavanja i količina ubrizganog goriva

Najčešće se optimiranje rada motora vrši uz pomoć povećanja stupnja kompresije uz promjenu početka ubrizgavanja goriva. Na slici 10 prikazan je odnos povećanja stupnja kompresije i momenta ubrizgavanja goriva kod sporokretnih motora.



Slika 10. Odnos povećanja stupnja kompresije i promjene početka ubrizgavanja kod sporokretnog motora [5]

Maksimalni tlak izgaranja je jednak kao i kod klasičnog motora i javlja se pri istom kutu koljenastog vratila iako izgaranje započinje kasnije, gledajući klasični motor, što bi značilo da preostaje manje naknadne kompresije plinova uslijed ranije započetog izgaranja što rezultira nižim maksimalnim temperaturama izgaranja, uspoređujući s klasičnim motorom, te su plinovi izgaranja manje vremena izloženi maksimalnim temperaturama izgaranja. Povećanje stupnja kompresije u konačnici kompenzira povećani specifični potrošak goriva izazvan zakašnjelim, tj. odgođenim ubrizgavanjem. Tvrtka Caterpillar Motoren je istraživanjem došla do spoznaje da ako se kod srednjekretnih motora stupanj kompresije poveća sa 15.5 na 17, istovremeno odgađajući početak ubrizgavanja u svrhu ograničavanja porasta maksimalnog tlaka izgaranja u cilindru za oko 20 bara, dolazi do smanjenja koncentracije NO_x sa 12 na 8 g/kWh bez porasta specifičnog potroška goriva. Slično ispitivanje, ali na sporokretnim motorima, je provela tvrtka Wärtsilä te se došlo do spoznaje da se kombinacijom povećanja stupnja kompresije i odgađanja ubrizgavanja

goriva postiže smanjenje koncentracije NO_x za maksimalno oko 25% uz istovremeni porast specifičnog potroška goriva za oko 1%.

Povećanje omjera kompresije se može postići preinakama kompresionog prostora ili ranijim zatvaranjem ispušnog ventila uslijed čega dolazi do povećanja mase plinova izgaranja unutar samog cilindra. Ovo povećanje mase plinova omogućuje snižavanje maksimalnih temperatura izgaranja, ali i povećanje količine kisika koja je na raspolaganju prilikom nastajanja NO_x.

Tvrtka Wärtsilä je također došla do spoznaje da povećanje tlaka ispirnog zraka uz istovremeno odgađanje ubrizgavanja goriva može rezultirati povećanjem ili smanjenjem koncentracije NO_x, a što ovisi o samoj konstrukciji motora. Ako se stupanj kompresije poveća smanjenjem kompresionog prostora, izgarni prostor će biti plići, što može rezultirati boljim hlađenjem plamene fronte izgaranja preko metalnih površina kompresionog prostora. Ovakav način povećanja stupnja kompresije za posljedicu ima povećanje koncentracije čađe i dodatno smanjenje koncentracije NO_x.

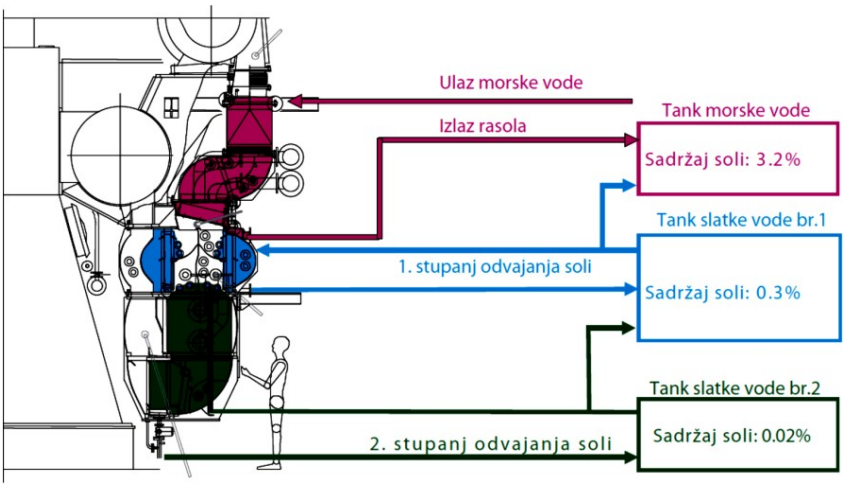
Temperatura ispirnog zraka, „Miller-ov“ ciklus

Snižavanje temperature ispirnog zraka dovodi do smanjenja maksimalnih temperatura izgaranja, a samim time i do smanjenja koncentracije NO_x. Za svakih 3°C sniženja temperature ispirnog zraka koncentracija NO_x se snižava za oko 1%. Snižavanje temperature ispirnog zraka rezultira snižavanjem temperature izgaranja i toplinskih gubitaka, što utječe na poboljšanje toplinske učinkovitosti motora. Pretjeranim hlađenjem ispirnog zraka dolazi do povećanje koncentracije čađe uslijed smanjenja oksidacije čestica nastalih u procesu izgaranja.

Zbog ograničenih mogućnosti standardnih metoda sniženja temperature ispirnog zraka, na srednjokretnim motorima može se primijeniti koncept „Miller“ ciklusa kako bi se postigle niže temperature ispirnog zraka. Upotrebom turbopunjača koji mogu osigurati više tlakove ispiranja od standardnih omogućeno je da se usisni ventil zatvori prije nego klip dođe u donju mrtvu točku (engl. *Bottom Dead Center,* BDC) u taktu ispiranja. Ispirni zrak tada ekspandira unutar cilindra motora uslijed kretanja klipa prema donjoj mrtvoj točki, uzrokujući sniženje temperature ispirnog zraka. Primjenom Millerovog ciklusa može se postići i do 20% manje koncentracije NO_x, a bez povećanja specifičnog potroška goriva.

5.1.2. Ovlaživanje ispirnog zraka (SAM)

Kod primjene ovlaživanja ispirnog zraka, u struju vrućeg ispirnog zraka, nakon turbopuhala, se ubrizgava desalinizirana morska voda koja ga na taj način ovlažuje i hladi, ali negativna strana je sadržaj soli od oko 3.2%. Sadržaj soli se u daljnjem procesu smanjuje na oko 0.02% uporabom dvostepenog ispiranja slatkom vodom (slika 11). Uporaba SAM sistema povećava toplinski kapacitet ispirnog zraka koji omogućava veću apsorpciju topline u procesu izgaranja, ali s druge strane smanjuje sadržaj kisika u ispirnom zraku. Krajnji rezultat je snižavanje maksimalnih temperatura izgaranja što u konačnici dovodi do 50%-tnog smanjenja sadržaja NO_x u emisiji ispušnih plinova.

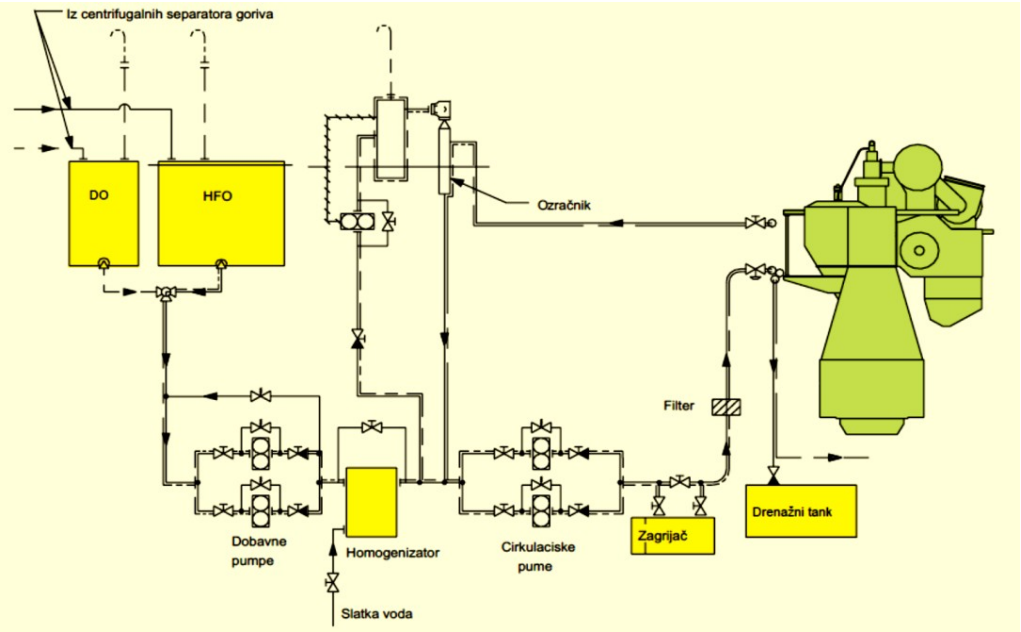


Slika 11. Vrijednosti sadržaja soli pri 100% opterećenja i ISO uvjetima okoline [5]

5.1.3. Emulzifikacija goriva vodom (WIF)

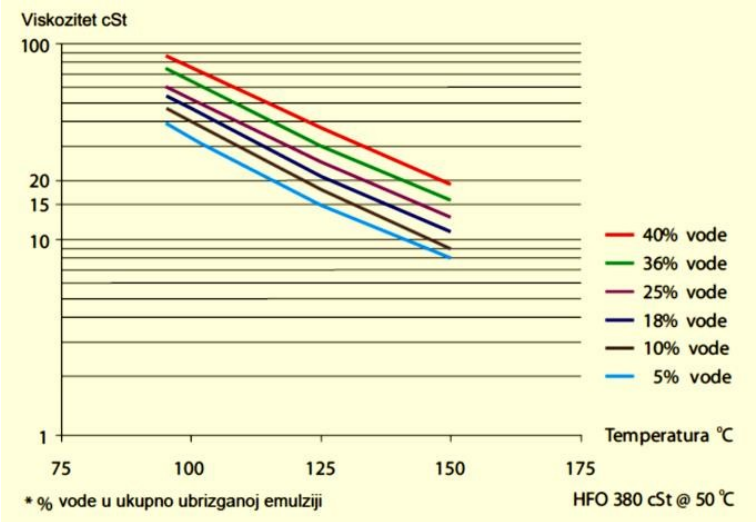
Kod korištenja tehnike emulzifikacije goriva vodom, voda se kontinuirano dodaje gorivu prilikom njegove potrošnje, a homogenost smjese se osigurava mehaničkim putem tretmanom u homogenizatoru. Kada se emulzija ubrizga u motor dolazi do oduzimanja topline izgaranja radi zagrijavanja vode do točke ključanja, isparavanja i pregrijavanja, a što dovodi do snižavanja maksimalnih temperatura izgaranja i kvalitetnijeg raspršivanja goriva, što u konačnici dovodi do oko 1%-tnog smanjenja sadržaja NO_x u emisiji ispušnih plinova za svakih 1% dodane vode. Da bi se postiglo optimalno raspršivanje goriva u cilindra motora, veličina kapljica vode u gorivu nakon procesa emulzifikacije mora biti maksimalno 5 μm. Prema rezultatima ispitivanja tvrtke MAN Diesel A/S, ovu veličinu

kapljica vode je moguće postići u homogenizatoru ultrazvučnog tipa. Smještaj homogenizatora u brodskom sistemu goriva prikazan je na slici 12.



Slika 12. Položaj homogenizatora u sustavu goriva glavnog motora [5]

Dodavanjem vode teškom gorivu postupkom homogenizacije emulziji se povećava viskoznost, kao što je to prikazano na slici 13.



Slika 13. Ovisnost viskoziteta u udjelu vode u emulziji [5]

Kako bi se zadržao propisani viskozitet u vrijednostima od 12 do 15 mm^2/s (maksimalno 20 mm^2/s) potrebno je povisiti temperaturu emulzije na 150ºC pa čak i više ako se povećava udjel vode u emulziji (170ºC za 50% vode). Također je potrebno povećati i tlak cirkulacijskog kruga sustava goriva.

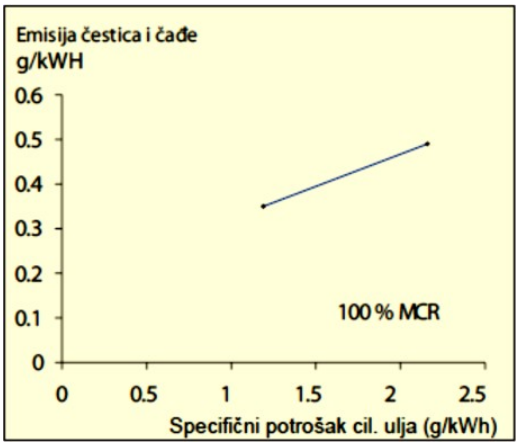
Zbog dodavanja vode gorivu i ovisnosti viskoziteta emulzije o postotku udjela vode nužno je potrebno povećati radni tlak dobavnih pumpi goriva sa 4 na 9 bara. Voda koja se uvodi u homogenizator mora biti destilirana te se strogo mora poštivati gornja dopuštena koncentracija natrijevog klorida (NaCl) u gorivu jer natrij može reagirati sa vanadijem iz goriva tvoreći naslage na vretenu i sjedištu ispušnog ventila uzrokujući propuštanja ispušnih plinova.

Iz spomenutog razloga voda koja se koristi u homogenizaciji mora biti proizvedena u brodskom generatoru slatke vode. Uporaba emulzije kod elektronski kontroliranih motora (ME/ME-C) nudi dodatne prednosti kao što su:

- Optimalno oblikovanje ubrizgavanja pri bilo kojem sadržaju vode u emulziji;
- Kontrolirano ubrizgavanje kod elektronski kontroliranih motora omogućuje ubrizganje emulzije i sa visokim udjelom vode i kod niskih opterećenja motora jer se predubrizgavanjem može kompenzirati zakašnjenje ubrizgavanja.

5.1.4. Elektronski regulirano podmazivanje cilindarskih košuljica

Kod dvotaktnih dizelskih motora cilindarska ulja za podmazivanje imaju direktan utjecaj na porast emisije čestica i čađe. Istaraživanja provedena od strane tvrtke MAN Diesel A/S pokazuju da se prilikom smanjenja specifičnog potroška cilindarskog ulja za podmazivanje smanjuje i emisija čestica i čađe, a što je i prikazano na slici 14.



Slika 14. Emisija čestica i čađe u funkciji potroška cilindarskog ulja ua podmazivanje [5]

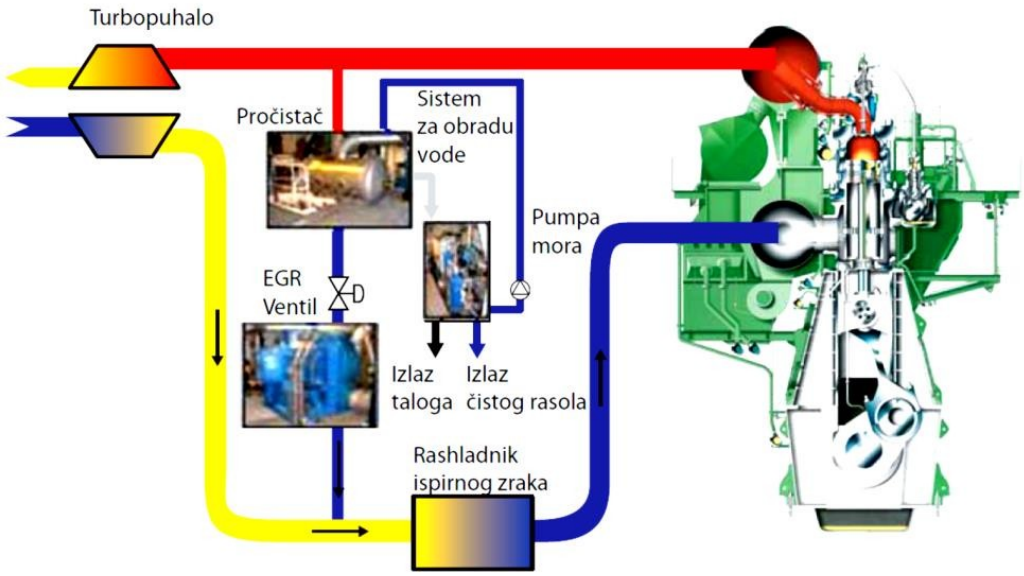
Potrošnja cilindarskog ulja predstavlja značajan trošak u formiranju budžeta brodovlasnika pa se smanjenje specifičnog potroška cilindarskog ulja ističe kao veoma važna razvojna tema. Tehnološki razvoj sustava podmazivanja cilindarskih košuljica, osim ekoloških elemenata, mora zadovoljiti i dostatno podmazivanje tribološkog sustava „cilindarska košuljica-stapni prsten-stap“ kako bi se osiguralo zadovoljavajuće podmazivanje tribološkog sustava i produžilo vrijeme održavanja sustava.

Zbog ovih ekoloških i eksploatacijskih potreba najveći svjetski proizvođači velikih brodskih dvotaktnih sporokretnih dizelskih motora razvili su visokotlačni elektronski kontrolirani sustav ubrizgavanja cilindarskog ulja u unaprijed određenom trenutku i položaju stapa koji osigurava optimalno podmazivanje u svakom režimu rada motora, a što nije bilo moguće kod klasičnog podmazivanja cilindarskih košuljica. “Alpha ACC” (engl. *Adaptive Cylinder oil Control*) tvrtke MAN Diesel ili „Pulse Lubricating System“ tvrtke Wärtsilä Sulzer predstavljaju danas standardne lubrikatore koji se koriste za podmazivanje cilindarskih košuljica.

5.1.5. Recirkulacija ispušnih plinova (EGR)

Sistem recirkulacije ispušnih plinova podrazumijeva recirkulaciju samo dijela emisije ispušnih plinova (slika 15). Nakon odstranjivanja čađe i sumporovih oksida dio ispušnih plinova se miješa sa svježim ispirnim zrakom prije ulaska u rashladnik ispirnog zraka. Prisutnost povećane koncentracije CO_2 i vode povećava toplinski kapacitet nastale smjese. Nadalje, koncentracija kisika se smanjuje što znači da se motor mora snabdjeti većom količinom mješavine pročišćenih ispušnih plinova i svježeg ispirnog zraka za

potpuno izgaranje iste količine goriva. Pošto se povećavaju i toplinski kapacitet i masa ispirne smjese, kao rezultat se javlja smanjenje maksimalne temperature izgaranja (toplina izgaranja se raspršila na veće količine plina sa nižom ukupnom maksimalnom temperaturom izgaranja), a samim time i nižom koncentracijom NO_x u emisiji ispušnih plinova.



Slika 15. Shematski prikaz sistema recirkulacija ispušnih plinova EGR [5]

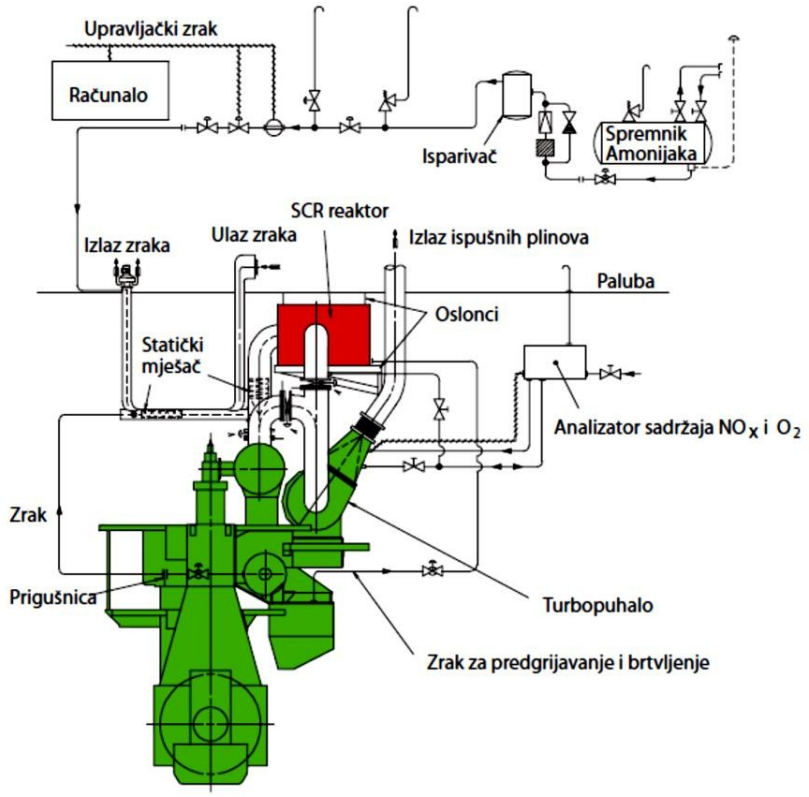
Od svih navedenih metoda EGR sistem ima najbolje predispozicije u smislu zadovoljenja novih zahtjeva o sadržaju NO_x prema granici Razreda III (*Tier III*). Gledajući tehnike ovlaživanja ispirnog zraka i emulzifikacije goriva vodom kao samostalne metode, ni jedna ni druga samostalno nemaju potencijal da zadovolje ograničenje Razreda III.

5.2. SEKUNDARNA METODA SMANJENJA ŠTETNIH ELEMENATA U EMISIJI ISPUŠNIH PLINOVA

5.2.1. Selektivna katalitička redukcija (SCR)

Selektivna katalitička redukcija je najučinkovitija metoda za odstranjivanje NO_x iz emisije ispušnih plinova. Metoda se zasniva na ubrizgavanju amonijaka (NH_3), kao redukcijske supstance, u emisiju ispušnih plinova pri temperaturi od 300 do 400ºC. Nakon ubrizgavanja NH_3 smjesa se prevodi preko katalizatora. Važno je napomenuti da se redukcija NO_x korištenjem SCR-a mora odvijati unutar gore spomenutih temperaturnih

granica, jer će u protivnom ako je temperatura reakcije suviše visoka (iznad 490ºC) NH_3 izgorjeti te neće reagirati s dušikovim monoksidom (NO) i dušikovim dioksidom (NO_2). Pri niskim temperaturama reakcije učinak smanjenja dušikovih oksida će biti malen, a prijeti i opasnost da se kondenzacijom amonijevog sulfata (engl. *amonia slip*) uništi katalizator. Na slici 16 prikazan je shematski prikaz selektivnog katalitičkog reaktora.



Slika 16. Shematski prikaz selektivnog katalitičkog reaktora SCR [5]

Ako se reakcija odvija unutar dozvoljenih granica, NH_3 reagira s NO_2 te dolazi do nastajanja dušika (N_2) i vode (H_2O) prema sljedećim jednadžbama:

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \tag{7}$$

$$6NO_2 + 8NH_3 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O \tag{8}$$

Količina ubrizganog NH_3 u emisiju ispušnih plinova određuje se i kontrolira pomoću računalnog programa prema količini proizvedenih NO_x u funkciji opterećenja motora. Uporabom selektivne katalitičke redukcije postiže se 90%-tno smanjenje NO_x. Prema nekim izvorima (Eyring, Köhler, Lauer, and Lemper, 2005.) uz pomoć ovog sustava

moguće je postići smanjenje NO_x za 90-99%, ugljikovodika za 80-90%, ugljikovog monoksida (CO) za 80-90% i čađe za oko 30-40%. Životni vijek katalizatora je od tri do pet godina ako se koriste tekuća goriva, a ako se koristi zemni plin i duži. Selektivni katalitički reaktor je konstruktivni dodatak motoru što znači da on nema veze sa samom konstrukcijom motora i ne ovisi o proizvođaču motora. Najveće mane sustava su visoka nabavna cijena i visoka nabavna cijena NH_3.

6. UREĐAJI ZA ANALIZU ISPUŠNIH PLINOVA

Za određivanje sastava dimnih plinova propisane su norme i standardi koji opisuju mjerne uređaje koji se primjenjuju za takva mjerenja, kao i mjerne metode koje se koriste za mjerenja.

Mjerne metode se s obzirom na način uzimanja uzorka mogu podijeliti na:

- neekstraktivne: To su pretežno spektroskopske metode sa uređajima za mjerenje na dimnom kanalu. Rade na principu *Beer-Lamber* zakona prema kojem, ako se monokromatska zraka svjetlosti emitira poprečno na dimni kanal, smanjenje intenziteta svjetlosti je proporcionalno količini mjerenih plinova u dimnim plinu. Slika 17 prikazuje analizator za kontinuirano mjerenje emisije štetnih plinova.

Slika 17. Analizator za kontinuirano mjerenje emisije štetnih plinova [9]

- ekstraktivne: Koriste se kod kontinuiranih mjerenja i gotovo uvijek kod povremenih mjerenja. Način uzimanja i obrade uzorka propisan je normom HRN EN ISO 10396, gdje su navedeni uvjeti pod kojima se može vršiti analiza sastava dimnih plinova kao i mjesto uzimanja uzorka. Mjerenje ekstraktivnom metodom karakterizira uzimanje uzorka plina iz dimnog kanala te analiza plina u izdvojenom uređaju. Uzorak plina se pomoću membranske pumpe dovodi do rashladnika (Peltierovrashladni uređaj), gdje se naglo hladi i izdvaja se kondenzat (vodena para). Tako obrađeni plinovi vode se dalje na senzore za detekciju pojedinih plinova (O_2, NO, NO_2, SO_2,...).

Ovisno o propisima i veličini stacionarnog izvora emisije mjerenja se obavljaju kontinuirano ili povremeno. Da bi odredili sastav dimnih plinova koristimo određene vrste senzora. Senzori pomoću kojih se određuje sastav plina su prema načinu rada prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Senzori i princip rada [9]

Senzor	Princip
Elektrokemijski	Međudjelovanje energije kemijske reakcije i električne energije
Optički	Promjena optičkih svojstava
Kalorimetrički	Toplina razvijena u reakcijama ispitanog plina
fotometrički	Apsorpcija ultrljubičastog i infracrvenog zračenja
Paramagnetski	Paramagnetska svojstva kisika
Kemiluminescencija	Kemijske reakcije sa pojavom luminescencije
Ionizacija plamena	Pojava ionizacije plamena i mjerenje nastale struje

Za detekciju koncentracije pojedinih plinova mogu se koristiti različite vrste mjernih senzora, ali za detekciju nekih plinova se mogu koristiti samo određeni mjerni senzori prikazani u tablici 5. [9]

Tablica 5. Senzori i vrste plinova koje mogu izmjeriti [9]

Senzor	SO_2	CO	CO_2	NO_x	H_2S	O_2	C_xH_y
Fotometrija (IC)	X	X	X	X			
Fotometrija (UV)	X			X			
Paramagnetizam							X
Kemiluminescija			X		X		
Kalorimetrija		X					X
Ionizacija plamena							X
Elektrokemijski		X	X		X	X	

Elektrokemijski senzor i ne-disperzirani infracrvni senzor (engl. *nondispersive infrared,* NDIR), koji su najbitniji za mjerenje emisija brodskog motora, objašnjeni su kasnije u tekstu (poglavlje 6.3.).

Za mjerenje emisija ispušnih plinova na brodu se većinom koriste prijenosni uređaji kao što su VarioPlus, E8500 MK, testo 350 MARITIME V2, RASI901-MK, itd.

6.1. UREĐAJ E8500 MK

E8500 MK (prikazan na slici 18) je kompletan prijenosni emisijski analizator za brodske dizel motore usklađen sa MARPOL Prilogom VI i NO_x Tehničkim propisom. Može imati maksimalno 8 senzora; do 5 elektrokemijskih vrsta senzora, do 3 NDIRvrsta senzora. U tablici 6 prikazane su specifikacije uređaja. [10]

Slika 18. E8500 MK emisijski analizator [10]

Tablica 6. Specifikacije E8500 MK [10]

Parametar	Senzor	Raspon	Točnost
O_2	elektrokemijski	0-25%	±0.1% volumena
CO	elektrokemijski	0 - 8000 ppm	<300 ppm = ±10 ppm do 2000 ppm = ±4% >2000 ppm = ±10%
CO	NDIR	0 - 15.00%	±3% očitanja
NO	elektrokemijski	0 - 4000 ppm	<125 ppm = ±5 ppm do 4000 ppm = ±4%
NO_2	elektrokemijski	0 - 1000 ppm	<125 ppm = ±5 ppm do 1000 ppm = ±4%
NO_x	izračunat	0 – 5000 ppm	
SO_2	elektrokemijski	0 - 4000 ppm	<125 ppm = ±5 ppm do 4000 ppm = ±4%
CO_2	NDIR	0 - 20.0%	±3% očitanja
C_XH_Y	NDIR	0 - 3.00%	±3% očitanja + 0.01%

6.2. UREĐAJ TESTO 350 MARITIME

Testo 350 MARITIME je prijenosni sustav za analizu emisija ispušnih plinova mjeri u skladu s MARPOL Prilogom VI i NO_x Tehničkim propisom 2008. Idealan je alat za profesionalnu analizu ispušnih plinova NO, NO_2, SO_2, CO, CO_2, O_2 i podržava u ovim poslovima:

- u izravnom mjerenju i nadzoru na brodu
- povremeni pregledi i posredni pregledi
- u pojednostavljenom postupku ispitivanja i mjerenja
- provjera graničnih vrijednosti NO_x propisane u MARPOL Prilogu IV

Sastoji se od kontrolne jedinice koja je prijenosna, jedinice za analizu i mjerenje te mjerne sonde (slika 19). Mjerni raspon i točnost uređaja je prikazana u tablici 7. [11]

Slika 19. testo 350 MARITIME [11]

Tablica 7. Mjerni raspon i točnost testo 350 MARITIME [11]

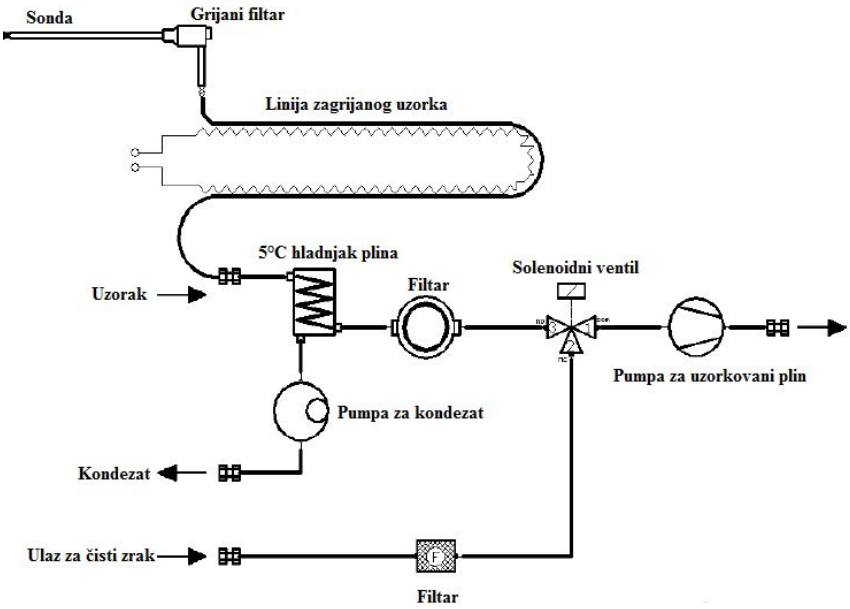
Parametar	Raspon	Točnost
O_2	0-25%	Prema MARPOL Prilogu VI i NO_x Tehničkom propisu
CO	0-3000 ppm	
NO	0-3000 ppm	
NO_2	0-500 ppm	
SO_2	0-3000 ppm	
CO_2 (IR)	0-40%	

6.3. UREĐAJ VARIOPLUS INDUSTRIAL

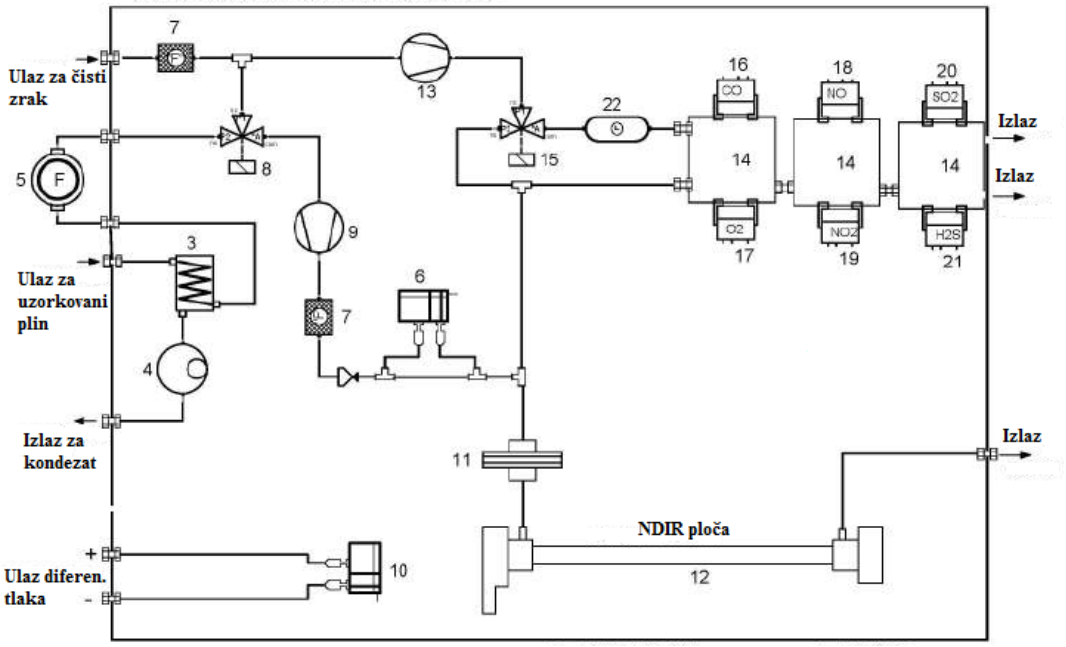
Analizator dimnih plinova VarioPlus (slika 20) se koristi za polu-kontinuiranu emisiju, ispitivanje sukladnosti i mjerenje kontrole na svim izvorima izgaranja.

Slika 20. VarioPlus analizator dimnih plinova [12]

Na slici 21 i slici 22 prikazan je shematski prikaz protoka plina od sonde za uzorkovanje plina do senzora unutar uređaja, dok su u tablici 8 prikazane komponente analizatora sa slike 22. Uzorak plina se uzima iz dimnog kanala preko sonde s grijanim sinteriranim metalnim filtrom i grijanom uzorkom. Uzorak se u uređaju naglo hladi, filtrira te se kondezat vodi do elektrokemijskih i NDIR senzora za detekciju plinova.



Slika 21. Shematski prikaz protoka plina od sonde do analizatora [13]



Slika 22. Shematski prikaz protoka plina kroz analizator [13]

Tablica 8. Komponente analizatora sa slike 22

Broj	Opis
3	Hladnjak plina
4	Pumpa za kondezat
5	Filtar za uzorkovani plin (PTFE)
6	Senzor protoka uzorka
7	Filtar prašine
8	Solenoidni ventil automatskog nuliranja
9	Pumpa za uzorkovani plin
10	Senzor diferencijalnog tlaka
11	Acrodisc PTFE filtar
12	NDIR ploča
13	Pumpa za čišćenje CO
14	Cjevovod elektrokemijskih senzora
15	Solenoidni ventil za čišćenje CO
16	CO senzor
17	O_2 senzor
18	NO senzor
19	NO_2 senzor
20	SO_2 senzor
21	H_2S senzor
22	NO_x zaštitni filtar

U tablici 9 prikazane su specifikacije uređaja.

Tablica 9. Specifikacije VarioPlus [12]

Mjerna komponenta	Vrsta senzora	Raspon	Rezolucija	Točnost
O_2	Elektrokemijski	0-21%	0.10%	±0.2%
CO	Elektrokemijski	0-10000 ppm	1 ppm	±10 ppm ili ±5% očitano
NO	Elektrokemijski	0-5000 ppm	100 ppm	±200 ppm ili ±5% očitano
NO_2	Elektrokemijski	0-1000 ppm	1 ppm	±5 ppm ili ±5% očitano
SO_2	Elektrokemijski	0-5000 ppm	1 ppm	±10 ppm ili ±5% očitano
H_2S	Elektrokemijski	0-500 ppm	1 ppm	±5 ppm ili ±5% očitano
H_2	Elektrokemijski	0-2%	0.01%	±0.05% ili ±5% očitano
CO	NDIR (%)	0-10%	0.01%	±0.03% ili ±5% očitano
CO	NDIR (ppm)	0-30000 ppm	1 ppm	±40 ppm ili ±5% očitano
CO_2	NDIR	0-30%	0.10%	±0.6% ili ±5% očitano

6.3.1. Elektrokemijski senzor

Sadržaj kisika uzorka plina mjeri se s dvije elektrode elektrokemijskog senzora. Toksični plinovi kao što su CO, NO, NO_2, SO_2, H_2S mjere se sa senzorima s tri elektrode. Elektrokemijski senzori temelje se na tehnologiji difuzije plina.

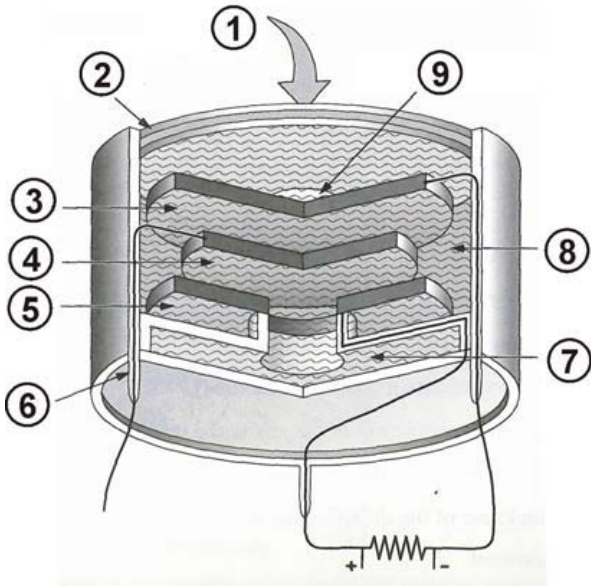
Prednosti ove tehnologije čini stalno generirani signal koji je izravno proporcionalan i linearan prema koncentraciji volumena (% ili ppm) komponenti analitičkog plina.

Tri elektrode su:

- S (senzorska elektroda),

- C (protu elektroda),
- R (referentna elektroda).

Na slici 23 prikazan je elektrokemijski senzor, dok su u tablici 10 opisani dijelovi elektrokemijskog senzora sa slike 23.



Slika 23. Elektrokemijski senzor [12]

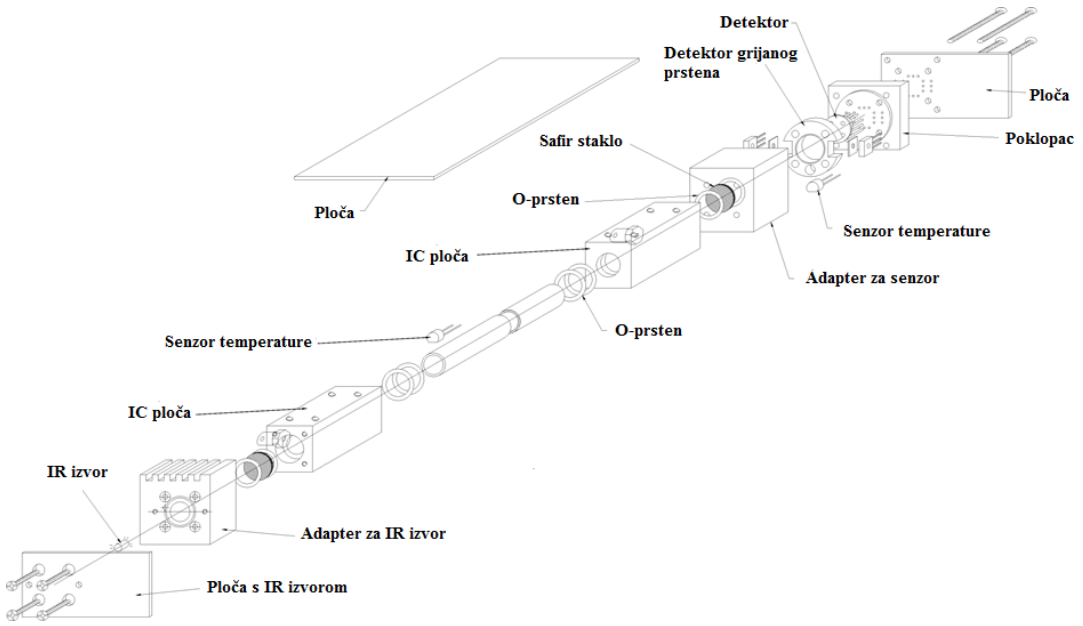
Tablica 10. Opis dijelova elektrokemijskog senzora [12]

Broj	Opis
1	Uzorak plina
2	Filtar čestica
3	Senzorska elektroda
4	Referentna elektroda
5	Protu elektroda
6	Priključna igla
7	Rezervoar elektrolita
8	Bilk elektrolit
9	Kapilarna difuzijska barijera

Plinovi koji dođu do senzorske elektrode reagiraju na površini elektrode ili oksidacijom (na primjer CO, H_2S, SO_2, NO, H_2) ili redukcijom (poput CO, H_2S, SO_2, NO, H_2).

6.3.2. NDIR senzor

Pomoću ne-disperzirane infracrvene klupice VarioPlus-a moguće je izmjeriti CO, CO_2 i ugljikovodike. Izborno je moguće izmjeriti SO_2 u većim rasponima što je moguće s elektrokemijskim SO_2 osjetnikom. Na slici 24 prikazan je NDIR senzor.



Slika 24. NDIR senzor [12]

Regulirani infracrveni izvor (IR) osigurava struju fotona u rasponu od 2 do 8 μm. Infracrveno svjetlo usmjereno je kroz stanicu uzorka na optički detektor. Izvor je elektronski moduliran s 2 Hz. Na svakom kraju plinskog uzorka nalaze se infracrvena prozirna leća sa kalcijevim fluoridom. Piroelektrični detektor je reguliran temperaturom. Dodatno je osigurana kompenzacija mjerenja za temperaturu uzorka i varijacije tlaka. Preostala infracrvena energija, ne apsorbirani plin uzorka, vodi se do optičkog detektora. Prolazi četiri optički uski pojas filtra koji se svaki poravnava na infracrvenom apsorpcijskom spektru ciljnih plinova (jedan filtar je referentni filter, koristi se za starenje i kompenzaciju prljavštine). Infracrveno svjetlo koje je prošlo kroz filtar sakupila su četiri piroelektrična detektora, koji dijele isto kućište. Oni proizvode napon koji je proporcionalan intenzitetu svjetla. Mjerenje i regulacija temperature bloka detektora

olakšava kompenzaciju IR filtra i varijacije temperature IR detektora. Izlaz detektora unaprijed je pojačano i poslano preko multipleksera na analogno digitalni pretvarač (A/D) i na u-kontrolor. [8]

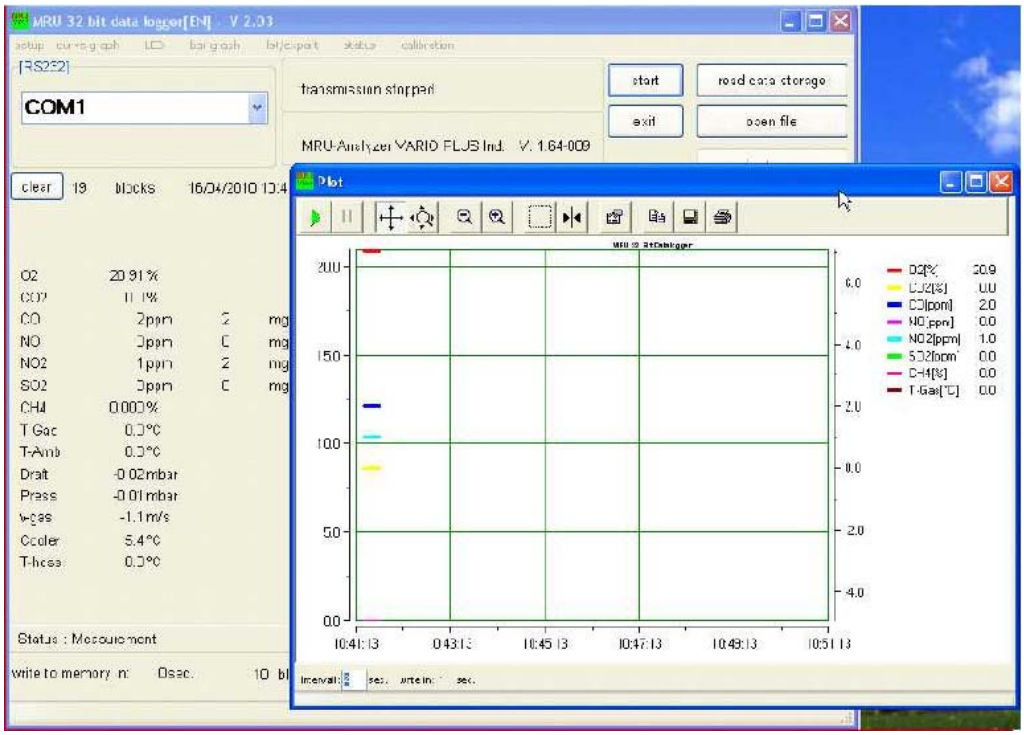
6.3.3. MRU 32 Bit DataLogger

MRU 32 Bit DataLogger (slika 25) stvoren je kako bi se olakšalo prikazivanje i spremanje izmjerenih vrijednosti MRU analizatora na Windows računalu.

MRU 32 Bit DataLogger obavlja sljedeće funkcije:

- grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tijekom mjerenja
- izvoz imjerenih vrijednosti u ASCII, Excel ili HTML
- prikaz mjernih vrijednosti tijekom mjerenja ili iprikazivanje sadržaja pohranjene datoteke mjerenja analizatora
- prikazivanje spremljenih mjerenja na računalu.

Pod curve graph se mogu grafički prikazati krivulje izmjerenih vrijednosti. Kako sve vrijednosti nemaju istu mjernu jedinicu, u setup-u možemo namjestiti koje vrijednosti želimo prikazati. [14]



Slika 25. MRU 32 Bit DataLogger [14]

7. PRIMJER MJERENJA ISPUŠNIH EMISIJA BRODSKOG MOTORA

Eksperimentalna metoda je provedena na brodu Hrvatske ratne mornarice DBM-82 Krka. DBM-82 Krka ima dva Burmeister & Wain Alpha 10V23L-VO dizel motora ukupne snage od 3 100 KS / 2240 kW, brzine okretaja 825 okr/min (svaki) i postiže brizinu do 13 čvorova. Brod koristi brodsko dizelsko gorivo. Mjerenje je obavljeno uređajem VarioPlus Industrial opisanom u poglavlju 6.3. Podaci su dobiveni dok je brod bio na vezu, bez opterećenja. VarioPlus uređaj nema certifikat u skladu s MARPOL Prilogom VI i NO_x Tehničkim propisom, dok je samo mjerenje obavljeno na dimnjaku pa su posljedično drugi faktori također utjecali na konačni rezultat. Na slici 26 prikazan je izvadak iz brodskog dnevnika za vrijeme dok se obavljalo mjerenje gdje se vidi kad je motor upućen u rad, u kojem režimu je radio (PH – prazni hod), koji je bio broj okretaja, položaj zakretnog krila propelera (ZKP) i kada je prestao sa radom.

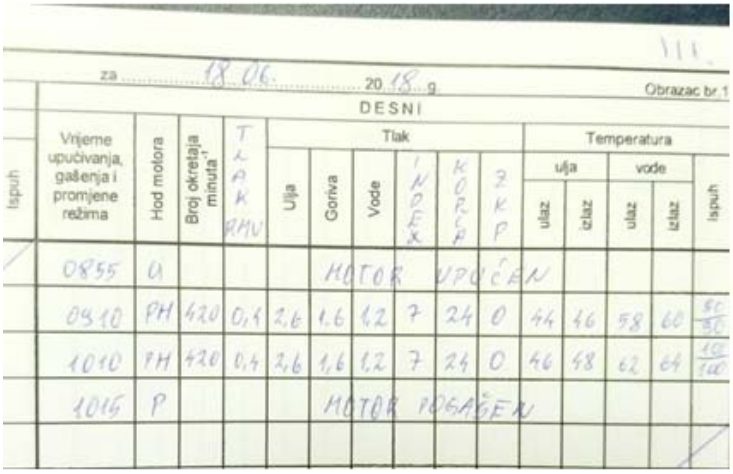
UPUĆIVANJE U MJESTU

RAD POGONSKIH STROJEVA U MJESTU ILI PLOV

LIJEVI

Vrijeme upučivanja, gašenja i promjene režima	Hod motora	Broj okretaja minuta^{-1}	TAK RAV	Tlak: Ulja	Tlak: Goriva	Tlak: Vode	Tlak: INDEX	Tlak: KORČA	Tlak: ZKP	Temperatura ulja: ulaz	Temperatura ulja: izlaz	Temperatura vode: ulaz	Temperatura vode: izlaz	Ispuh
0855	U				MOTOR UPUĆEN									
0910	PH	420	0,4	2,4	1,6	1	7	24	0	42	44	58	60	110/90
1010	PH	420	0,4	2,4	1,6	1	7	24	0	43	45	60	62	110/100
1015	P				MOTOR POGAŠEN									

a)



za 18.06. 2018. g. Obrazac br. 1

DESNI

Vrijeme upučivanja, gašenja i promjene režima	Hod motora	Broj okretaja minuta^{-1}	TAK RAV	Tlak: Ulja	Tlak: Goriva	Tlak: Vode	Tlak: INDEX	Tlak: KORČA	Tlak: ZKP	Temperatura ulja: ulaz	Temperatura ulja: izlaz	Temperatura vode: ulaz	Temperatura vode: izlaz	Ispuh
0855	U				MOTOR UPUĆEN									
0910	PH	420	0,4	2,6	1,6	1,2	7	24	0	44	46	58	60	90/80
1010	PH	420	0,4	2,6	1,6	1,2	7	24	0	46	48	62	64	110/100
1015	P				MOTOR POGAŠEN									

b)

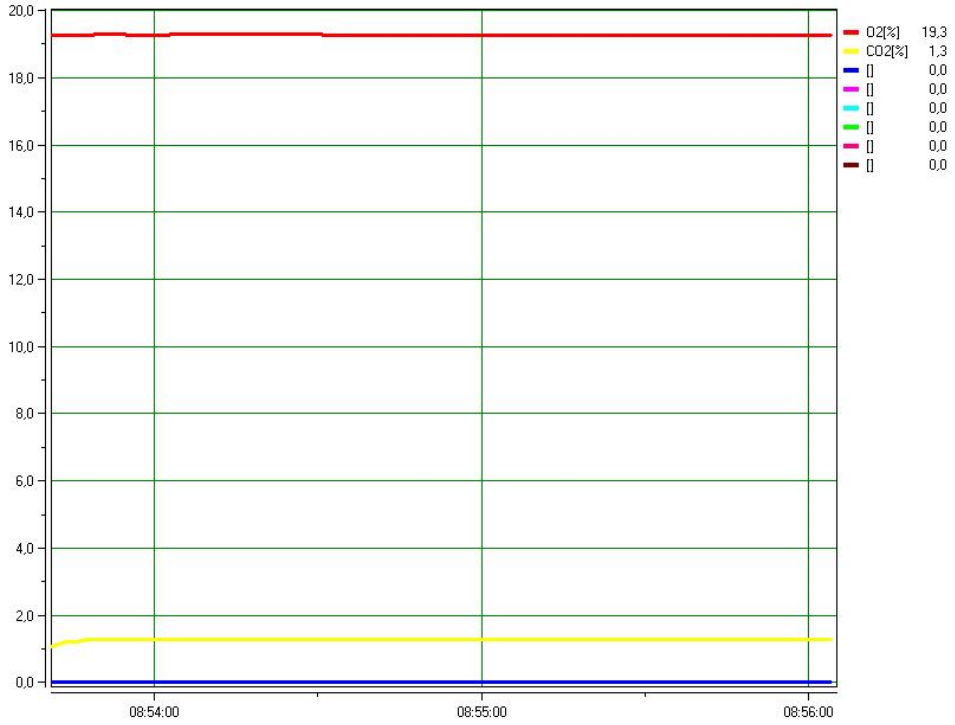
Slika 26. Izvadak iz brodskog dnevnika a) lijevi motor, b) desni motor

U tablici 11 prikazane su izmjerene vrijednosti ispušnih plinova uz naglasak da je mjerenje obavljeno na dimnjaku jer nije bilo mogućnosti obaviti mjerenje negdje bliže ispuhu motora.

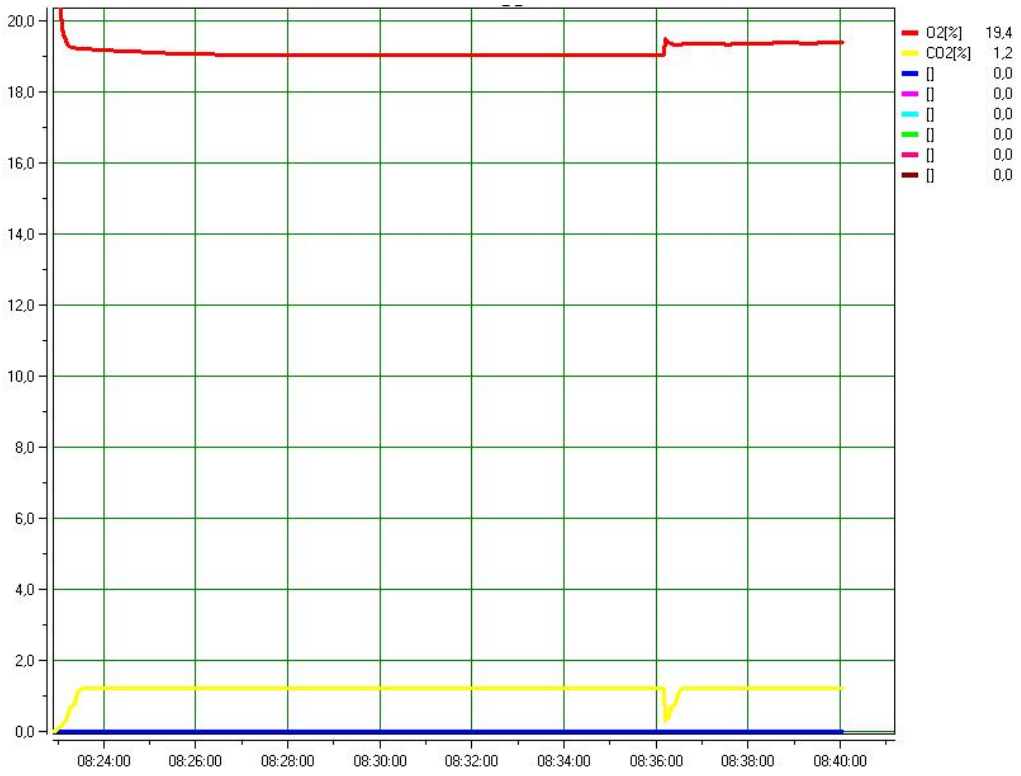
Tablica 11. Vrijednosti izmjerenih vrijednosti ispušnih plinova

Mjerna komponenta	Vrijednost		Mjerna jedinica
	Lijevi motor	Desni motor	
O_2	19.25	19.38	%
CO_2	1.3	2.3	%
CO	252	561	ppm
NO	220	113	ppm
NO_x	295	189	ppm
NO_2	75	76	ppm
SO_2	7	29	ppm
NO_x	1808	1251	mg/MJ

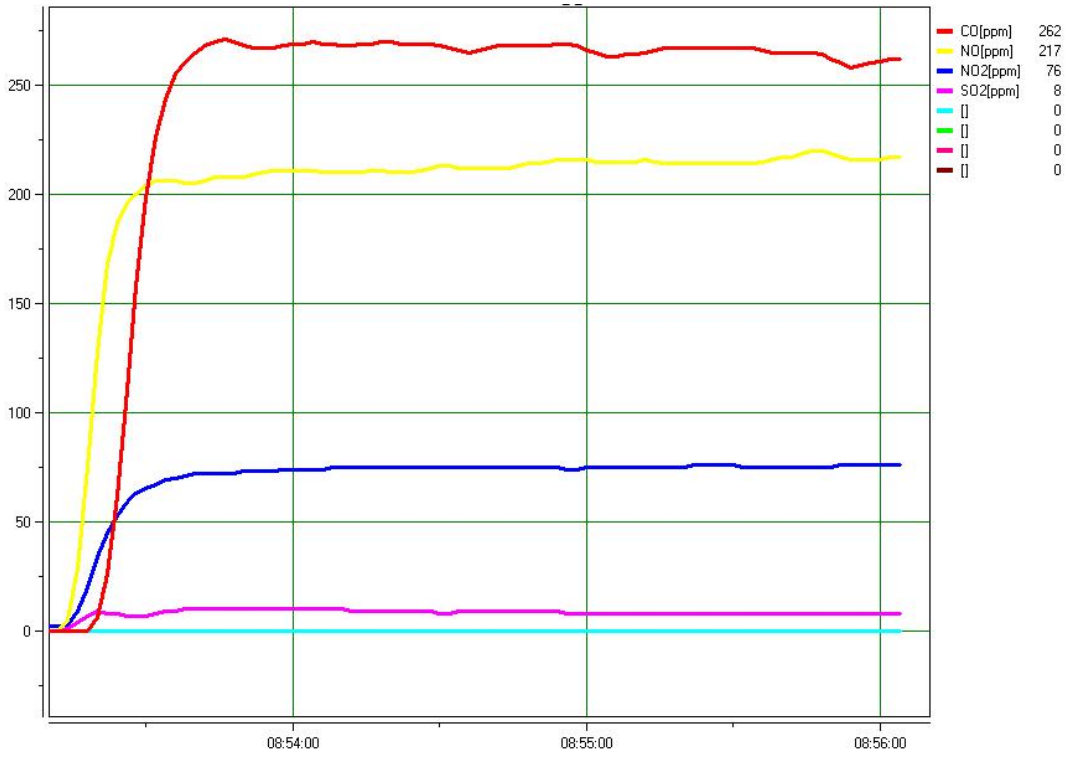
Na slici 27 i slici 28 te slici 29 i slici 30 grafički su prikazane vrijednosti O_2, CO_2, CO, NO, NO_2 i SO_2 za oba motora. Grafovi su dobiveni u programu MRU 32Bit Datalogger koji je opisan u poglavlju 6.3.3. Testiranjem se može utvrditi da su vrijednosti relativno stabilne na lijevom motoru uz lagane devijacije koje su nastajale zbog pomicanja mjerne sonde od strane ispuha te kontakta sa zrakom iz atmosfere. Vrijednosti su na desnom motoru stabilne, uz napomenu da su devijacije pri kraju nastale zbog rukovanja uređajem.



Slika 27. Grafički prikaz O_2 i CO_2 za lijevi motor



Slika 28. Grafički prikaz O_2 i CO_2 za desni motor



Slika 29. Grafički prikaz CO, NO, NO_2 i SO_2 za lijevi motor

Slika 30. Grafički prikaz CO, NO, NO_2 i SO_2 za desni motor

Usporedbom vrijednosti između motora može se primijetiti da je lijevi motor bio opterećen. Razlog tome je obavaljanje testiranja na motoru od strane članova posade čime je opterećenje variralo.

Dozvoljena količina NO_x za ovaj dizelski motor srednje brzine u razredu 1 iznosi:

$$NO_x(\frac{g}{kWh}) = 45 \times n^{-0,2} = 45 \times 825^{-0,2} = 11,75 \tag{9}$$

Da bi smo provijerili jesu li su NO_x vrijednosti ispod dopuštene granice (slika 2), trebamo pretvoriti $NO_x(\frac{mg}{MJ})$ u $NO_x(\frac{g}{kWh})$.

Lijevi motor:

$$NO_x(\frac{mg}{kWh}) = NO_x(\frac{mg}{MJ}) \times 3,6 = 1808 \times 3,6 = 6508,8 \tag{10}$$

$$NO_x(\frac{g}{kWh}) = NO_x(\frac{mg}{kWh}) \times 0,001 = 6508,8 \times 0,001 = 6,5088 \tag{11}$$

Desni motor:

$$NO_x(\frac{mg}{kWh}) = NO_x(\frac{mg}{MJ}) \times 3,6 = 1251 \times 3,6 = 4503,6 \tag{12}$$

$$NO_x(\frac{g}{kWh}) = NO_x(\frac{mg}{kWh}) \times 0,001 = 4503,6 \times 0,001 = 4,5036 \tag{13}$$

Iz dobivenih vrijednosti vidimo da su NO_x vrijednosti ispod granice za ovaj dizelski motor srednje brzine u razredu 1.

8. ZAKLJUČAK

Eksperimentalne metode nam omogućuju da uz pomoć prijenosnih uređaja za analizu emisija ispušnih plinova, koji su u skladu s MARPOL Prilogom VI i NO_x Tehničkim propisom, možemo izravno na motoru dok je u pogonu izmjeriti njegove ispušne emisije s velikom točnošću. U radu su uspoređene karakteristike više uređaja za analizu koji se mogu nabaviti na tržištu, sagledane su njihove karakteristike i razrađene su metode mjerenja ispušnih emisija. Također su analizirane i tehnike koje se koriste za smanjenja štetnih ispušnih emisija. Izvršeni su eksperimenti na brodu sa srednjekretnim motorima starije generacije i analizirana su mjerenja ispušnih emisija CO, NO, NO_2 i SO_2. Zabilježena je razlika u emisijama NO_x između lijevog i desnog motora, a do koje je došlo zbog opterećenja lijevog motora testiranjima članova posade.

Da bi se dodatno smanjila količina štetnih plinova koji se ispuštaju iz brodskih motora, ECA razmišlja o proširenju područja za nadzor, što bi uključivalo Mediteransko more, Sjevereno more, obale Meksika, Japana, Kine, itd. Uz to se radi na novim tehnologijama za smanjenje štetnih plinova te prilagodbi starih brodova i motora propisima prikazanim i opisanim u radu.

LITERATURA

[1] http://www.ics-shipping.org/shipping-facts/shipping-and-world-trade (3.9.2018.)

[2] http://www.airclim.org/acidnews/2011/AN3-11/sulphur-emissions-shipping-be-slashed (3.9.2018.)

[3] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32015R0757 (3.9.2018)

[4] http://www.imo.org/en/about/conventions/listofconventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx (14.7.2018.)

[5] Branko Lalić: Optimiziranje rada brodskog porivnog dizelskog motora u svrhu ispunjenja novih zahtjeva o ispušnim emisijama, 2013 http://intranet.fesb.hr/portals/0/docs/nastava/kvalifikacijski/fezx01%20kvalifikacijsku%20ispit.pdf

[6] www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx (14.7.2018.)

[7] http://www.hallmarkfuels.com/eca

[8] Ivan Komar and Branko Lalić: Current Air Quality Issues, Chapter 8 Sea Transport Air Pollution, 2015

[9] http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%2007/9_sastav_dimnih_plinova.pdf (16.7.2018.)

[10] https://www.e-inst.com/wp-content/uploads/2018/05/brochure-E8500-MK.pdf (17.8.2018.)

[11] https://www.testo350.com/downloads/350-maritime/Brochure_350_Maritime.pdf (17.8.2018.)

[12] Operation manual VarioPlus Industrial

[13] VarioPlusIndustrial Presentation

[14] Manual 32-bit Data Logger

[15] Moris, A. S.: Principles of measurement and instrumentation, 3rd Edition, 2001. https://people.ifm.liu.se/danfi/TFMT14/TFMT14_files/Measurement%20%26%20Instrumentation%20Principles,3rd%20Edition_Morris.pdf

[16] G. Radica, Razvoj brodskih motora prema IMO propisima za smanjenje emisija ispušnih plinova, Split, 2008.

POPIS SLIKA

Slika 1. Emisije SO_x i NO_x za kopnene izvore i međunarodnu plovidbu u EU [2]..... 1
Slika 2. Grafički prikaz razreda za kontrolu NO_x [5] 3
Slika 3. Područja za kontrolu emisija ECA [7] 5
Slika 4. a) Specifična potrošnja goriva porivnih strojeva b) Omjer emisije NO_x za porivne strojeve [8] 7
Slika 5. Tipičan sastav emisije ispušnih plinova sporokretnog dvotaktnog motora tipa MAN B&W MC [5] 9
Slika 6. Šablona formiranja mlaza goriva kod četverotaktnog i dvotaktnog motora [5]..... 17
Slika 7. Raspored temperatura u zoni izgaranja srednjokretnog motora [5] 18
Slika 8. Prikaz razlike novog kliznog rasprskača i standardnog rasprskača za motor MAN B&W K98MC [5] 19
Slika 9. Tri načina ubrizgavanja goriva kod Wärtsilä RT-Flex motora [5]..... 20
Slika 10. Odnos povećanja stupnja kompresije i promjene početka ubrizgavanja kod sporokretnog motora [5] 21
Slika 11. Vrijednosti sadržaja soli pri 100% opterećenja i ISO uvjetima okoline [5]..... 23
Slika 12. Položaj homogenizatora u sustavu goriva glavnog motora [5] 24
Slika 13. Ovisnost viskoziteta u udjelu vode u emulziji [5] 24
Slika 14. Emisija čestica i čađe u funkciji potroška cilindarskog ulja ua podmazivanje [5]... 26
Slika 15. Shematski prikaz sistema recirkulacija ispušnih plinova EGR [5] 27
Slika 16. Shematski prikaz selektivnog katalitičkog reaktora SCR [5]..... 28
Slika 17. Analizator za kontinuirano mjerenje emisije štetnih plinova [9] 30
Slika 18. E8500 MK emisijski analizator [10] 32
Slika 19. testo 350 MARITIME [11] 34
Slika 20. VarioPlus analizator dimnih plinova [12] 35
Slika 21. Shematski prikaz protoka plina od sonde do analizatora [13]..... 35
Slika 22. Shematski prikaz protoka plina kroz analizator [13]..... 36
Slika 23. Elektrokemijski senzor [12] 39
Slika 24. NDIR senzor [12] 40
Slika 25. MRU 32 Bit DataLogger [14] 41
Slika 26. Izvadak iz brodskog dnevnika a) lijevi motor, b) desni motor..... 43
Slika 27. Grafički prikaz O_2 i CO_2 za lijevi motor 45

Slika 28. Grafički prikaz O_2 i CO_2 za desni motor 45
Slika 29. Grafički prikaz CO, NO, NO_2 i SO_2 za lijevi motor 46
Slika 30. Grafički prikaz CO, NO, NO_2 i SO_2 za desni motor 46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti CO_2 za uobičajene vrste brodskog goriva (suhi ispušni plin) [8] 14
Tablica 2. Sažetak o zagađivačima [8] 15
Tablica 3. Efekt promjene oblika rasprskača goriva [5] 18
Tablica 4. Senzori i princip rada [9] 31
Tablica 5. Senzori i vrste plinova koje mogu izmjeriti [9] 31
Tablica 6. Specifikacije E8500 MK [10] 33
Tablica 7. Mjerni raspon i točnost testo 350 MARITIME [11] 34
Tablica 8. Komponente analizatora sa slike 22 37
Tablica 9. Specifikacije VarioPlus [12] 38
Tablica 10. Opis dijelova elektrokemijskog senzora [12] 39
Tablica 11. Vrijednosti izmjerenih vrijednosti ispušnih plinova 44

POPIS KRATICA

EU	Europska Unija
ECA (engl. *Emission Control Areas*)	Područja za kontrolu emisija
GO (engl. *gas oil*)	Plinsko gorivo
MDO (engl. *marine diesel oil*)	Brodsko dizelsko gorivo
HFO (engl. *heavy fuel oil*)	Teško gorivo
ppm (engl. *parts per million*)	Dijelova na milijun
O_2	Molekula kisika
H	Vodik
N	Dušik
C	Ugljik
S	Sumpor
NOx	Dušikovi oksidi
NO	Dušikov monoksid
NO_2	Dušikov dioksid
N_2O	Dušikov (I) oksid
VOC	Hlapivi orgasnki spojevi
SO_x	Sumporovi oksidi
SO	Sumporov monoksid
SO_2	Sumporov dioskid
H_2S	Sumporovodik
SO_3	Sumporni trioksid
H_2SO_4	Sulfatna kiselina
CO	Ugljikov monoksid
CO_2	Ugljikov dioksid
CH	Ugljikovodik
NMHC	Ne-metanski ugljikovodik
SFOC (engl. *specific fuel oil consumption*)	Posebne potrošnje goriva
SAM (engl. *Scavenge Air Moistening*)	Ovlaživanje ispirnog zraka
WIF (engl. *Water-in-Fuel emulsion*)	Emulzifikacija goriva vodom
EGR (engl. *Exhaust Gas Recirculation*)	Recirkulacija ispušnih plinova
SCR (engl. *Selectiv Catalytic Reduction*)	Selektivna katalistička redukcija

VIT (engl. *Variable Injection Timing*)	Kontrola kuta ubrizgavanja goriva
VEC (engl. *Variable Exhaust valve Closing*)	Kontrola zatvaranja ispušnog ventila
BDC (engl. *Bottom Dead Center*)	Donja mrtva točka
SAM (engl. *Scavenge Air Moistening*)	Ovlaživanja ispirnog zraka
WIF (engl. *Water-in-Fuel emulsion*)	Tehnika emulzifikacije goriva vodom
NaCl	Natrijev klorid
EGR (engl. *Exhaust Gas Recirculation*)	Recirkulacija ispušnih plinova
NH_3	Amonijak
NDIR (engl. *nondispersive infrared*)	Ne-disperzirani infracrvni senzor
A/D	Analogno digitalni pretvarač
PH	Prazni hod
ZKP	Zakretno krilo propelera