

**Mr.sc. Kristijan Lenac**  
Rijeka, Beli kamik 4

Pregledni članak  
UDK: 629.5.063  
504.3.054

Primljeno: 01. travnja 2005.  
Prihvaćeno: 20. svibnja 2005.

## **METODE SMANJIVANJA EMISIJE ŠTETNIH TVARI S BRODOVA**

*U ovom radu prikazane su metode koje se koriste na brodovima radi smanjenja emisije štetnih tvari kao što su: dušični oksidi, sumporni oksidi, čvrste čestice, ugljični monoksid, ugljični dioksid i štetne organske komponente. Metode koje se koriste mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine i to: primarne i sekundarne. U primarne metode spadaju tehnička rješenja kojima se sprječava nastanak štetnih tvari u samome motoru, dok se sekundarnim metodama neutraliziraju već nastale štetne tvari. U primarne metode spadaju: preinake na sustavu izgaranja i sustavu dovoda zraka, izravno ubrizgavanje vode, recirkulacija ispušnih plinova, emulziranje vode i goriva. U sekundarne metode spadaju: selektivna katalitička redukcija, upotreba goriva s malim postotkom sumpora, sustav smanjenja emisije pomoću plazme.*

*Ključne riječi: emisija štetnih tvari s brodova, primarne metode, sekundarne metode*

### **1. UVOD**

Postoje dvije metode smanjivanja emisije štetnih tvari s brodova. Primarnim metodama sprječava se nastanak štetnih tvari u samome motoru, dok se sekundarnim metodama smanjuju ili u potpunosti otklanjaju već stvorene štetne tvari. Primarnim metodama je moguće smanjiti emisiju dušičnih oksida (NO<sub>x</sub>) za 10% - 50%, a sekundarnim čak i do 95%.

U primarne metode spadaju: preinake sustava izgaranja, preinake sustava za dovod zraka, izravno ubrizgavanje vode, recirkuliranje ispušnih plinova, emulzija vode i goriva, sustav zajedničkog cjevovoda.

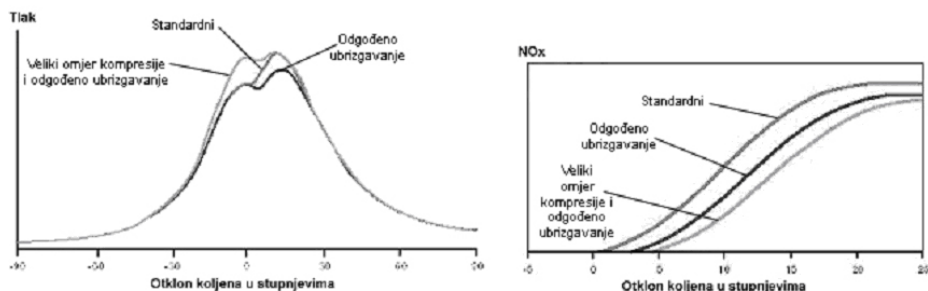
U sekundarne metode spadaju: selektivna katalitička redukcija, upotreba goriva s malim postotkom sumpora, sustav smanjenja emisije pomoću plazme.

## 2. PRIMARNE METODE

### 2.1. Preinake sustava izgaranja

#### 2.1.1. Omjer kompresije i odgođeno vrijeme ubrizgavanja

Jedna od najčešćih metoda podešavanja motora je povećavanje omjera kompresije u kombinaciji s odgođenim vremenom ubrizgavanja. Na slici je prikazana kombinacija povećanog omjera kompresije i odgođenog vremena ubrizgavanja kod sporohodnih motora. Vršni tlak je jednak kao i kod standardnih motora i javlja se pri približno istom kutu koljena, iako kod ovih motora sagorijevanje počinje kasnije nego kod standardnih motora. To znači da kod ovih motora ima manje naknadne kompresije ranije izgorjenih plinova, tako da se ne postižu toliko visoke temperature, kao kod standardnih motora te se taj motor nalazi pod visokim temperaturama kraće vrijeme. Povećani omjer kompresije također povećava i potrošnju goriva kao rezultat odgođenog vremena ubrizgavanja.



*Slika 1: Tlak u cilindru i emisija NOx kod Sulzerovog RTA motora u slučaju standardnog omjera kompresije, odgođenog ubrizgavanja i odgođenog ubrizgavanja kombiniranog s povećanim omjerom kompresije*

Izvor : Goldsworthy I., Design Of Ship Engines For Reduced Emissions Of Oxides Of Nitrogen, Australian Maritime College, 2002

U Caterpillar Motoren su zaključili da se kod srednjehodnih motora povećanjem omjera kompresije sa 15,5 na 17, uz odgođeno vrijeme ubrizgavanja, povećava vršni tlak u cilindru za oko 20 bara, što daje smanjenje emisije NOx sa 12 g/kWh na 8 g/kWh, bez povećanja potrošnje goriva. Sulzer je procijenio da je maksimalno moguće smanjenje emisije NOx kod sporohodnih motora, s povećanjem omjera kompresije i odgođenim vremenom ubrizgavanja, 25% uz povećanje potrošnje goriva za 1%.

Omjer kompresije se može povećati povećanjem geometrijskog omjera kompresije ili prilagođavanjem hoda ventila. Prilagođavanjem hoda ventila povećat će se omjer pretička zraka, čime se povećava raspoloživa masa za apsorpiranje energije izgaranja, ali se također povećava i količina kisika raspoloživa za stvaranje NOx. Ako se povećanje geometrijskog

omjera kompresije postiže smanjenjem zračnosti, prostor za izgaranje bit će ispunjeniji, što će rezultirati povećanim hlađenjem plamena preko površine komore za izgaranje, što će nadalje dovesti do povećanja čađe, ali i smanjenja NOx. Oblik komore za izgaranje i geometrija raspršenog goriva moraju se podesiti da bi se kompenziralo smanjenje visine komore za izgaranje. Kod četverotaktnih srednjehodnih motora, vrlo visoki omjer kompresije zahtjeva smanjenje preklapanja ventila da bi se izbjegao kontakt između ventila i klipa. To smanjuje efikasnost ispirnog zraka i hlađenje ispušnog ventila. Smanjena efikasnost ispirnog zraka može dovesti do smanjenja NOx.

Wartsila je kod svojih Vasa 32 srednjehodnih dizel- motora izvršila neke preinake kojima je postignuto samanje emisije NOx. Preinakama je postignuta idealna kombinacija omjera kompresije, vremena ubrizgavanja i omjera ubrizgavanja. Povećanjem omjera kompresije i povećanjem tlaka sagorijevanja, uz odgođeno vrijeme ubrizgavanja goriva i povećani omjer ubrizgavanja, postignuto je smanjenje NOx sa 15 g/kWh na 10-11.5 g/kWh te je smanjena potrošnja goriva za 4%. Preinake zahtijevaju novi klip, konstruiran da izdrži veće tlakove i modificiranu opremu za ubrizgavanje goriva. [ 1 ] Pumpa za ubrizgavanje goriva je konstruirana da izdrži visoke tlakove ubrizgavanja. Visoki tlak ubrizgavanja osigurava dobru atomizaciju goriva i kratak period ubrizgavanja potreban za sagorijevanje sa što manjom emisijom NOx. Pumpa je opremljena ventilom za rasterećenje konstantnog tlaka, koji služi za sprječavanje kavitacije pri niskim opterećenjima i sekundarno ubrizgavanje pri visokim opterećenjima. Rupice sapnice ubrizgača goriva imaju zaobljene unutarnje rubove. Takav optimalan hidraulički oblik sprječava eroziju/kavitaciju koja se pojavljivala kod konvencionalnih sapnica. Klip je također napravljen od materijala koji su otporni na visoke tlakove. [ 6 ]

### **2.1.2. Preinake na ubrizgaču goriva i povećanje broja ubrizgača goriva**

Smanjenje emisije NOx-a se kod sporohodnih dizel motora može postići korištenjem dvaju ili triju ubrizgača goriva smještenih blizu vanjskog ruba komore za izgaranje. Svaki od tih ubrizgača ima sapnicu s velikim brojem rupica za ubrizgavanje. Interakcija između raspršenog goriva iz tih triju sapnica znatno utječe na količinu stvorenog NOx-a. Postoji optimalan broj rupica sapnice za minimum NOx. Dokazano je da se oko raspršenog goriva pri izgaranju stvaraju prstenasta područja s povećanim formacijama NOx. Ukoliko sapnica ima mali broj rupica, zakašnjava interakcija između individualnih područja visoke temperature, uz prisutstvo kisika u prostoru između raspršenog goriva, dovodi do povećane koncentracije NOx. Kod srednjeg broja rupica, stvaraju se izolirane visokotemperaturne zone, koje su jako blizu jedna drugoj tako da je u prostoru između njih moguća jako mala količina kisika. Kod velikog broja rupica, interakcija među ubrizganim gorivom je jako brza tako da je i mogućnost stvaranja NOx znatno smanjena.

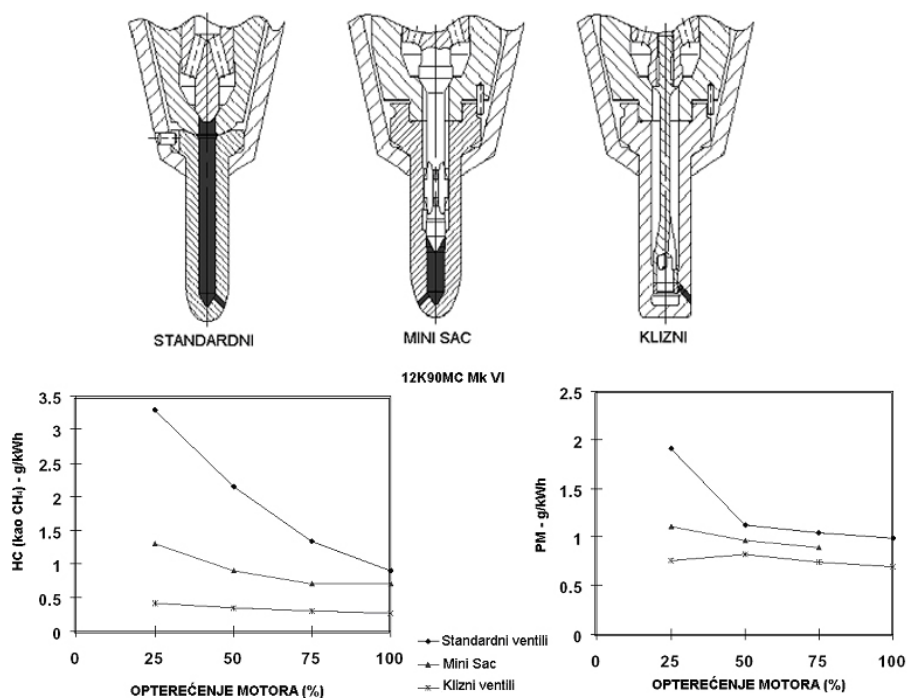
MAN B&W je radi smanjenja emisije štetnih tvari kod svojih sporohodnih motora uveo klizni tip ventila za ubrizgavanje goriva. Kod ovog tipa ventila je minimalizirana mogućnost ulaska goriva u komoru za izgaranje nakon ubrizgavanja. To direktno dovodi do smanjenja emisije ugljičnog monoksida (CO) i štetnih organskih komponenti (VOC), jer kod motora s ovakvim tipom ventila nema nepotpunog izgaranja goriva radi curenja goriva u cilindar, nakon što je završio proces izgaranja. Istovremeno s razvojem kliznog ventila MAN

B&W je optimizirao i sapnicu za smanjenje emisije NO<sub>x</sub>. Na taj se način postiglo smanjenje NO<sub>x</sub>-a za 25% pri opterećenju motora od 90%, u odnosu na standardni ventil i sapnicu, s povećanjem potrošnje goriva od samo 1%. Također, kod ovih motora imamo i smanjenu emisiju dima.

Kod Ruston motora se smanjenje emisije NO<sub>x</sub> postiglo smanjenjem kuta raspršivanja goriva sa 140 na 130 stupnja i to za 32 %, a potrošnja goriva se povećala za 6%.

Mitsubishi je upotrebom ventila sa smanjenom emisijom NO<sub>x</sub> kod svojih sporohodnih motora smanjio emisiju NO<sub>x</sub> sa 18,5 g/kWh na 15 g/kWh, ali mu se povećala potrošnja goriva za 2%.

Povećanjem broja ubrizgača po cilindru omogućena je bolja kontrola procesa sagorijevanja i efikasnije izgaranje. Ovime se može smanjiti emisija NO<sub>x</sub> i do 30%, ali se povećavaju troškovi radi većeg broja ubrizgača, cijevi i dodatne opreme.



Slika 2: Primjer smanjenja emisije upotrebom kliznih ventila u odnosu na standardne ventile

Izvor: Henningsen S., MV Sine Maersk Emission Measurements & Retrofit Control Technology Discussion, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, 2004.

## **2.2. Preinake sustava za dovod zraka**

### **2.2.1. Hlađenje ispirnog zraka**

Smanjenjem temperature ispirnog zraka smanjuje se temperatura izgaranja, a time i emisija dušičnih oksida (NO<sub>x</sub>). Za svaka 3 °C smanjenja temperature ispirnog zraka, NO<sub>x</sub> se smanji za oko 1%. Smanjenje temperature zraka za nabijanje rezultira smanjenjem cjelokupne temperature i smanjenjem gubitka topline, što nadalje rezultira poboljšanom toplinskom efikasnošću. Ovakve mjere je vrlo teško postići korištenjem standardne tehnike hlađenja. Kod četverotaktnih motora može se upotrijebiti Millerov koncept da bi se postigle niske temperature ispirnog zraka. Korištenjem turbopuhala s visokim tlakom, usisni ventil se zatvori prije nego klip dođe u donju mrtvu točku tijekom usisnog takta. Kako se klip miče prema donjoj mrtvoj točki, zrak unutar cilindra ekspanira, rezultirajući smanjenjem temperature. Millerovo supernabijanje može smanjiti NO<sub>x</sub> za 20%, bez povećanja potrošnje goriva. [ 1 ]

### **2.2.2. Povećanje tlaka ispirnog zraka**

Ova metoda neće sama po sebi smanjiti emisiju NO<sub>x</sub>, već se koristi u kombinaciji s drugim metodama. U kombinaciji s drugom metodom, kao što je recimo odgođeno vrijeme ubrizgavanja, može se postići smanjenje emisije NO<sub>x</sub> od 10% do 40%. Postoje sljedeće mogućnosti:

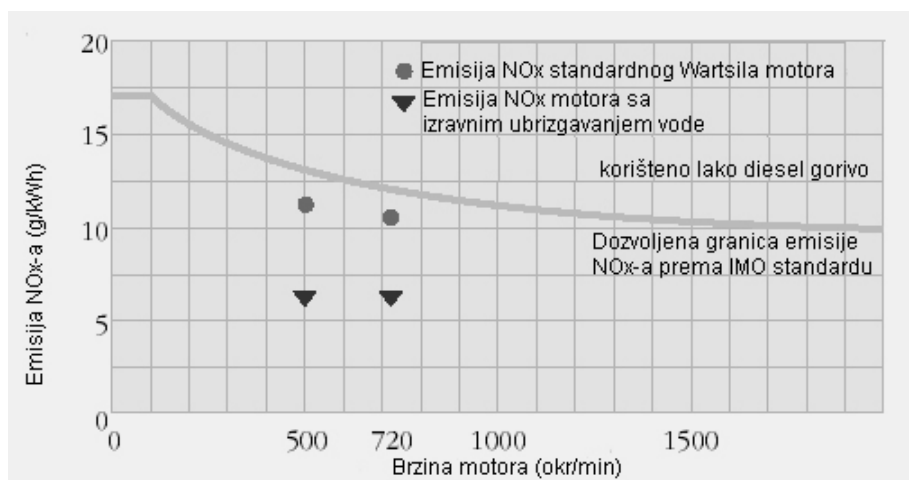
- Ukoliko je vrijeme ubrizgavanja odgođeno i omjer kompresije je konstantan, vršni tlak će pasti i specifična potrošnja goriva će porasti.
- Ukoliko je vrijeme ubrizgavanja odgođeno, a omjer kompresije se poveća da bi se dostigao originalni vršni tlak u cilindru dok se tlak zraka za nabijanje drži konstantnim, specifična potrošnja goriva će se malo smanjiti.
- Ukoliko je vrijeme ubrizgavanja odgođeno, a poveća se tlak nabojnog zraka da bi se postigao originalni vršni tlak dok je omjer kompresije konstantan, specifična potrošnja goriva će se povećati.
- Ukoliko se i vrijeme ubrizgavanja i omjer kompresije održavaju jednakim, povećanjem tlaka nabijanja smanjit će se specifična potrošnja goriva. [ 8 ]

## **2.3. Izravno ubrizgavanje vode**

NO<sub>x</sub> je glavni produkt izgaranja goriva. Smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a može se postići smanjenjem temperature tijekom procesa izgaranja, a to se postiže izravnim ubrizgavanjem vode u komoru izgaranja.

Sustav izravnog ubrizgavanja vode je vrlo jednostavan način za značajno smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a. Taj sustav zahtijeva samo čistu vodu i nekoliko dodatnih dijelova, a prednosti su sljedeće:

- Smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a za 50% – 60%
- Emisija NO<sub>x</sub>-a iznosi 4 – 6 g/kWh za motore koji koriste lako gorivo te 5 – 7 g/kWh za motore koji koriste teško gorivo
- Nema negativno djelovanje na komponente motora
- Motor može raditi bez ubrizgavanja vode ukoliko zatreba i na takav rad se može prebaciti pri bilo kojem opterećenju
- U slučaju alarma dolazi do automatskog prelaza na rad bez ubrizgavanja vode
- Za smještaj opreme za izravno ubrizgavanje vode treba jako malo prostora tako da se sustav može ugraditi na bilo koju instalaciju
- Investicija i troškovi rada su niski
- Omjer ubrizgane vode u odnosu na ubrizgano gorivo iznosi 0,4 – 0,7



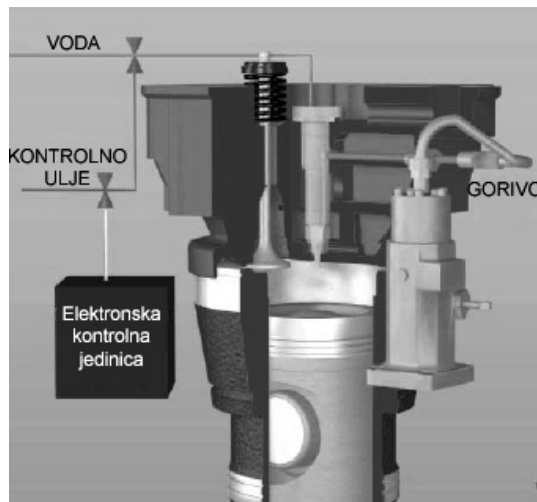
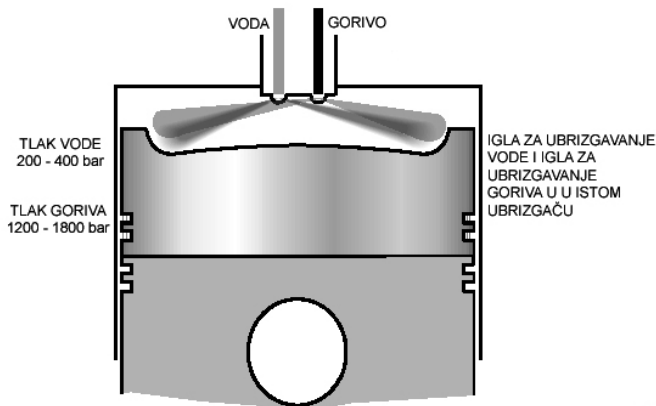
Slika 3: Razlika u emisiji NO<sub>x</sub>-a kod tipičnih dizel motora i motora s izravnim ubrizgavanjem goriva

Izvor: Direct Water Injection, Wartsila Switzerland Ltd.

Glavni dio tog sustava je ventil kroz koji se ubrizgava i voda i gorivo. Izravno ubrizgavanje vode smanjuje emisiju NO<sub>x</sub>-a za 50% – 60%, bez štetnog djelovanja na izlaznu snagu i dijelove motora. Ugrađen sigurnosni sustav omogućuje trenutni prestanak ubrizgavanja vode u slučaju prevelikog protoka vode ili curenja, a kako je sustav vode u potpunosti odvojen od sustava goriva i nakon zatvaranja sustava vode motor će nastaviti normalno raditi.

Motor sa sustavom izravnog ubrizgavanja vode je opremljen s kombiniranim ventilom za ubrizgavanje i sapnicom koji omogućavaju ubrizgavanje vode i goriva u cilindar. Sapnica ima dvije odvojene igle, čije je upravljanje također odvojeno. Voda se ubrizgava prije goriva i na taj način hladi komoru za izgaranje, čime se smanjuje emisija NO<sub>x</sub>-a. Ubrizgavanje vode prestaje prije početka ubrizgavanja goriva u cilindar tako da proces paljenja i sagorijevanja teku nesmetano.

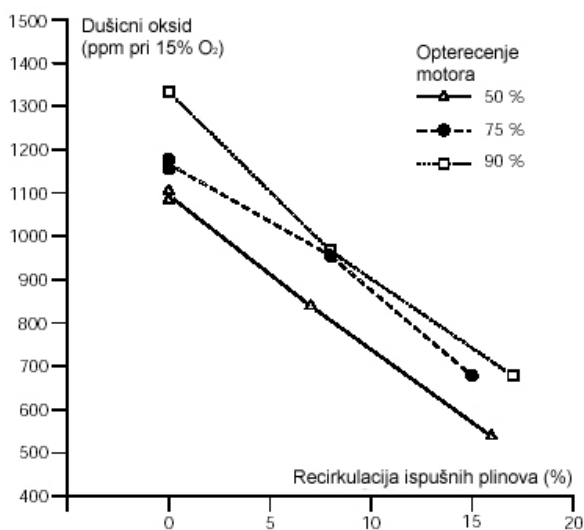
Tlak vode koja se ubrizgava iznosi 210- 400 bara, ovisno o tipu motora. Takav tlak vode postiže se pomoću visokotlačne pumpe vode. Niskotlačna pumpa je također potrebna da bi opskrbljivala visokotlačnu pumpu dovoljnom količinom vode. Prije niskotlačne pumpe voda se filtrira da bi se iz nje otklonile krute čestice. Na strani glave cilindra ugrađuje se osigurač protoka čiji je zadatak da prekine dovod vode u cilindar u slučaju da se igla u sapnici zaglavi. Vrijeme početka ubrizgavanja vode i vrijeme trajanja ubrizgavanja kontroliraju se elektronski pomoću kontrolne jedinice, koja dobiva ulazni signal iz izlaza motora. [ 3 ]



*Slika 4: Princip direktnog ubrizgavanja vode*

## 2.4. Recirkulacija ispušnih plinova

Na tlak kisika i dušika može se jedino utjecati promjenom specifične količine zraka koji ulazi u motor ili promjenom omjera između kisika i dušika. Omjer se može mijenjati recirkulacijom ispušnih plinova. Ukoliko se recirkulira 15% ispušnih plinova, rezultirajuća količina kisika u ulaznom zraku će se smanjiti s atmosferskih 21% na 18%, što će imati značajan utjecaj na stvaranje NO<sub>x</sub>-a. Može se računati da se s 10% recirkuliranih ispušnih plinova smanjuje emisija NO<sub>x</sub> za 2 g/kWh. Ovom metodom može se smanjiti emisija NO<sub>x</sub> i do 80%, ali se povećava specifična potrošnja goriva i do 10%.

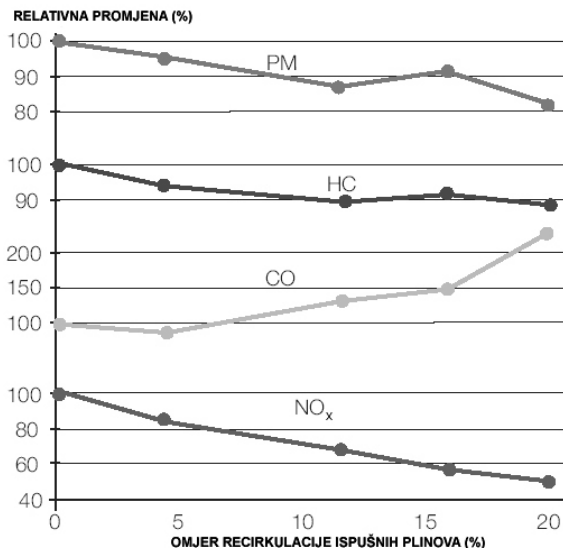


Slika 5: Utjecaj recirkulacije ispušnih plinova na emisiju NO<sub>x</sub>

Izvor: Emission Control Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines

Postoje dvije varijante recirkulacije ispušnih plinova. Prva varijanta je recirkulacija ispušnih plinova prije turbopuhala, a druga poslije turbopuhala. U oba slučaja plinovi se moraju ohladiti i pročistiti. Recirkulacija ispušnih plinova ima i jednu manu radi koje nije pogodna za korištenje na brodu, nego se većinom koristi u postrojenjima na kopnu. Ta mana je otjecanje otpadnih voda koje se koriste za pročišćavanje plinova, a sadrže sumpor, nesagorene ugljikovodike, čađu i pepeo. Ova metoda je puno bolja za uporabu kod plinskih turbina i u slučajevima kada su prisutni čisti plinovi.



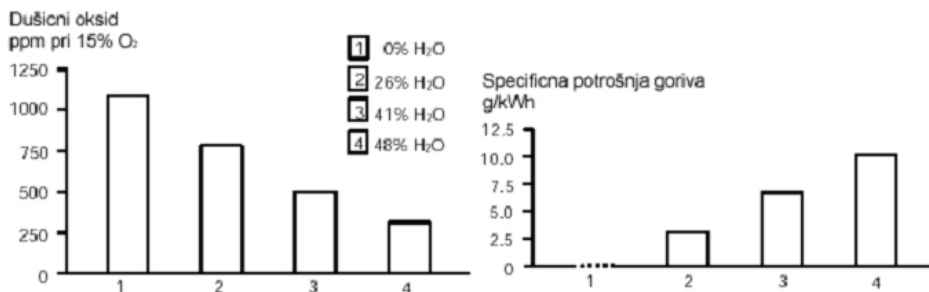


Slika 6: Emisija kod opterećenja od 75% pri raznim omjerima recirkulacije ispušnih plinova

Izvor: Emission Control: MAN B&W Two-Stroke Diesel Engine, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark

## 2.5. Korištenje emulzije vode i goriva

Miješanje vode s gorivom znatno smanjuje emisiju NO<sub>x</sub>. Ova metoda koristi se češće kod kopnenih postrojenja nego na brodovima. Standardni motor dozvoljava emulziju goriva s 20% vode pri punom opterećenju, iako su testirane i količine vode 50/50% gorivo/voda.



Slika 7: Utjecaj emulzive vode i goriva na emisiju NO<sub>x</sub> i specifičnu potrošnju goriva

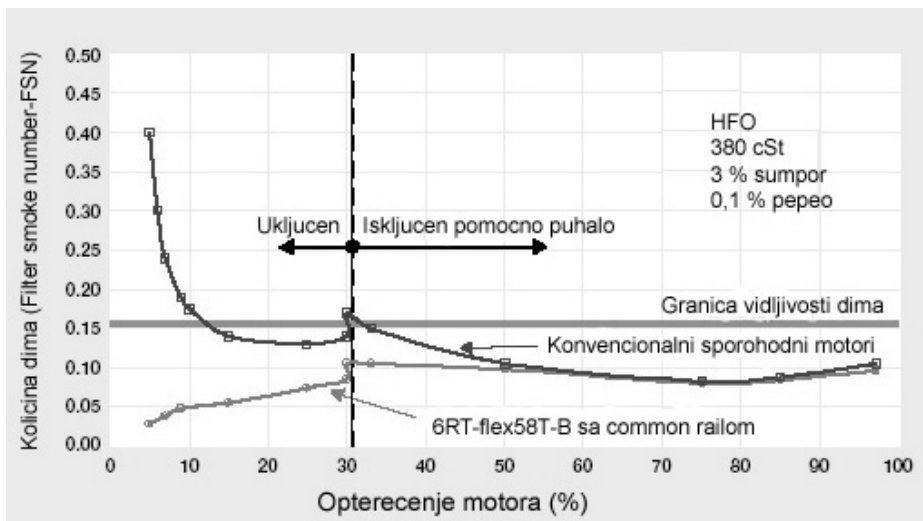
Izvor: Emission Control Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines

Utjecaj emulziranog goriva varira, ovisno o vrsti motora, ali u osnovi jedan posto vode smanjuje emisiju NO<sub>x</sub> za jedan posto. Kod teških dizel goriva, moguća je čista emulzija vode i goriva, dok je kod benzina moguća samo uz pomoć emulzirajućeg agenta. Tipični takvi agenti su jeftini biljni proteini, koji se koriste kao industrijska hrana za stoku.

Regulacija količine vode koja se miješa s gorivom može se obavljati na temelju protoka goriva i na temelju količine emitiranoga NO<sub>x</sub>-a na ispuhu. Kod plovila koja koriste emulzirano gorivo, postoji posebno dizajnirani sigurnosni sustav tako da se u slučaju nestanka električne energije ne naruši stabilnost miješanja vode i goriva te da se motor može uputiti u rad bez prebacivanja na gorivo bez vode. [ 4 ]

## 2.6. Sustav zajedničkog cjevovoda

Kod motora sa sustavom zajedničkog cjevovoda (Common Rail System) postignut je bezdimni rad pri manjim brojevima okretaja te značajno smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a u odnosu na konvencionalne brodske dizel- motore. Razlog tomu je što je kod tih motora postignuto bolje izgaranje goriva. Bolje izgaranje goriva se kod motora sa Common Rail sustavom postiže održavanjem tlaka ubrizgavanja goriva na optimalnom nivou pri svim brzinama te selektivnim zatvaranjem ubrizgača goriva i optimiziranim otvaranjem i zatvaranjem ispušnih ventila.



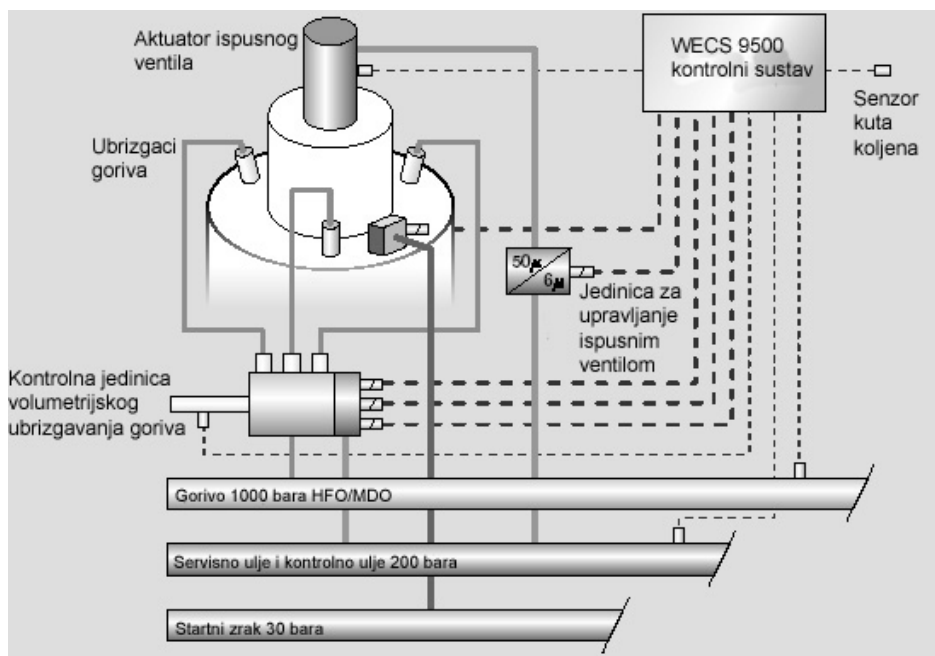
Slika 8: Emisija dima kod Sulzerovih RT-flex motora u odnosu na konvencionalne dizel motore

Izvor: Sulzer RT-flex low speed engines, Wartsila Switzerland Ltd.

Emisija NO<sub>x</sub>-a je kod motora sa sustavom zajedničkog cjevovoda ispod granice koju propisuje prilog VI MARPOL 73/78 konvencije, jer je postignuta najbolja moguća ravnoteža između potrošnje goriva i emisije NO<sub>x</sub>-a pri svim opterećenjima.

Sulzerovi RT-flex motori uvode po prvi put ubrizgavanje goriva pomoću sustava zajedničkog cjevovoda kod modernih, velikih dizel -motora. Dosadašnji sustav impulsnog ubrizgavanja goriva je kombinirao stvaranje tlaka, tempiranje i doziranje goriva u pumpama za ubrizgavanje s ograničenom fleksibilnošću utjecaja na varijable ubrizgavanja. Za razliku od toga, common-rail sustav odvaja funkcije i na taj način daje mnogo veću fleksibilnost. On ima zasebne funkcije kontrole preciznog volumetričkog ubrizgavanja goriva, oblikovanja varijabli vremena ubrizgavanja i slobodnog odabira tlaka ubrizgavanja. [ 5 ]

Otvaranjem i zatvaranjem ispušnih ventila, vremenom ubrizgavanja, volumenom ubrizganog goriva, slijedom ubrizgavanja, regulacijom startnog zraka upravlja elektronski sustav (WECS<sup>1</sup>).



Slika 9: Elektronska regulacija sustava zajedničkog cjevovoda

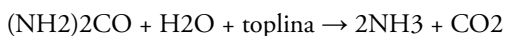
Izvor: Sulzer RT-flex low speed engines, Wartsila Switzerland Ltd.

<sup>1</sup> WECS – Wartsila Electronic Control System

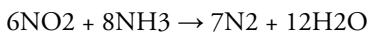
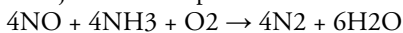
### 3. SEKUNDARNE METODE

#### 3.1. Selektivna katalitička redukcija

Proces selektivne katalitičke redukcije (SCR<sup>2</sup>) smanjuje emisiju NO<sub>x</sub>-a do bezopasnih supstanci koje se normalno nalaze u zraku kojeg udišemo. SCR je trenutno najefikasnija metoda za smanjivanje emisije NO<sub>x</sub>-a, a smanjenje iznosi 85% - 95%. Reducirajuće sredstvo (urea) se ubrizgava u ispušne plinove pri temperaturi od 290-450 °C. Karbanid se u ispušnim plinovima raspada na amonijak, koji tada prolazi kroz proces katalizacije koji pretvara NO<sub>x</sub> na bezopasni dušik i vodu. Proces se odvija po sljedećim formulama:

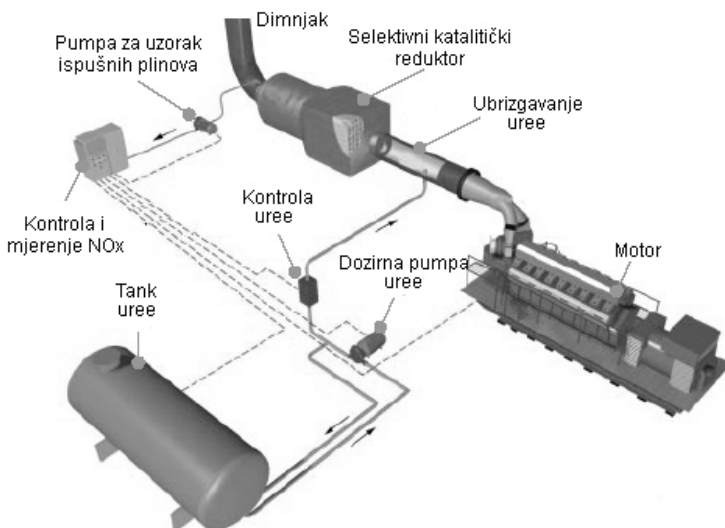


Ta mješavina tada prolazi kroz katalizator, gdje se NO<sub>x</sub> pretvara u dušik i vodu:



Na taj se način može dostići nivo NO<sub>x</sub>-a od 2 g/kWh ili niže, što je u skladu s najstrožim dopuštenim nivoom.

Tipična jedinica za selektivnu katalitičku redukciju sastoji se od reaktora, koji sadrži nekoliko slojeva katalizatora, sustava za doziranje i spremnika sredstva te kontrolnog sustava. Parametar koji se koristi za kontrolu količine uree koja se ubrizgava je opterećenje motora. Da bi se postigla što točnija kontrola, ubrizgavanje je povezano na povratni signal s uređaja za mjerenja količine NO<sub>x</sub>-a koji se nalazi iza katalizatora.



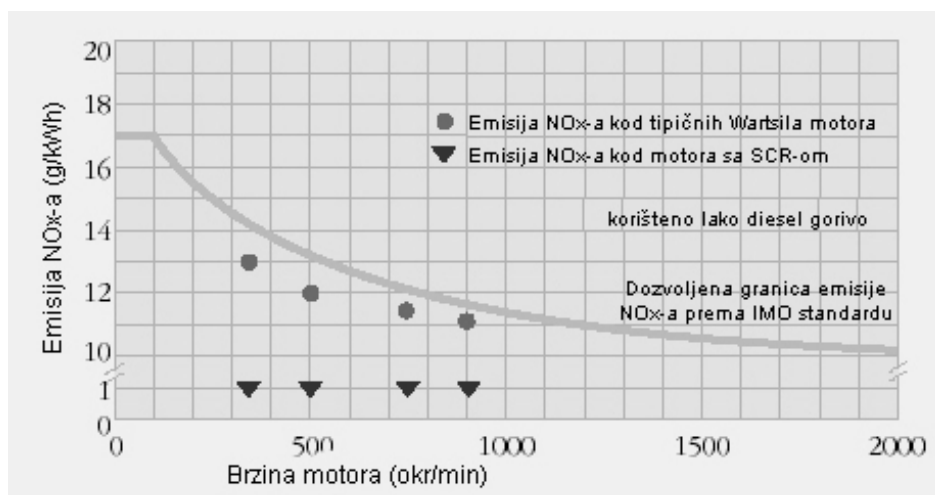
Slika 10: Selektivna katalitička redukcija

Izvor: Compact Selective Catalytic Reduction (Compact SCR), Wartsila Switzerland Ltd.

<sup>2</sup> Selektivna katalitička redukcija (Selective Catalytic Reduction)

Smanjenje NO<sub>x</sub>-a će ovisiti o količini ubrizgane uree. Smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a se također može postići i povećanjem volumena katalizatora. Ukoliko se na brodu nalazi kotao na ispušne plinove, on se mora smjestiti iza SCR-a, iz razloga što SCR zahtijeva relativno visoke temperature za rad.

Životni vijek elemenata katalizatora je obično 3-5 godina za tekuća goriva i nešto duže ukoliko motor radi na plin. Glavne troškove u radu ovakvog sustava čini potrošnja uree i zamjena katalitičkih slojeva. Potrošnja uree iznosi oko 20-25 g/kWh. Veličina spremnika uree ovisi o veličini motora i o tome koliko često brod dolazi u luke u kojima ima mogućnost opskrbe ureom. [ 2 ]



Slika 11: Razlika u emisiji NO<sub>x</sub>-a kod tipičnih dizel motora i motora sa SCR

Izvor: Compact Selective Catalytic Reduction (Compact SCR), Wartsila Switzerland Ltd.

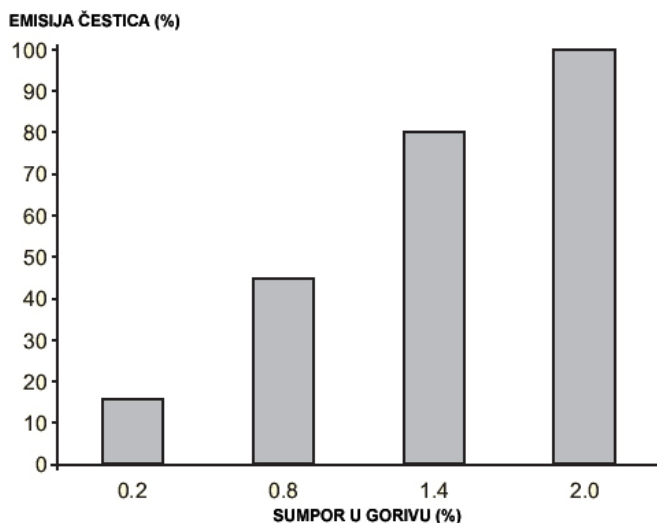
### 3.2. Upotreba goriva s malim postotkom sumpora

Kao što je već prije rečeno, emisija sumpornog dioksida direktno ovisi o postotku sumpora u gorivu. Dakle, najjednostavniji i najjeftiniji način za smanjenje emisije sumpornog dioksida je smanjenje postotka sumpora u gorivu. Teška dizel goriva, koja se koriste kod brodova, u prosjeku sadrže oko 3% sumpora. Upotreba goriva s niskim postotkom sumpora su također moguća kod brodova i to najčešće bez potrebe za bilo kakvim dodatnim modifikacijama na brodom stroju. Dodatni troškovi (radi veće cijene tih goriva) se kompenziraju zbog veće kvalitete takvih goriva pa dolazi do manjeg trošenja dijelova broskog stroja, potrebna je manja količina ulja za podmazivanje i manja je potreba za održavanjem, motor mirnije radi s manjim rizikom od problema u radu.

Razlika u cijeni između goriva s malim postotkom sumpora (1% ili manje) i goriva s velikim postotkom sumpora (3,5%) u prosjeku iznosi oko 19 \$ po toni goriva. Do te razlike je došlo radi potrebe za novim ulaganjima rafinerija za proces desumporizacije goriva.

Brojne zemlje su uvele smanjene takse za brodove koji koriste gorivo sa smanjenim

postotkom sumpora, pa je tako, recimo, Švedska 1998. uvela smanjene takse u svojim lukama i plovnim putovima za trajekte koji koriste gorivo s postotkom sumpora manjim od 0,5% i teretne brodove koji koriste gorivo s postotkom sumpora manjim od 1%. Na taj način postignut je nagli porast brodova koji koriste gorivo s manjim postotkom sumpora, pa tako danas 80% ulaza u Švedske luke čine takvi brodovi.



Slika 12: Emisija čestica kao funkcija količine sumpora u gorivu

Izvor: Emission Control: MAN B&W Two-Stroke Diesel Engine, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark

Europska komisija donijela je prijedlog kojim bi se emisija sumpornog dioksida (SO<sub>2</sub>) i čestica smanjila do 2008. za 10% u odnosu na emisiju iz 2000. Taj prijedlog obuhvaća sljedeće mjere :

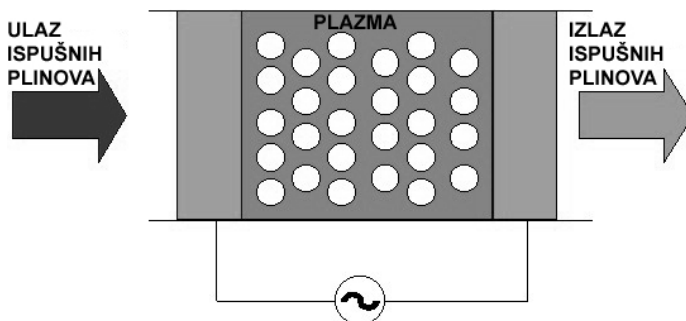
- korištenje goriva koja sadrže maksimalno 1,5% sumpora za brodove koji plove u Baltičkom i Sjevernom moru te Engleskom kanalu
- korištenje goriva koja sadrže maksimalno 1,5% sumpora za putničke brodove koji uplovljavaju ili isplovljavaju iz bilo koje europske luke
- poboljšanje postojeće opskrbe lakim gorivima koja koriste morski brodovi i brodovi koji plove po unutrašnjim vodama, uvodeći granicu od maksimalno 0,2% sumpora na goriva koja koriste brodovi u lukama ili na sidru.

Iako bi uvođenje takvih mjera znatno povećalo troškove, došlo bi i do brojnih prednosti kao što je djelovanje na ekosustav, ljudsko zdravlje, usjeve i materijale modernih zgrada. U svakom slučaju, prednosti bi u svim aspektima uvelike premašile troškove. [ 7 ]

### 3.3. Sustav smanjenja emisije pomoću plazme

Plazma je djelomično ionizirani plin koji se sastoji od neutralne smjese atoma, molekula, slobodnih radikala, iona i elektrona. Električna energija se pretvara u energiju elektrona koji stvaraju slobodne radikale, koji uništavaju zagađivače u ispušnim plinovima.

Na razvoju hladnog plazma sustava (NTP – non-thermal plazma) koji radi pri atmosferskom tlaku, radi se već dugi niz godina. Danas se sustav već koristi za: pročišćavanje ispušnih plinova inceneratora, tretmane razgradnje smeća, filtriranje zraka, UV tretman smeća, a ova se tehnologija pokušava usavršiti i za upotrebu kod dizel- motora.



Slika 13: Sustav smanjenja emisije pomoću hladnog plazma sustava (NTP – non-thermal plazma)

Izvor: [http://www.cimac.com/workinggroups/wg5WebDocument/DieselEmissions\\_31Mar00.htm](http://www.cimac.com/workinggroups/wg5WebDocument/DieselEmissions_31Mar00.htm)

Prototip za ispušne plinove dizel- motora baziran je na površinskom oslobađanju. Plazma se stvara pomoću izmjeničnog visokog napona koji razbija plin između dvije elektrode. Područje između dviju elektrode ispunjeno je materijalom, što rezultira razbijanjem napona u prazninama između materijala. Vrijeme razbijanja napona iznosi nekoliko nanosekundi. Na taj se način stvara hladna plazma koja uništava emisiju štetnih tvari.

Iako je ovaj sustav tek u fazi testiranja za brodsku upotrebu, troškovi proizvodnje bi trebali biti relativno niski. Sustav je kompaktan i izrazito fleksibilan što se tiče veličine i oblika. Dosadašnji eksperimenti pokazali su mogućnost smanjenja emisije NO<sub>x</sub> čak do 97%. [ 8 ]

## 4. ZAKLJUČAK

Radi sve strožih propisa vezanih za emisiju štetnih tvari s brodova, došlo je do potrebe za pronalaženjem tehničkih rješenja kojima se emisija štetnih tvari svodi na što je moguće manji nivo. Metode smanjenja emisije štetnih tvari mogu se podijeliti na primarne i sekundarne. Primarna metoda kojom se postiže najveće smanjenje emisije NO<sub>x</sub> je recirkulacija ispušnih plinova, kojom je moguće postići smanjenje emisije NO<sub>x</sub> i do 80%, ali uz povećanje potrošnje goriva od čak 10%. Povećanjem omjera kompresije u kombinaciji s odgođenim vremenom ubrizgavanja moguće je postići smanjenje emisije NO<sub>x</sub> do 25% uz povećanje potrošnje goriva od 1%. Smanjenje emisije NO<sub>x</sub> od 25% moguće je postići i povećanjem broja ubrizgača

goriva, uz povećanje potrošnje goriva od samo 1%. Ovom metodom značajno se smanjuje i emisija dima. Povećanjem tlaka ispirnog zraka može se postići smanjenje emisije NOx od 10% - 40%, ali ova metoda se koristi isključivo u kombinaciji s drugim metodama, dok se hlađenjem ispirnog zraka za svaka 3 °C smanjuje emisije NOx za 1%. Izravnim ubrizgavanjem vode u cilindar moguće je postići smanjenje emisije od 50% - 60% i to bez štetnog djelovanja na izlaznu snagu i dijelove motora, dok se korištenjem emulzije vode i goriva postiže smanjenje emisije NOx od 1% za 1% vode. Od sekundarnih metoda najefikasnija je metoda selektivne katalitičke redukcije kojom se postiže smanjenje emisije NOx od čak 85% - 95%. Najjednostavnija i najjeftinija metoda za smanjenje emisije sumpornog dioksida je upotreba goriva s malim postotkom sumpora. Sustav smanjenja emisije pomoću plazme danas je još u fazi testiranja za brodsku upotrebu, ali su dosadašnji eksperimenti pokazali da bi se ovim sustavom koji je vrlo jednostavan moglo postići smanjenje emisije NOx do čak 97%. Jedino poštivanjem propisa i uvođenjem sustava za kontrolu emisije štetnih tvari moguće je zaštititi okoliš koji je dosadašnjom nebrigom već znatno uništen.

## LITERATURA

- [ 1 ] Goldsworthy L., *Design Of Ship Engines For Reduced Emissions Of Oxides Of Nitrogen*, Australian Maritime College, 2002.
- [ 2 ] *Compact Selective Catalytic Reduction (Compact SCR)*, Wartsila Switzerland Ltd.
- [ 3 ] *Direct Water Injection*, Wartsila Switzerland Ltd.
- [ 4 ] *Emission Control Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines*
- [ 5 ] *Sulzer RT-flex low speed engines*, Wartsila Switzerland Ltd.
- [ 6 ] *Technology Review Vasa 32*, Wartsila Switzerland Ltd.
- [ 7 ] <http://www.acidrain.org/factsheet13>
- [ 8 ] [http://www.cimac.com/workinggroups/wg5WebDocument/DieselEmissions\\_31Mar00.htm](http://www.cimac.com/workinggroups/wg5WebDocument/DieselEmissions_31Mar00.htm)



*Summary*

**METHODS OF REDUCING HARMFUL POLLUTANT EMISSIONS FROM SHIPS**

*This paper outlines methods used for reducing emission of air pollutants such as: nitrogen oxides, sulfur oxides, particulate matter, carbon monoxide, carbon dioxide and volatile organic compounds from ships. These methods can be separated into two major groups: primary and secondary. Primary methods consist of different technical solutions that prevent producing of air pollutants in the engine, while secondary methods neutralize the air pollutants that have already emerged. Primary methods are: modifications of the combustion system and air system, direct water injection, exhaust gas recirculation, fuel and water emulsion. Secondary methods are: selective catalytic reduction, low sulfur fuels, plasm system of reducing air pollutant emission.*

*Key words: emission of air pollutants from ships, primary methods, secondary methods.*

*Beli kamik 4, 51000 Rijeka  
Croatia*