

# Nova generacija dvotaktnih sporookretnih dizelskih motora na prirodni plin.

---

**Blidar, Iris**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:654349>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-11**



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

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**IRIS BLIDAR**

**NOVA GENERACIJA DVOTAKTNIH SPOROOKRETNIH  
DIZELSKIH MOTORA NA PRIRODNI PLIN**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**NOVA GENERACIJA DVOTAKTNIH SPOROOKRETNIH  
DIZELSKIH MOTORA NA PRIRODNI PLIN**  
**NEW GENERATION OF SLOW-SPEED TWO-STROKE  
DIESEL ENGINES ON NATURAL GAS**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Tehnologija transporta tekućih tereta

Mentor: izv. prof. dr.sc. Dean Bernečić

Student: Iris Blidar

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112078378

Rijeka, rujan 2021.

Student: Iris Blidar

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 01120783787

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG  
RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom  
NOVA GENERACIJA DVOTAKTNIH SPOROOKRETNIH DIZELSKIH MOTORA NA PRIRODNI PLIN  

---

*(naslov završnog rada)*

izradio samostalno pod mentorstvom  
*Izv. Prof. Dr. Sc. Deana Bernečića*

---

te komentorstvom

---

stručnjaka/stručjakinje iz tvrtke

---

*(naziv tvrtke).*

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

Suglasan sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:  
*(zaokružiti jedan ponuđeni odgovor)*

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student

---

*(potpis)*

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisani su sustavi pogonskih medija na novim generacijama motora s niskotlačnim sustavom za dobavu plina. Opisani su glavni dijelovi i funkcije te propisi koji osiguravaju sigurnu izgradnju i rukovanje s takvim sustavima. Osim samih sustava prezentirane su i nove tehnologije poput sustava detekcije propuštanja plina i sustava za smanjenje metanskog skliza recirkulacijom ispušnih plinova. Glavni naglasak ovog rada je na razvoju i implementaciji novih modernih tehnologija u svrhu napretka pomorske industrije i smanjenja ugljičnog otiska koji brodovi s klasičnim vrstama pogona imaju na okoliš.

Ključne riječi: Alternativna pogonska goriva, „Dual fuel“ motori, LNG, nove tehnologije, sustavi pogonskih medija

## **SUMMARY**

This paper describes systems that supply fuel to a new generation of engines with low-pressure gas supply systems. The main parts of the systems and their functions are described as well as the regulations that ensure the safe construction and handling of such systems. In addition to the systems themselves, new technologies that support gas systems such as gas leak detection systems and exhaust gas recirculation have been presented. The main emphasis of this paper is on the development and implementation of new modern technologies for the purpose of advancing the maritime industry and reducing the carbon footprint that ships with conventional types of propulsion have on the environment.

Key words: Alternative fuels, Dual fuel engines, LNG, new technologies, fuel supply systems,

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>II</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MEĐUNARODNI PROPISI</b> .....	<b>2</b>
2.1. MEĐUNARODNI PRAVILNIK ZA BRODOVE KOJI KORISTE PLIN ILI DRUGA GORIVA S NISKIM PLAMIŠTEM.....	2
2.2. MARPOL ANNEX VI ZAHTJEVI ZA MOTORE S UNUTARNJIM IZGARANJEM ...	4
<b>3. TEHNOLOGIJA NISKOTLAČNIH SUSTAVA PLINA NA DVOTAKTNIM SPOROOKRETNIM MOTORIMA</b> .....	<b>6</b>
3.1 GENERALNI OPIS NISKOTLAČNIH MOTORA NA PLINOVITA I TEKUĆA GORIVA .....	6
3.1.1 <i>Princip rada motora u plinskom režimu rada</i> .....	6
3.2. SIGURNOST DVOTAKTNIH SPOROOKRETNIH NISKOTLAČNIH MOTORA .....	8
3.2.1. <i>Spontane detonacije i njihov utjecaj na rad motora</i> .....	8
3.2.2. <i>Detekcija i postupci kod propuštanja plina</i> .....	9
3.3. KAPITALNI I OPERATIVNI TROŠKOVI MOTORA S NISKOTLAČNIM UBRIZGAVANJEM PLINA .....	11
3.3.2. <i>Operativni troškovi</i> .....	12
3.4. EMISIJE ŠTETNIH TVARI KOD MOTORA S NISKOTLAČNIM SUSTAVOM.....	13
<b>4. SUSTAVI POGONSKIH MEDIJA NA NOVIM SPOROOKRETNIM MOTORIMA S NISKOTLAČNIM PLINSKIM SUSTAVOM</b> .....	<b>15</b>
4.1. SUSTAV PLINOVITOG GORIVA.....	15
4.1.1. <i>Unutarnji sustav plina</i> .....	16
4.1.2. <i>Glavni plinski ventilni sklop i vanjski sustav za dobavu plina</i> .....	18
4.2. SUSTAV TEKUĆEG GORIVA.....	21
4.3. SUSTAV PILOT GORIVA .....	28
4.2.1. <i>Jedinica za dobavu pilot goriva rasprskачima</i> .....	29
4.2.2. <i>Rasprskач pilot goriva</i> .....	30
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>32</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>34</b>

# 1. UVOD

Motori na prirodni plin razvili su se zbog dva glavna razloga.

Prvi razlog je iskorištavanje prirodnog plina (metana), koji zbog svojih fizikalnih svojstava konstantno isparava unutar tankova u kojima se prevozi u tekućem stanju (LNG tankeri).

Drugi razlog je potreba za sve čistim gorivima koji smanjuju udio sumpornih i dušikovih oksida (SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>) kao i ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) u ispušnim plinovima koji doprinose zagađenju i globalnom zatopljenju.

Sve stroži ekološki propisi primoravaju brodovlasnike na primjenjivanje modernijih načina propulzije za svoje brodove. Među modernijim tipovima propulzije je i nova vrsta dvotaktnih motora na prirodan plin s niskotlačnim sustavom dobave plina. Ovaj rad bavi se opisom motora s niskotlačnim sustavima za dobavu plina glavnome motoru, opisom glavnih komponenti sustava te opisom principa rada niskotlačnog sustava prirodnog plina i ostalih tekućih goriva koje taj motor koristi. Jedan manji dio rada opisuje propise i zahtjeve koje se odnose na motore koji koriste plinovita i tekuća goriva za pogon broda, no naglasak rada je na tehnologijama i sustavima koji dobavljaju plinovito gorivo glavnom motoru pri niskom tlaku.

## **2. MEĐUNARODNI PROPISI**

Svrha međunarodnih propisa je osiguravanje minimalnih standarda za sigurnost posade i okoline tijekom izvođenja radova i ostalih operacija na brodu, od strane posade i ostalih popratnih službi. IGF kod (International Code for Ships Using Gases or Other Low-flash point Fuels) odnosno Međunarodni kodeks za sigurnost brodova koji koriste plin ili druga goriva s niskim plamištem propisuje standarde za sigurno rukovanje, izradu i konstrukciju sustava koji opslužuju moderne motore na prirodni plin kao i za same motore. Sa sve strožim ekološkim zahtjevima moderni motori moraju poštovati sve striktnije vrijednosti štetnih tvari u svojim ispušnim plinovima. Zahtjevi za sadržaj štetnih tvari u ispušnim plinovima kod takvih motora propisani su Tier III normama, a u sklopu Međunarodne pomorske organizacije (IMO).

### **2.1. MEĐUNARODNI PRAVILNIK ZA BRODOVE KOJI KORISTE PLIN ILI DRUGA GORIVA S NISKIM PLAMIŠTEM**

Glavna filozofija IGF<sup>1</sup> Pravilnika je pružanje smjernica za uređenje, izgradnju, kontrolu i nadzor strojeva, opreme i sustava koji se koriste lako zapaljivim gorivom kako bi se smanjio rizik od opasnosti za brod, njegovu posadu i okoliš, osim brodova pokrivenih Međunarodnim pravilnikom za brodove koji prevoze tekući prirodni plin. Navedeni pravilnik određuje propise i pravila za gradnju i rukovanje sustavima vezanih za pogon glavnog stroja, pomoćnih strojeva te ostalih strojeva/uređaja koji koriste prirodan plin kao pogonsko sredstvo. Ovdje su navedene neke od glavnih odredbi tog Pravilnika:

- Sigurnost i pouzdanost sustava bit će jednaka onoj postignutoj s novim i usporedivim konvencionalnim glavnim i pomoćnim strojevima i uređajima pogonjenim tekućim gorivom [2].
- Mogućnost i posljedice opasnosti vezane za pogonski medij bit će ograničene na minimum putem specifičnog razmještaja i dizajna sustava, poput sustava ventilacije, detekcije i sigurnosnih radnji. U slučaju propuštanja plina ili kvara sigurnosnih sustava, poduzet će se potrebne sigurnosne mjere [2].
- Projektiranje sustava mora osigurati da sigurnosne mjere i radnje vezane za sustav plina neće prouzrokovati gubitak energije [2].

---

<sup>1</sup> Međunarodni pravilnik za brodove koji koriste plin ili druga goriva sa niskim plamištem



- Područja rizika bit će ograničena, koliko je to izvedivo, kako bi se smanjili potencijalni rizici koji bi mogli utjecati na sigurnost broda osoba na brodu i opreme [2].
- Oprema koja se nalazi u opasnim područjima mora biti svedena na minimum potrebnu za operativne svrhe i mora biti primjereno certificirana.
- Nepredviđeno nakupljanje eksplozivnih, zapaljivih ili otrovnih plinova treba biti spriječeno [2].
- Izvori paljenja u opasnim zonama bit će svedeni na minimum kako bi se smanjila mogućnost od eksplozije [2].
- Sustavi će biti izvedeni tako da omogućuju prigodnu i sigurnu dobavu i skladištenje goriva. Sustavi moraju biti u stanju primiti gorivo u odgovarajućem agregatnom stanju bez propuštanja. Osim ako je to potrebno iz sigurnosnih razloga, sustav mora biti dizajniran tako da ne dopušta odzračivanje u svim normalnim uvjetima rada [2].
- Mora se osigurati instalacija, sustava cjevovoda, sustava za zadržavanje plina prilikom propuštanja i sustava za rasterećenje tlaka koji su prikladno dizajnirani i izvedeni za svoju namjeravanu primjenu [2].
- Sustavi za sprječavanje ispuštanja plinovitog goriva te strojni prostori koji sadrže potencijalne izvore propuštanja moraju biti locirani i uređeni tako da požar ili eksplozija neće dovesti do neprihvatljivog gubitka energije ili onesposobljavanja uređaja u drugim strojnim prostorima [2].
- Moraju se osigurati primjereni sustavi za nadzor, alarmiranje, kontrolu ili gašenje sustava goriva kako bi osigurali sigurne i pouzdane operacije na brodu [2].
- Mora se osigurati fiksna detekcija plina prikladna za sve prostore koji to zahtijevaju [2].
- Moraju se osigurati mjere za otkrivanje, gašenje i zaštitu od požara koje odgovaraju opasnostima [2].
- Jedan kvar u nekom tehničkom sustavu ili komponenti ne smije dovesti do nesigurne ili potencijalno opasne situacije na cijelom brodu [2].

## 2.2. MARPOL ANNEX VI ZAHTJEVI ZA MOTORE S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Pravila koja reguliraju sprječavanje zagađenja okoliša s brodova propisana su unutar Konvencije zvane MARPOL 73/78<sup>2</sup>(Međunarodna Konvencija za sprječavanje zagađenja mora s brodova). Annex VI MARPOL konvencije usvojen je 1997., a bavi se sprječavanjem zagađenja okoliša ispušnim plinovima s brodova. Annex VI ograničava glavne zagađivače zraka sadržane u ispušnim plinovima poput sumporovih oksida („SOx“<sup>3</sup>), dušičnih oksida („NOx“<sup>4</sup>), te zabranjuje namjerno ispuštanje tvari koje oštećuju ozonski omotač („ODS“<sup>5</sup>), regulira spaljivanje smeća na brodu i emisiju hlapljivih organskih spojeva („VOC“<sup>6</sup>) s tankera [8]. Na sjednici Odbora za zaštitu morskog okoliša („MEPC“<sup>7</sup>) 2005. godine, odbor dogovora reviziju Annex-a VI s ciljem značajnog pooštavanja granica emisija u svijetu, kao posljedica ubrzanog napretka tehnologija vezanih za motore s unutarnjim izgaranjem. Pod revidiranim Annex-om VI MARPOL-a globalna granica za sumpor u gorivu pada s 3,50% na 0,50%, to pravilo stupilo je na snagu 1. Siječnja 2020. godine. Progresivno smanjenje udjela dušikovih oksida (NOx) je također uključeno u reviziju s novim ograničenjima emisija „Tier III“ za motore ugrađene na brodove izgrađene od 1. Siječnja 2016. godine ili nakon, koji plovo unutar Sjeverno američkih i Američko karipskih područja kontrole emisija („ECA“<sup>8</sup>). Osim u navedenim slučajevima, Tier III zahtjevi se odnose na motore ugrađene na brodove čije područje plovidbe spada u kontrolna područja emisija koje se smatraju da bi u budućnosti mogla primjenjivati Tier III razinu kontrole dušikovih oksida (NOx). Za revidirane mjere se očekuje da bi mogle imati znatni pogodan utjecaj na atmosferu, okoliš i ljudsko zdravlje, ponajviše za ljude koji žive u lučkim ili priobalnim gradovima.

---

<sup>2</sup> International Convention on the Prevention of Pollution from Ships

<sup>3</sup> Sumporni oksidi

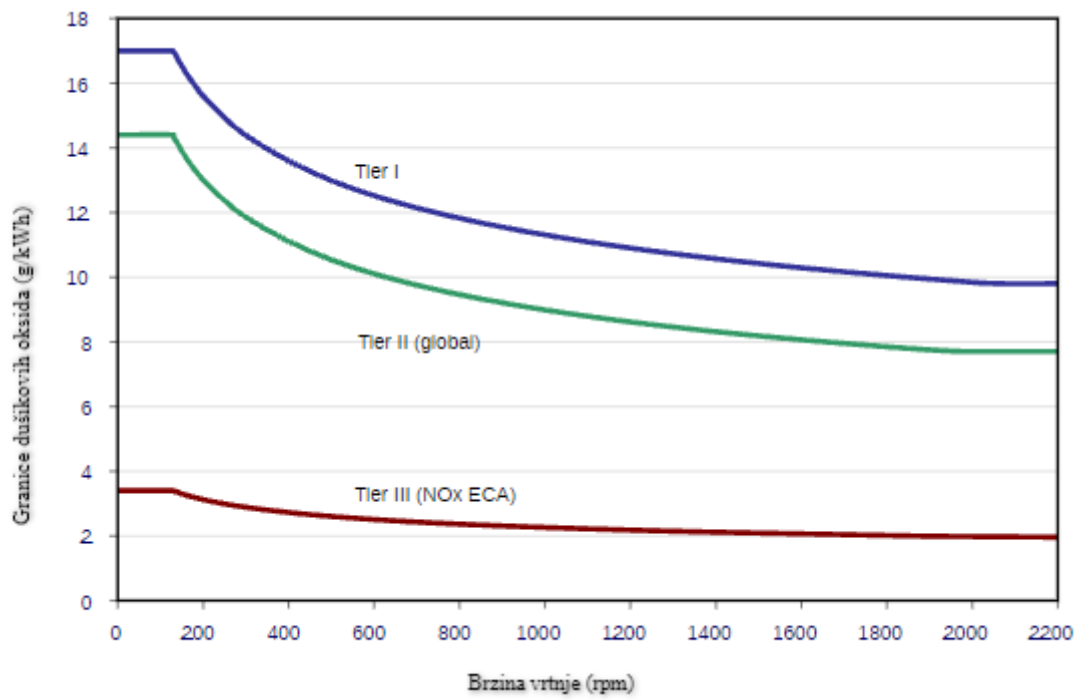
<sup>4</sup> Dušikovi oksidi

<sup>5</sup> Ozone Depleting Substances

<sup>6</sup> Volatile Organic Compounds

<sup>7</sup> Marine Environment Protection Committee

<sup>8</sup> Emission Control Area



**Slika 1: Odnos broja okretaja i sadržaja NOx-a u ispušnim plinovima [6]**

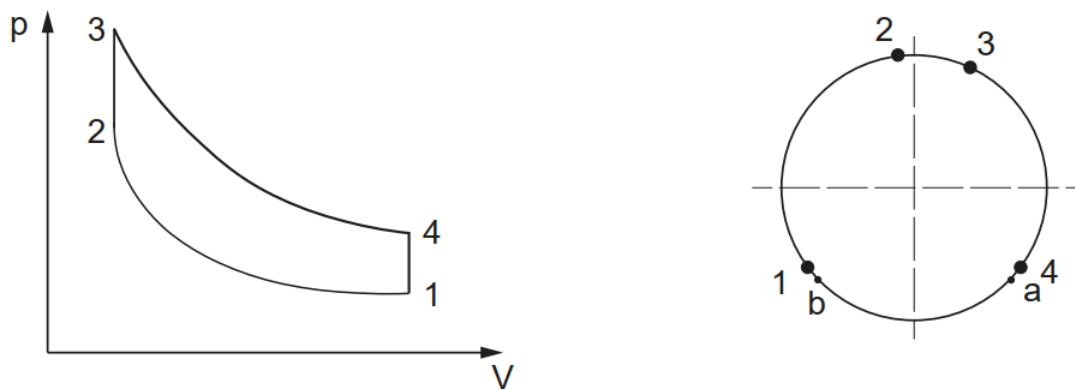
### 3. TEHNOLOGIJA NISKOTLAČNIH SUSTAVA PLINA NA DVOTAKTNIM SPOROOKRETNIM MOTORIMA

#### 3.1 GENERALNI OPIS NISKOTLAČNIH MOTORA NA PLINOVITA I TEKUĆA GORIVA

Glavni motor opremljen je s turbo punjačem i ispušnim ventilima, u dizelskom režimu motor se može koristiti dizelskim ili teškim gorivom. Za vrijeme dizelskog režima rada malena količina goriva ubrizgava se kroz rasprskalice pilot goriva kako bi prevenirali kontaminaciju rasprskalice s naslagama koje se stvaraju tijekom izgaranja.

U plinskom režimu rada motor koristi prirodni plin (Metan) pri niskom tlaku i radi na „Otto“<sup>9</sup> principu. Pilot gorivo koje se koristi kako bi zapalili smjesu zraka i plinovitog goriva je dizelsko gorivo. Tijekom plinskog režima rada motor zadovoljava sve IMO Tier III propise. Motor i svi popratni sustavi građeni su prema IGC i IGF Pravilnicima. Motor je opremljen s „Common-rail“ sustavom s elektronički upravljivim ventilima za ubrizgavanje goriva i ispušnim ventilima. Kontrolni sustav motora upravlja sa svim najvažnijim funkcijama (brzina motora, zaštita od prekomjerne brzine, ubrizgavanje goriva, itd...) [5].

##### 3.1.1 Princip rada motora u plinskom režimu rada



Slika 2: *P-V i razvodni dijagram X-DF motora u plinskom režimu rada [5]*

**1-2:** Klip se giba prema GMT i komprimira ispirni zrak, plin se dovodi u komoru izgaranja nakon što klip zatvori ispirne kanale i zatvori se ispušni ventil. Temperatura zapaljive smjese raste s porastom tlaka.

<sup>9</sup> Proces u kojemu se goriva smjesa zapaljuje vanjskim izvorom paljenja (iskra, pilot gorivo)

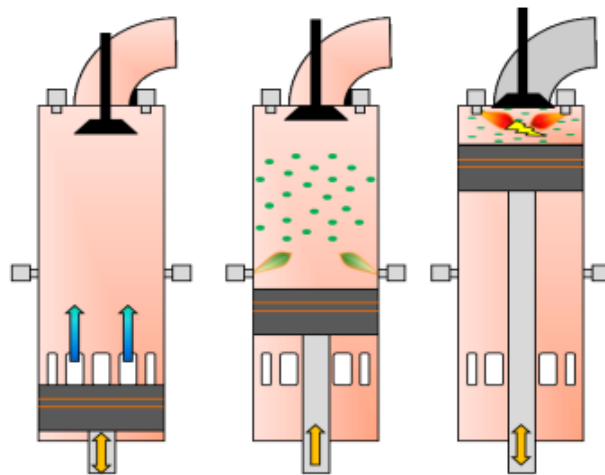
**2-3:** U točki (2) par stupnjeva prije GMT pilot gorivo se ubrizga u komoru izgaranja. Zapaljiva smjesa zraka i plina se potom zapali i počinje izgarati.

**3-4:** Izgaranje stvara nagli porast tlaka koji potom gura klip prema DMT, tlak u komori izgaranja pada.

**4-1:** Ispirni zrak mijenja produkte izgaranje sljedećim redoslijedom:

1. U točki (4) ispušni ventil se otvara
2. U točki (a) klip otkrije ispirne kanale. Ispirni zrak ulazi u cilindar i istiskuje ispušne plinove van kroz ispušni ventil
3. U točki (b) klip prekriva ispirne kanale
4. U točki (1) ispušni ventil se zatvara i počinje kompresija [5].

Tehnologija dvotaktnih sporookretnih motora s niskotlačnim sustavom plina osniva se na „Lean Burn“<sup>10</sup> principu koji za razliku od standardnih dvotaktnih sporookretnih motora ne koristi dizelski ciklus nego „Otto“ ciklus izgaranja. Gorivo (u ovom slučaju plin) se miješa sa zrakom prije izgaranja s velikim omjerom zraka naspram gorivu te se ta smjesa potom komprimira i zapali pomoću uštrcavanja pilot goriva koje ima ulogu iskre.



*Slika 3: Prikaz ciklusa izgaranja u plinskom režimu rada [3]*

Spomenuti koncept primijenjen na dvotaktne sporookretnene motore ima sljedeće prednosti:

<sup>10</sup> „Lean burn“ princip je izraz za motor koji radi s velikim omjerom zraka u gorivoj mješavini (65:1), što rezultira s visokom koncentracijom kisika u ispušnim plinovima.

- Niskotlačna dobava plina povećava cjelokupnu sigurnost i jednostavnost sustava. Plin se dobavlja u komoru izgaranja preko niskotlačnog voda, ovisno o snazi motora tlak pri kojem se dobavlja se mijenja :
  - 6-13.3 bar - motori s promjerom cilindra do 72 cm [3].
  - 6-15 bar – motori s promjerom cilindra iznad 72 cm [3].
- Mala količina pilot goriva potrebna za izgaranje, manje od 1% [3].
- Mogućnost rada na plin u velikom rasponu snage od 10% do 80 % [3].
- Manji sadržaj PM<sup>11</sup> čestica u ispušnim plinovima [3].
- Sukladan s IMO Tier III bez naknadne obrade ispušnih plinove (SCR, Scrubber) [3].

## **3.2. SIGURNOST DVOTAKTNIH SPOROOKRETNIH NISKOTLAČNIH MOTORA**

Sigurnost radnog mjesta vrlo je važna za svakog zaposlenika u industriji jer svim radnicima je lakše raditi u sigurnom i zaštićenom prostoru. Sigurno radno mjesto ne samo da štiti od ozljeda i bolesti, nego i smanjuje troškove koji su posljedica zbrinjavanja istih, smanjuje mogućnost od nastanka slučajnih kvarova odnosno povećava produktivnost samog broda. Zdravlje i sigurnost ključni su čimbenici u svim industrijama ne samo u pomorstvu u cilju promicanja dobrobiti za zaposlenika i poslodavca, stoga igraju veliku ulogu kod naručitelja pri samom izboru pogona za brod.

### **3.2.1. Spontane detonacije i njihov utjecaj na rad motora**

Spontane detonacije (“knocking”<sup>12</sup>) mogu se pojaviti unutar komore izgaranja u cilindru. Do spontanih detonacija dolazi zbog visokih tlakova kompresije, zbog kojih se dešavaju spontana izgaranja gorive smjese prije početka izgaranja. Te detonacije stvaraju tlačne valove koji se šire kroz komoru izgaranja te mogu dovesti komoru izgaranja do rezonantnog stanja prilikom kojeg se čuje glasan zvuk koji podsjeća na kucanje, od tuda dolazi izraz na engleskom jeziku (“Knocking”). Osim neugodnog zvuka spontana izgaranja mogu oštetiti komoru izgaranja.

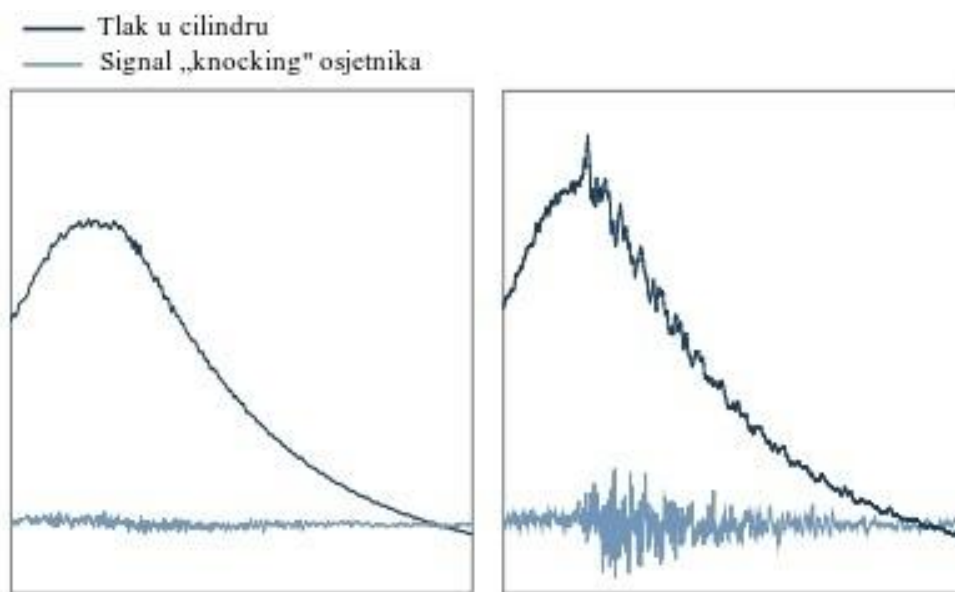
Kontrolni sustavi glavnog motora („ECS“)<sup>13</sup> nadzire izgaranje te je u stanju donositi korektivne mjere ako dođe do tih detonacija. Svaki cilindar na motoru opremljen

<sup>11</sup> Particulate Matter – krute čestice nečistoća malih promjera

<sup>12</sup> Spontane detonacije prije početka izgaranja smjese plina i zraka tokom takta kompresije

<sup>13</sup> Engine Control System

je „knocking“ osjetnikom koji je spojen na zajednički kontrolni modul. U slučaju da osjetnik registrira pre ranu detonaciju („knocking“), kontrolni sustav motora (ECS) oglasit će alarm. Osjetnici spontanih detonacija mogu razlikovati lagane i teške oblike detonacija. Ukoliko dođe do lakših detonacija na nekom od cilindara, kontrolni sustav smanjit će količinu plina za taj cilindar te na taj način promijeniti omjer zraka i goriva u smjesi ili će prilagoditi vrijeme ubrizgavanja pilot goriva. Ako detonacije prestanu kontrolni sustav vraća parametre motora na normalni rad. Ako dođe do jakog „knockinga“ na jednom ili više cilindara kontrolni sustav automatski prebacuje motor na dizelski rad [4].

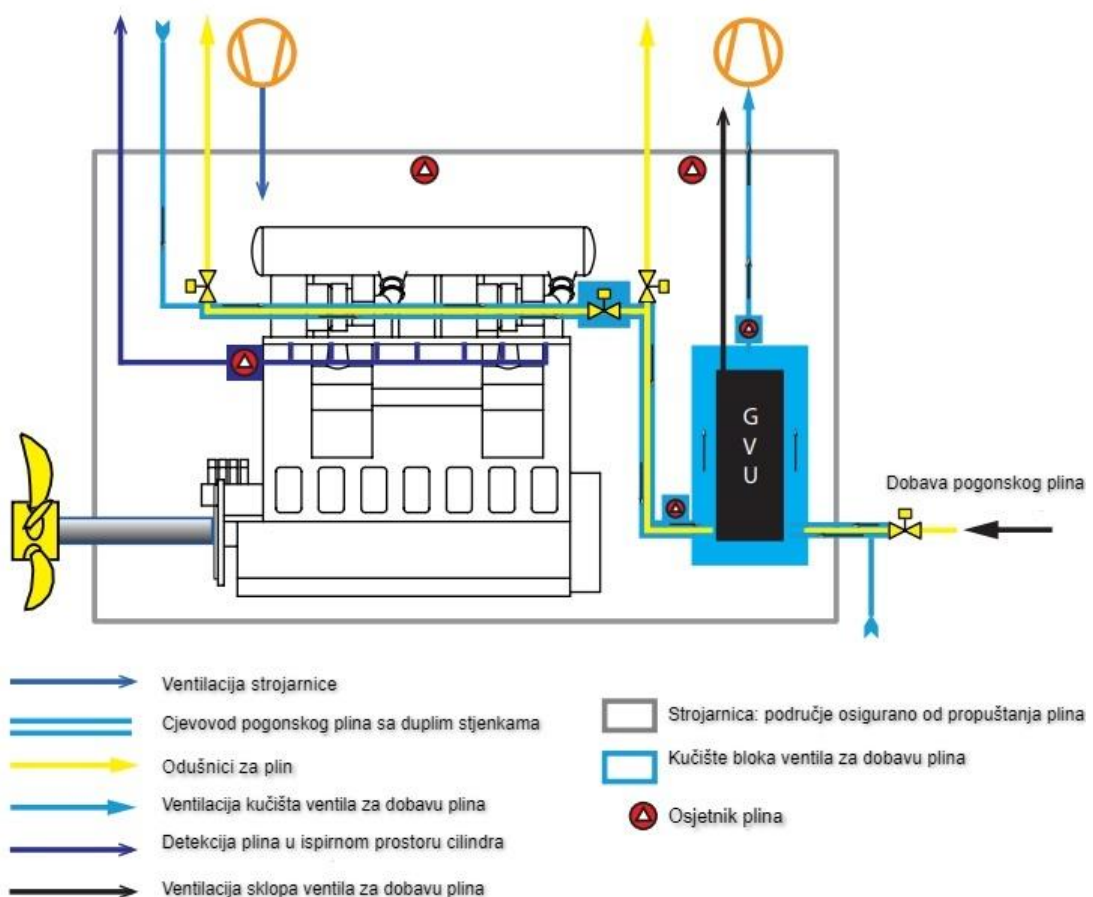


**Slika 4: Usporedba normalnog rada i rada pri pojavi spontanih detonacija [4]**

### 3.2.2. Detekcija i postupci kod propuštanja plina

Propuštanja plina u ispirni prostor mogu nastati zbog neispravnosti ventila za dovod plina (ventil se ne želi zatvoriti) ili zbog propuštanja klipnih prstenova. Oba slučaja mogu se detektirati pomoću kontrolnih sustava u motoru. Jako curenje plina rezultira visokim tlakovima izgaranja zbog uranjenog paljenja i brzog izgaranja viška prekomjerne količine plina u cilindru u kojem je došlo do propuštanja. Propuštanje će biti otkriveno pomoću sustava za nadzor temperature ispušnih plinova, a kod većih propuštanja može doći do aktiviranja osjetnika spontanih detonacija („knocking“ osjetnik).

Ventil za dovod plina („GAV”<sup>14</sup>) nadzire se konstantno pomoću osjetnika položaja ventila, ako iz bilo kojeg razloga ventil ostane otvoren duže vrijeme, sigurnosni sustav će na temelju signala od osjetnika prebaciti motor na dizelski režim rada. Senzor za detekciju plina ugrađuje se u područje ispirog zraka ispod klipa, taj senzor konstantno prati sastav ispirog zraka. Ako dođe do povećanja koncentracije plina, sigurnosni će sustav prvo oglasiti alarm, a ukoliko se koncentracija plina nastavi povećavati sustav će prebaciti motor na dizelski rad. Senzor koji prati tlakove unutar cilindra također može poslužiti kao uređaj za otkrivanje propuštanja. Ukoliko tlak u nekom od cilindara naraste preko unaprijed određenog praga, oglasit će se alarm za devijaciju tlaka u tom cilindru. Taj alarm može ukazati na moguće propuštanje u tom cilindru [4].



**Slika 5: Prikaz sigurnosnih sustava na motoru [4]**

Cjevovodi plina u strojarnici i na samome motoru su pod konstantnim nadzorom kako bi se mogla ustanoviti eventualna propuštanja. Cjevovod plina izveden je s duplim stijenkama, a prostor između stijenki konstantno se provjetrava. Dva osjetnika

<sup>14</sup> Gas Admission Valve



koncentracije plina mjere eventualna propuštanja i aktiviraju alarm koji potom prebacuje motor na dizelski rad.

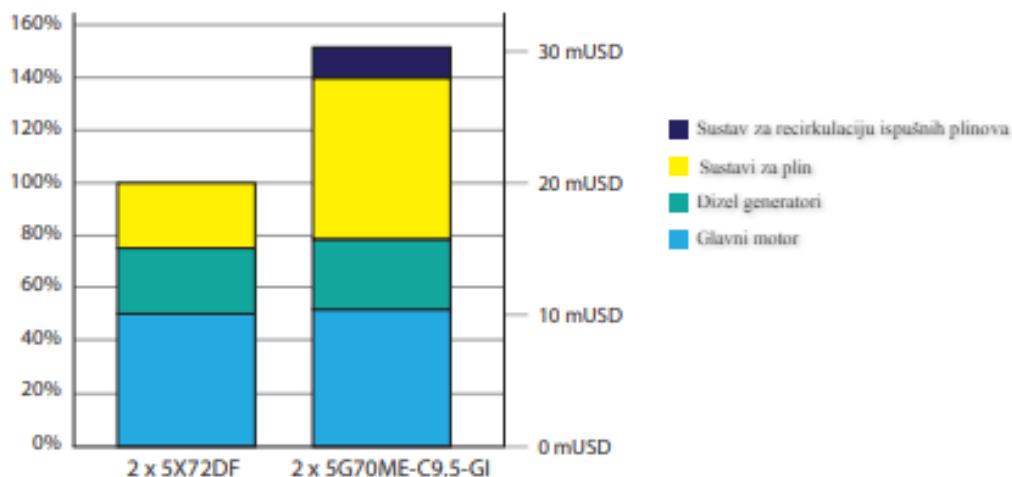
Strojarnica mora biti dizajnirana tako da bude zona niske opasnosti od požara ili propuštanja plina kako bi smanjili mogućnost nastanka nesreće. Na brodu se prostori u kojima postoji moguća opasnost od stvaranja zapaljive smjese klasificiraju sljedećim oznakama:

- Z0: Zona u kojoj su uvjeti zapaljivosti cijelo vrijeme ili jako dugo prisutni [3].
- Z1: Zona u kojoj se uvjeti zapaljivosti ostvaruju samo prilikom nekih operacija [3].
- Z2: Zona u kojoj se uvjeti zapaljivosti neće pojaviti tijekom obavljanja nekakvih radnji ili će ostati prisutni kratko vrijeme [3].

### **3.3. KAPITALNI I OPERATIVNI TROŠKOVI MOTORA S NISKOTLAČNIM UBRIZGAVANJEM PLINA**

#### **3.3.1. Kapitalni troškovi instalacije pogona**

Iako cijena samih motora nije toliko različita, cijena sustava znatno je manja. Sustav dobave plina, zbog manjih tlakova ne zahtijeva toliko robusne komponente poput visokotlačnog sustava plina i visokotlačnih kompresora. Kompresori, pumpe, isparivači, izmjenjivači topline, cjevovodi, senzori i ostale komponente znatno su jeftinije za niskotlačne motore. Treba napomenuti da su ti motori u skladu s Tier III zahtjevima bez potrebe za naknadnom obradom ispušnih plinova, što znači da s takvim motorima ne dolazi trošak instalacije “Scrubbera” ili selektivnih katalitičnih reaktora, za brodove koji plovo u ECA zonama.



Slika 6: Prikaz razlike u kapitalnim troškovima niskotlačnih i visokotlačnih pogona na plin[4]

### 3.3.2. Operativni troškovi

Operativni troškovi sastoje se od troškova potrošnog materijala (ulja za podmazivanje, pogonski medij) i troškova održavanja.

#### Potrošni materijali

Potrošnja pilot goriva je manja nego na visokotlačnim motorima što znači da se više energije dobavlja motoru kroz pogonski plin nego kod visokotlačnih motora. Da bi mogli proizvesti kvalitetnu usporedbu između niskotlačnih i visokotlačnih motora potrebno je uzeti u obzir sljedeće faktore:

- Potrošnju goriva glavnog motora [1],
- Operativni profil broda (vrsta broda, područje plovidbe, itd...) [1],
- Potrošnju sustava dobave pogonskog medija (kompresori, pumpe, itd..) [1],
- Sati rada unutar ECA zona (rad motora da zadovolji Tier III zahtjeve) [1],
- Troškovi pogonskih medija (LNG<sup>15</sup>, MGO<sup>16</sup>, HFO<sup>17</sup>)[1].

Motor s niskotlačnim sustavom ima slične dnevne operativne troškove kao i onaj s visokotlačnim sustavom iako je utrošak plina za glavni motor veći kod niskotlačnih sustava. Pri radu u Tier III zonama, niskotlačni sustav ima manje troškove jer za razliku

<sup>15</sup> Liquid Natural Gas

<sup>16</sup> Marine Gas Oil

<sup>17</sup> Heavy Fuel Oil

od visokotlačnih nije potrebna naknadna obrada ispušnih plinova da bi se zadovoljili Tier III zahtjevi [4].

## **Održavanje**

Elementi sustava za dobavu plina napravljeni su za niske tlakove (maksimalno 16 bara za razliku od 300 bara na visokotlačnim sustavima), što utječe na cijenu rezervnih dijelova i omogućava jednostavno i lakše održavanje. Obično tlačno ispitivanje sustava plina na niskotlačnom sustavu traje nekoliko minuta dok na visokotlačnom može potrajati i do par sati [4].

## **3.4. EMISIJE ŠTETNIH TVARI KOD MOTORA S NISKOTLAČNIM SUSTAVOM**

### **NO<sub>x</sub> Emisije**

U plinskom načinu rada, motori rade prema „Otto“ principu, plinsko gorivo i zrak miješaju se kako bi dobili homogenu smjesu unutar cilindra, prije paljenja pomoću pilot goriva. S velikim količinama zraka u smjesi proces kao rezultat ima ravnomjernije raspoređivanje temperature unutar komore izgaranja u odnosu na dizelski proces. U dizelskom procesu gorivo se ubrizgava pri kraju kompresije što kao posljedicu ima izgaranje pri puno većim temperaturama koje potom potiču stvaranje NO<sub>x</sub>-a. Niža temperatura izgaranja u motorima s niskotlačnim plinskim sustavom smanjuje razinu stvaranja NO<sub>x</sub>-a [4].

### **Metan i metanski skliz**

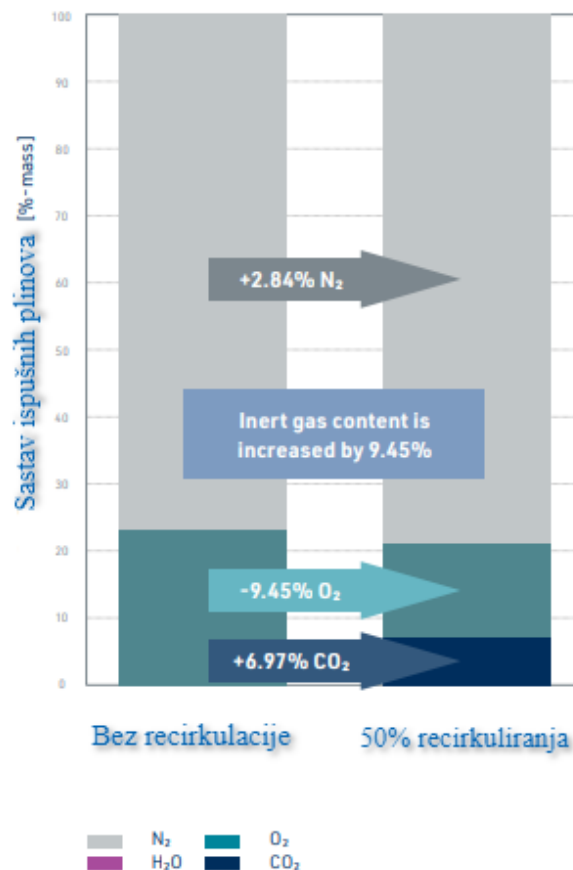
Metan je jedan od stakleničkih plinova koji doprinose globalnom zatopljenju. Naime, metan je nekoliko puta štetniji od CO<sub>2</sub>. Iz tog razloga se ispuštanje metana u atmosferu strogo zabranjuje kako bi smanjili utjecaj stakleničkih plinova na globalno zatopljenje. Do metanskog skliza dolazi iz dva glavna razloga:

- Prazni prostori unutar cilindra [4],
- Nepotpuno izgaranje u hladnijim dijelovima komore izgaranja [4].

Metanski skliz znatno je veći kod niskotlačnih sustava nego kod visokotlačnih. Veličina motora je također važna, metanski skliz se povećava s povećanjem promjera cilindra jer kod većih cilindara ima više zazora u koje bi se metan mogao zavući. Neki od parametara koji smanjuju metanski skliz:

- Veličina motora: veći promjer cilindra veći metanski skliz .
- Smanjenje vremena u kojemu su ventil za dovod plina i ispušni ventil u otvorenom položaju istovremeno, smanjenje preklapanja otvorenosti smanjuje metanski skliz [9].

Jedan od načina za rješavanje metanskog skliza je recirkulacija ispušnih plinova. Kada recirkuliramo ispušne plinove i miješamo ih s ispirnim zrakom, ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ) nam zamjenjuje kisik ( $\text{O}_2$ ) u svježem ispirnom zraku smanjujući tako reaktivnost smjese tijekom izgaranja, što stabilizira izgaranje. Kako  $\text{CO}_2$  ima veći toplinski kapacitet, smanjuje se maksimalna temperatura u cilindru. Smanjivanje „knocking“-a je još jedna posljedica recirkulacije koja dolazi sa smanjenjem reaktivnosti gorive smjese. Metanski skliz obrnuto je proporcionalan količini recirkulacije ispušnih plinova. Recirkulacijom neizgoreni metan ide ponovno na izgaranje te se tako smanjuje udio metana koji odlazi u atmosferu s ispušnim plinovima do čak 50%[7].



**Slika 7: Razlika u sastavu ispušnih plinova bez recirkulacije i s 50% ispušnih plinova u recirkulaciji [7]**

## **4. SUSTAVI POGONSKIH MEDIJA NA NOVIM SPOROOKRETNIM MOTORIMA S NISKOTLAČNIM PLINSKIM SUSTAVOM**

Za pogon ovih motora (osim sustava komprimiranog zraka, ulja za podmazivanje i rashladne vode) potrebna su tri sustava; sustav za plinovito gorivo, sustav za tekuće gorivo i sustav za pilot gorivo. Kako ovi motori rade na „Otto“ principu, zapaljivoj smjesi goriva i zraka je potreban vanjski izvor paljenja. Pilot gorivo ima upravo tu ulogu, paljenje smjese. U ovom poglavlju slijedi opis navedenih sustava, njihovi glavni dijelovi i njihov princip rada.

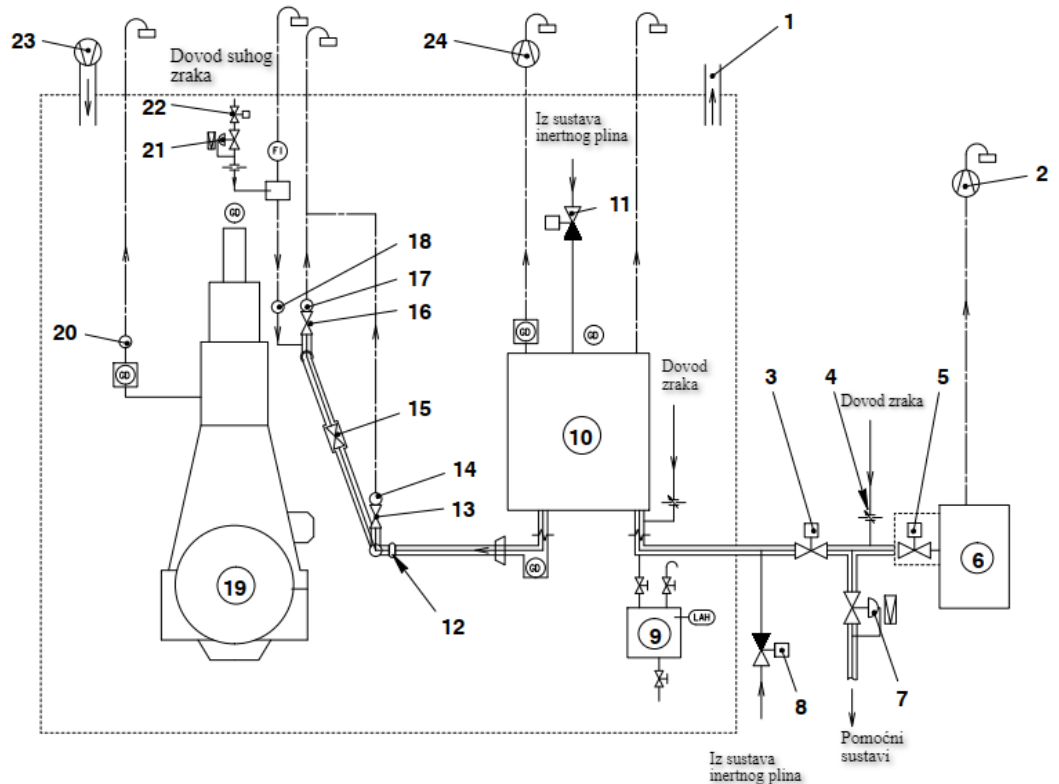
### **4.1. SUSTAV PLINOVITOG GORIVA**

Glavna uloga plinskog sustava je dobava plina ventilima za puštanje plina u cilindar. Sustav plinovitog goriva konstantno se nadzire detektorima plina koji u slučaju propuštanja plina aktiviraju alarm. Ako se oglasi protupožarni alarm dok je motor pogonjen plinom, kontrolni sustav motora automatski prebacuje rad motora na dizelski režim. Sustav plinovitog goriva napravljen je od tri podsustava:

- Unutarnji sustav plina,
- Sklop ventila za plin („GVU“<sup>18</sup>),
- Vanjski sustav plina.

---

<sup>18</sup> Gas Valve Unit – Sklop ventila za dobavu pogonskog plina glavnome motoru



**Slika 8: Sustav pogonskog plina [3]**

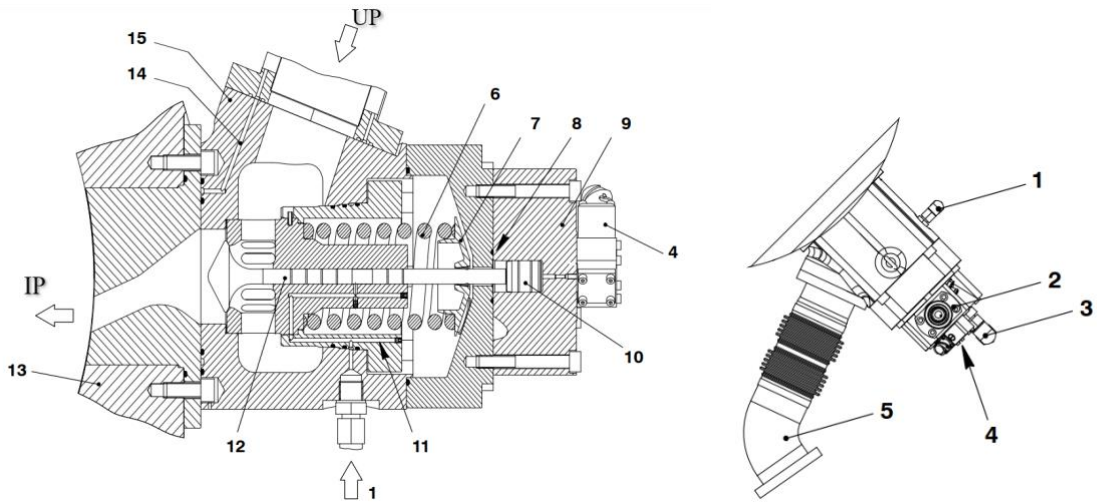
- |    |                                |    |  |
|----|--------------------------------|----|--|
| 1  | Ventilacija strojarnice        | 13 | Ventil za odzračivanje                       |
| 2  | Isisni ventilator              | 14 | Odušnik sustava plina                        |
| 3  | Zaporni ventil                 | 15 | Zaporni ventil                               |
| 4  | Regulator zraka (podesivi)     | 16 | Ventil za odzračivanje                       |
| 5  | Glavni ventil plina (zaporni)  | 17 | Odušnik sustava plina                        |
| 6  | Tank/obrada plina              | 18 | Ulaz suhog zraka u plinski cjevovod          |
| 7  | Ventil za regulaciju tlaka     | 19 | Glavni motor                                 |
| 8  | Ventil za propuhivanje sustava | 20 | Izlaz detektora plina ispod klipa            |
| 9  | Drenažni ventil kondenzata     | 21 | Ventil za regulaciju tlaka                   |
| 10 | GVU                            | 22 | Zaporni ventil                               |
| 11 | Ventil za propuhivanje GVU-a   | 23 | Ulaz zraka u strojarnicu                     |
| 12 | Ulaz plina u motor             | 24 | Izlaz detektora plina za prostor ispod klipa |

#### 4.1.1. Unutarnji sustav plina

##### Ulazni ventil

Svaki cilindar opremljen je s dva ulazna ventila (GAV) koji kontroliraju ispuštanje plina u komoru izgaranja. Kontrolni sustav glavnog motora nadgleda i regulira rad ulaznog ventila. Ulazni ventil se upravlja hidraulički, pomoću servo-ulja. Ventil je opremljen senzorom koji prati njegov položaj i prenosi tu informaciju u digitalnom obliku kontrolnom sustavu glavnog motora koji potom taj signal iskoristi kako bi podesio

vrijeme za propustiti plin u komoru izgaranja koje je povezano s opterećenjem motora. Opruga vraća ventil u zatvoreni položaj kada se solenoid ventil prestane napajati.



**Slika 9: Ulazni ventil plina [3]**

1	Ulaz servo ulja	10	Klip
2	Hidraulična cijev servo ulja	11	Provrti za podmazivanje
3	Povrat ulja	12	Tijelo ventila
4	Solenoid ventil	13	Košuljica
5	Ulaz plina u cilindar	14	Provrt
6	Kompresijska opruga	15	Kučište ventila
7	Sjedište opruge		
8	O-ring brtva	UP	Ulaz plina (u ventil)
9	Glava ventila	IP	Izlaz plina (iz ventila)

Kontrolni sustav motora upravlja solenoid ventilom (4), servo ulje djeluje na klip (10, 12). Pomakom klipa (10,12) pladanj klipa miče se sa svoga sjedišta i propušta plin u komoru izgaranja. Kada se solenoid ventil (4) prestane napajati te servo ulje prestane tlačiti klip (10) opruga vrati ventil u početni položaj.

### **Cijevi za dobavu plina**

Cijevi za dobavu plina izvedene su s duplom stijenkom i opremljene su s jednim zapornim ventilom za svaku dobavnu cijev odvojeno. Cijevi za dobavu kroz koje teče plin ugrađene su uzduž motora, cijevi koje spajaju ulazni ventil i dobavne cijevi su napravljene u fleksibilnoj izvedbi. Kad motor nije u pogonu ili u plinskom režimu rada plin se ispušta iz cjevovoda.

## **Zaporni i odzračni ventili**

Zaporni ventili s obje strane motora ugrađeni su na glavni dobavni cjevovod plina. Tijekom rada ti ventili propuštaju pin prema ulaznim ventilima odnosno prema cilindrima. U slučaju propuštanja plina zaporni ventili se zatvaraju i izoliraju cjevovod na motoru od ostatka dobavnog cjevovoda te na taj način spriječavaju dobavu plina motoru. U tom slučaju motor prelazi s plinskog na dizelski režim rada.

Uloga odzračnih ventila u sustavu je brzo rasterećivanje sustava od plinovitog goriva pod tlakom. To osigurava da kod prestanka sustava s radom ne zaostane goriva u cjevovodima. Za odzračivanje ulaznog ventila izlaz iz ventila ostaje zatvoren dok je odzračni ventil otvoren.

### **4.1.2 Glavni plinski ventilni sklop i vanjski sustav za dobavu plina**

#### **Cijevi za dobavu plina**

Cijevi koje prenose plin od mjesta skladištenja do strojarnice u zatvorenom su prostoru koji je konstantno ventiliran i opremljen je detektorima plina.

#### **Zaporni ventil**

Tijekom normalnog rada, zaporni ventil plinskog ventilnog sklopa služi za prekid dovoda goriva u strojarnicu, te se može upravljati daljinski iz strojarnice, kontrolne sobe strojarnice ili s mosta. U nekim slučajevima se taj ventil i automatski zatvara<sup>19</sup>.

#### **Glavni plinski ventilni sklop**

Za motore na više goriva neophodno je da imaju sigurnu i preciznu kontrolu nad tlakom plina i promjenom opterećenja. Zato je važno da motor bude opremljen s pouzdanim i adekvatnim sustavom za dobavu plina. Glavne uloge plinskog ventilnog sklopa su:

- Kontrola tlaka plina;
  - Tlak plina mora biti usklađen s opterećenjem motora,
  - Signal za točnu vrijednost tlaka dolazi od kontrolnog sustava glavnog motora.

---

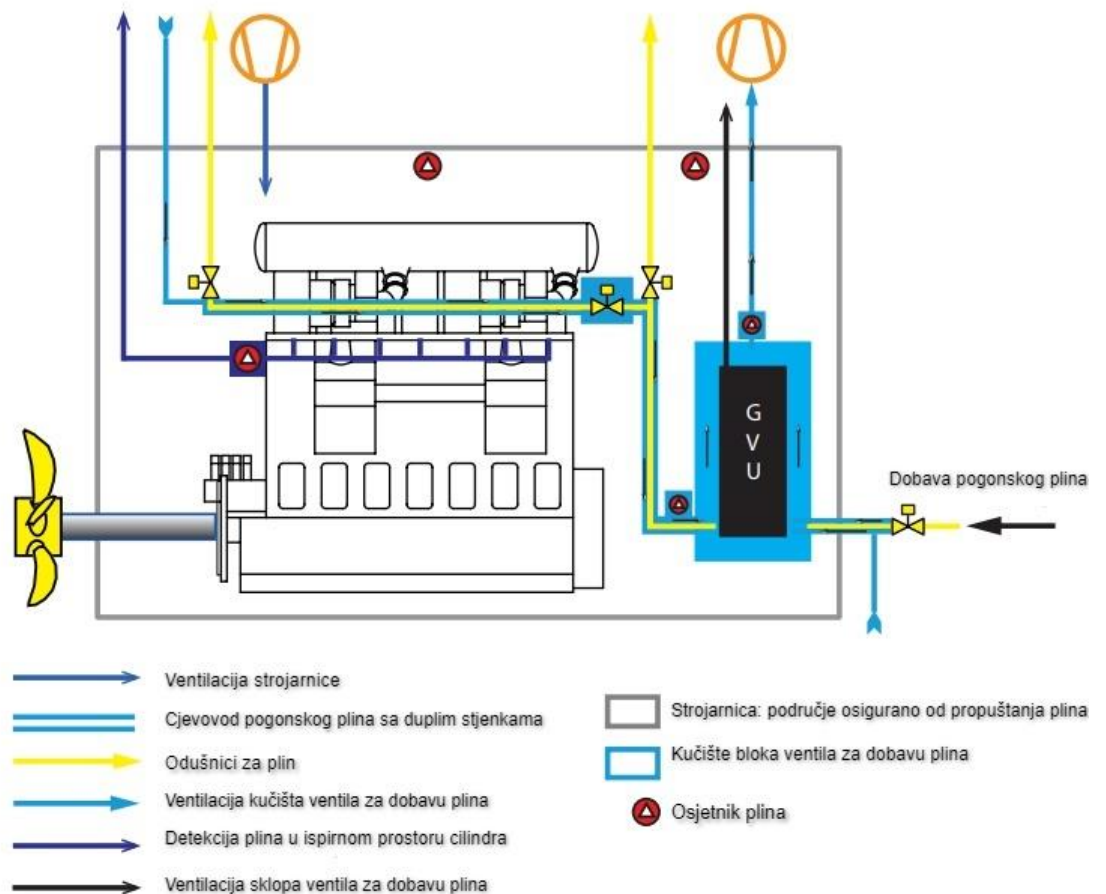
<sup>19</sup> U slučaju propuštanja plina i u slučaju automatskog prebacivanja na dizelski rad.



- Kontrola propuštanja;
  - Sekvenca se izvodi prije nego se motor prebaci na plinski režim rada,
  - Postupak utvrđuje da su pojedini ventili unutar sklopa ispravni i da nema propuštanja.
- Inertiranje;
  - Sklop je opremljen sustavom koji automatski rasterećuje sustav i inertira ga dušikom.
- Nadzor temperature plina.

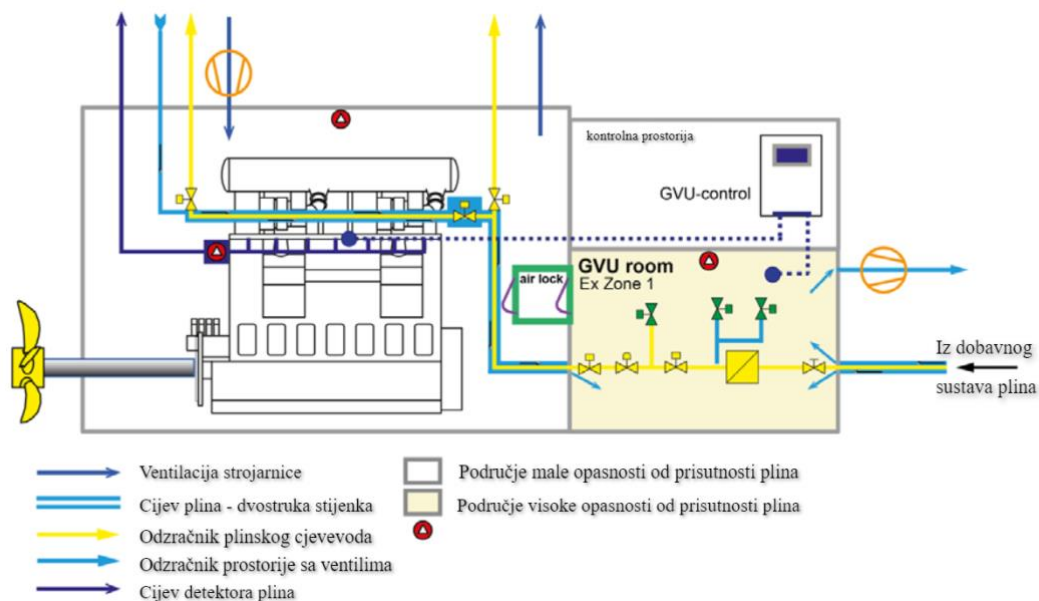
Sklop ventila dolazi u dvije izvedbe:

- Zatvoreni dizajn jedinice dolazi s dvo-membranskim cijevima ugrađenim u plinsko nepropusnoj komori koja je u konstantnom podtlaku. Jedinica takve izvedbe može se ugraditi u strojarnici (ne postoji opasnost od propuštanja plina). Isisni ventilator spaja se na odzračnik komore u kojima su smješteni ventili i održava komoru u konstantnom podtlaku nadzirajući cijelo vrijeme iznos podtlaka. U slučaju kvara isisnog ventilatora sustav automatski prebacuje motor na dizelski režim rada, tlak u cjevovodu od jedinice ventila do glavnog motora se oslobađa kroz odzračnike. Ako dođe do pretlaka u sustavu, inertni plin zamjeni sav pogonski plin u cjevovodu. Detektori plina konstantno mjere sadržaj plina između stijenki plinskih cijevi, ukoliko dođe do otkrivanja plina u sustavu sigurnosni sustav automatski prebacuje motor na dizelski režim rada. Veličina sustava ovisi o promjeru cilindra [5].



**Slika 10: Sustav sa zatvorenom izvedbom [3]**

- Otvoreni dizajn sklopa ventila nije zatvoren u plinsko nepropusnoj komori i ne posjeduje cijevi s duplim stijenkama. Takva izvedba se ugrađuje isključivo izvan strojarnice u posebnoj prostoriji koja ima dovoljan protok zraka te mora biti građena po visokim standardima sigurnosti. Sustav ventilacije za prostoriju s ventilima mora biti odvojen od ostalih ventilacijskih sustava te mora osigurati da se zrak u prostoriji i cijevima promjeni 30 puta svaki sat.



**Slika 11: Shematski prikaz sustava s odvojenom ventilskom prostorijom [3]**

## 4.2. SUSTAV TEKUĆEG GORIVA

Sustav tekućeg goriva ima ulogu dobiti određenu količinu goriva rasprskivačima. A prije dobave rasprskivačima gorivo je potrebno pravilno pripremiti za ubrizgavanje. Priprema goriva sastoji se od zagrijavanja i čišćenja goriva od mogućih nečistoća (voda, krute čestice). Gorivo je potrebno zagrijavati kako bi mu se smanjio viskozitet potreban za pravilno ubrizgavanje. Gorivo konstantno cirkulira kroz sustav kako bi sustav održao radnu temperaturu. Glavni elementi sustava goriva su:

### Cjevovod goriva

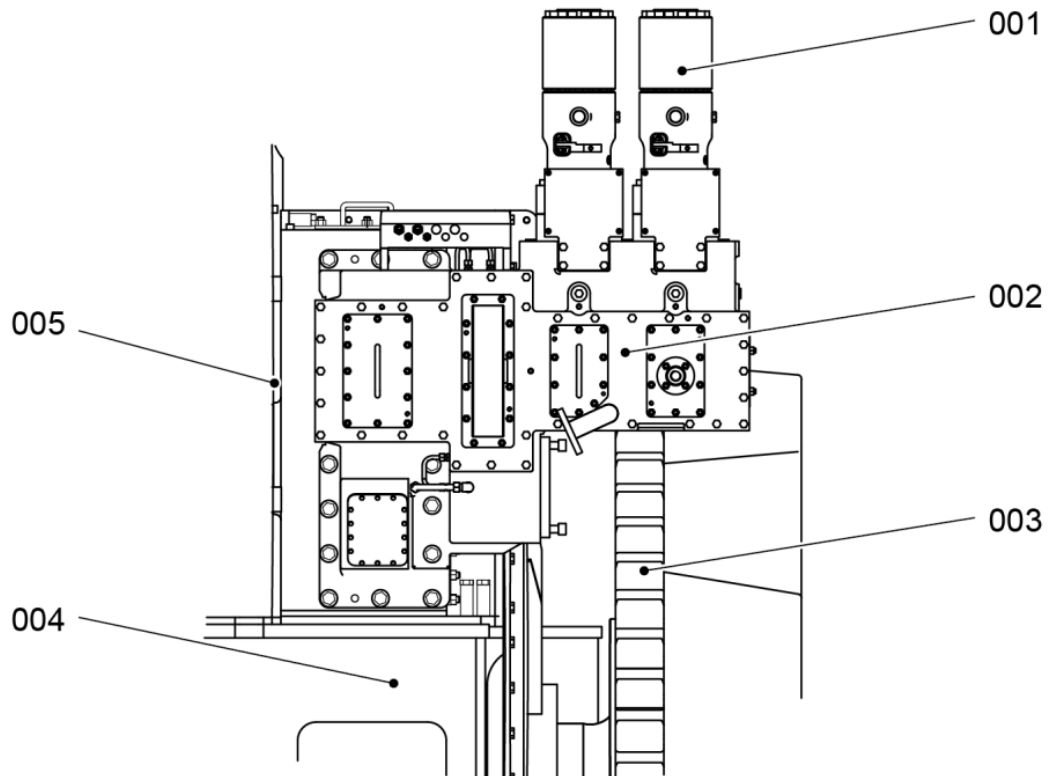
Cjevovod goriva povezuje različite elemente sustava u jednu cjelinu. Cijevi su opremljene s vlastitim grijačima (cijev pare omotana oko cijevi goriva) kako bi gorivo tijekom zaustavljanja pogona ostalo zagrijano. Visokotlačne cijevi goriva koje se ne nalaze unutar razvodnika „fuel rail“ izvedene su s duplim stijenkama i punktovima za kontrolu propuštanja.

### Ventil za regulaciju tlaka

Podesivi ventil konstantnog tlaka (17 – slika 14) u povratnom vodu održava tlak na usisu cirkulacijskih pumpi.

### Dobavna jedinica (visokotlačne pumpe)

Dobavna jedinica sastoji se od VT pumpi i pumpi servo ulja.



**Slika 12: Dobavna jedinica tekućeg goriva [5]**

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 | Pumpa goriva                  |
| 2 | Dobavna jedinica s poklopcima |
| 3 | Zamašnjak                     |
| 4 | Temeljna ploča                |
| 5 | Potporni stup                 |

### **Visokotlačna pumpa goriva**

Visokotlačna pumpa goriva tlači gorivo do 1000 bara.

### **Razdjelnik goriva („Fuel rail“)**

Dobavlja gorivo ventilima za regulaciju protoka ili jedinicama za kontrolu ubrizgavanja.

### **Nepovratni ventili**

Nepovratni ventili sprječavaju povrat goriva iz razdjelnika nazad u visokotlačne pumpe ako one ne rade ili su u kvaru.

## **Ventil konstantnog tlaka**

Ventil konstantnog tlaka (27) ima funkcije regulacije tlaka i protoka prema razdjelniku goriva.

## **Rasteretni ventil**

Rasteretni ventil je sigurnosni uređaj koji se u slučaju porasta tlaka otvori i rastereti sustav od pre velikog tlaka.

## **Ventil za regulaciju protoka**

Dobavlja predodređenu količinu goriva rasprskaćima. O količini goriva odlučuje kontrolni sustav motora na osnovu raznih parametara.

## **Rasprskaći**

Dobavljaju raspršeno gorivo u komoru izgaranja.

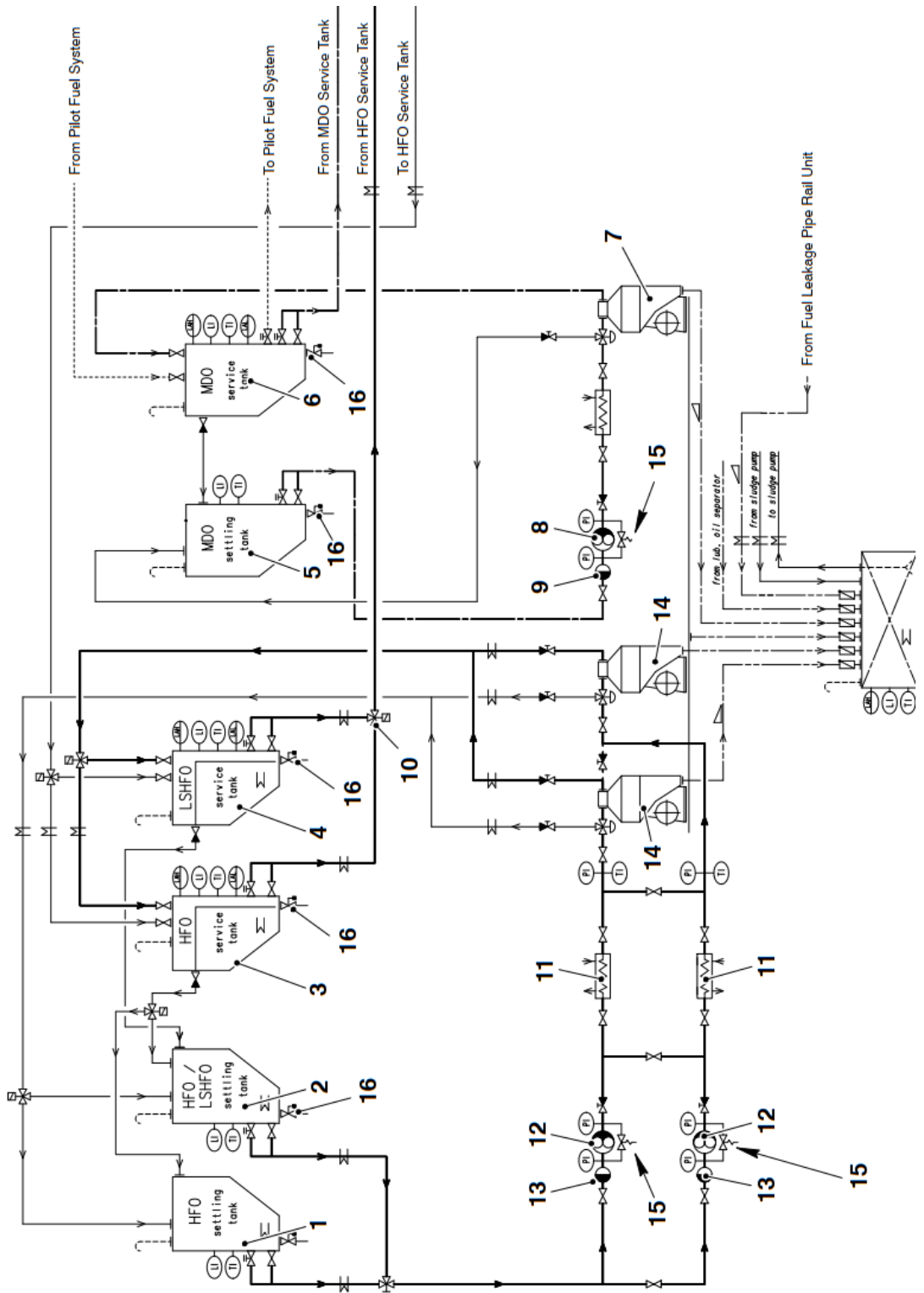
Sustav tekućeg goriva radi lakšeg razumijevanja možemo podijeliti u dva podsustava:

## **Sustav pripreme i dobave goriva**

Tekuća goriva koja se koriste na brodu, moraju se pravilno obraditi prije ulaska u motor kako bi odstranili krute čestice i nečistoće koje sadrže. Ukoliko bi se koristilo loše očišćeno gorivo moglo bi doći do ozbiljnih kvarova na motoru (ubrzano trošenje komponenti, skupljanje sedimenata unutar komore izgaranja).

Prvi stupanj obrade goriva izvodi se u taložnim tankovima (1,2,5 – slika 13), u kojima se voda i nečistoće u gorivu talože na dno tanka (tank je potrebno povremeno drenirati). Daljnja obrada izvodi se pomoću separatora (14 – slika 13), koji koristi centrifugalnu silu kako bi odvojio vodu i krute čestice iz goriva. Prije ulaska u separator gorivo se mora zagrijati u zagrijaču (11 – slika 13). Gorivo se grije na najvišu temperaturu pri kojoj voda u njemu još ne isparava jer bi onda izgubili vodenu brtvu u separatoru. Temperatura separacije mora biti što bliža 98° C s tolerancijom  $\pm 2^\circ$  C. Što je manji protok goriva kroz separator, separacija će biti kvalitetnija. Dobavna pumpa separatora (8 – slika 13) u dnevni tank dobavlja istu ili nešto manju količinu goriva od one koju troši glavni motor, upravo iz razloga kako bi održali što manji protok kroz separator i time povećali čistoću goriva. Zadnji grijač (23 – slika 14) kroz koji gorivo mora proći prije ulaska u

visokotlačnu pumpu ima ulogu dizanja temperature goriva do temperature ubrizgavanja. Kontrolni sustav motora koji je usko povezan sa sustavom goriva regulira na osnovu zahtjevane snage motora koliko će rasprskача biti u funkciji. Pri niskim opterećenjima prekida rad jednog (motori s dva rasprskача po cilindru) ili dva (motori s tri rasprskача po cilindru) rasprskача. To osigurava kvalitetnije izgaranje s manje stvaranja dima i smanjuje potrošnju.



Slika 13: Sustav za pripremu i dobavu goriva [3]

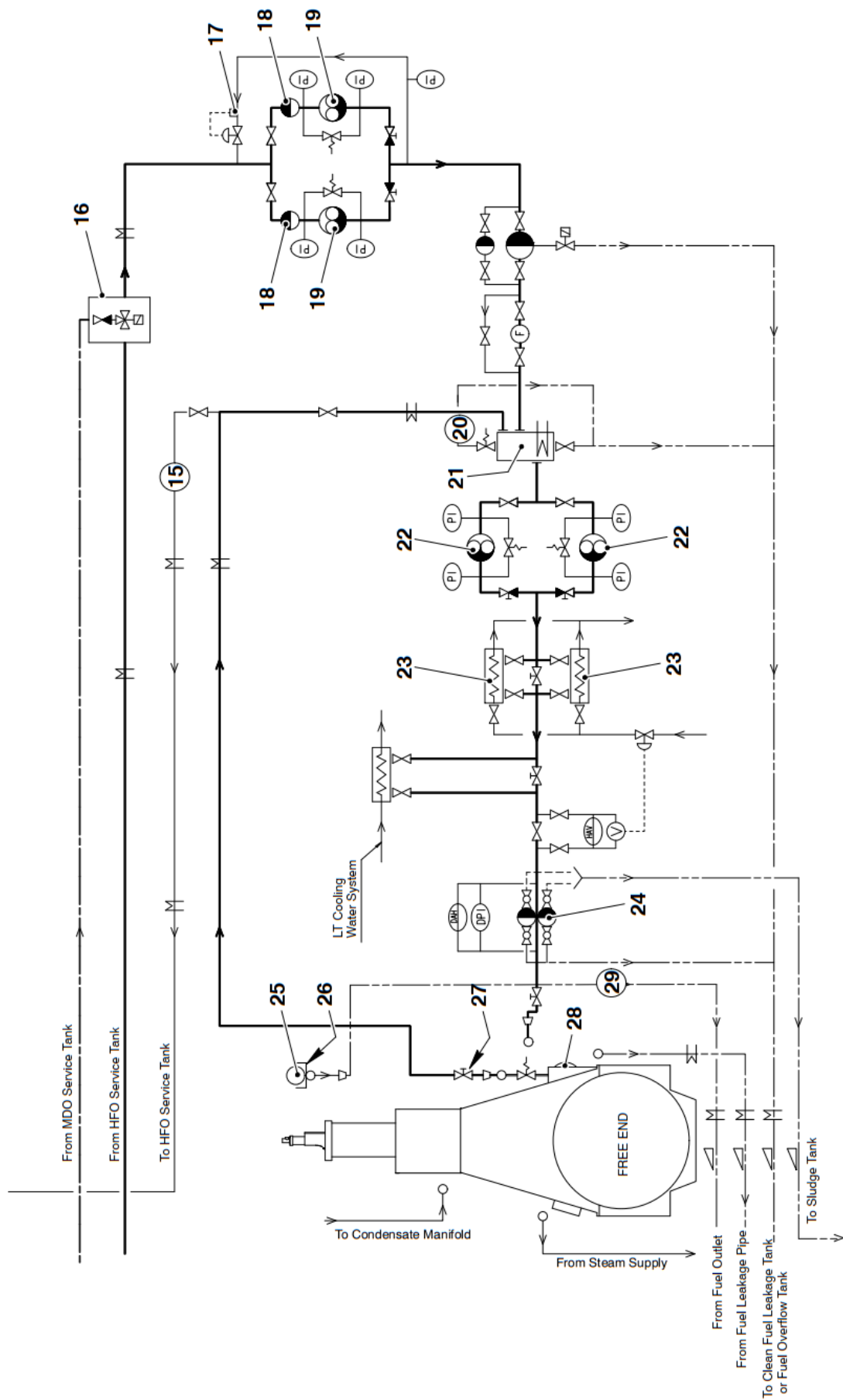
## **Sustav za dobavu goriva cilindrima**

Dobavna pumpa (19 – slika 14) teško gorivo iz servisnog tanka dobavlja u tank za miješanje goriva (21 – slika 14). „Booster“<sup>20</sup> pumpa (22 – slika 14) gorivo iz tanka za miješanje goriva tlači prema grijačima (23 – slika 14) i filterima (24 – slika 14), „booster“ pumpe visokotlačnim pumpama (28) te dobavlja više goriva nego što je motoru potrebno za izgaranje. Višak goriva se vraća nazad u tank za miješanje goriva. Ventil konstantnog tlaka (27) održava radni tlak i protok u razvodniku goriva („common rail“) konstantnim, a ventil za regulaciju tlaka (17) određuje tlak goriva na usisu dobavne pumpe.

---

<sup>20</sup> Cirkulacijska pumpa sustava tekućeg goriva



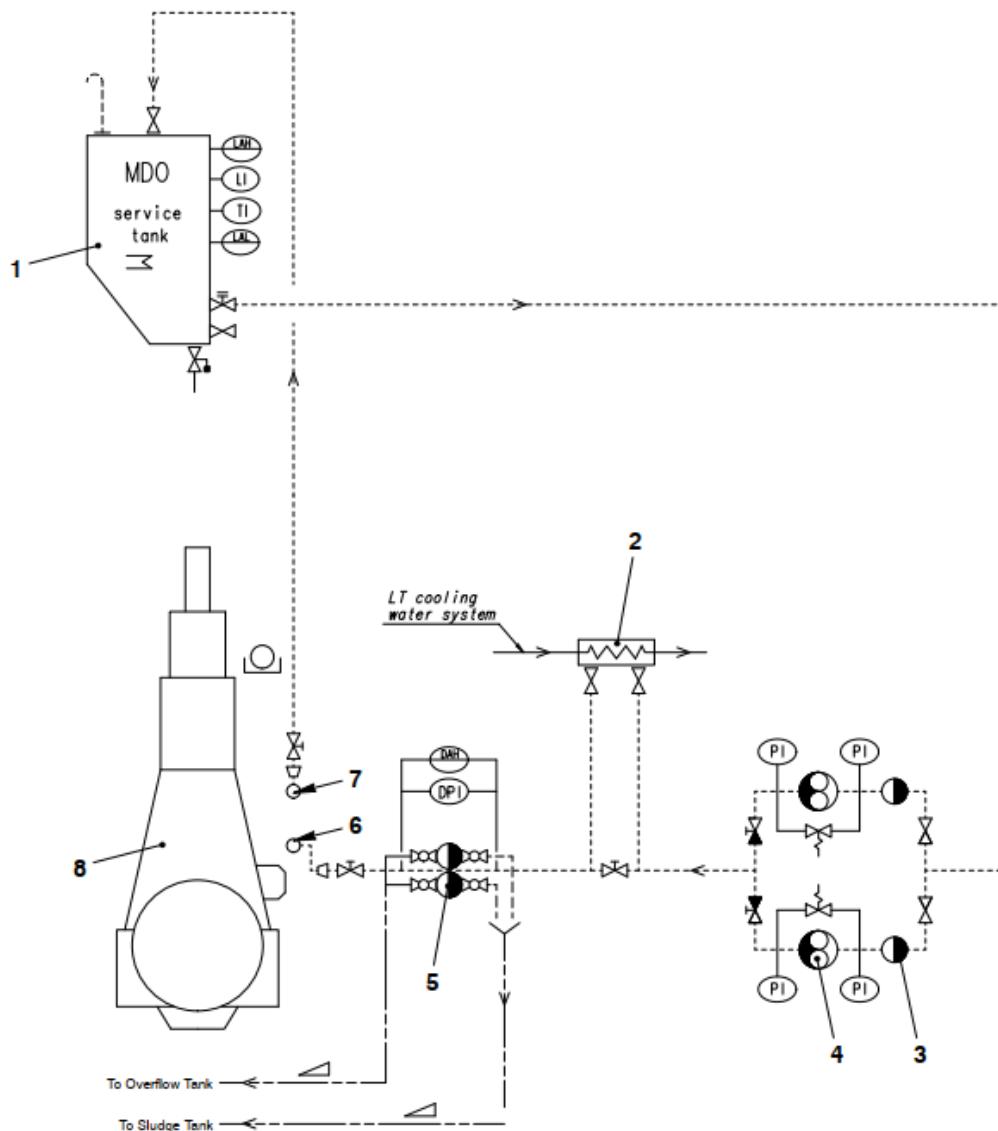


Slika 14: Shematski dijagram sustava tekućeg goriva [3]

### 4.3. SUSTAV PILOT GORIVA

Za pilot gorivo uglavnom se koriste dizelska goriva, koja se u cilindar ubrizgavaju kako bi zapalili smjesu zraka i plinovitog goriva dok motor radi na plin. U dizelskom načinu rada motora kroz rasprskalice pilot goriva se ubrizgava malena količina goriva kako ne bi došlo do stvaranja naslaga na rasprskacu pilot goriva. Vrijeme ubrizgavanja i količina goriva određuju se elektronski. Sustav pilot goriva sastoji se od:

- Jedinice za dobavu pilot goriva rasprskacima,
- Rasprskaca pilot goriva,
- Dnevnih tankova dizelskog goriva,
- Zajedničke visokotlačne sabirnice („Common rail“),
- Visokotlačne cijevi pilot goriva.



Slika 15: Sustav pilot goriva [3]

1	Servisni tank dizelskog goriva	5	Filtar goriva
2	Rashladnik dizelskog goriva	6	Ulaz pilot goriva
3	„Duplex“ <sup>21</sup> filtar	7	Izlaz pilot goriva
4	Pumpa pilot goriva	8	Glavni motor

Pumpa pilot goriva (4) nalazi se na samom motoru. Jedinica za dobavu rasprskaačima sastoji se od pumpe pilot goriva, usisnih filtara (3) i ventila za regulaciju/rasterećenje tlaka. Pumpa pilot goriva je elektronski upravljiva radijalna klipna pumpa s ugrađenim prekotlačnim „by-pass“ ventilima. Pilot gorivo se dobavlja rasprskaačima pri radnom tlaku, a iz sigurnosnih razloga, visokotlačne cijevi pilot goriva su izvedene s duplim stijenkama. Ukoliko dođe do propuštanja, gorivo se skuplja u malenom tanku za prihvata propuštanja. Tank je opremljen s mjeračima razine koji signaliziraju alarm visoke razine. Pred komora rasprskaača hladi se visokotemperaturnom vodom dok se rasprskaač hladi uljem.

#### **4.2.1. Jedinica za dobavu pilot goriva rasprskaačima**

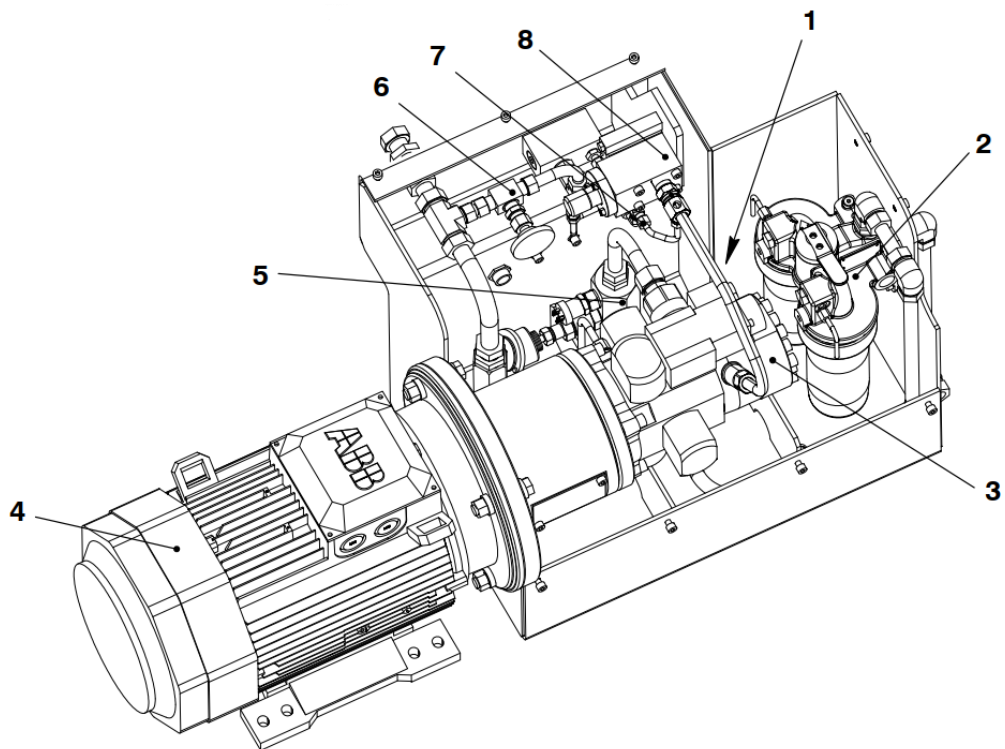
Jedinica za dobavu goriva sastoji se od sljedećih elemenata:

- Pumpa pilot goriva, električno upravljiva s ugrađenim prekotlačnim ventilom,
- „Duplex“ filteri
- Igličasti ventil,
- Visokotlačne cijevi,
- Glavni kolektor propuštanja u sustavu,
- Cijevi za propuštanja.

Pumpa pilot goriva podiže tlak goriva na radni tlak. Pumpa se upravlja elektronički, cijevi od pumpe do rasprskaača izvedene su s duplim stijenkama. Gorivo pod visokim tlakom putuje od dobavne pumpe preko dobavnih i spojnih blokova do rasprskaača, cijevi su u mogućnosti apsorbirati nagle promijene u tlaku. Gorivo koje se skupi između stijenki cijevi odvodi se u kolektor koji je opremljen s osjetnikom razine. Rasprskaači imaju ugrađeni solenoid ventil, a njima upravlja kontrolni sustav koji određuje vrijeme ubrizgavanja i vrijeme trajanja ubrizgavanja. Jedinica se hladi pomoću servisnog ulja i visoko temperaturnog sustava rashladne vode [3].

---

<sup>21</sup> Filter u duploj izvedbi; u slučaju zaprljanja jednog protok se prebacuje na drugi filter

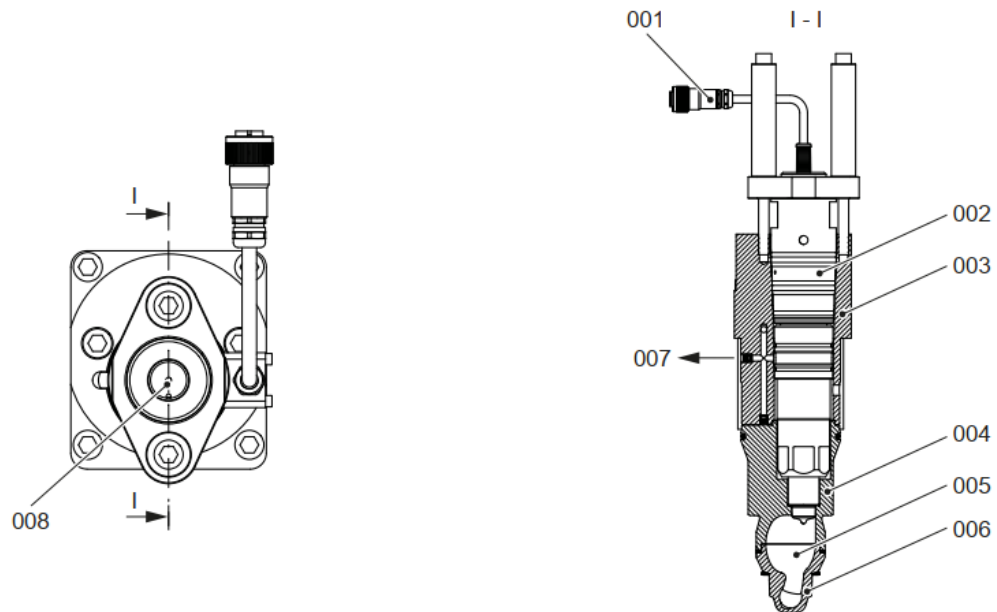


**Slika 16: Jedinica za dobavu pilot goriva [3]**

1	VT cijev pilot goriva	5	Jedinica za mjerenje
2	„Duplex“ filter	6	Igličasti ventil
3	Pumpa pilot goriva	7	Cijev za propuštanja
4	Elektromotor	8	Rasteretni ventil

#### 4.2.2. Rasprskач pilot goriva

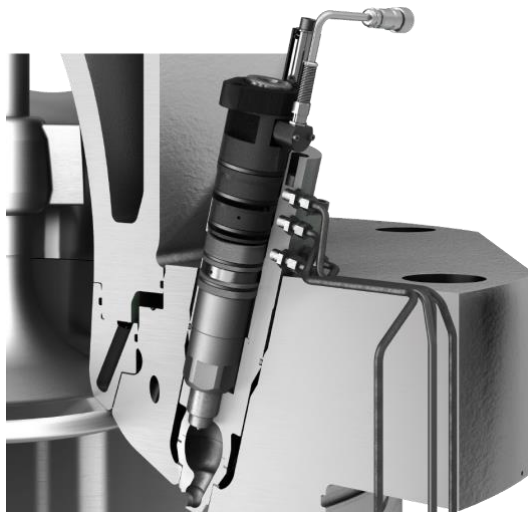
Dva ventila za ubrizgavanje pilot goriva postavljena su na svaku glavu cilindra i oni dobavljaju pilot gorivo u komoru izgaranja kad je motor u plinskom režimu rada. Solenoid ventili ugrađeni u sklop rasprskaća reguliraju vrijeme ubrizgavanja i količinu goriva u odnosu sa zahtijevanom snagom motora. Rasprskaći pilot goriva izvedeni su s pred komorom. Pred komora je pogodna jer stabilizira izgaranje i povećava preciznost detonacije, a hlađena je visoko temperaturnom rashladnom vodom. Rasprskać se hladi uljem, a kako ne bi došlo do kontaminacije ulja s gorivom, ulje i višak goriva iz rasprskaća odvođe se u kaljužni tank. Malena količina goriva se vraća u sustav preko povratnog ventila kako bi imali stalnu cirkulaciju medija kroz sustav [3].



**Slika 17: Rasprskič pilot goriva [5]**

1	Električni kabel	5	Pred komora
2	Tijelo ventila	6	Donji dio kućišta
3	Prirubnica	7	Povrat pilot goriva
4	Gornji dio kućišta	8	Ulaz pilot goriva

Pilot gorivo preko visokotlačnih cijevi ide od pumpe do rasprskiča, a kontrolni sustav glavnog motora aktivira solenoid ventil koji zatim propusti gorivo u cilindar. Gorivo se kod ubrizgavanja ne ubrizga direktno u cilindar već u pred komoru koja je dio sklopa rasprskiča. Gorivo u komoru izgaranja cilindra dođe u atomiziranom stanju i zapali smjesu zraka i goriva [5].



**Slika 18: Rasprskič pilot goriva [3]**

## 5. ZAKLJUČAK

Kao zaključak ovog završnog rada smatram da je važno napomenuti da plin, iako relativno čist izvor energije za razliku od dizelskih i teških goriva, ne spada u obnovljiv izvor energije te kao takav nije održiv u svijetu koji sve više postrožuje zahtjeve za motore koji se pogone s nekim od navedenih medija. Samo uporaba ne fosilnih goriva (biogoriva, sintetička goriva), ili obnovljivih izvora energije (solarna energija, vjetar, itd...) će dodatno smanjiti emisije stakleničkih plinova pogonskih sustava na brodu, a implementacija ne fosilnih ili obnovljivih izvora energije na nove vrste pogona zavisi od brzine razvoja tehnologija koje nam dopuštaju da na siguran način iskorištavamo ta goriva i od institucija koje propisuju standarde sigurnosti za te i ostale sustave.

Iskorištavanje prirodnog plina za pogon i implementacija „Dual-Fuel“ motora u brodarskoj je industriji pokrenulo revoluciju u kojoj se s „prljavih“ prelazi na sve čišća goriva, te s razvojem novih tehnologija takva vrsta pogona postaje sve atraktivniji izbor za brodovlasnike.

Mislim da nas u budućnosti čeka daljnji razvoj motora i sustava koji koriste plin kao pogonski medij, do trenutka kada nam tehnologija bude dopustila korištenje jednog od obnovljivih izvora energije u istoj mjeri i s istom pouzdanošću kao što to čine fosilna goriva.

## LITERATURA

- [1] WinGD, Low pressure X-DF Engines, 2020
- [2] Bureau Veritas, International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code), 2020
- [3] WinGD, X72DF Operation Manual, 2017
- [4] WinGD, Low-pressure X-DF Engines FAQ, 2020
- [5] Hyundai – WinGD 5X72DF Operating Instructions Manual, 2019
- [6] <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#other>
- [7] WinGD iCER Brochure, 2021
- [8] <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx>
- [9] [https://safety4sea.com/cm-lng-as-marine-fuel-and-methane-slip/?\\_\\_cf\\_chl\\_jschl\\_tk\\_\\_=pmd\\_N.hlbIVybKJ7v2S9hu9sllIGx07hdk9ijboC.h2.nPzQ-1633836127-0-gqNtZGzNAiWjcnBszQIR](https://safety4sea.com/cm-lng-as-marine-fuel-and-methane-slip/?__cf_chl_jschl_tk__=pmd_N.hlbIVybKJ7v2S9hu9sllIGx07hdk9ijboC.h2.nPzQ-1633836127-0-gqNtZGzNAiWjcnBszQIR)

## POPIS SLIKA

Slika 1: Odnos broja okretaja i sadržaja NO <sub>x</sub> -a u ispušnim plinovima [6].....	5
Slika 2: P-V i razvodni dijagram X-DF motora u plinskom režimu rada [5] .....	6
Slika 3: Prikaz ciklusa izgaranja u plinskom režimu rada [3] .....	7
Slika 4: Usporedba normalnog rada i rada pri pojavi spontanijih detonacija [4] .....	9
Slika 5: Prikaz sigurnosnih sustava na motoru [4] .....	10
Slika 6: Prikaz razlike u kapitalnim troškovima niskotlačnih i visokotlačnih pogona na plin[4] .....	12
Slika 7: Razlika u sastavu ispušnih plinova bez recirkulacije i s 50% ispušnih plinova u recirkulaciji [7].....	14
Slika 8: Sustav pogonskog plina [3] .....	16
Slika 9: Ulazni ventil plina [3] .....	17
Slika 10: Sustav sa zatvorenom izvedbom [3] .....	20
Slika 11: Shematski prikaz sustava s odvojenom ventilskom prostorijom [3] .....	21
Slika 12: Dobavna jedinica tekućeg goriva [5].....	22
Slika 13: Sustav za pripremu i dobavu goriva [3].....	25
Slika 14: Shematski dijagram sustava tekućeg goriva [3] .....	27
Slika 15: Sustav pilot goriva [3].....	28
Slika 16: Jedinica za dobavu pilot goriva [3] .....	30
Slika 17: Rasprskič pilot goriva [5] .....	31
Slika 18: Rasprskič pilot goriva [3] .....	31