

# Brodski motori na dvojno gorivo

---

**Veličković, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:552071>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-09**

*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](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**NIKOLA VELIČKOVIĆ**

**BRODSKI MOTORI NA DVOJNO GORIVO**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

**BRODSKI MOTORI NA DVOJNO GORIVO**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**

**Prof. dr. sc. Gojmir Radica**

**STUDENT:**

**Nikola Veličković**

(MB:0171275223)

**SPLIT, 2020.**

## SAŽETAK

Brodski dizelski motori na dvojno gorivo su pogonski strojevi koji istovremeno rade na dvije vrste goriva: dizelsko gorivo i ukapljeni prirodni zemni plin. Njihov tehnički razvoj uvjetovan je IMO-vom regulativom na području onečišćenja zraka emisijom ispušnih plinova i sve prihvatljivijom cijenom ukapljenog prirodnog zemnog plina – LNG (eng. *Liquid Natural Gas*) kao goriva. Dvije vrste brodskih motora ovog tipa se koriste na brodovima, a to su četverotaktni DF (eng. *Dual Fuel*) i dvotaktni MEGI (eng. *Main Engine Gas Injection*), koji su obrađeni u završnom radu. Dva glavna svjetska proizodača koja su dizajnirala i dalje razvijaju takve motore su MAN B&W i Wartsila. Prvotno su se motori na dvojno gorivo isključivo koristili na velikim LNG tankerima koji su kao gorivo koristili ispareni teret. Međutim, njihov razvoj i sve veća pouzdanost dovela je do njihove primjene i na druge tipove brodova.

**Ključne riječi:** *Brodski motori, LNG, DF, MEGI, MAN B&W, Wartsila*

## ABSTRACT

Marine dual fuel engines are operating machines that simultaneously work with two types of fuel: diesel fuel and liquefied natural gas. Their technical development are conditioned by IMO regulations on the field of pollution by exhaust gas emissions and with more acceptable price of liquefied natural gas – LNG as fuel. Two types of dual fuel marine engines are used on ships, four-stroke DF (Dual Fuel) and two-stroke MEGI (Main Engine Gas Injection), that are elaborated in this final work. Two worlds major manufacturers that have designed and still continue to develop such engines are MAN B&W and Wartsila. Initially, dual fuel engines were used just on LNG carriers that used boil off cargo as fuel. However, their technical development and much higher reliability has led to their adaptation to other types of vessels as well.

**Keywords:** *Diesel engines, LNG, DF, MEGI, MAN B&W, Wartsila*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GORIVO.....</b>	<b>2</b>
2.1. DIZELSKO GORIVO (MDO) .....	2
2.2. TEŠKO GORIVO (HFO).....	4
2.3. UKAPLJENI PRIRODNI ZEMNI PLIN (LNG).....	5
<b>3. MOTORI SA UNUTRAŠNJIM IZGARANJEM .....</b>	<b>6</b>
3.1. ČETVEROTAKTNI MOTORI, 4T (PRINCIPI RADA ) .....	6
3.2. DVOTAKTNI MOTORI, 2T (PRINCIP RADA).....	8
3.3. DIZELSKI I OTTO MOTORI ( RAZLIKA KOD 4T MOTORA) .....	11
<b>4. BRODSKI MOTORI NA DVOJNO GORIVO .....</b>	<b>12</b>
4.1. DF MOTORI.....	13
4.2. MEGI MOTORI .....	20
<b>5. PRIMJENA DF I MEGI MOTORA .....</b>	<b>29</b>
5.1.1. LNG BRODOVI.....	29
5.1.2. CRUISER NA LNG .....	30
5.1.3. KONTEJNERSKI BROD NA LNG .....	31
5.1.4. RORO BRODOVI NA LNG.....	31
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>33</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>34</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>36</b>

## 1. UVOD

Brodski dizel motori na dvojno gorivo su strojevi koji istovremeno u cilindru imaju dvije vrste goriva, dizel i LNG. Brodski dizel motor je toplinski uređaj koji kemijsku energiju, gorivo, pretvara u mehanički rad, na način da gorivo sagorijeva te da poguruje klip. Dizelski motori već jako dugo godina služe kao pogonski strojevi za brodove, te su jako dugim razvojem dosegli velik stupanj iskoristivosti, čak preko 50%. Zbog onečišćenja zemljine atmosfere, te zbog regulativa koje su donesene od strane nadležnih, dozvoljena vrijednost sumpora u teškom gorivu je 0.5%. Problem je riješen sa prirodnim plinom, koji ima jako nizak postotak sumpora, a ujedno mu je i cijena jako niska.

Rad je podijeljen u 6 poglavlja.

Nakon uvoda, u prvom poglavlju opisivati ćemo pojam goriva. Gorivo je tvar koja prilikom izagranja stvara veliku količinu toplinske enregije, koju iskorištavamo u razne svrhe. Imamo nekoliko vrsta goriva, a nama su bitna: dizel, HFO i LNG.

U trećem poglavlju opisivati ćemo motore s unutrašnjim sagorijevanjem, njihov princip rada, te razlike između Otto i dizel motora

U četvrtom poglavlju biti će opisana tehnologija dizel brodskih motora na dvojno gorivo. To je tehnologija koja rješava problematiku budućnosti, tj. problematiku onečišćenja zemljine atmosfere. Ugrađujemo novi sustav goriva, na već postojeće motore ili na nove motore, sustav LNG-a. Te sustave proizvode dvije kompanije, a to su Wartsila, sa svojim DF motorima i MAN, sa svojim MEGI motorima.

U petom poglavlju biti će opisano na koje vrste brodova ugrađujemo ove nove tehnologije.

U šestom poglavlju, sažeto će biti opisan zaključak obrađene tematike rada.

## 2. GORIVO

Gorivo su tvari koje prilikom izgaranja razvijaju velike količine toplinske energije, koja se iskorištava u različite svrhe. Da bi neka tvar mogla služiti kao gorivo, važno je da ima veliku toplinsku vrijednost (omjer topline koja se dobije izgaranjem te tvari i njezine mase), da se može dobiti jeftino i u velikim količinama, da je postojana i da se lako transportira, da ima što nižu temperaturu paljenja i da ne razvija otrovne i štetne proizvode izgaranja. Goriva su u kemijskom smislu organske prirode, pa u njima izgaraju ugljik, vodik i sumpor. Ugljik najviše pridonosi toplinskoj vrijednosti, dok o vodiku više ovisi zapaljivost goriva. Svako tekuće gorivo ima drukčije plamište, ponašanje na hladnoći, viskoznost, mazivost, sadržaj sumpora, aditive. Da nemamo gorivo, ne bi mogli pogoniti brod. Na brodu kao gorivo najčešće koristimo: dizel (MDO, engl. *marine diesel oil*), teško gorivo (HFO, engl. *heavy fuel oil*) i u novije vrijeme ukapljeni prirodni zemni plin (LNG, engl. *liquid natural gas*).[1]

### 2.1. DIZELSKO GORIVO (MDO)

U cilindar dizel motora zrak se usisava, komprimira, tlak i temperatura mu rastu, a malo prije GMT-a u taj se vrući zrak ubrizgava gorivo koje se odmah pali uslijed visoke temperature zraka. Odatle proizlazi i osnovni zahtjev na goriva za dizelske motore, ona se moraju upaliti lako i sa što manjim zakašnjenjem, odnosno moraju biti sklona samozapaljenju. Ta se sklonost iskazuje cetanskim brojem koji se određuje ispitivanjem u laboratorijskom motoru po normiranoj metodi. Što je gorivo sklonije samozapaljenju, to mu je cetanski broj veći. U dizelskim motorima postoji vremenski razmak od početka ubrizgavanja goriva i početka njegova izgaranja (zakašnjelo paljenje). Kvaliteta izgaranja dizelskog goriva izražava se cetanskim brojem ili izračunati indeks aromatičnosti ugljika CCAI brojem (eng. *Calculated Carbon Aromaticity Index*). Što je cetanski broj niži, odnosno CCAI viši, veće je zakašnjenje paljenja, te se javljaju veći udarci uslijed detonantnog izgaranja. Cetanski broj odgovara volumnom udjelu cetana (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>) u smjesi sa alfa-metil-naftalenom, i pokazuje sposobnost samozapaljenja. Cetan je nerazgranati ugljikovodik koji se lako pali pri kompresiji, te je njegov cetanski broj označen sa 100, dok je cetanski broj alfa-metil-naftalena 0. Izračunati indeks aromatičnosti ugljika CCAI indeks je kvalitete paljenja pogonskog goriva. Rad svih motora s unutarnjim

izgaranjem direktno ovisi o kvaliteti paljenja goriva. Kod Otto motora gorivo ima oktansku vrijednost. Kod dizelskog motora to ovisi o vrsti goriva, te se koriste cetanski brojevi. Dizel gorivo koje koristimo za pogon glavnih i pomoćnih motora, potpaljivanje kotla, inceneratora, generatora inertnog plina, ispiranje sistema goriva, opskrbu generatora u nuždi, požarnih pumpi u nuždi. Dizel koristimo za pokretanje motora, te za manovru, za sve ostalo koristimo HFO. Znači dizel nam je osnova za sve, te kasnije prebacujemo na teško gorivo ili LNG. Gustoća dizela je oko 850-900kg/ m<sup>3</sup> pri temperaturi od 15C.[2]

Parametar	Jedinica	Granica	Kategorija ISO - F -						Referentna metoda
			DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	
Kinematička viskoznost na 40 °C	mm <sup>2</sup> /s <sup>a</sup>	maks.	5,5	6	6	6	11	ISO 3104	
		min.	1,4	2	3	2			
Gustoća na 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	maks.	-	890	890	900	ISO 8217:2017(E) dio 6.1		
Cetanski indeks	-	min.	45	40	40	45	ISO 6264		
Sumpor <sup>b</sup>	mas %	maks.	1,0	1,0	1,0	1,5	ISO 8217:2017(E) dio 6.3		
Točka paljenja	°C	min.	43	60	60	60	ISO 8217:2017(E) dio 6.4		
Hidrogen sulfid	mg/kg	maks.	2,0	2,0	2,0	2,0	ISO 8217:2017(E) dio 6.5		
Kiselinski broj	mgKOH/g	maks.	0,5	0,5	0,5	0,5	ISO 8217:2017(E) dio 6.6		
Ukupni talog vruće filtracije	mas %	maks.	-	-	-	0,10 <sup>c</sup>	ISO 8217:2017(E) dio 6.8		
Oksidacijska stabilnost	g/m <sup>3</sup>	maks.	25	25	25	25 <sup>d</sup>	ISO 12205		
Metil ester masne kiseline (FAME) <sup>e</sup>	vol %	maks.	-	-	7,0	-	7,0	ISO 8217:2017(E) dio 6.10	
Ugljični ostatak - mikro metoda na 10 %	mas %	maks.	0,3	0,3	0,3	-	ISO 10370		
Ugljični ostatak - mikro metoda	mas %	maks.	-	-	-	0,3	ISO 10370		
Točka zamršenja <sup>f</sup>	zima	°C	maks.	-16	Report	report	-	ISO 8217:2017(E) dio 6.11	
	ljetno	°C	maks.	-16	-	-	-		
Točka začepjenja pri hladnoj filtraciji	zima	°C	maks.	-	report	report	-	ISO 8217:2017(E) dio 6.11	
	ljetno	°C	maks.	-	-	-	-		
Točka tečenja (gornja) <sup>f</sup>	zima	°C	maks.	-	-6	-6	0	ISO 8217:2017(E) dio 6.11	
	ljetno	°C	maks.	-	0	0	6		
Prozirnost			prozirno i bistro <sup>g</sup>				<sup>c</sup>	ISO 8217:2017(E) dio 6.12	
Voda	vol %	maks.	-	-	-	-	-	0,30 <sup>c</sup>	ISO 3733
Pepeo	mas %	maks.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	ISO 6245	
Mazivost (WSD) pri 60 °C <sup>h</sup>	µm	maks.	520	520	520	520	520 <sup>d</sup>	ISO 12156-1	

<sup>a</sup> mm<sup>2</sup>/s  
<sup>b</sup> Bez obzira na navedene granice, naručitelj će odrediti maksimalni sadržaj sumpora u skladu s relevantnim zakonskim ograničenjima zemlje u kojoj se brod nalazi.  
<sup>c</sup> Ako uzorak nije proziran i bistar, potrebno je izvršiti test na ukupan talog dobiven vrućom filtracijom i test na prisutnosti vode  
<sup>d</sup> Ako uzorak nije proziran i bistar ovaj test se ne može provesti, te se sukladnost s ovim ograničenjem ne može prikazati.  
<sup>e</sup> Vidi ISO 8217:2017(E) dio 5.1 i dodatak A.  
<sup>f</sup> Točka tečenja ne može jamčiti uporabu ovog goriva za sve brodove u svim klimatskim područjima. Naručitelj treba potvrditi da su karakteristike hladnog tečenja (točka tečenja, točka zamršenja, točka začepjenja pri hladnoj filtraciji) prikladna za planirano područje plovidbe broda.  
<sup>g</sup> Ako je uzorak obojen i nije proziran, tada je potrebno primijeniti metodu određivanja prisutnosti vode prema ISO 8217: 2017(E) dio 6.11.  
<sup>h</sup> Ovaj zahtjev se odnosi na goriva sa sadržajem sumpora manjim od 500 mg/kg (0,050 mas%).

Slika 1. Standard iz 2017 za laka brodska goriva (dizel) [4]



## 2.2. TEŠKO GORIVO (HFO)

Teško gorivo ili bunker gorivo (HFO) je zamjena za dizel na brodu. HFO je izgledom sličan katranu. Inače je u krutom stanju, ali kada ga zagrijavamo dolazi u tekuće stanje. Teško gorivo koristimo za pogon glavnih i pomoćnih motora, pogon kotla itd.

HFO se najviše razlikuje od dizela po svojoj gustoći i viskozitetu, ali i po tome što sadrži veliki postotak sumpora. Sumpor je najveći zagađivač okoliša, te se novim zakonom od 01.01.2020 zabranjuje upotreba HFO koji ima veći postotak sumpora od 0.5% , a daljnjim vremenom i ta brojka će se smanjiti. HFO se u novije vrijeme zamjenjuje sa LNG-om.

Zbog svoje gustoće i viskoziteta, na brodu HFO u bunker tankovima zagrijavamo, te ga zatim stalno grijemo (parom ili el.grijačima), da bi ga mogli dovesti do motora. Ako ga ne grijemo, on će biti u krutom stanju, te neće moći teći kroz cjevovod. Gustoća HFO, zavisno od kategorije, je od 991 do 1010kg/ m<sup>3</sup> pri temperaturi od 15 C, a viskozitet mu je od 180 do 700 mm<sup>2</sup>/s (cSt) pri temperature od 50 C, prema ISO normi 8217. HFO su ostatci nakon frakcijske destilacije i to je ono najgore i najnečistije što ostaje, ali na brodu služi svrsi. Koristimo ga zato što je najjeftiniji.[3]

Characteristic	Unit	Limits	Category – ISO – F -											Test method reference
			RBA	RMB	RMD	RME	RMG			RMK				
			10 <sup>a</sup>	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700	
Kinematic viscosity @ 50°C <sup>b</sup>	mm <sup>2</sup> /s	max	10.00	30.00	80.00	180.0	180.0	380.0	500.0	700.0	380.0	500.0	700.0	ISO 3104
Density @ 15°C	kg m <sup>3</sup>	max	920.0	960.0	975.0	991.0	991.0			1010.0			ISO 3675 or ISO 12185	
CCAI	-	max	850	860	860	860	870			870				
Sulfur <sup>c</sup>	mass%	max	Statutory requirements											ISO 875 ISO 14596
Flash point	°C	max	60	60	60	60	60			60			ISO 2719	
Hydrogen sulfide <sup>d</sup>	mg kg	max	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00			2.00			IP 570	
Acid number <sup>e</sup>	mg KOH kg	max	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5			2.5			ASTM D664	
Total sediment aged	mass%	max	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10			0.10			ISO 10307-2	
Carbon residue: micro method	mass%	max	2.5	10.00	14.00	15.00	18.00			20.00			ISO 10370	
Pour point (upper) <sup>f</sup>	winter quality	°C	max	0	0	30	30	30			30			ISO 3016
	summer quality	°C	max	6	6	30	30	30			30			
Water	volume%	max	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50			0.50			ISO 3733	
Ash	mass%	max	0.04	0.07	0.07	0.07	0.100			0.150			ISO 6245	
Vanadium	mg kg	max	50	150	150	150	350			450			IP 501. IP 470 or ISO 14597	
Sodium	mg kg	max	50	100	100	50	100			100			IP 501 IP470	
Aluminium plus silicon	mg kg	max	25	40	40	50	60			60			IP 501 IP 470 or ISO 10478	
Used lubricating oils (ULO) calcium and zinc: or calcium and phosphorus	mg kg	-	The fuel shall be free from ULO. A fuel shall be considered to contain ULO when either one of the following conditions is met: calcium >30 and zinc >15; or calcium >30 and phosphorus >15											IP 501 or IP 470 IP 500

<sup>a</sup> This category is based on a previously define distillate DMC category that was described in ISO 8217:2005, Table 1. ISO 8217:2005 has been withdrawn.  
<sup>b</sup> mm<sup>2</sup>/s = 1cSt  
<sup>c</sup> The purchaser shall define maximal sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See 0.3 and Annex C.  
<sup>d</sup> Du to reasons stated in Annex D, the implementation date for compliance with the limit shall be 1 July 2012. Until souch time, the specified value is given for guidance.  
<sup>e</sup> See Annex H.  
<sup>f</sup> Pucharser shall ensure that this pour point is suitable for the equipment on board, especially if the ship operates in cold climates.

Slika 2. Standard iz 2017 za teška brodska goriva (HFO) [4]

### 2.3. UKAPLJENI PRIRODNI ZEMNI PLIN (LNG)

LNG ili ukapljeni prirodni zemni plin je spoj nekoliko plinova, u kojem prevladava metan (90%). Metan je izuzetno zapaljiv u smjesi sa zrakom. Kao plin je jako zapaljiv, dovoljno je da ga ima 5 % do 15 % u zraku, da bi se zapalio. Njega čuvamo na temperaturi od  $-162\text{ C}$  na tlaku od 1 Bar. Ukapljeni prirodni plin zauzima oko 1/600 volumena prirodnog plina u plinovitom stanju. Bez mirisa, bez boje, netoksičan je i nekorodira. Opasnosti su gorivost, smrzavanja i gušenja. LNG nije u velikim količinama štetan za atmosferu, te je zato puno pogodniji za upotrebu nego teško gorivo ili dizel. LNG nema udjel sumpora. U novije vrijeme počeli su se izgrađivati brodovi sa motorima na dvojno gorivo, a stari brodovi su se počeli prenamjenjivati da rade na dvojno gorivo. Ti motori rade tako da se plin ubrizgava u motor, a zatim se ta smjesa zapali sa dizelom (na principu samozapaljenja). Razlog toga svega je da su brodovi ekološki prihvatljivi i da ne zagađuju atmosferu. Plin se koristi svugdje isto kao i dizel ili teško gorivo (ali ne gdje su emergency sustavi), a to je upotreba kod glavnih i pomoćnih motora, kotlova.[1]

SVOJSTVO	VRIJEDNOST	NAPOMENA
Temperatura ključanja	$-161.5^{\circ}\text{C}$	@ 1 atm
Ledište	$-182.6^{\circ}\text{C}$	@ 1 atm
Specifična gravitacija LNG-a	0.43 ~ 0.47	ovisno o vodi=1
Gustoća plina	0.7 ~ 0.9	$\text{kg}/\text{m}^3$ @ STP
Granice zapaljivosti	4 ~ 15	Ovisno o volumenu u zraku
Temperatura zapaljenja	$538^{\circ}\text{C}$	@ 1 atm
Sadržaj ugljika	73	Ovisno o težini
Sadržaj vodika	24	Ovisno o težini
Sadržaj kisika	0.4	Ovisno o težini
Atomski omjer vodika i ugljika	3.0 ~ 4.0	
Relativna gustoća	0.72 ~ 0.8	Pri $15^{\circ}\text{C}$
Oktanski broj	120 ~ 130	
Metanski broj	69 ~ 99	

Slika 3. Karakteristike LNG-a [3]

### 3. MOTORI SA UNUTRAŠNJIM IZGARANJEM

Motor s unutrašnjim izgaranjem je klipni stroj u kojem se kemijska energija goriva pretvara u mehanički rad na izlaznome vratilu. Gorivo u smjesi sa zrakom izgara u cilindru ili komori izgaranja motora, čime nastaju plinovi visoke temperature i tlaka. Konstrukcijski se razlikuju motori kod kojih tlak plinova u ekspanziji pravocrtno pomiče klip u cilindru, što se uz pomoć klipnjače pretvara u rotacijsko gibanje koljenastoga vratila (stapni i klipni strojevi), te motori s rotacijskim klipom (wankelov motor). Prema načinu paljenja smjese razlikuju se motori s paljenjem uz pomoć el. iskre (otto motor) i motori s kompresijskim paljenjem (dizel motor). Svi motori imaju radni proces koji se sastoji od četiri faze: usisavanje svježih plinova (1), njihova kompresija (2), izgaranje i ekspanzija (3), istiskivanje iskorištenih plinova iz cilindra (4). Moramo znati i jednu veliku bitnu razliku, a to je da postoje dvotaktni motori i četverotaktni motori.[4]

#### 3.1. ČETVEROTAKTNI MOTORI, 4T (PRINCIPI RADA )

Četverotaktn motor je motor koji radni ciklus odvija za vrijeme dva okreta koljenastog vratila, tj. četiri hoda stapa ili četiri takta. Četiri takta četverotaktnog motora su:

- usisavanje smjese ili zraka
- kompresija i paljenje
- izgaranje i ekspanzija (radni takt)
- ispuh i istiskivanje plinova.

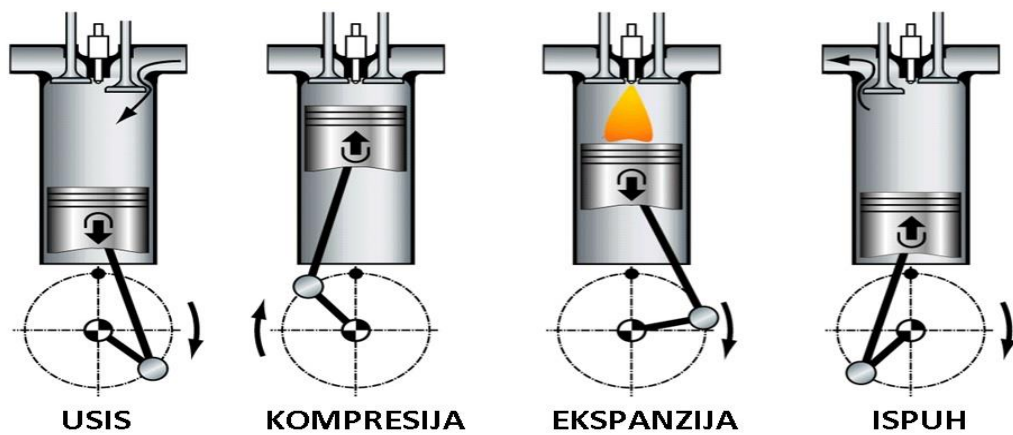
U prvom taktu klip se giba od GMT (gornje mrtve točke) do DMT (donje mrtve točke), otvoren je usisni ventil i zrak ulazi u cilindar (dizel ciklus) ili usis mješavine goriva i zraka (Otto ciklus). Zbog otpora u dovodnim kanalima i usisnom ventilu, tlak u cilindru niži je od atmosferskog za (0.05-0.10)  $10^5 \text{ N/m}^2$ . Da bi cilindar napunili sa što više zraka, usisni ventil se otvara nešto ispred GMT i zatvara se nešto poslije DMT.

U drugom taktu komprimira se usisni medij. Temperatura pri tom raste. Usisni i ispušni ventili su zatvoreni. Stupanj kompresije određen je omjerom volumena cijelog prostora cilindra kada je klip u DMT prema volumenu kompresijskog prostora koji ostaje iznad klipa u GMT. Taj je stupanj kompresije kod Otto motora nizak, da se komprimirana smjesa sama ne zapali, dok kod dizel motora mora biti visok stupanj kompresije, da se ubrizgano gorivo u visokom zagrijanom zraku samozapali. Kod Otto motora stupanj ovisi

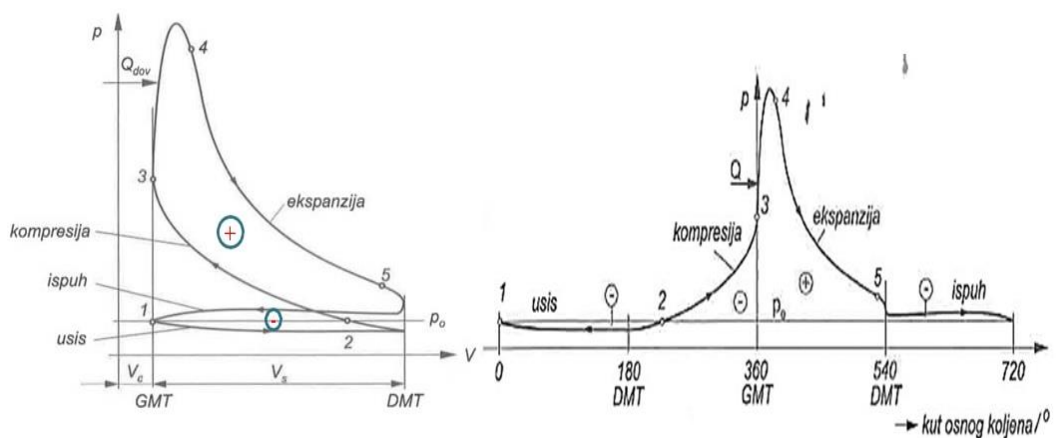
o vrsti goriva te je za suvremene Otto motore stupanje kompresije 10-11.5, a za dizel motore 12-25.

U trećem taktu, događa se paljenje gorive smjese, te počinje izgaranje koje se produljuje na putu klipa u hodu prema DMT. Nakon izgaranja, dimni plinovi ekspandiraju. Usisni ventil je za cijelo vrijeme tog takta zatvoren. Ispušni ventil se otvara prije nego klip dođe u DMT i tlak brzo padne na tlak ispuha.

U četvrtom taktu događa se potpuno odstranjivanje plinova iz cilindra. Pri hodu klipa od DMT prema GMT ispušni ventil je otvoren i klip istiskuje plinove. Plinovi koji zaostaju u kompresijskom prostoru, istiskuju se svježim zrakom koji nadire dok su istovremeno otvoreni usisni i ispušni ventil, što traje odgovarajuće zakretu osnog koljena i do 135°. Plinovi koji prolaze kroz ispušni ventil još ekspandiraju i ulaze u ispušni vod s tlakom  $(1.0-1.1)10^5 \text{ N/m}^2$  (kod motora bez prednabijanja) i s temperaturom 220-500°C kod dizel motora, a 500-700°C kod Otto motora. [6]



Slika 4. Taktovi 4T motora [7]



Slika 5. p-v i p-a dijagram 4T motora [7]

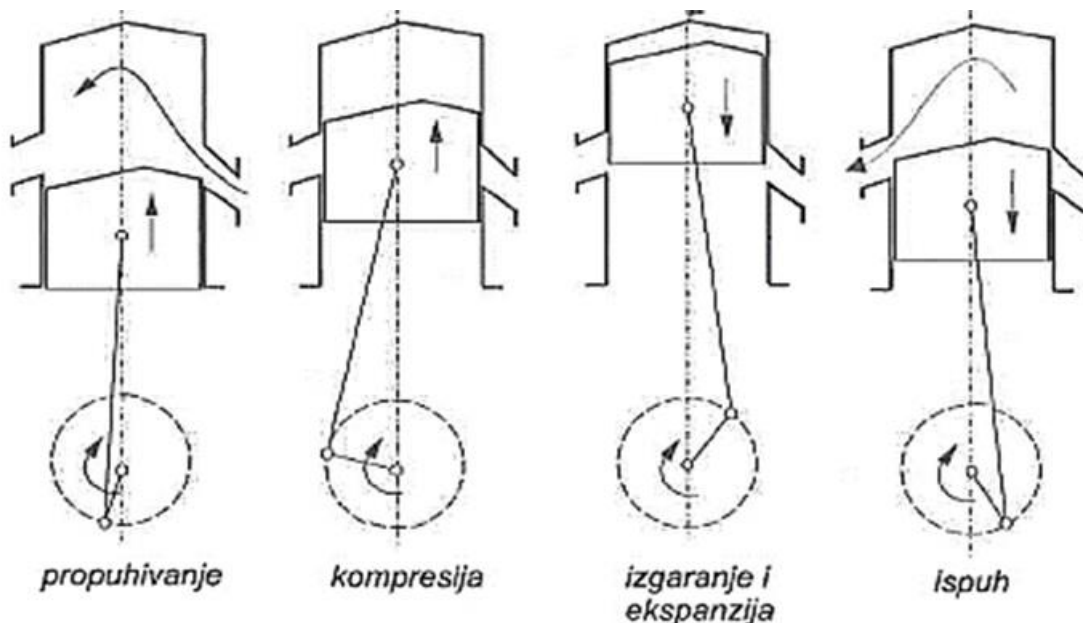
Rad četverotaktnog motora može se prikazati u P-v dijagramu i P-a dijagramu-razvijeni dijagram. Linija usisa ide nešto ispod atmosfere linije, a zatim slijedi kompresija do točke 3. Od 3 do 4 je izgaranje i dovodi se toplina  $Q_{dov}$ , u točki 5 se otvara ispušni ventil, a posljednji takt je istiskivanje plinova s tlakom nešto višim od atmosferskog. Od točke 5 do kraja 4 dovodi se toplina.[6]

### 3.2. DVOTAKTNI MOTORI, 2T (PRINCIP RADA)

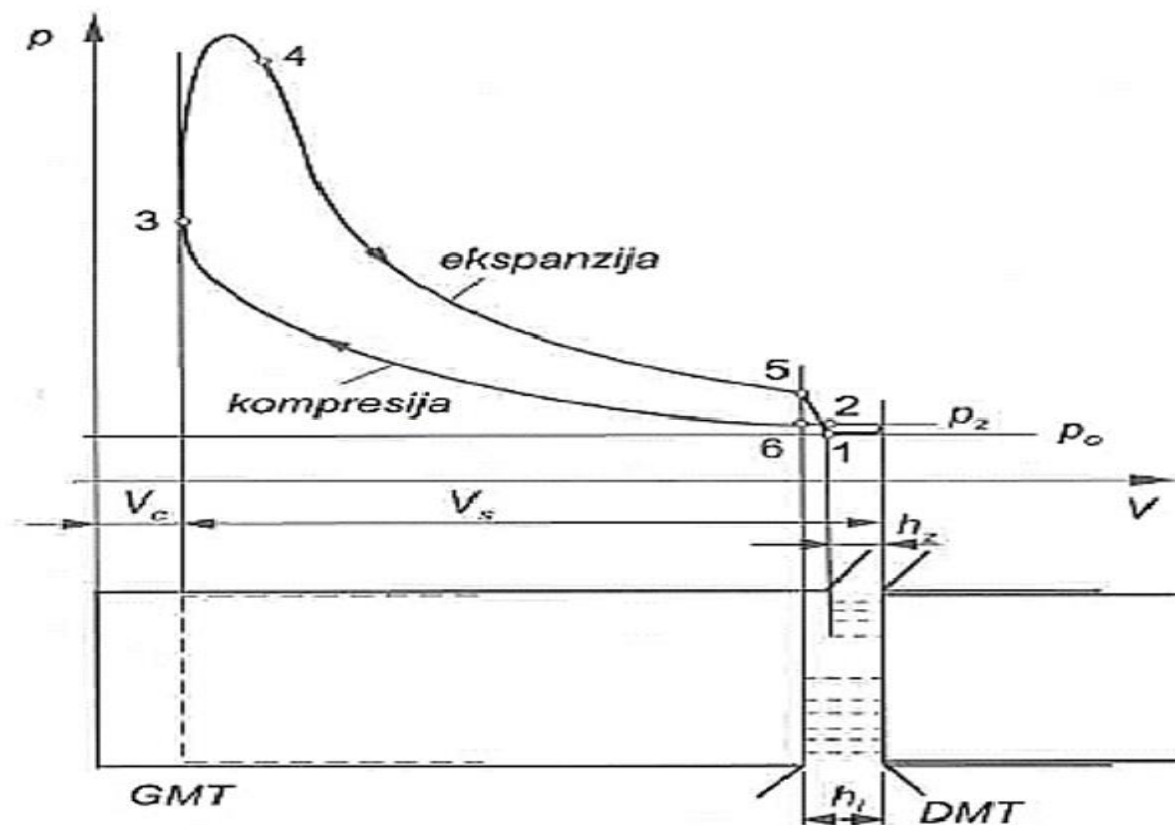
Dvotaktni motor je motor koji radni ciklus odradi za vrijeme jednog okreta koljenastog vratila, tj. dva hoda klipa ili dva takta. Ta dva takta dijele se na na:

- Kompresijski takt (propuhivanje ili ispiranje, kompresija, paljenje).
- Radni takt (izgaranje, ekspanzija, ispuh i početak propuhivanja).

Ispuhivanje plinova izgaranja i punjenje svježim zrakom događa se djelomično u prvom taktu. Kompresija, paljenje, izgaranja i ekspanzija događa se isto kao kod četverotaktnog motora, dok za ispuh, propuhivanje i punjenje svježim zrakom ostaje samo vrijeme na kraju drugog i na početku prvog takta. Umjesto usisivanja, čisti zrak se utiskuje u cilindar pod malim pretlakom, a istovremeno se istiskuju zaostali dimni plinovi. Jedan se zrak pritom gubi, ali veći dio ostaje u cilindru, te se zatim komprimira. Ovaj postupak se zove propuhivanje ili ispiranje. Zrak ulazi, kao što plinovi izlaze kroz ispirne kanale, koji se nalaze na obodu cilindarske košuljice i koji se otvaraju i zatvaraju pomicanjem stapa.



Slika 6. Taktovi 2T motora [7]



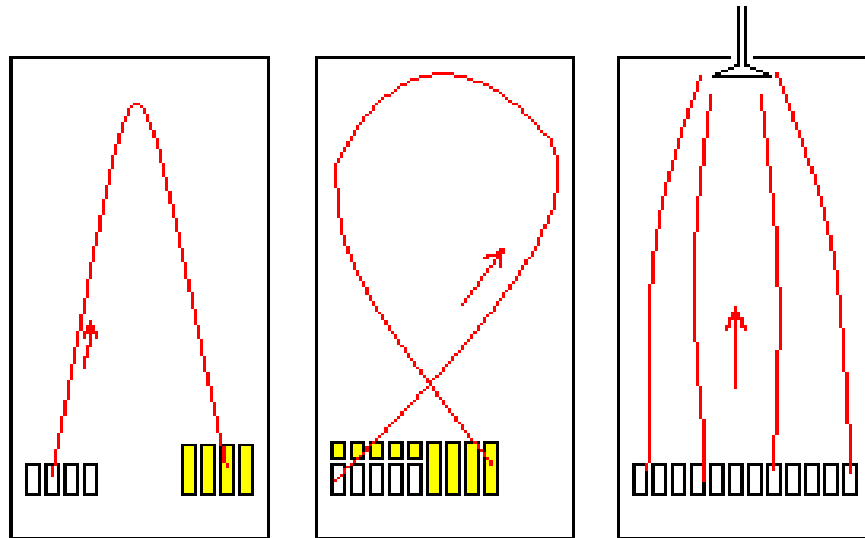
**Slika 7. P-v dijagram 2T motora [7]**

Na slici 7. je prikazan dijagram 2T motora prema kojem se mogu pratiti pojedine faze ciklusa. Zrak koji je ispunio cilindar komprimira se od točke 6 do 3, kada počinje ubrizgavanje goriva u komprimirani zrak. Od 3 do 4 traje izgaranje, pri kojem se dovodi toplina  $Q_{dov}$ , a od 4 do 5 plinovi izgaranja ekspanziraju. U točki 5 klip najprije otvara ispušne kanale, te tlak pada na atmosferski, a tek kada u točki 1 otvara ispirne kanale koji su niži, tlak se neznatno povećava. U točki 2, kada klip opet prekrije ispirne kanale, tlak se skoro izjednačuje sa atmosferskim, jer je ispuh još otvoren. Kompresija počinje u točki 6, nakon zatvaranja ispušnih kanala i traje do 3. Kut osnovnog koljena koji odgovara ispuhivanju i ispiranju nešto je veći od  $120^\circ$ , tako da je vrijeme na raspolaganju za ispiranje cilindra dosta dugo (točka 5-6). U dijagramu  $h_z$  predstavlja visinu ispirnog kanala, a  $h_i$  visinu ispušnog kanala.[6]

Dvotaktni motor je u osnovi jednostavan motor bez kompliciranog razvodnog mehanizma za otvaranje ventila, s relativno jednostavnim održavanjem i dobrom pouzdanošću. Ispiranje cilindra se u tom slučaju izvodi na tri načina, poprečnim sustavom ili obrnutim (petlja) sustavom. Prva dva sustava postižu otprilike iste rezultate ispiranja i podjednako su u primjeni. Nešto složeniji i kvalitetniji sustav je sustav s uzdužnim

ispiranjem, gdje zrak struji uzdužno, ali se u tom slučaju mora imati ventil na glavi motora, što s jedne strane poskupljuje izvedbu, ali omogućava bolje ispiranje motora i poboljšanje ukupnih performansi motora i povećanje ukupnog stupnja iskorištenja na preko 54%, što je najbolji rezultat od svih strojeva koje je čovjek proizveo.

Na slici 8. prikazana su sva tri načina ispiranja, na prvoj slici je princip izvedbe poprečnog ispiranja, u sredini obrnutog ili petlja ispiranja, a na desnoj slici je prikazano ispiranje kod novijih i modernijih tipova dvotaktnog motora, tj. uzdužno ispiranje. Na slikama je također vidljiv princip izrade kanala na košuljici koji je određen vrstom ispiranja.[5]



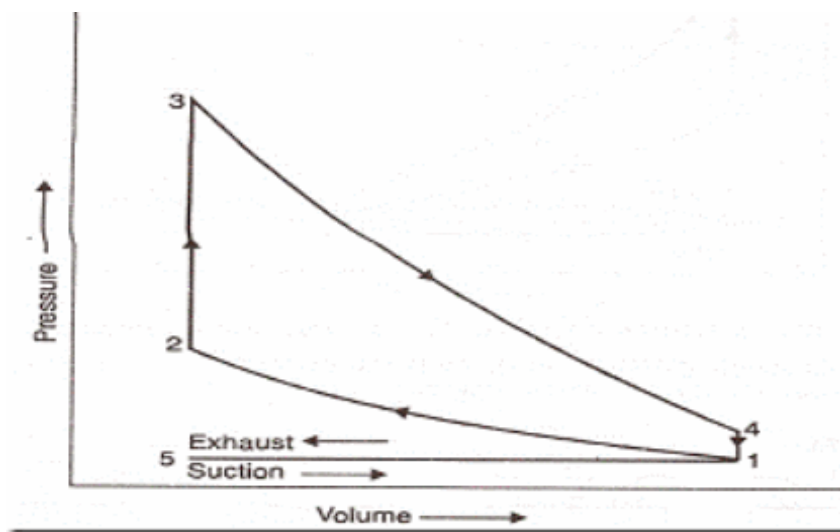
**Slika 8. Ispiranje cilindara kod 2T motora [6]**

Glavne razlike između 2T i 4T brzokretnih motora su:

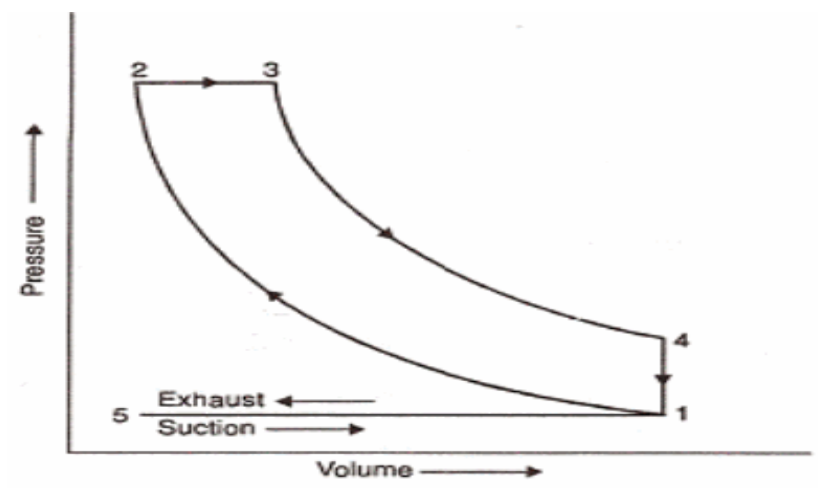
- 2T motor pri istom broju okretaja u minuti ima dvostruki broj radnih taktova
- 2T motor je lakši i zauzima manje prostora od jednako jakog 4T motora
- 2T motori su jednostavniji po konstrukciji od 4T motora
- Zakrteni moment 2T motora je ravnomjerniji, jer ciklus obavi za vrijeme jednog okretaja.
- 4T dizel motori su efikasniji brzokretni motori, jer imaju više vremena na raspolaganju za izmjenu medija od 2T Diesel motora.

### 3.3. DIZELSKI I OTTO MOTORI ( RAZLIKA KOD 4T MOTORA)

Glavne razlike kod 4T dizel i Otto motora su te što Otto motori u taktu usisa usisavaju smjesu goriva i zraka, smjesa se pali električnom iskrom, dok se kod dizel motora u usisnom taktu usisava čisti zrak. Dizel motor ima način paljenja takav, da se gorivo ubrizgava u cilindar pri kraju kompresijskog takta, zbog temperature komprimiranog zraka gorivo se zapali bez potrebe za dodatnim izvorom paljenja, te na taj način počinje takt ekspanzije. Kod Otto motora, koristimo iskru za paljenje gorive smjese, te kada iskra zapali gorivo počinje stupanj ekspanzije, te izgaranje traje cijelom duljinom gibanja klipa. Stupanj kopresije za Otto motore je 10-11.5, a za dizel motore 12-25.



Slika 9. Teoretski P-v dijagram Otto procesa [8]



Slika 10. Teoretski P-v dijagram dizel procesa [8]



#### 4. BRODSKI MOTORI NA DVOJNO GORIVO

U novije vrijeme LNG brodovi imaju problem sa BOG (engl. *Boil Off Gas*), ali i sa onečišćenjem okoliša zbog korištenja HFO i dizel goriva. Iz tog razloga tražilo se rješenje, te su se razvili brodski motori na dvojno gorivo, a to su DF (engl. *Dual Fuel*) i MEGI (engl. *Main Engine Gas Injection*). Boil off gas je LNG koji usljed pomicanja broda, valjanja i vremenskih uvjeta, temperature, isparava. Ovo je prirodni proces koji nije moguće zaustaviti, a zbog zaštite tankova od tlaka koji nastaje isparavanjem LNG-a potrebno je odvesti BOG iz tankova. Ranije vrste tankera za prijevoz prirodnog plina koristili su BOG kao pogonsko gorivo za glavne generatore pare (engl. *Main steam boilers*), ti brodovi su kao propulzijski stroj koristili parnu turbinu. U novije vrijeme rješenja za iskorištenje BOG su napravljena na slijedeće načine:

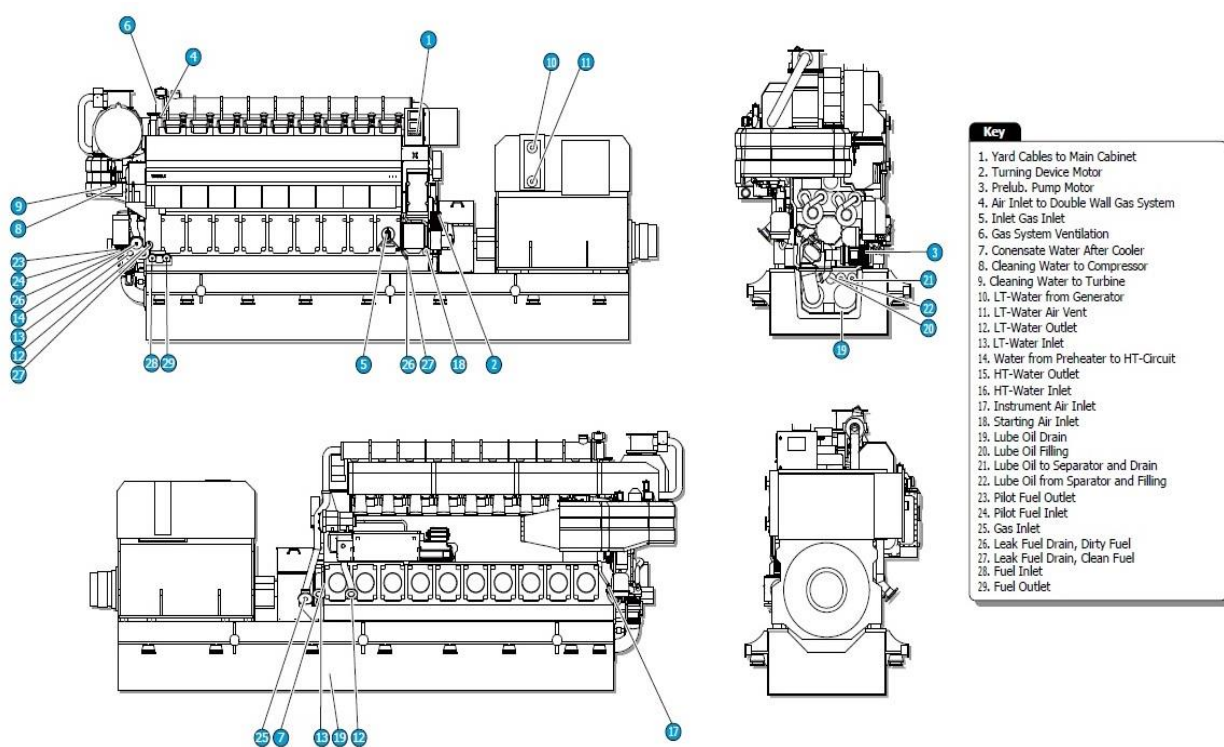
- Hlađenje i ukapljivanje BOG i ponovno vraćanje kapljevine u tankove, taj sistem je jako kompliciran i troši puno energije, plin se ne koristi kao pogonsko gorivo,
- Drugi način je sa DF i MEGI motorima. Oni koriste taj višak kao pogonsko gorivo u motoru, tako da umjesto dizela ili HFO koristimo LNG.

Taj sistem se pokazao kao jako dobar i kvalitetan te se čak počeo ugrađivati na brodove koji nisu tankeri za prijevoz LNG, ali koriste LNG za pogon brodskih motora. LNG je puno čišći od dizela i HFO, te je znatno smanjeno onečišćenje ispušnim plinovima. Najnovija generacija tankera za prijevoz ukapljenog prirodnog plina koristi četverotaktne dizelske motore kao pogonske strojeve za pogon generatora za proizvodnju električne struje, te dvotaktne sporohodne dizelske motore za propulziju broda. Kod ovakvih brodova motori koji se ugrađuju su dizajnirani na način da mogu koristiti tri vrste goriva, a to su: dizel, teško gorivo, prirodni plin.

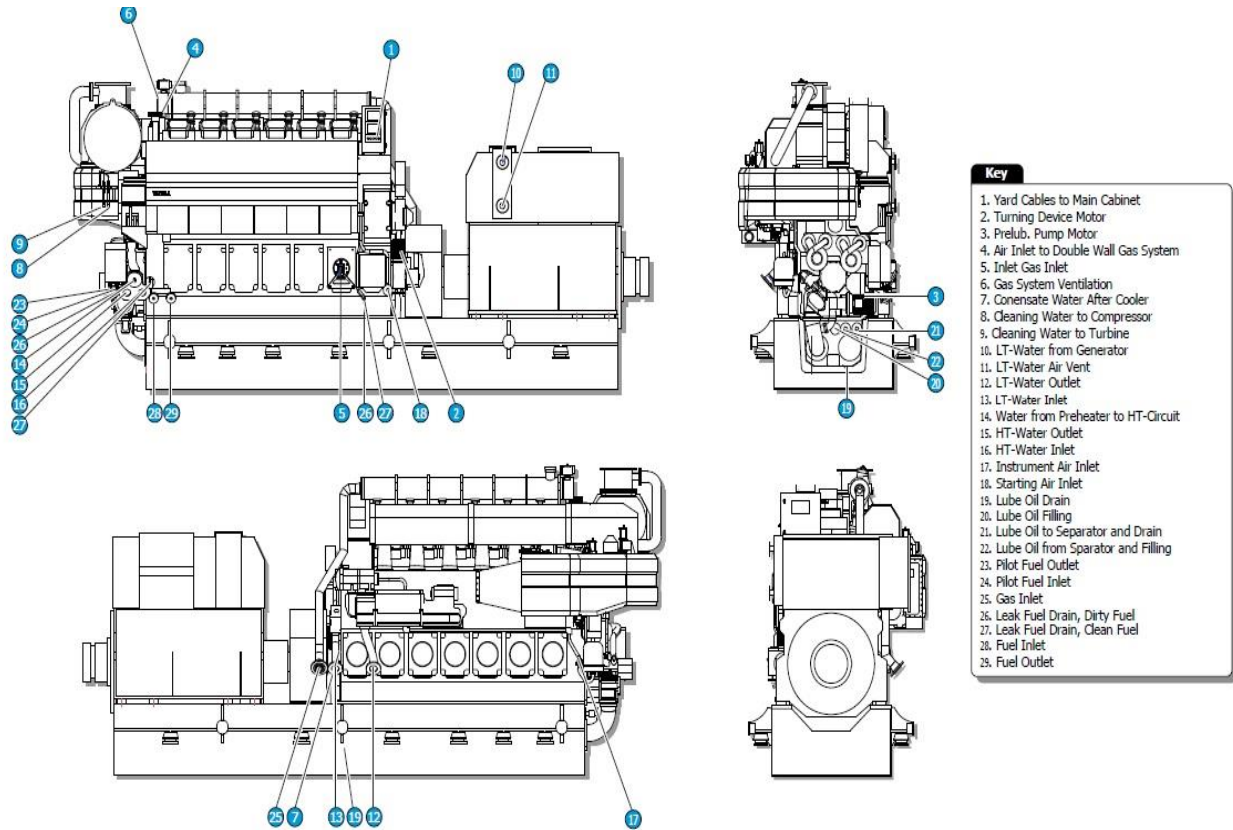
## 4.1. DF MOTORI

Obradit će se primjer motora sa broda Creole spirit, četverotaktni dizel motori.

### WARTSILA 9L34DF & WARTSILA 6L34DF



Slika 11. Wartsila 9L34DF [19]



Slika 12. Wartsila 6L34DF [19]

2.3.1 Main Particulars: Wärtsilä 9L34DF x 2 and 6L34DF x 2

	Unit	9L34DF	6L34DF
Max continuous rating (MCR)	kW	3915	2610
Speed	rpm	720	720
Cylinder bore	mm	340	340
Stroke	mm	400	400
Mean effective pressure	MPa	2	2
Mean piston speed	m/s	9.6	9.6
Configuration	-	In-line engine	In-line engine
Number of cylinders	-	9	6
Direction of rotation, looking at driving end	-	Clockwise	Clockwise
Firing order (Clockwise rotation)	-	1-7-4-2-8-0-3-9-5	1-5-3-6-2-4
Firing order (Counter-clockwise rotation)	-	1-5-9-3-6-8-2-4-7	1-4-2-6-3-5

Combustion Air System

	Unit	Mode of Operation			
		9L34DF		6L34DF	
		Gas	Diesel	Gas	Diesel
Air flow at 100 % load	kg/s	6.2	7.6	4.1	5.1
Temperature at turbocharger intake, max.	°C	45		45	
Temperature after air cooler, load > 70%	°C	45	-	45	-
Temperature after air cooler, load 30..70%	°C	55	-	55	-
Temperature after air cooler	°C	-	50	-	50

Exhaust Gas System

	Unit	Mode of Operation			
		9L34DF		6L34DF	
		Gas	Diesel	Gas	Diesel
Exhaust gas flow, 100 %	kg/s	6.5	7.84	4.33	5.23
Exhaust gas flow, 75 % load	kg/s	5.08	5.95	3.38	3.97
Exhaust gas flow, 50 % load	kg/s	4.18	3.96	2.79	2.64
Exhaust gas temperature after turbocharger, 100 % load	°C	400	350	400	350
Exhaust gas temperature after turbocharger, 75 % load	°C	425	375	425	375
Exhaust gas temperature after turbocharger, 50 % load	°C	440	420	440	420
Exhaust gas back pressure, max.	kPa	4		4	
Calculated pipe diameter for 35 m/s	mm	670	707	548	578

Heat Balance at 100 % Load

	Unit	Mode of Operation			
		9L34DF		6L34DF	
		Gas	Diesel	Gas	Diesel
Jacket water	kW	780	730	500	480
Charge air, HT-circuit	kW	500	860	340	570
Charge air, LT-circuit	kW	380	380	250	250
Lubricating oil	kW	440	430	290	290
Radiation etc.	kW	160	160	100	100

Fuel Consumption

	Unit	Mode of Operation			
		9L34DF		6L34DF	
		Gas	Diesel	Gas	Diesel
Total energy consumption at 100 % load	kJ/kWh	7972	-	7972	-
Total energy consumption at 75 % load	kJ/kWh	8362	-	8362	-
Total energy consumption at 50 % load	kJ/kWh	9087	-	9087	-
Fuel gas consumption at 100 % load	kJ/kWh	7877	-	7877	-
Fuel gas consumption at 75 % load	kJ/kWh	8248	-	8248	-
Fuel gas consumption at 50 % load	kJ/kWh	8858	-	8858	-
Fuel oil consumption at 100 % load	g/kWh	2.3	189	2.3	189
Fuel oil consumption at 75 % load	g/kWh	2.8	193	2.8	193
Fuel oil consumption at 50 % load	g/kWh	4.9	200	4.9	200

Fuel Gas System

	Unit	Mode of Operation			
		9L34DF		6L34DF	
		Gas	Diesel	Gas	Diesel
Gas pressure at engine inlet, min	kPa	452		452	
Gas pressure to gas valve unit, min	kPa	572		572	
Gas temperature before gas valve unit	°C	0-60		0-60	

Slika 13. Osnovne karakteristike 9L34DF i 6L34DF [19]

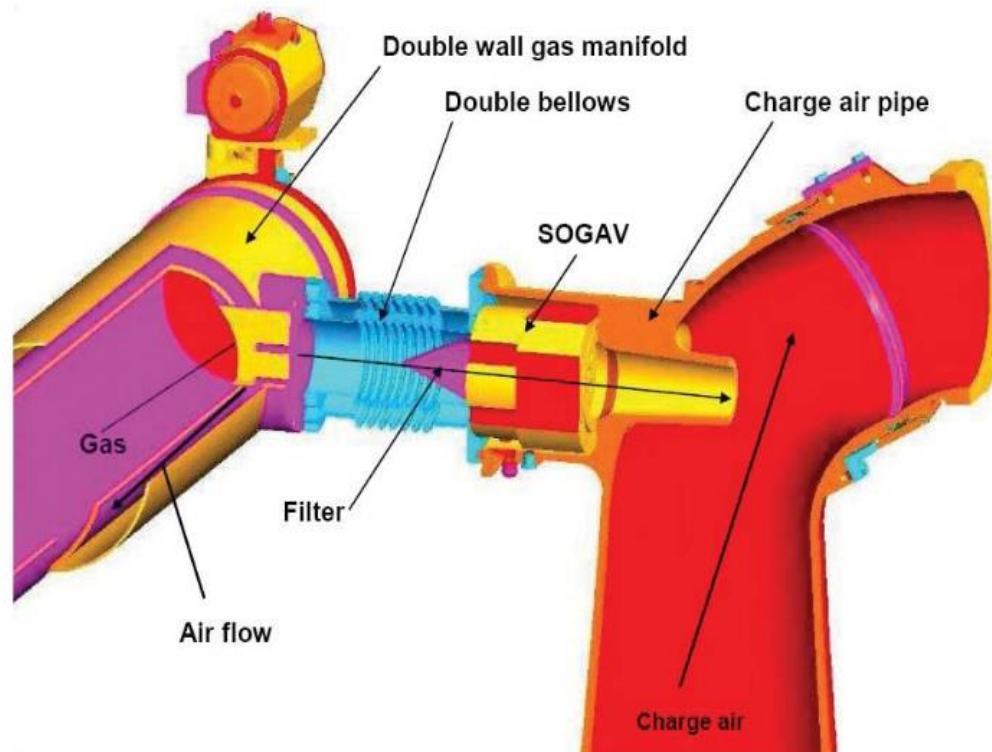
Motori WARTSILA 9L34DF x2 & 6L34DF x2 su dual fuel common rail motori, koji imaju sustav ubrizgavanja LNG-a, te ih to čini motorima koji rade na tri vrste goriva, triple fuel motorima. Jedina razlika između tih motora, kao običnih, koji rade na dizel i na HFO, je sistem goriva, tj. dodan je još jedan sistem cijevi za LNG. Dual-fuel sistem sastoji se od klasičnog sistema goriva za dizel ili za teško gorivo i odvojeno koristi sistem pilot goriva sa uporabom dizela (to je sistem, koji pali smjesu LNG i zraka da bi započela ekspanzija). Ubrizgavanje kod pilot sistema je upravljano elektronički. Pilot pumpa kojom se ubrizgava pilot gorivo je klipna pumpa upravljana mehanički (gorivo se ubrizgava istim ubrizgačem, samo ona ima dvije odvojene mlaznice). Na slici 14. vidimo kako izgleda ubrizgač kod DF motora. Široka mlaznica služi nam kada motor radi na dizel, dok nam uska mlaznica služi za ubrizgavanje pilot goriva, kada motor radi na LNG.



**Slika 14. Ubrizgač dizela na DF motorima [9]**

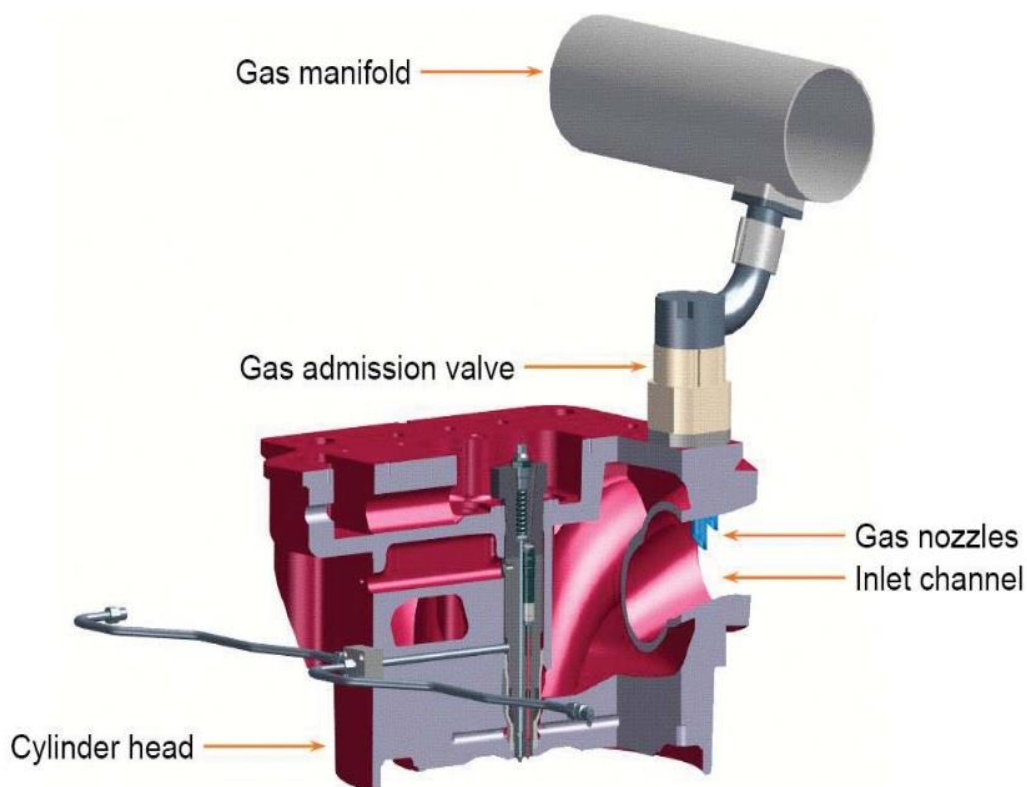
Prirodni plin, LNG, dostavlja se do motora preko jedinice za upravljanje plinom kroz velik sustav common-rail cijevi koje se rade uz motor. Svaki cilindar ima svoju dobavljačku cijev koja je upravljana elektroničkim pneumatskim ventilom na ulazu za

zrak. Cijevi za plin imaju dvostruku stijenku kada ovaj sustav primjenjujemo u pomorstvu, da bi sigurnost ovoga sustava bila što veća. Između prve i druge stijenke cijevovoda nalazi se inertni plin zbog sigurnosti, te se kontinuirano ventilira. Plin prije nego se ubrizga u zrak da se stvori smjesu, mora proći kroz filter i kroz ventil SOGAV (engl. *Solenoid Operated Gas Admission Valve*). To je glavni dobavni ventil koji kontrolira količinu plina za svaki cilindar. Ventil je smješten na usisnom kanalu. Taj ventil je direktno aktivirani solenoid ventil. Upravljanje se vrši s obzirom na vrijeme otvaranja ventila. SOGAV ima visoku izlaznu snagu i kratak pomak što rezultira brzim i dosljednim zatvaranjem.



**Slika 15. Cijevovod plina na DF motoru [9]**

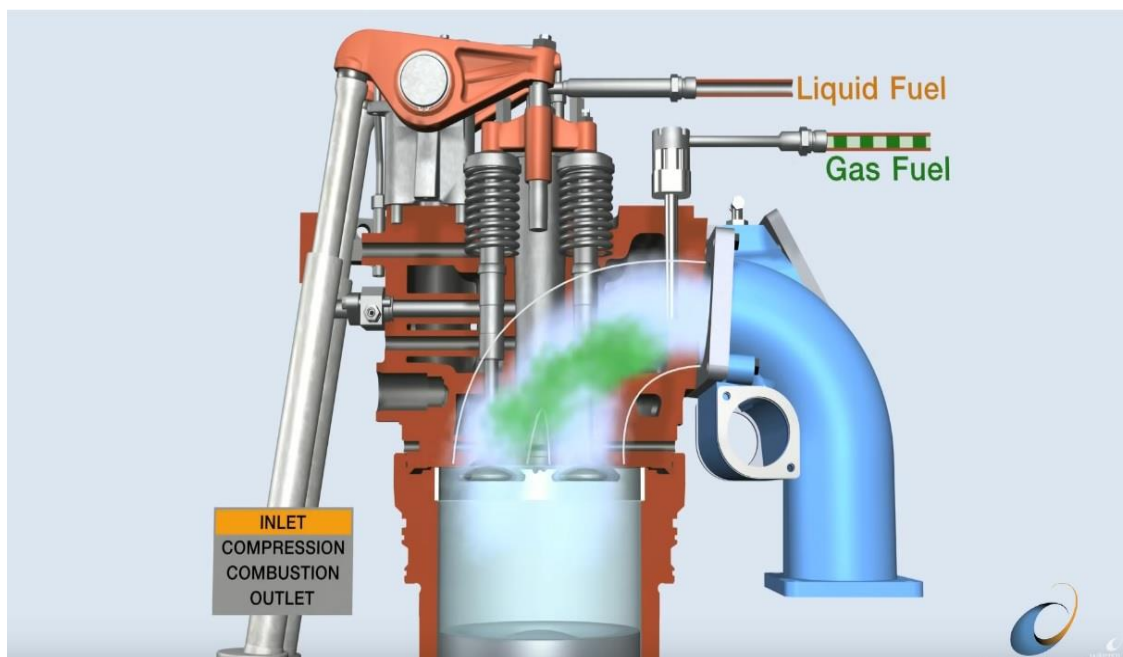
Wartsila dual fuel motor je dizajniran za operacije sa korištenjem dizela ili plina. Upravljački način motora može se mijenjati tokom rada, dok je motor pod određenim granicama i bez ometanja generiranja snage. Ako dobava plina nestane, motor se automatski prebacuje na rad sa dizelom. Kada motor radi na prirodni plin, plin se ubrizgava pod velikim pritiskom. Plin se zapaljuje tako što ubrizgamo malu količinu pilot dizela (koji se uslijed temperature i tlaka samozapali). Kod rada motora na dizel, motor radi samo na tekuće gorivo. Dizel i teško gorivo koristi se kao gorivo sa klasičnim sistemom ubrizgavanja. Pilot sistem ubrizgavanja upaljen je samo kod korištenja plina kao pogonsko gorivo.



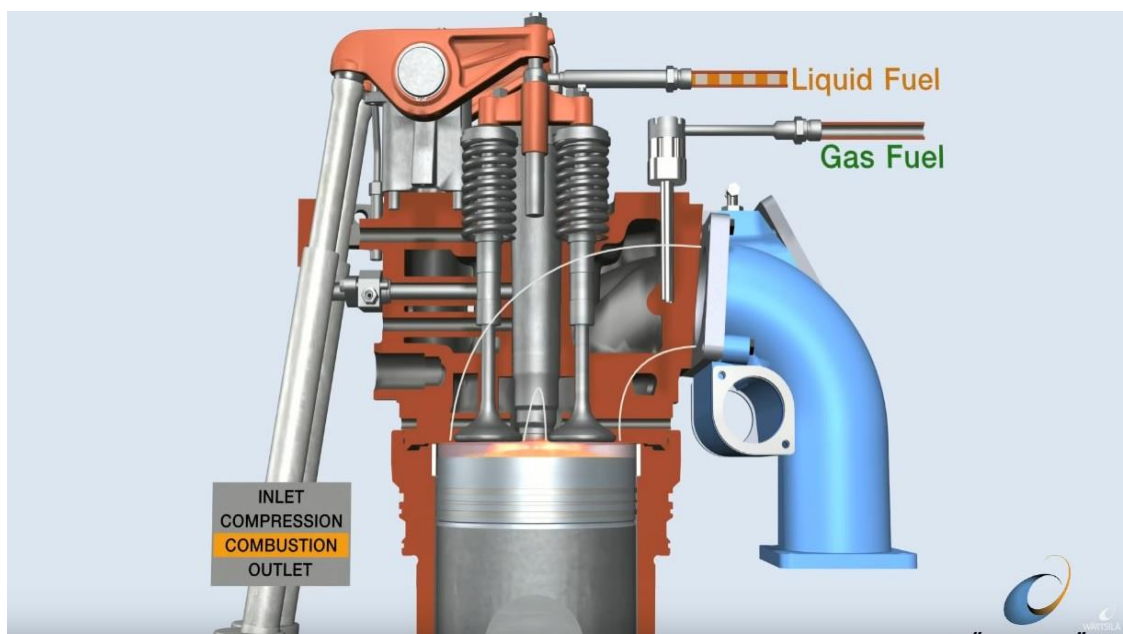
**Slika 16. Ubrizgač plina i glava motora [9]**

U prvom taktu klip se kreće iz gornje mrtve točke prema donjoj mrtvoj točki, usisni ventili su otvoreni, a u cilindar se ubrizgava mješavina plina i zraka. U drugom taktu vrši se kompresija kretanjem klipa iz donje mrtve točke prema gornjoj mrtvoj točki, svi ventili su zatvoreni, da bi se nekoliko stupnjeva prije nego li klip dođe u gornju mrtvu točku ubrizgala mala količina dizela, koja bi zbog temperature i tlaka u cilindru izazvala zapaljenje i izgaranje mješavine zraka i plina, te stvorila sila koja djeluje na čelo klipa predavajući mu energiju kretanja iz gornje mrtve točke prema donjoj mrtvoj točki (treći takt-ekspanzija). U četvrtom taktu klip se kreće iz donje mrtve točke prema gornjoj mrtvoj točki, usisni ventili su zatvoreni, ispušni ventili su otvoreni, te se ispušni plinovi izbacuju iz cilindra u ispušni cjevovod. Proces se ponavlja dolaskom klipa u gornju mrtvu točku i njegovim kretanjem prema donjoj mrtvoj točki (prvi takt).

Kada motor radi na dizel, on radi na klasični dizel princip, ali kada radi na LNG, tada motor radi na Otto princip. Da bi motor radio na LNG, u komoru sa zrakom je dodan ubrizgač koji raspršuje plin u zrak pod velikim tlakom, te radi smjesu koju ćemo koristiti kao radni medij.

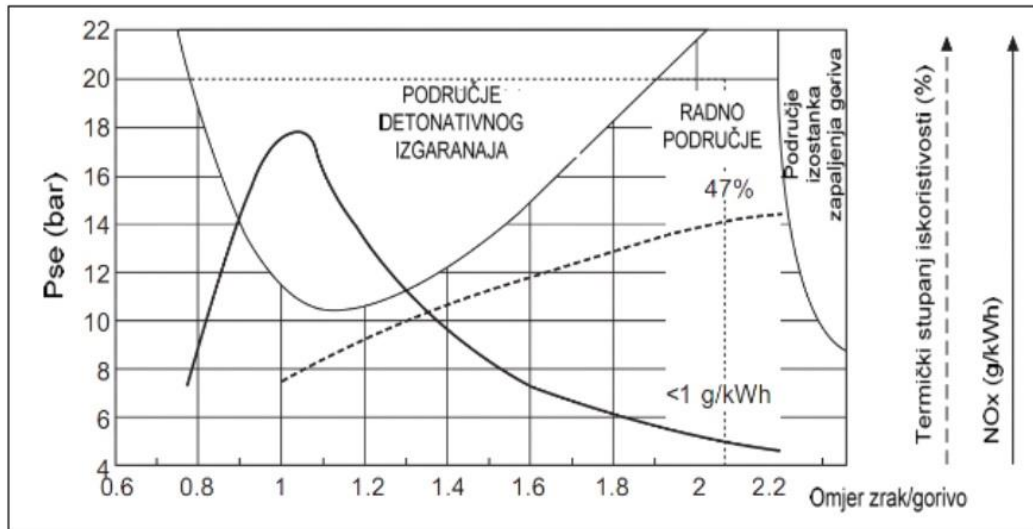


**Slika 17. Smjesa LNG i zraka, prije ulaza u cilindar [12]**



**Slika 18. Paljenje smjese malom količinom dizela [12]**

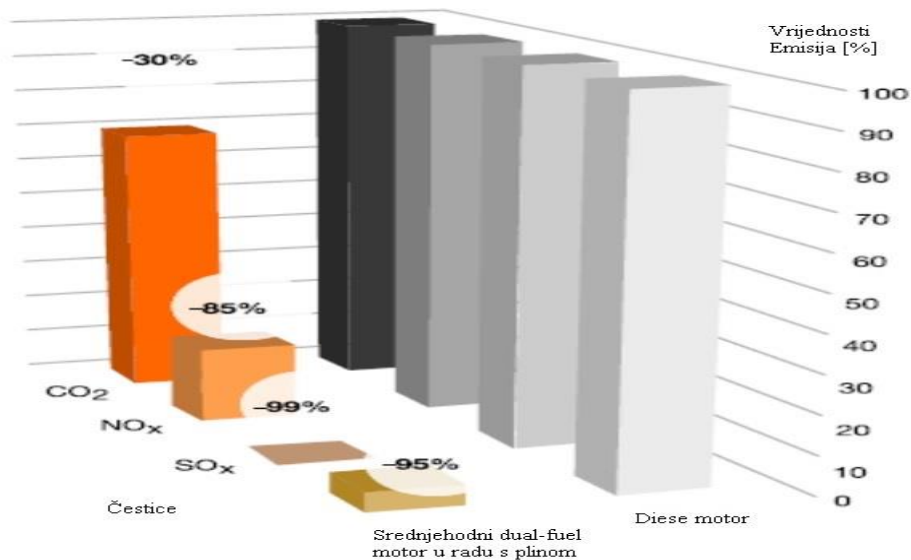
Upućivanje motora je uvijek samo na dizel, a rad na dvojno gorivo tj. LNG se prebacuje tek nakon što se rad motora na dizelsko gorivo stabilizira. Kod prebacivanja na rad na dvojno gorivo, treba izbjegavati bogatu smjesu plinovitog goriva i zraka zbog mogućeg detonativnog izgaranja. Da bi se to izbjeglo, motori na dvojno gorivo u plinskom režimu rada koriste siromašnu smjesu, odnosno imaju višak zraka. Omjer zraka i goriva je od 1,9 do 2,3.



**Slika 19. Krivulja detonativnog izgaranja i izostanka zapaljenja goriva, te područje rada motora na dvojno gorivo [14]**

Kako je područje rada za vrijeme rada motora u plinskom režimu usko (između 1,9 i 2,3) slika 18, omjer smjese zraka i plina mora biti strogo kontrolirano kako bi se izbjeglo detonativno izgaranje u cilindru ili se treba ući u područje izostanka zapaljenja usisane smjese zraka i plinskog goriva.

Razlog razvoja DF motora je ekologija. Brodski motori na dizel i HFO onečišćuju okoliš u velikim količinama. Plin je rješenje, jer smanjuje broj štetnih tvari kada ga se koristi kao gorivo.

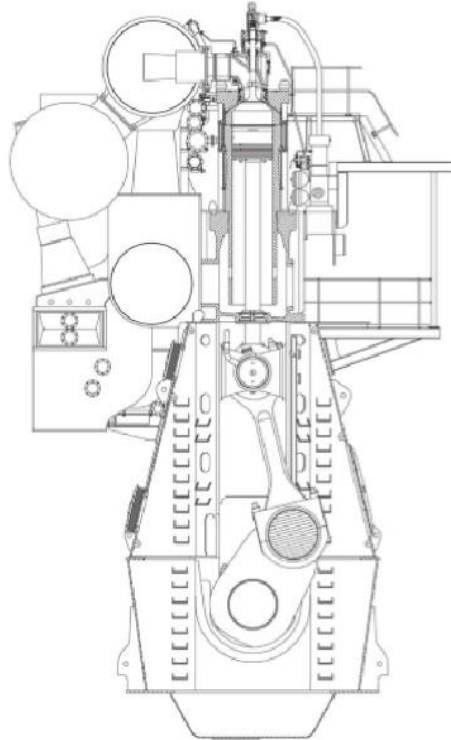


**Slika 20. Smanjenje štetnih plinova, koristeći LNG kao gorivo [13]**



## 4.2. MEGI MOTORI

Obradit će se primjer motora sa broda Creole spirit, dvotaktni dizel motor.

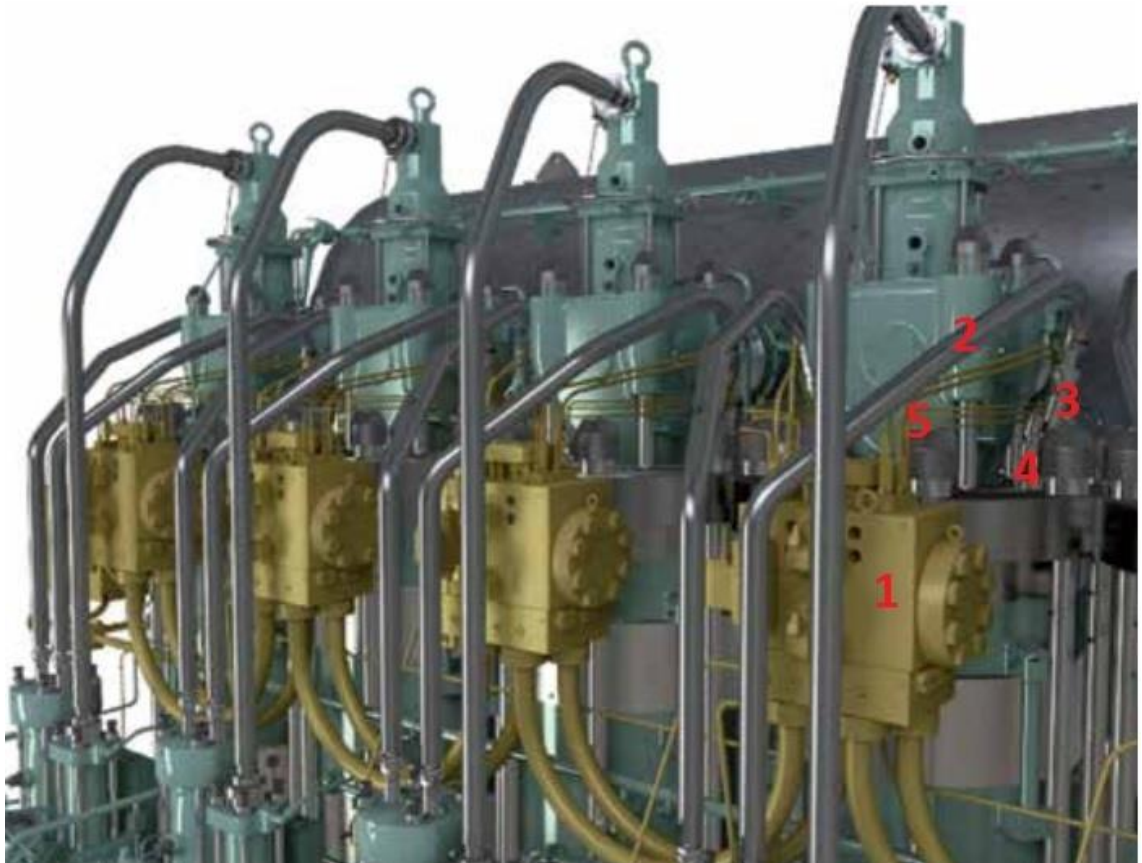


Slika 21. Hyundai-MAN B&W 5G70ME-C9.2-GI.[19]

Model		HYUNDAI-MAN B&W 5G70ME-C9.2-GI
Number of cylinder		5
Cylinder bore		700 mm
Stroke		3,256 mm
SMCR	Output	12,520 Kw
	Revolution	69.1 rpm
	MEP	1,740 kPa
	Pmax	18,500 kPa
	Mean piston speed	7.5 m/s
CSR	Output	10,775 Kw
	Revolution	65.7 rpm
	MEP	1,576 kPa
Direction of rotation (Ahead)		No.1 (at starboard side): Anti-Clockwise (looking from AFT) No.2 (at port side): Clockwise (looking from AFT)
Cooling medium	Cylinder jacket	Fresh water
	Piston	Lubricating oil
	Scav. air cooler	Fresh water
Starting system		Compressed air (max. pressure 3,000 kPa)
Fresh water inlet temp.		36 °C
Blower inlet pressure		100 kPa
Blower inlet temperature		45 °C
Relative humidity		60 %

Slika 22. Specifikacije Hyundai-MAN B&W 5G70ME-C9.2-GI [19]

Za razliku od DF motora, MAN-ovi MEGI motori su dvotaktni dizel sporohodni motori, koji mogu sagorijevati LNG unutar cilindra. Taj proces obavljaju jednako kao i kad rade na dizel, što znači da rade na dizel proces. Na svaki MAN-ov motor postoji mogućnost ugradnje sistema, tako da motor može raditi i na LNG. Tehnički gledano, jako je mala razlika između motora na standardno gorivo i motora koji koristi plin kao gorivo, dok GI (gas injection) motor pruža optimalnu fleksibilnost goriva. Na slici 23 vidjeti ćemo komponente koje trebamo modificirati i dodati na bi motor radio na plin.



**Slika 23. MEGI motor, dodatci za ubrizgavanje plina [18]**

Na slici 23 vidimo dijelove:

- 1. jedinica za ubrizgavanje plina
- 2. dovod dizel goriva
- 3. ubrizgač dizel (pilot) goriva
- 4. ubrizgač plina
- 5. dobava brtvećeg ulja

Linija za opskrbu plinom dizajnirana je s ventiliranim cijevima s dva zida (cijev unutar cijevi), uključujući HC (engl. *Hydro Carbon*) senzore za sigurnosno isključivanje sistema. Za upravljanje motorom koji koristi plin, uz ME kontrolni sustav dodan je GI

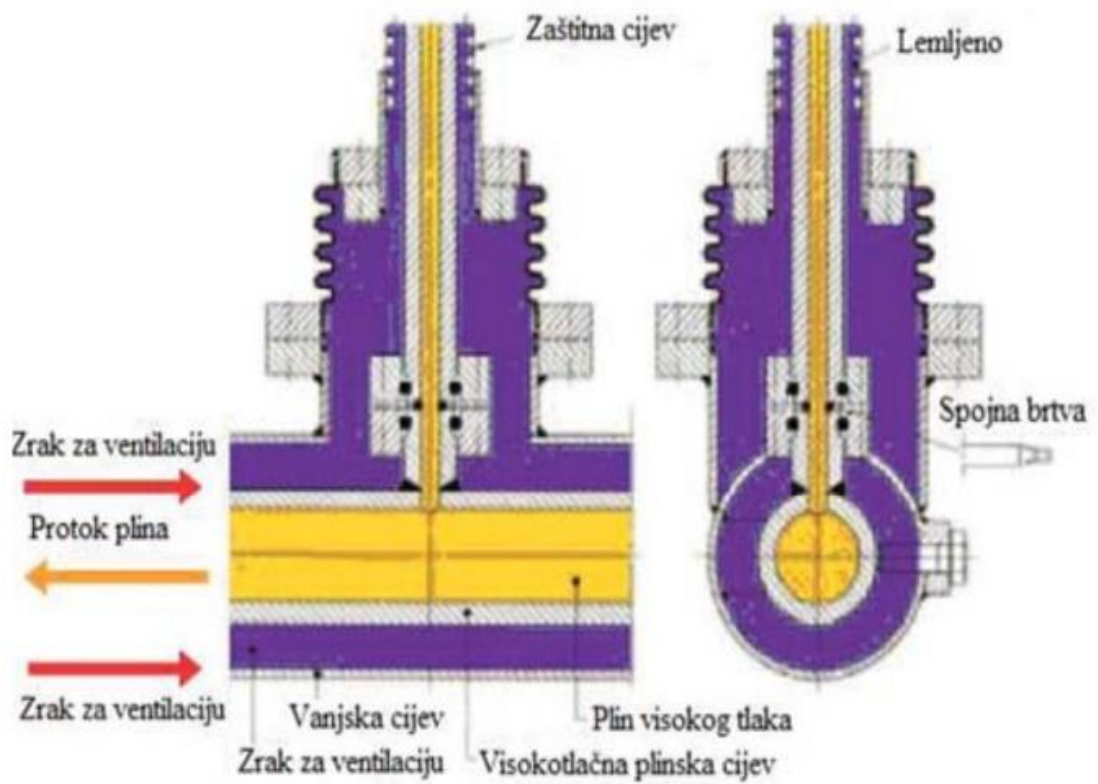
kontrolni i sigurnosni sustav. Osim ovih sigurnosnih sustava, dodani su i neki novi dijelovi, a to su:

-Ventilacijski sustav za odzračivanje prostora između unutarnje i vanjske stijenke cijevi dvostranog cjevovoda (ventilator koji usisava zrak između cijevi mora biti smješten u zoni bez prisustva prirodnog plina. Ventilatori su specijalne izvedbe, to jest izvedbe bez mogućnosti pojave iskre u njihovom radu. Zrak koji se upuhuje u cijevi sa dvostrukom stjenkom mora biti čist i suh jer bi vlažan zrak (uslijed kondenzacije vlage) mogao izazvati pojačanu koroziju i oštetiti stijenke cijevi.)

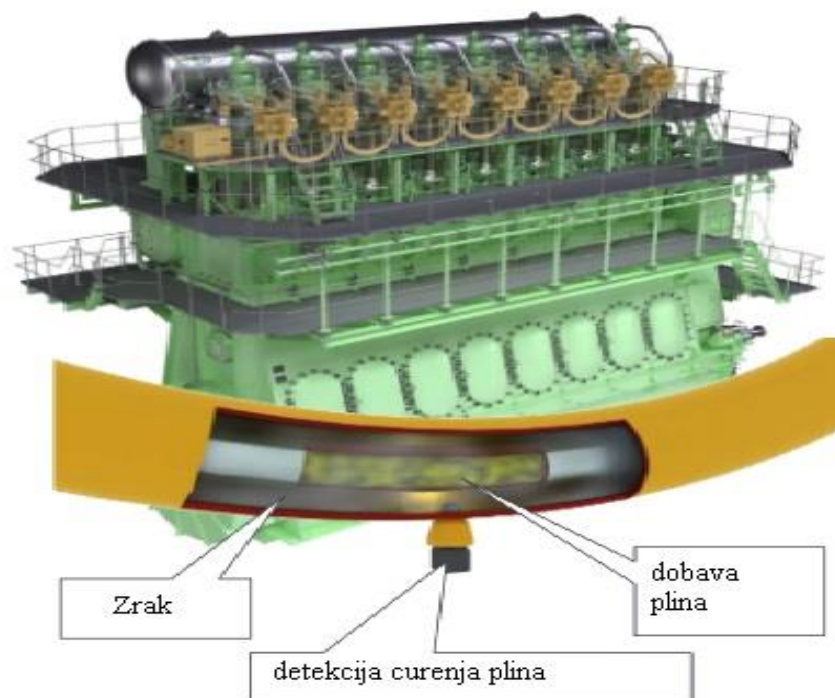
-Sustav za brtvljenje uljem, isporučivanje ulja za brtvljenje na plinske ubrizgače koji razdvajaju kontrolno ulje i plin (ovaj je sustav u potpunosti integriran u motor i brodogradilište više ne treba pregledavati ove instalacije).

-Inertni plinski sustav koji omogućava pročišćavanje plinskog sustava na motoru inertnim plinom.

-Sustav upravljanja i sigurnosti, koji uključuje analizator ugljikovodika za provjeru sadržaja ugljikovodika u zraku u cijevima s dvostrukim zidovima.

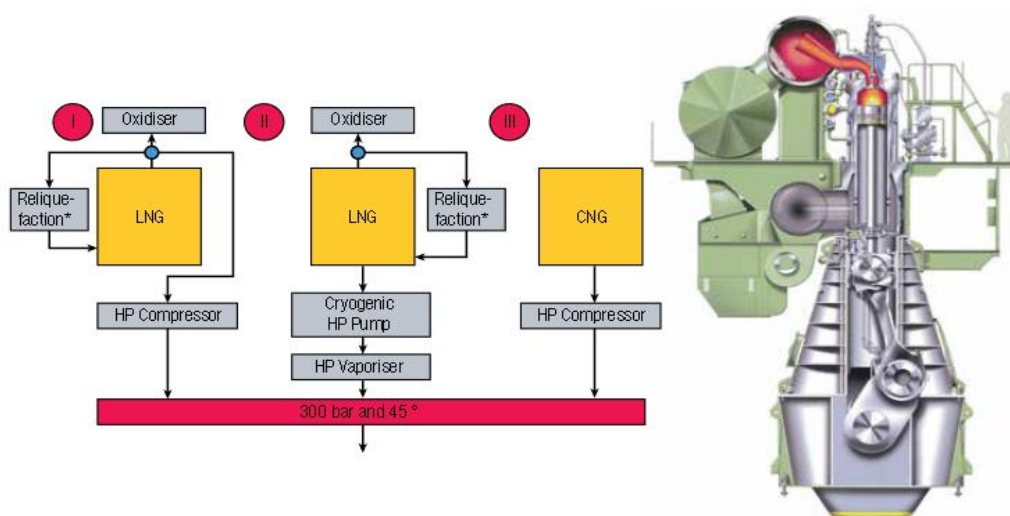


Slika 24. Presjek cijevi sa dvostrukom stijenkom [18]



**Slika 25. Sistem s dvostrukom stijenkom [17]**

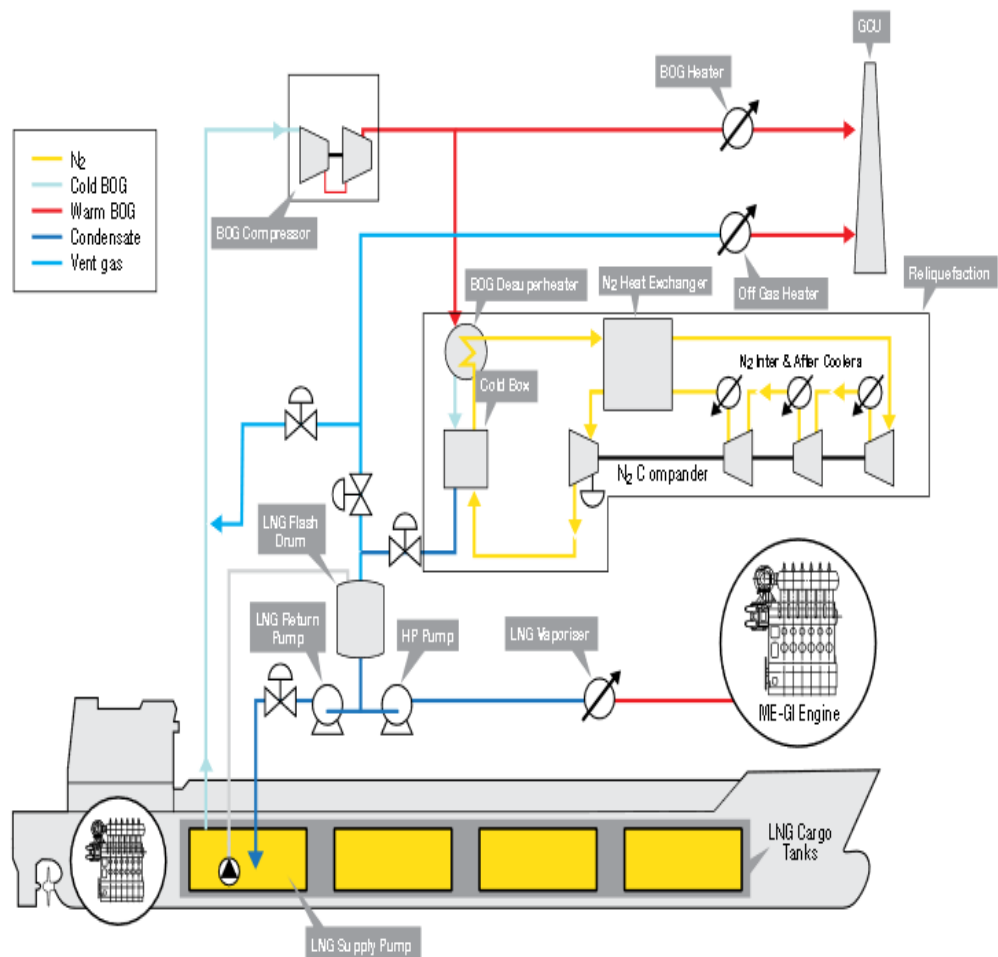
GI sistem koji skuži za kontrolu i sigurnost je dizajniran da reagira na grešku. Svi kvarovi otkriveni tijekom rada na plinsko gorivo, uključujući kvarove samog upravljačkog sustava, rezultirat će zaustavljanjem i prelaskom na HFO ili dizel gorivo, te će se dogoditi pročišćavanje i uklanjanje plina za visokotlačne plinske cijevi i kompletan sustav opskrbe plinom će ostati bez plina. Prelazak na režim dizela vrši se bez gubitka snage na motoru. Nedavna ispitivanja pokazala su da se motor ponaša potpuno normalno, kao i kada radi na dizel, tj. jednostavno je nemoguće ćuti koja vrsta goriva se gori.



**Slika 26. Tri različita načina opskrbe prirodnim plinom [18]**

Prirodni plin se može do motora dovesti na tri različita načina (slika 26), a to su:

1. LNG se uzima iz tanka, te se preko HP (engl. High Pressure) kompresora distribuira do motora, na 300 Bar i 45 C stupnjeva. Također postoji sustav reukapljivanja koji vraća dio LNG natrag u tank.
2. LNG se uzima iz tanka, te se preko cryogenic HP pumpe šalje u HP isparivač, te se onda distribuira do motora, na 300 bar i 45 C stupnjeva. Također postoji sustav reukapljivanja LNG natrag u tank.
3. Sustav je kada se prirodni plin skladišti pod tlakom u tanku, CNG (engl. *Compressed Natural Gas*). Iz tanka pod tlakom preko HP kompresora se distribuira do motora. Ovaj sistem je specifičan za brodove koji ne prevoze LNG kao teret.



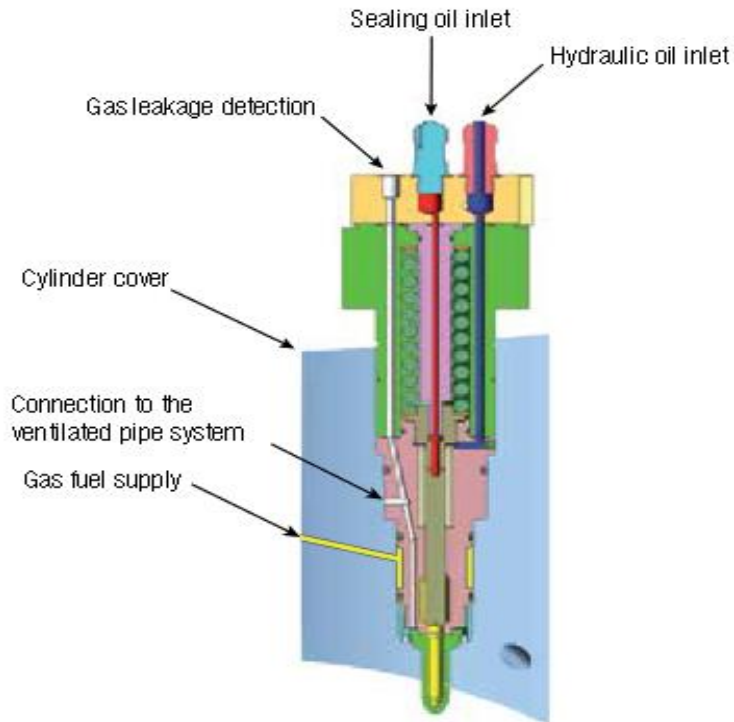
**Slika 27. Komponente koje nam trebaju biti modificirane za brodove koji imaju motore na dvojno gorivo [18]**

Dovod visokotlačnog plina (300 bar) teče kroz glavni lanac cijevi koji povezuje glavni blok i akumulator plinskog ubrizgača svakog cilindra. Ovaj lančani tip dizajna izvodi dva jako važna zadatka:

- svaku jedinicu cilindra odvajaju od ostalih u smislu dinamike plina, koristeći dobro dokazanu filozofiju dizajna MAN ME-ovog sustava za dizel.
- oni djeluju kao fleksibilni spojevi između krutog sustava glavnih cijevi i strukture motora, štiteći od izvanrednih naprezanja u lančanim cijevima uzrokovanih neizbježnim razlikama u toplinskom širenju plinovodnog sustava i strukture motora.

Budući da je cjevovod za opskrbu plinom common rail izvedbe, ventil za ubrizgavanje plina mora se upravljati pomoćnim sustavom koji koristi ulje. To se, u principu, sastoji od ME hidrauličkog upravljačkog ulja i sustava ventila ELGI (engl. *electronic gas injection valve*) & ELWI (engl. *electronical window and gas shutdown*) koji dovode ulje za visokotlačno upravljanje u ubrizgač, čime se kontrolira vrijeme otvaranja i zatvaranja plinskog ubrizgača. Rad sa dvostrukim gorivom zahtijeva ubrizgavanje i pogonskog (pilot) goriva i plinskog goriva u komoru za izgaranje. U tu se svrhu koriste različite vrste ubrizgača. Dva su za ubrizgavanje plina, a dva za pogonsko (pilot) gorivo.

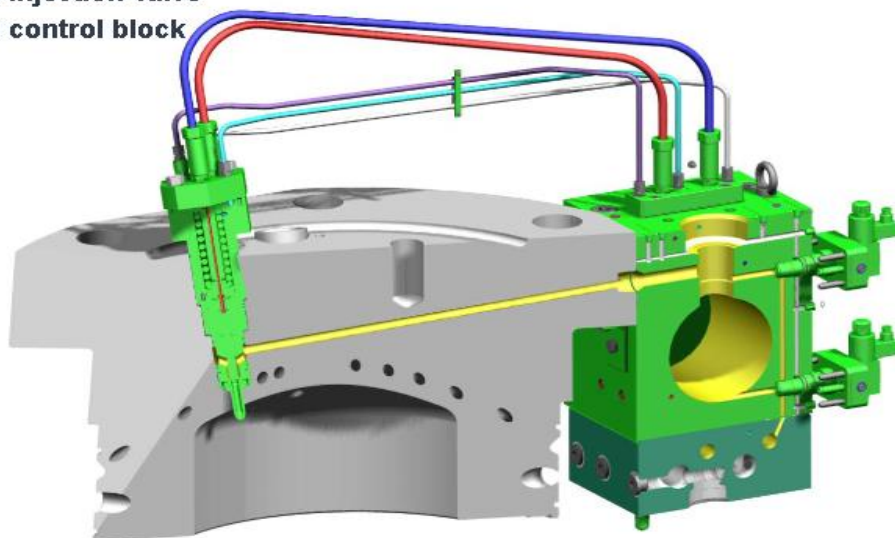
Dizajn ubrizgača za ubrizgavanje plina prikazan je na slici 28. Ovaj ubrizgač udovoljava principima tradicionalnog dizajna kompaktnog dizajna. Plin ulazi u ubrizgač za ubrizgavanje plina kroz provrte u poklopcu cilindra. Da bi se spriječilo istjecanje plina između poklopca cilindra i ubrizgača za ubrizgavanje plina, te kućišta ventila i vretena (igle), ugrađeni su brtveni prstenovi izrađeni od materijala otpornog na plin i temperaturu. Svako istjecanje plina kroz brtvene prstenove plina vodit će se kroz provrte u ubrizgaču za ubrizgavanje plina u prostor između unutarnjeg i vanjskog zaštitnog cjevovodnog sustava dvostrukog zida plinovoda, gdje će curenje plina otkriti HC sensor.



**Slika 28. Ubrizgač plina [19]**

Plin djeluje kontinuirano na vreteno (iglu) ubrizgača s max pritiskom od oko 300 bara. Da se spriječi ulazak plina u sustav za upravljanje regulacijskim uljem kroz zazor oko vretena (igle), vreteno (igla) je zabrtvljen brtvenim uljem pod pritiskom većim od tlaka plina (25-50 bara većim od tlaka plina).

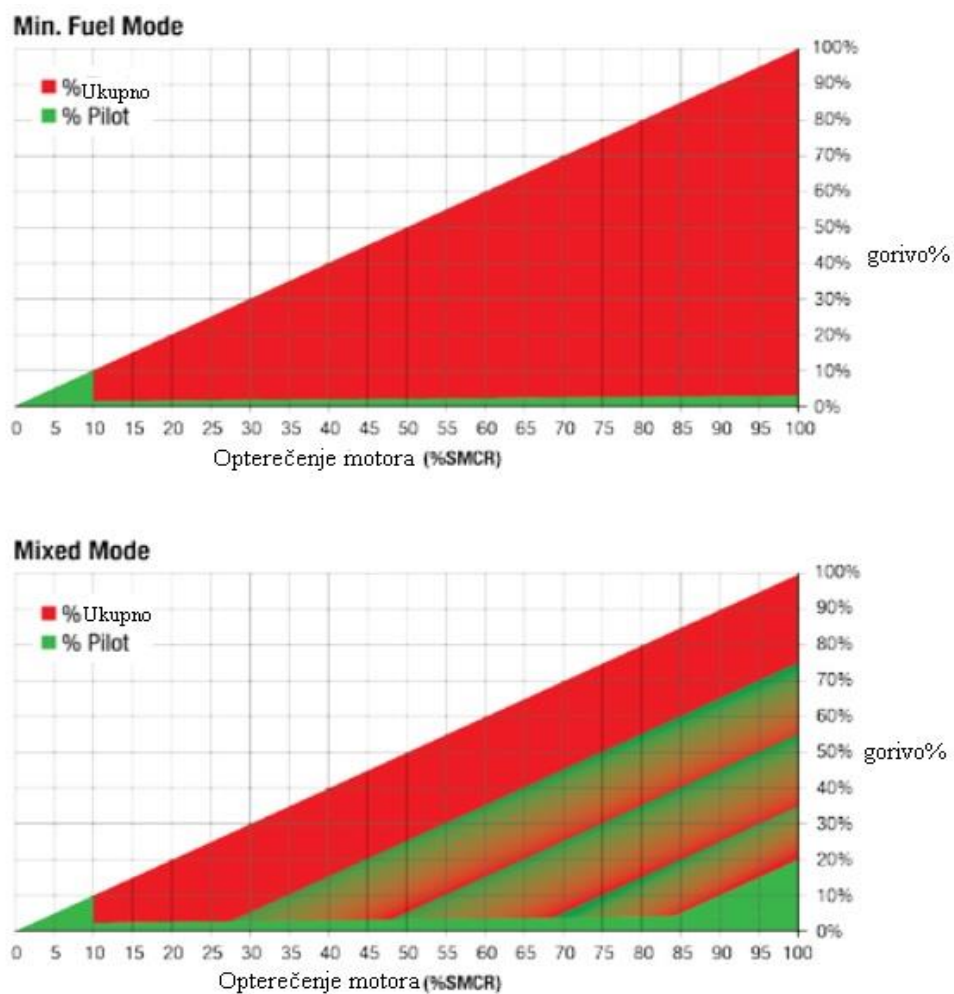
- **Gas injection valve**
- **Gas control block**



**Slika 29. Ubrizgač plina i akumulator za kontrolu plina [17]**

Jedna od prednosti pogonskog motora ME-GI je njegova fleksibilnost goriva, što je velika prednost, posebno za LNG tankere. Izgaranje plina (BOG, engl. *boil of gas*) koji zbog razlike topline isparava, odličan je za korištenje u dizel motorima, jer taj plin koji isparava, iskorištavamo na dobar način. Na početku plovidbe imamo jako malo boil off gasa jer se brod slabo pokreće, zadržava se velika količina dušika, a toplinska vrijednost je niska. Ako se brod počne micati, te se počne stvarati boil of gas, koji se može sastojati od etana i propana, tada je toplinska vrijednost velika. Dvotaktni motor s visokotlačnim ubrizgačima može sagorjevati sva ta različita goriva, a da ne utječe na pad toplinske učinkovitosti motora. Koncept upravljanja obuhvaća tri različita načina:

- Dizel-HFO način (samo dizel ili HFO se koristi kao gorivo)
- Način sa korištenjem pilot goriva
- Dual fuel način (korištenje mješanja dizel i plina)



Slika 30. Modeli korištenja različitih goriva na LNG brodovima [13]



Zbog svoje iznimne „čistoće“, dosta brodova je počelo primjenjivati LNG kao pogonsko gorivo. Ako uspoređujemo sagorijevanje HFO sa plinom, možemo vidjeti da su ispušni plinovi puno čišći. Imamo jako niske, pa skoro da i nemamo, količine sumpora. Emisije NOx i CO2 su uvelike smanjene. Za smanjenje NOx emisija možemo koristiti iste uređaje kao i kod normalnih motora, samo nemožemo koristiti sistem emulzifikacije. Najviše se koristi SCR (engl. *selective catalitic reduction*) koji može smanjiti emisije NOx za 98%.

Prosječne emisije za 6S70ME-C		Prosječne emisije za 6S70ME-GI	
Opterećenje 100%	g/kWh	Opterećenje 100%	g/kWh
CO <sub>2</sub>	577	CO <sub>2</sub>	446
O <sub>2</sub> (%)	1359	O <sub>2</sub> (%)	1340
CO	0.64	CO	0.79
NO <sub>x</sub>	11.58	NO <sub>x</sub>	8.76
HC	0.19	HC	0.39
SO <sub>x</sub>	10.96	SO <sub>x</sub>	0.88
PM (mg/m <sup>3</sup> )	0.54	PM (mg/m <sup>3</sup> )	0.34

**Slika 31. emisije ispušnih plinova kod normalnog motora i kod MEGI motora [13]**

## 5. PRIMJENA DF I MEGI MOTORA

Primjena DF i MEGI motora je najviše zato što LNG kao pogonsko gorivo smanjuje onečišćenje okoliša. Mnoge države uvele su zabranu korištenja nečistih (HFO) goriva u njihovim teritorijima. Tim područjima, ECA (engl. *Emission control areas*) koristimo dizel ili koristimo LNG. Kao što znamo, plin je čist, te je postao alternativno rješenje. Tom činjenicom počela je ugradnja te modifikacija već postojećih motora, te pretvaranje u DF i MEGI motore.

Prednosti Wartsila i MAN motora su:

- Dokazana pouzdanost
- Niski operativni troškovi
- Fleksibilnost goriva
- Smanjene emisije

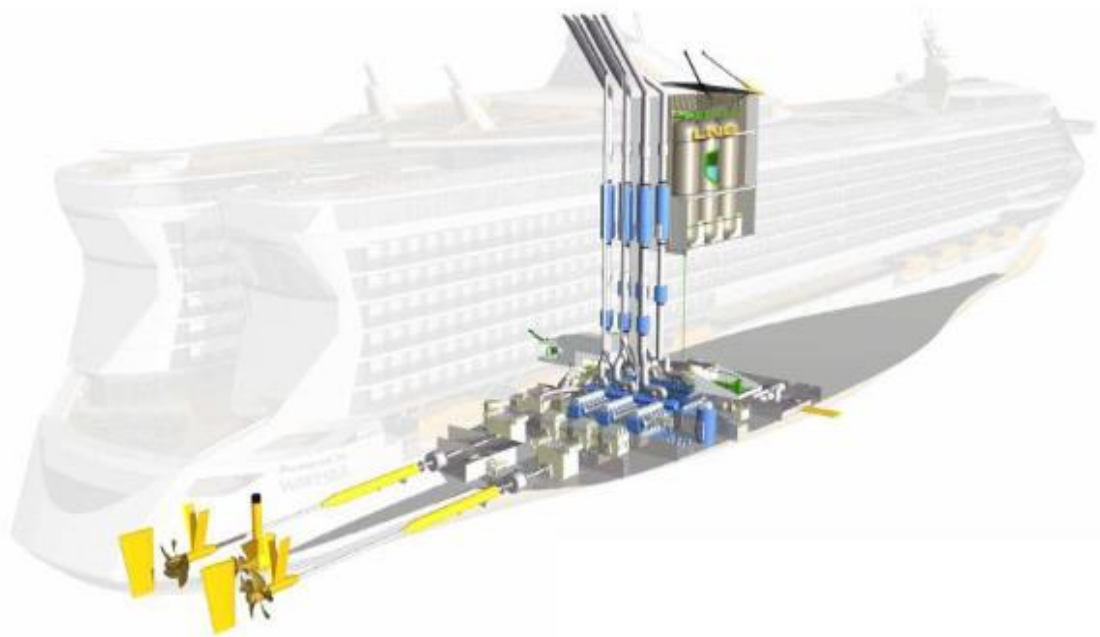
### 5.1.1. LNG BRODOVI

LNG brodovi su brodovi koji prevoze LNG. Oni svojim pokretanjem prouzrokuju BOG (engl. *boil off gas*). To je isparavanje plina uslijed pomicanja broda. Kada plin isparava mi ga trebamo ponovo ukapljiti, ohladiti i vratiti u tankove. Taj sustav oduzima puno energije, te smo osmislili način rješavanja tog problema, a to su MEGI i DF motori.

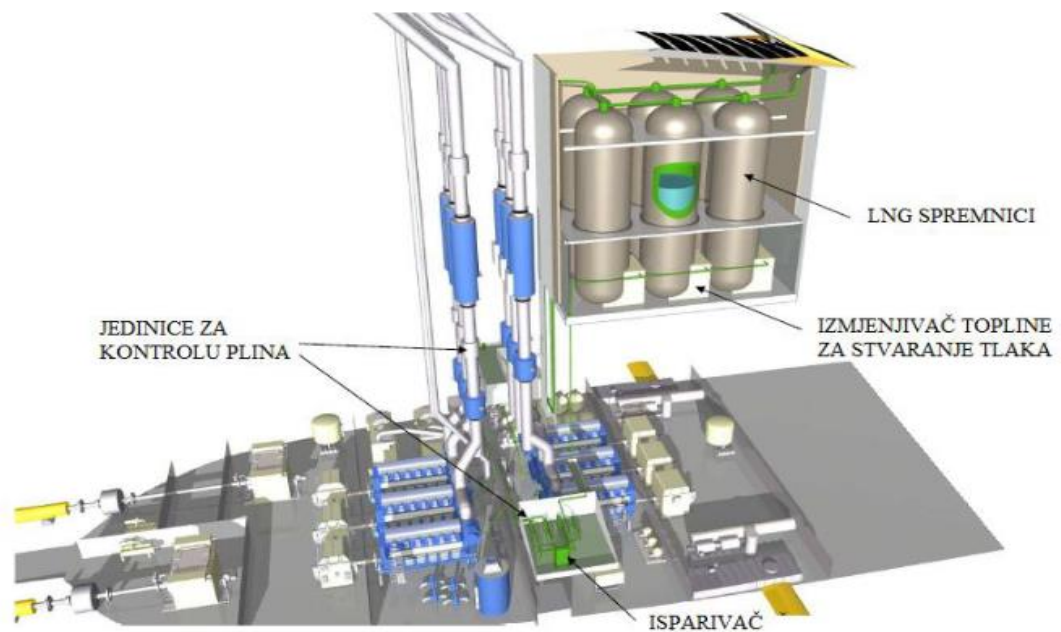


Slika 32. Creole spirit, koristi i DF i MEGI motore (generatori i propulzija) [23]

### 5.1.2. CRUISER NA LNG



Slika 33. Kruzer s DF motorima [21]



Slika 34. Postrojenje LNG-a na cruiser brodu [21]

Brod ima dizel električnu propulziju, što znači da su električni propeleri, a električnu struju dobivamo iz Wartsila DF motora.

### 5.1.3. KONTEJNERSKI BROD NA LNG



**Slika 35. DNV GL-ov kontejner sa LNG pogonom [20]**

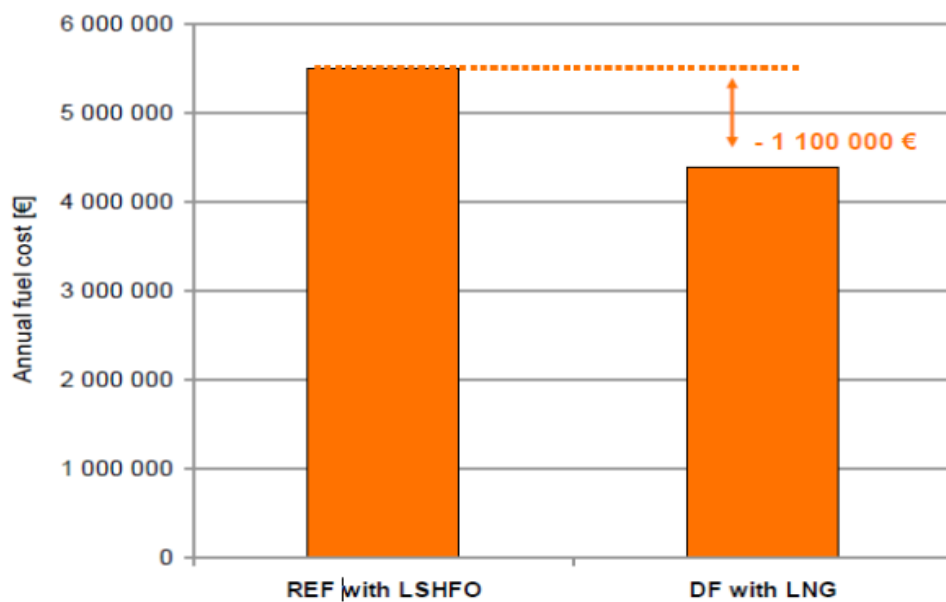
Kontejnerski brod koji je trebao biti građen u Brodosplitu, od strane kompanije DNV GL. Zbog ekoloških emisija, problem je trebao biti riješen s DF motorima.

### 5.1.4. RORO BRODOVI NA LNG

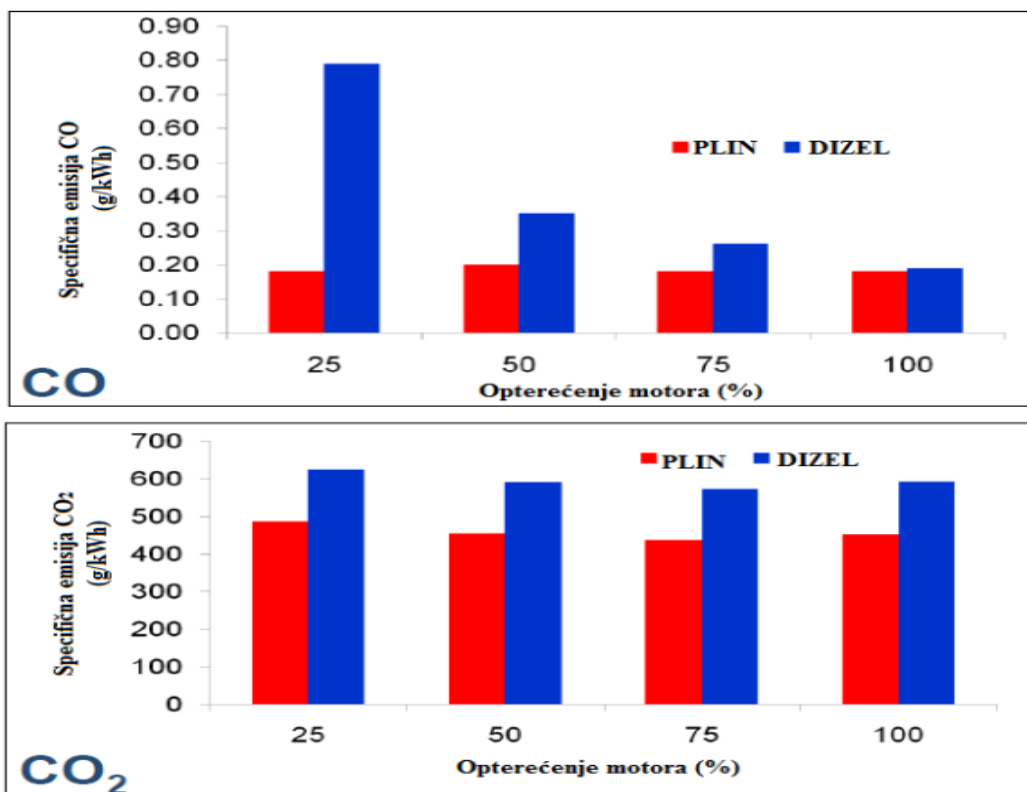


**Slika 36. najveći RORO sa LNG pogonom [22]**

Primjena dual fuel motora pridonosi uštedi goriva i novca, te smanjenju onečišćavanja okoliša. Uspoređujući godišnji rad dual fuel motora i motora koji koristi dizel ili teško gorivo stvara se razlika od preko milijun eura (slika 35).



Slika 37. Troškovi kada se koristi klasično gorivo i troškovi DF motora [21]



Slika 38. Emisije CO i CO<sub>2</sub>, koristeći dizel i plin (LNG).[16]

## 6. ZAKLJUČAK

Uz dizel i HFO, prirodni plin je postao jedno od najvažnijih goriva današnjice. Nalazišta zemnog plina konstantno se pronalaze, pa se tako i potražnja za plinom kao gorivom neprekidno povećava. Prirodni plin je plin koji svojim izgaranjem ima dosta manje štetnih proizvoda. Manji je SO<sub>x</sub>, manji je NO<sub>x</sub>, manji je CO i CO<sub>2</sub>, ali i niska mu je cijena te kao takav je pogodan da bude gorivo budućnosti.

Iz razloga, što je plin jako dobar kao gorivo, veliki proizvođači motora su osmislili nove tehnologije koje će ugrađivati na nove, ali i modificirati stare dizelske brodske motore, tako da mogu sagorijevati plin unutar cilindra. Dvije kompanije, MAN i Wartsila, su osmislile tehnologije: DF- Wartsila i MEGI- MAN. Jednostavnom ugradnjom i modifikacijom na motore, omogućava se da brodski dizel motor, bio on četverotaktan ili bio dovotaktan, sagorijeva istovremeno dvije vrste goriva u cilindru, tj. da za primarno gorivo koristi plin, a dizel kao sekundarno, tj. gorivo da upali smijesu plina i zraka.

U novije vrijeme, kako se plin pokazao kao jako dobar, primjena ove tehnologije počela se modificirati na razne vrste brodova: na kontejeraše, cruisere, RO-RO brodove, jer se omogućava da brod uštedi novac na godišnjoj bazi (jer je LNG jeftiniji od diesela), ali da se zadovolje EKO norme.

U završnom radu su se obradili 4T i 2T motori na dvojno gorivo ugrađeni na brodu Creole spirit od kompanije Teekay Co.

Detaljno su objašnjeni najvažniji sustavi za pripremu goriva i pravilno funkcioniranje tehnološki zahtjevnih procesa kod MAN- MEGI (Hyundai-MAN B&W 5G70ME-C9.2-GI) i Wartsila- DF (WARTSILA 9L34DF & WARTSILA 6L34DF) motora na dvojno gorivo.

## LITERATURA

- [1] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=22729> (PRISTUPLJENO 12.08.2020)
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dizel> (PRISTUPLJENO 12.08.2020)
- [3] [https://www.researchgate.net/figure/Properties-of-processed-natural-gas\\_tbl1\\_262691939](https://www.researchgate.net/figure/Properties-of-processed-natural-gas_tbl1_262691939) (PRISTUPLJENO 12.08.2020)
- [4] [https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3695480/mod\\_resource/content/1/05.%20SUSTAV%20GORIVA.pdf](https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3695480/mod_resource/content/1/05.%20SUSTAV%20GORIVA.pdf) (SKRIPTA DR.SC. BRANKA LALIĆA - SUSTAV GORIVA, PRISTUPLJENO 12.08.2020)
- [5] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=42132> (PRISTUPLJENO 13.08.2020)
- [6] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Dvotaktni\\_motor](https://hr.wikipedia.org/wiki/Dvotaktni_motor) (PRISTUPLJENO 15.08.2020)
- [7] <https://www.pfst.unist.hr/hr/sadasnji-studenti/nastava/nastavni-materijali?format=raw&task=download&fid=4105> ( SKRIPTA DR.SC IVANA KOMARA- PODJELA MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM, PRISTUPLJENO 15.08.2020)
- [8] <http://engineering.myindialist.com/2009/lab-manual-to-study-about-4-stroke-diesel-and-4-stroke-petrol-engine/#.X0Zr0TVJ1PY> (PRISTUPLJENO 15.08.2020)
- [9] Wartsila 34DF product guide
- [10] Wartsila 34DF brochure
- [11] Wartsila 34DF LNG shipping solution
- [12] <https://www.youtube.com/watch?v=6mifHJ3MkfE> (PRISTUPLJENO 17.08.2020)
- [13] MAN B&W : MEGI concept
- [14] MAN B&W : Engine ME-GI gas-ready ship
- [15] MAN B&W : A Tehnical, operational and cosr-effective solution for ships fuelled by gas
- [16] MAN B&W : Engine: ME Engine –the new generation of Diesel Engine
- [17] MAN B&W : Diesel and Turbo
- [18] MAN B&W L70ME-C.8.2-GI: Project guide
- [19] Creole spirit (Teekay shipping): Machinery operating manual
- [20] <https://www.dnvgl.com/news/brodosplit-builds-four-Ing-fuelled-container-ships-with-dnv-gl-class-51489> (PRISTUPLJENO 18.08.2020)
- [21] Tirelli G.: WärtsiläDual-Fuel Engines, Rijeka, September 2009.

- [22] <https://wallenius-sol.com/en/worlds-largest-Ing-oro> (PRISTUPLJENO 20.08.2020)
- [23] <https://www.flickr.com/photos/teekaycorp/34325356615> (PRISTUPLJENO 20.08.2020)



## POPIS SLIKA

Slika 1. Standard iz 2017 za laka brodska goriva (dizel) [4] .....	3
Slika 2. Standard iz 2017 za teška brodska goriva (HFO) [4].....	4
Slika 3. Karakteristike LNG-a [3].....	5
Slika 4. Taktovi 4T motora [7] .....	7
Slika 5. p-v i p-a dijagram 4T motora [7] .....	7
Slika 6. Taktovi 2T motora [7] .....	8
Slika 7. P-v dijagram 2T motora [7] .....	9
Slika 8. Ispiranje cilindara kod 2T motora [6] .....	10
Slika 9. Teoretski P-v dijagram Otto procesa [8] .....	11
Slika 10. Teoretski P-v dijagram dizel procesa [8].....	11
Slika 11. Wartsila 9L34DF [19] .....	13
Slika 12. Wartsila 6L34DF [19] .....	14
Slika 13. Osnovne karakteristike 9L34DF i 6L34DF [19].....	14
Slika 14. Ubrizgač dizela na DF motorima [9].....	15
Slika 15. Cijevovod plina na DF motoru [9] .....	16
Slika 16. Ubrizgač plina i glava motora [9] .....	17
Slika 17. Smjesa LNG i zraka, prije ulaza u cilindar [12] .....	18
Slika 18. Paljenje smjese malom količinom dizela [12] .....	18
Slika 19. Krivulja detonativnog izgaranja i izostanka zapaljenja goriva, te područje rada motora na dvojno gorivo [14].....	19
Slika 20. Smanjenje štetnih plinova, koristeći LNG kao gorivo [13].....	19
Slika 21. Hyundai-MAN B&W 5G70ME-C9.2-GI.[19] .....	20
Slika 22. Specifikacije Hyundai-MAN B&W 5G70ME-C9.2-GI [19] .....	20
Slika 23. MEGI motor, dodatci za ubrizgavanje plina [18] .....	21
Slika 24. Presjek cijevi sa dvostrukom stijenkom [18].....	22
Slika 25. Sistem s dvostrukom stijenkom [17] .....	23
Slika 26. Tri različita načina opskrbe prirodnim plinom [18] .....	23
Slika 27. Komponente koje nam trebaju biti modificirane za brodove koji imaju motore na dvojno gorivo [18] .....	24
Slika 28. Ubrizgač plina [19].....	26
Slika 29. Ubrizgač plina i akumulator za kontrolu plina [17] .....	26

Slika 30. Modeli korištenja različitih goriva na LNG brodovima [13].....	27
Slika 31. emisije ispušnih plinova kod normalnog motora i kod MEGI motora [13] .....	28
Slika 32. Creole spirit, koristi i DF i MEGI motore (generatori i propulzija) [23] .....	29
Slika 33. Kruzer s DF motorima [21] .....	30
Slika 34. Postrojenje LNG-a na cruiser brodu [21] .....	30
Slika 35. DNV GL-ov kontejner sa LNG pogonom [20].....	31
Slika 36. najveći RORO sa LNG pogonom [22] .....	31
Slika 37. Troškovi kada se koristi klasično gorivo i troškovi DF motora [21] .....	32
Slika 38. Emisije CO i CO <sub>2</sub> , koristeći dizel i plin (LNG).[16].....	32

