

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

Marko Mencer

**PREDNOSTI PRIRODNOG PLINA KAO POGONSKOG
ENERGENTA BRODSKIH MOTORA**

Magistarski rad

Rijeka, prosinac 2012.

PREDGOVOR

Glavna motivacija za izradu ovog rada je razmišljanje o alternativnim izvorima goriva za pogon brodskih motora. Prirodni plin, o kojem govori poglavlje 2, se do nedavno smatrao kao višak i spaljivao u obliku baklje, što je predstavljalo veliki gubitak energije. Prirodni plin postoji u sklopu naftnih izvorišta ili u zasebnim izvorištima. Ideja o korištenju prirodnog plina kao pogonskog energenta upravo proizlazi iz tih saznanja. Sama infrastruktura za obradu i transport prirodnog plina zahtijeva velika novčana sredstva, što za sobom povlači automatski razvitak i napredak regije u kojoj se infrastruktura za obradu i transport prirodnog plina nalazi. Izgradnja infrastrukture ovisi i o području koje je geološki i zemljopisno bogato plinom, s tim da tehnologija povezivanja cijevovodima omogućuje izgradnju terminala i na siromašnijim područjima, ako potencijalno predstavljaju dio plinske mreže.

Brodski strojni sustavi su jednostavnije izvedbe u smislu količine dijelova sustava, naspram konvencionalnih sustava goriva koji sadrže separatore, skladišne, taložne i dnevne tankove, pripremne jedinice goriva, grijače. Znači ideja je dovoditi plin gotovo direktno iz skladišnog tanka plina prema motoru bez prethodne pripeme koju inače zahtijevaju konvencionalni sustavi. Neki od prijedloga se mogu vidjeti u poglavlju 5. U svrhu opravdavanja svoje hipoteze kojom želim prikazati plin kao prihvatljivije gorivo za pogon brodskih motora, motore na plinsko gorivo dijelimo u 3 skupine: OG (Otto – Gas, Otto – plinski motori), DG (Diesel – Gas, Dizel – plinski motori i GD (Gas – Diesel, Plinski – Dizelski motori). Sve tri skupine spadaju pod DF (Dual Fuel motore), s tim da prve dve skupine rade kao Otto motori, koji kao izvor paljenja koriste električnu iskrnu sa svijećice ili ubrizgavanje 3 – 5% pilot dizelskog goriva, dok se treća skupina motora bazira na izmjeni ubrizganog pogonskog energenta. Ubrizgavanje se vrši pod tlakom ubrizgavanja naizmjenice. Prvo se ubrizgava plin, a zatim pilot dizelsko gorivo čiji plamen služi kao izvor paljenja smjese plina i zraka. Prve dve skupine spadaju pod motore manjih snaga, dok se treći tip motora uglavnom odnosi na glavne motore. Osnovni polutanti iz ispušnih plinova motora, pod udarom propisa o zaštiti okoliša su NO_x i čađa. Prirodni plin izgaranjem po svojoj prirodi stvara zanemarivo malu količinu čađe u odnosu na dizelska i teška goriva, dok je količina NO_x smanjena, što se vidi iz poglavlja 4. Povećana emisija HC i CO se tretiraju katalizatorom trostrukog djelovanja.

Današnji motori imaju stupanj djelovanja približan dizelskim motorima. Prvi dio ispitivanja iz poglavlja 4 vrši se na motoru: Mercedes-Benz, OM – 355 DG., čime se dobiva uvid u rad DF motora na djelomičnim opterećenjima. Rezultati i način ispitivanja mogu poslužiti za daljnja ispitivanja na svim opterećenjima i režimima rada motora. Drugi dio istraživanja se vrši na jednocilindričnom, 4 – taktom, dizelskom motoru (DI), tehnološkom demonstratoru i prikazuje odnose između polutanata iz ispušnih plinova izgaranja, omjera zraka i goriva AFR, omjera plina i dizelskog goriva u smjesi za 4 područja opterećenja motora.

Za vrijeme plovidbe na brodovima Tankerske plovidbe Zadar, autor je više puta vršio mjerenja otvorenih indikatorskih dijagrama motora uz pomoć MIP AUTRONICA računala i uređaja za indiciranje.

Zahvaljujem se prvenstveno Fakultetskom vijeću Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci koje mi je u više navrata omogućilo produljenje magistarskog studija što mi je bilo prijekopotrebno zbog mojih profesionalnih i privatnih razloga i omogućilo da obaveze vezane za magistarski studij napokon i izvršim. Posebno bi zahvalio svom mentoru: Red.prof.dr.sc.

Vladimiru Medici na strpljivim i učinkovitim objašnjenjima i razgovorima, uputama te iscrpnoj i kvalitetnoj literaturi koju je nesebično podijelio samnom.

Na kraju bih zahvalio svojoj obitelji i prvenstveno supruzi Nini, bez koje ovaj rad kao i magistarski studij nebi bili napokon privedeni kraju.

SADRŽAJ

1	UVOD	1
	1.1. Definiranje problema	2
	1.2. Postavljanje cilja	2
	1.3. Ocjena dosadašnjih istraživanja	3
	1.4. Metode istraživanja	3
	1.5. Struktura magistarskog rada	3
2	UKAPLJENI PRIRODNI PLIN	5
	2.1. Porijeklo i razvoj prirodnog plina u svojstvu pogonskog energenta	5
	2.2. Sastav prirodnog plina	10
	2.3. Karakteristike prirodnog plina	13
	2.3.1. Ogrijevna vrijednost plinovitih goriva	15
	2.3.2. Metanski broj (MB)	15
	2.3.3. Laminarna brzina plamena	16
	2.3.4. Granica paljenja	16
	2.3.5. Jednadžba stanja	17
	2.3.6. Ogrijevna moć prirodnog plina	19
	2.3.7. Wobbe broj (Wobbe indeks – W_i)	19
	2.4. Dobivanje i obrada prirodnog plina	21
	2.4.1. Postupak obrade prirodnog plina	23
	2.4.2. Procesi ukapljivanja	25
	2.4.3. Kombinirana obrada plina i postrojenje za ukapljivanje	25
	2.4.4. Odvajanje kiselih plinova	25
	2.4.5. Dušik	26
	2.4.6. Isušivanje (dehidracija)	26
	2.4.7. Rashladni krug	26
	2.5. Transport i skladištenje prirodnog plina	26
	2.5.1. Skladištenje ukapljenog prirodnog plina	27
	2.5.2. Transport prirodnog plina brodom	29
3	PRIRODNI PLIN U SVOJSTVU POGONSKOG ENERGENTA BRODSKIH MOTORA	33
	3.1. Podjela DF motora po principu rada	34
	3.1.1. Otto-plinski princip rada (OG – Otto Gas)	39

3.1.2.	Dizelsko-plinski princip rada (DG – Diesel Gas)	41
3.1.3.	Plinsko-Dizelski princip rada (GD - Gas Diesel)	43
3.1.3.1.	MAN Diesel, ME-GI serija motora	44
3.1.4.	Goriva smjesa vodika i zraka, kao pogonsko gorivo GD motora	49
3.2.	Proces, sustavi izgaranja i parametri o kojima ovisi rad DF motora	50
3.2.1.	Pokazatelji o kojima ovisi rad DF motora	56
3.2.2.	Postizanje smanjenih emisija NO _x kod rada DF motora	58
3.2.3.	Upravljanje sastavom gorive smjese DF motora	61
3.2.3.1.	Ventil za regulaciju protoka zraka (<i>intake throttle valve</i>)	62
3.2.3.2.	Optok (<i>by-pass</i>) plinske strane turbopuhala	62
3.2.3.3.	Optok (<i>by-pass</i>) zračne strane turbopuhala	62
3.2.3.4.	Regulacija sastava gorive smjese u odnosu na $p_{sr,i}$	62
3.3.	Sigurnosni sustavi GD motora	64
3.3.1.	Upućivanje motora u području rada na plin	67
3.3.2.	Upućivanje motora u području rada na dizelsko gorivo	67
3.3.3.	Upućivanje motora u <i>blackout</i> području rada	67
3.3.4.	Prebacivanje područja rada motora: plin/dizelsko gorivo, dizelsko gorivo/plin	68
3.3.5.	Kritične točke kod odabira područja rada	69
3.3.5.1.	Zaustavljanje, izbacivanje iz pogona i zaustavljanje motora u nuždi	70
3.3.6.	Odnosi između: izlazne snage motora, brzine i opterećenja	70
3.4.	Izvedbe četverotaktnih srednjehodnih DF motora Wärtsilä i MAN B&W	72
3.4.1.	Motor Wärtsilä 50DF	74
3.4.2.	Motor MAN 51/60DF	80
3.4.3.	SaCoS sustav upravljanja i nadzora	83
3.4.4.	MAN Diesel motori sa ubrizgavanjem plina (<i>PGI – Performance Gas Injection</i>) sa osvrtom na Wärtsilä SG motor (<i>Spark gas</i>)	84
3.4.5.	Značajke motora na plinski energent po MAN B&W Diesel	86
4	ANALIZA DOBIVENIH VRIJEDNOSTI PODATAKA IZ RADA DF MOTORA PRIMJENOM MODELIRANJA	89
4.1.	Opis modela i pretpostavke	89
4.2.	Matematički model	90
4.2.1.	Model mlaza pilot goriva	90
4.2.2.	Analitički model plinskog goriva	94

4.3. Primjena modela	95
4.3.1. Promjena brzine oslobađanja topline za različite vrijednosti pretička zraka λ	97
4.3.2. Promjena kuta ubrizgavanja pilot dizelskog goriva	98
4.3.3. Promjena količine ubrizgavanja pilot dizelskog goriva	100
4.3.4. Prigušenje količine zraka za izgaranje	102
4.4. Zaključak o matematičkom modelu	104
4.5. Analiza emisija ispušnih plinova DF motora, dobivene izgaranjem prirodnog plina i dizelskog goriva	104
4.5.1. Uvjeti ispitivanja	106
4.6. Rezultati i razmatranje	107
4.6.1. Stupanj djelovanja i brzina oslobađanja topline	108
4.6.2. Temperatura ispušnih plinova	110
4.6.3. Dušični oksidi (NO_x)	111
4.6.4. Ugljični monoksid (CO)	112
4.6.5. Neizgoreni ugljikovodici (HC)	113
4.6.6. Čađa (Soot)	114
4.6.7. Zaključak	115
5 PRIJEDLOZI I MOGUĆNOSTI SKLADIŠTENJA UKAPLJENOG PRIRODNOG PLINA U SVOJSTVU POGONSKOG ENERGENATA BRODSKIH MOTORA (Wärtsilä)	117
6 ZAKLJUČAK	121
7 LITERATURA	125
POPIS SLIKA	127
POPIS TABLICA	130
POPIS OZNAKA	130
Popis indeksa	130
Popis simbola	131
Popis kratica	132