

Analiza potencijala alternativnih goriva u pomorskom prometu

Pražić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:616336>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Pražić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Luka Pražić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru, na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Luka Pražić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Pražić** JMBAG: **0035215153**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza potencijala alternativnih goriva u pomorskom prometu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Assessment of potential of alternative fuels in marine sector**

Opis zadatka:

Ekološki kriteriji u pomorskom prometu sve su rigorozniji, a cijene fosilnih goriva, koje imaju izražen utjecaj na ukupne operativne troškove broda, u posljednje vrijeme značajno su porasle. U posljednjih desetak godina u literaturi se intenzivno razmatra primjenjivost alternativnih goriva u pomorskom prometu, pri čemu se obrađuju različiti aspekti, poput ekonomskih, ekoloških, sigurnosnih, logističkih, itd. U završnom radu je potrebno analizirati potencijal alternativnih goriva u pomorskom prometu, na primjeru jednog broda za priobalnu, te jednog za preoceansku plovidbu, podrazumijevajući prethodno navedene aspekte. U tom smislu, zadatak treba sadržavati:

- pregled novijih istraživanja vezanih za primjenu alternativnih goriva na brodovima,
- pregled različitih vrsta alternativnih goriva, njihovih fizikalnih i kemijskih značajki, te prednosti i nedostataka u odnosu na lako, odnosno teško dizelsko gorivo,
- pregled konfiguracija brodskih energetske sustava pogonjenih alternativnim gorivima,
- analizu primjenjivosti odabranih alternativnih goriva na jednom brodu za priobalnu plovidbu,
- analizu primjenjivosti odabranih alternativnih goriva na jednom brodu za preoceansku plovidbu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimír

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	PREGLED BRODSKIH GORIVA	2
2.1	Konvencionalna brodska goriva.....	2
2.1.1	Teško loživo ulje (HFO)	2
2.1.2	Lako brodsko dizelsko gorivo (MDO).....	3
2.1.3	Plavi dizel.....	3
	Alternativna brodska goriva	4
2.1.4	Biodizel.....	5
2.1.5	Ukapljeni prirodni plin (LNG).....	7
2.1.6	Vodik.....	9
2.1.7	Amonijak.....	11
2.1.8	Metanol	12
3	PREGLED ALTERNATIVNIH KONFIGURACIJA BRODSKIH ENERGETSKIH SUSTAVA.....	14
3.1	Dizelski pogon	14
3.2	Električni pogon.....	16
3.3	Dizel - električni pogon.....	16
3.4	Dual fuel Dizel- LNG pogon	17
3.5	Dual fuel Dizel - Vodik pogon.....	19
4	ANALIZA PRIMJENJIVOSTI ALTERNATIVNIH GORIVA NA PRIMJERU BRODA ZA UNUTARNJU I PREKOOCEANSKU PLOVIDBU	21
4.1	Trajekt Kornati.....	21
4.2	Kontejnerski brod One Mackinac	28
5	ANALIZA REZULTATA	36
6	ZAKLJUČAK.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1.	Goriva u pomorskom prometu [8].....	4
Slika 2.	Gustoća energije goriva [8]	5
Slika 3.	Princip rada motora na vodik [20].....	11
Slika 4.	Konfiguracija dizelskog pogona [28]	15
Slika 5.	Konfiguracija električnog pogona [28]	16
Slika 6.	Konfiguracija Dual fuel Dizel-LNG [28]	17
Slika 7.	Motor na dvojno gorivo u dizelskom režimu rada [4].....	18
Slika 8.	Motor na dvojno gorivo u plinskom režimu rada [4]	18
Slika 9.	Trajekt Kornati [34].....	21
Slika 10.	Ruta Ploče-Trpanj [35].....	22
Slika 11.	Specifična cijena analiziranih goriva	24
Slika 12.	Donja ogrjevna moć analiziranih goriva	25
Slika 13.	Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva	26
Slika 14.	Trošak po prijeđenoj udaljenosti za analizirana goriva.....	27
Slika 15.	Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za trajekt	28
Slika 16.	Kontejnerski brod One Mackinac [38].....	28
Slika 17.	Ruta Rotterdam-Busan [39].....	29
Slika 18.	Specifična cijena analiziranih goriva	31
Slika 19-	Donja ogrjevna moć analiziranih goriva	32
Slika 20.	Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva	33
Slika 21.	Trošak po prijeđenoj udaljenosti za analizirana goriva.....	34
Slika 22.	Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za kontejnerski brod.....	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva vodika i dizelskog goriva [7]	3
Tablica 2. Usporedba svojstava dizela i biodizela [9]	6
Tablica 3. Usporedba faktora emisija štetnih plinova (g/g goriva) [13]	8
Tablica 4. Prednosti i nedostaci brodskih goriva [28]	13
Tablica 5. Podjela dizelskih motora [29]	15
Tablica 6. Karakteristike trajekta i rute plovidbe [35]	22
Tablica 7. Specifična cijena analiziranih goriva [36]	23
Tablica 8. Donja ogrjevna moć analiziranih goriva [37]	24
Tablica 9. Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva	25
Tablica 10. Trošak po prijeđenoj udaljenosti za analizirana goriva	26
Tablica 11. Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za trajekt	27
Tablica 12. Karakteristike kontejnerskog broda i rute plovidbe[40]	29
Tablica 13. Specifična cijena analiziranih goriva [36]	30
Tablica 14. Donja ogrjevna moć analiziranih goriva [37]	31
Tablica 15. Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva	32
Tablica 16. Trošak po prijeđenoj udaljenosti za analizirana goriva	33
Tablica 17. Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za kontejnerski brod	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>EC</i>	kWh/nm	Potrošnja energije
FAME		Fatty Acid Methyl Ester
HFO		Heavy Fuel Oil
IFO		Intermediate Heavy Fuel Oil
LGHFO		Low Grade Heavy Fuel Oil
MDO		Marine Diesel Oil
MGO		Marine Gasoil
$P_{AE,ave}$	kW	Prosječna snaga pomoćnih motora
P_{ave}	kW	Prosječna snaga
$P_{ME,ave}$	kW	Prosječna snaga glavnog motora
SOFC		Gorivni članak s čvrstim oksidom kao elektrolitom
TEU		Kapacitet standardnog ISO kontejnera
v_{ave}	m/s	Prosječna brzina broda

SAŽETAK

Pomorski prijevoz je najučinkovitiji i najjeftiniji način transporta robe, a većina svjetske trgovine se odvija morem. Međutim, iz međunarodnog pomorskog prometa ispušta se značajna količina štetnih plinova. Danas se u pomorskom prometu još uvijek većinom koriste goriva fosilnog podrijetla, kao što je dizelsko gorivo, čije izgaranje uzrokuje visoke emisije štetnih plinova. Upotreba goriva fosilnog podrijetla, zbog štetnog učinka na okoliš mora biti smanjena. Međunarodna pomorska organizacija nastoji smanjiti emisije štetnih plinova u pomorskom prometu putem regulativa, a primjećuje se tendencija sve strožeg regulatornog okvira koji ograničava takve emisije. U težnji za zamjenom klasičnih goriva fosilnog podrijetla, javljaju se alternativne opcije koje emitiraju znatno manje količine štetnih plinova u okoliš prilikom proizvodnje goriva te u eksploatacijskim uvjetima. U završnom radu razmatrana su alternativna goriva za brodske primjene, te je napravljena usporedba s klasičnim gorivima fosilnog podrijetla. Isto tako, dan je pregled konfiguracija brodskih energetske sustava pogonjenih isključivo alternativnim gorivima ili „dual fuel“ konfiguracijom pogona. Ekonomska analiza provedena je na trajektu Kornati te kontejnerskom brodu One Mackinac, kao primjerima brodova za priobalnu i preoceansku plovidbu.

Ključne riječi: emisije štetnih plinova, alternativna goriva, brodski energetski sustav, ekonomska analiza, priobalna plovidba, preoceanska plovidba.

SUMMARY

Maritime transport is the most efficient and the cheapest way of transporting goods, resulting in most of world trade being based on sea transport. However, international shipping is a significant source of harmful gas emissions. Today, maritime transport still mainly uses fuels of fossil origin such as diesel fuel, the combustion of which causes high emissions of harmful gases. The use of fossil fuels must be reduced due to their harmful effect on the environment. International Maritime Organisation (IMO) strives to reduce the emission of harmful gases in the maritime transport by its regulations and there is a trend towards more strict regulatory framework that limits harmful emissions. In tendency to replace traditional fossil fuels, alternative fuel options that emit significantly smaller amounts of harmful gases into the environment during production and under exploitation conditions are emerging. Within this thesis, alternative fuel options for marine applications were considered and a comparison with traditional fossil fuel is given, as well as an overview of configurations of ship energy systems powered exclusively by alternative fuels or "dual fuel" drive configuration. The economic analysis was carried out on the ferry Kornati and the container ship One Mackinac, as illustrative examples of short-sea and long-distance vessels.

Key words: emissions of harmful gases, alternative fuels, ship power systems, economic analysis, short-sea shipping, long-distance shipping.

1 UVOD

Pomorski promet predstavlja najučinkovitiji i najjeftiniji način transporta dobara, a preko 80% svjetske trgovine bazira se na transportu morem. Budući da se iz međunarodnog pomorskog prometa ispušta oko 940 milijuna tona CO₂ godišnje, taj prometni segment odgovoran je za otprilike 2,5 % globalnih emisija stakleničkih plinova [1]. Klimatske promjene i globalno zatopljenje glavni su problemi s kojima se današnji svijet susreće. Povećane emisije stakleničkih plinova (GHG) u atmosferi, a to su emisije ugljičnog dioksida (CO₂), metana (CH₄), dušikovog oksida (N₂O), te fluoriranih plinova u malim koncentracijama, imaju štetan učinak na ljudsko zdravlje i okoliš [2]. Nametnute ekološke mjere ne zaobilaze pomorski promet te nameću sve veću učinkovitost brodskih energetske sustava, koji su u većini slučajeva pokretani dizelskim motorima, koji ispuštaju značajne količine štetnih i stakleničkih plinova u atmosferu. Kako bi se ublažili ekološki utjecaji pomorskog prometa Europska unija u suradnji s Međunarodnom pomorskom organizacijom (eng. *International Maritime Organisation*) donosi regulative za smanjenje emisija ispušnih plinova u pomorskom prometu za najmanje 50 % do 2050. godine. Dobar primjer je prvi teretni brod na vodik „Zulu“, dužine 55 metara i širine 8 metara, koji za pogon koristi stlačeni vodik dobiven elektrolizom. Vodik se pohranjuje u spremnicima, a u gorivnim člancima odvija se pretvorba kemijske energije u električnu, koja brodu daje snagu od 1 MW. Brod je razvijen za komercijalni prijevoz tereta u Parizu, rijekom Seinom [3]. Nadalje, danski Maersk naručio je osam ugljično neutralnih kontejnerskih brodova pogonjenih ugljično neutralnim metanolom, s planiranom isporukom u 2024. godini. Brodove će izgraditi južnokorejsko brodogradilište Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd. (HHI), a bit će opremljeni motorima s pogonom na klasično gorivo i na metanol, te će moći prevoziti po 16000 kontejnera i činit će oko tri posto Maerskove flote. Takva odluka donosi smanjenje godišnje emisije ugljičnog dioksida od oko milijun tona. Pomorski sektor polako ulazi u tranziciju na alternativne pogone u brodskim energetske sustavima koji imaju manji ugljični otisak od klasičnih brodskih dizelskih goriva. U ovom završnom radu provedena je ekonomska analiza alternativnih goriva za pogon broda, te usporedba s dizelskim gorivom na primjeru trajekta Kornati koji plovi na ruti Ploče-Trpanj u Republici Hrvatskoj, te kontejnerskog broda One Mackinac koji plovi rutom Rotterdam-Busan.

2 PREGLED BRODSKIH GORIVA

2.1 Konvencionalna brodska goriva

Danas se za pogon brodskih motora tradicionalno koriste tekuća dizelska goriva namijenjena za brodove, te plinska goriva koja se mogu koristiti u kombinaciji s dizelskim gorivom (tzv. *Dual Fuel* izvedba). Kemijska energija goriva se pretvara u mehanički rad putem izgaranja, pri čemu se nastoji postići što veći stupanj djelovanja. Stupanj djelovanja brodskih dizelskih motora obično iznosi oko $\eta = 0,55$ [4].

Goriva koja se koriste za pogon brodskih dizelskih motora su:

- plinsko ulje (MGO) – upotrebljava se kod brzokretnih četverotaktnih dizelskih motora,
- lako brodsko dizelsko gorivo (MDO) – upotrebljava se kod srednjokretnih četverotaktnih dizelskih motora,
- teško brodsko gorivo (HFO) – upotrebljava se kod srednjokretnih i sporokretnih dvotaktnih dizelskih motora,
- srednje teško dizelsko gorivo (IFO) – dobiva se miješanjem lakog dizelskog goriva (MDO) s teškim dizelskim gorivom (HFO) u određenim omjerima,
- teško brodsko gorivo niske kakvoće (LGFHO) – upotrebljava se kod srednjokretnih četverotaktnih i sporokretnih dvotaktnih dizelskih motora, a koristi se za pogon generatora i za poriv brodova [5].

2.1.1 Teško loživo ulje (HFO)

Teško brodsko gorivo ima gustoću od 920 do 1010 kg/m³ i mora biti zagrijano do 145 °C kako bi bilo prikladno za upotrebu u brodskim motorima [5]. Nažalost, ostaci od HFO imaju mnoge nečistoće, uključujući sumpor kojeg je dopušteno 0,5 % u masenom udjelu goriva. Sumpor u gorivu pomaže pri podmazivanju motora, ali čim izgori, postaje zagađivač zraka - sumporov oksid ili SO_x – jedan od onečišćivača uzrokovan je nepotpunim izgaranjem. Iako pomorski promet nije jedini izvor, procjenjuje se da 13 % ukupnih svjetskih emisija SO_x dolazi upravo iz pomorskog sektora [6]. Teško brodsko gorivo koristi se za sporokretne dvotakne i srednjokretne dizelske motore.

2.1.2 Lako brodsko dizelsko gorivo (MDO)

Lako dizelsko gorivo mješavina je vrlo lakog goriva (plinskog ulja) i teškog brodskog goriva. Sličnog je sastava kao vrlo lako gorivo (brodski dizel) s gustoćom od 820 do 860 kg/m³ [4]. Glavna razlika u odnosu na teško brodsko gorivo je što se lako brodsko gorivo ne mora predgrijavati prije ubrizgavanja u cilindre zbog manje viskoznosti. Koristi se za srednjokretne četverotakne dizelske motore.

2.1.3 Plavi dizel

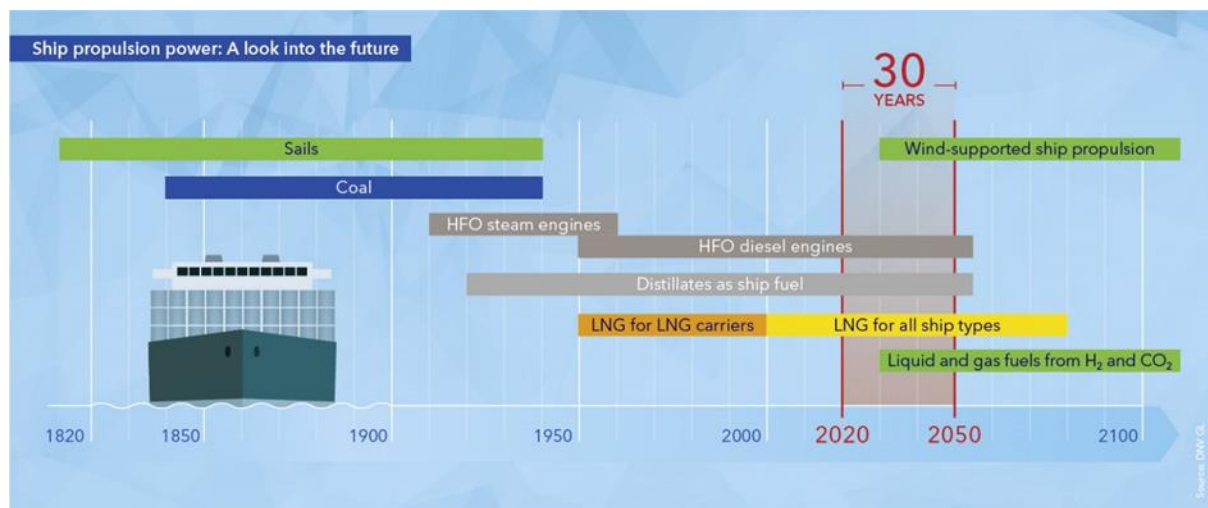
Dizelsko gorivo proizvodi se destilacijom nafte do 280 °C. Plavi dizel je Eurodizel obojan plavim markerom zbog kontrole potrošnje. Kako bi se smanjili troškovi goriva brodarskim kompanijama, te omogućile niže cijene usluga pomorskog prometa, cijena plavog dizela sufinancira se od strane države. U Tablici 1 prikazana su svojstva dizelskog goriva u usporedbi s vodikom kao alternativnim gorivom, gdje se vidi sadržaj ugljika u dizelskom gorivu i u vodikom. Isto tako prednost vodika kao alternativnog goriva je visoka donja ogrjevna vrijednost u usporedbi s dizelskim gorivom.

Tablica 1. Svojstva vodika i dizelskog goriva [7]

Svojstva	Vodik	Dizelsko gorivo
Sadržaj ugljika (masa %)	0	86
Donja ogrjevna vrijednost	119,9	42,5
Gustoća (na 1 bar i 273 K, kg/m ³)	0,089	830
Volumetrijski energetska sadržaj (na 1 bar i 273K, MJ/m ³)	10,7	35 x 10 ³
Molekularna težina	2,016	~170
Vrelište (K)	20	453-633
Temperatura samozapaljenja (K)	853	~523
Minimalna energija paljenja u zraku (na 1 bar pri stehiometrijskom omjeru, MJ)	0,02	0,24
Stehiometrijski omjer mase zraka/goriva	34,4	14,5
Udaljenost gašenja (na 1 bar i 298K pri stehiometrijskom omjeru, mm)	0,64	-
Minimalna brzina plamena u zraku (na 1 bar i i 298 K pri stehiometrijskom omjeru, m/s)	1,85	0,37-0,43
Koeficijent difuzivnosti u zraku (na 1 bar i 273K, m ² /s)	8,5 x 10 ⁻⁶	-
Granice zapaljivosti u zraku (vol %)	4-76	0,6-5,5
Adijabatska temperatura plamena (na 1 bar i 278 K pri stehiometrijskom omjeru, K)	2480	~2300
Oktanski broj	130+	-
Cetanski broj	-	40-55

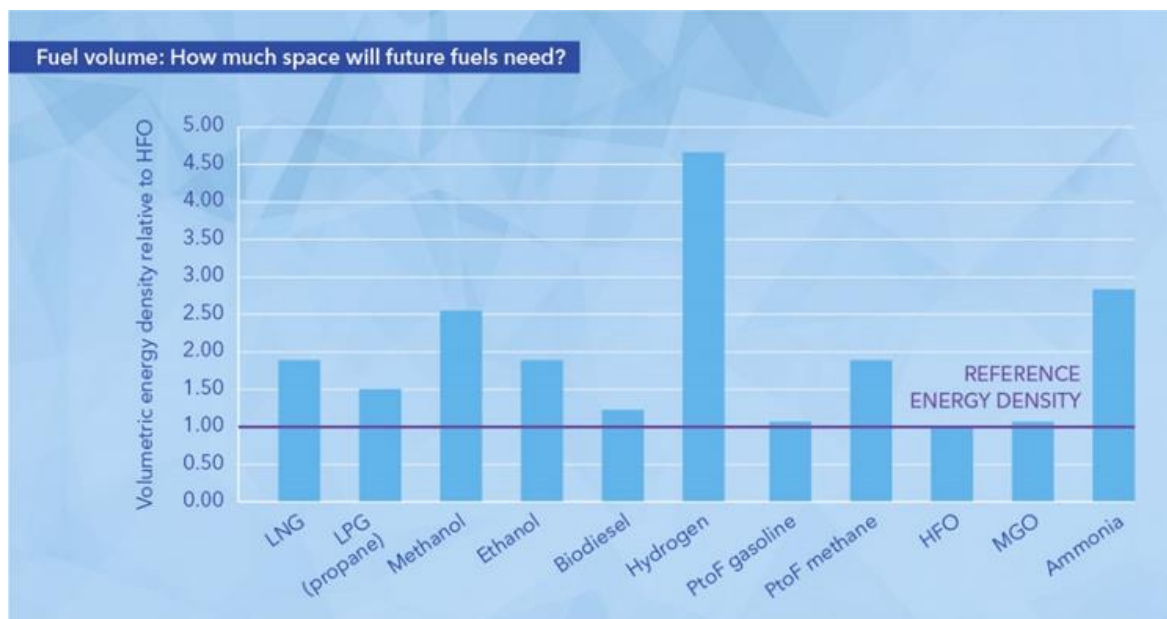
Alternativna brodska goriva

Napredak i razvoj industrije prati i pomorski sektor, razvojem novih načina pogona brodova s ciljem što manjeg ugljičnog otiska. Slika 1 prikazuje razvoj i promjene u načinu pogona broda kroz posljednja dva stoljeća, te projekciju pogona brodova u budućnosti.



Slika 1. Goriva u pomorskom prometu [8]

Cilj brodovlasnika je da svaki brod ima maksimalno iskorišten teretni prostor, kako bi zarada bila što veća. Zbog toga, bitno je koliku gustoću energije daje svako alternativno gorivo, što je prikazano na Slici 2.



Slika 2. Gustoća energije goriva [8]

2.1.4 Biodizel

Biodizelsko gorivo je bio razgradivo i manje toksično što povoljno utječe na smanjenje emisija štetnih plinova i zaustavljanje klimatskih promjena. Po kemijskom je sastavu metilni ester masnih kiselina (eng. *Fatty Acid Methyl Ester*). Biodizel je gorivo koje nastaje reakcijom ulja biljnog porijekla, kao što su ulja od suncokreta, kokosa, soje i sl., s metanolom u prisutnosti katalizatora. Energetski je učinkovito, neotrovno gorivo koje je biorazgradivo u vodi te ispušta znatno manje emisije štetnih plinova. Također ne sudjeluje u globalnom zatopljenju i smanjuje efekt staklenika, te je jeftinije od fosilnih goriva. Isto tako sadrži manju razinu sumpora i kancerogenih tvari od klasičnih dizelskih goriva. Biodizel se često miješa s dizelskim fosilnim gorivima, stvarajući mješavine koje su poznate kao biodizel mješavine. Neke od najčešćih mješavina uključuju:

- B100: čisti biodizel, bez dodataka fosilnog dizela,
- B20: mješavina 20 % biodizela i 80 % fosilnog dizela,
- B5: mješavina 5 % biodizela i 95 % fosilnog dizela,
- B2: mješavina 2 % biodizela i 98 % fosilnog dizela.

Sirovine za proizvodnju biodizela su životinjskog podrijetla (masti) i biljnog podrijetla (ulja). Najčešće korištena biljna ulja u proizvodnji biodizela su repičino, suncokretovo, sojino i palmino ulje. Korišteno jestivo ulje je također vrlo popularna sirovina u proizvodnji biodizela

[9]. Energetske značajke biodizela gotovo su jednake konvencionalnom dizelu, uz prednost puno bolje mazivosti koja znatno produžuje vijek trajanja motora. Biodizel i voda su netopljivi, pa se ne miješaju. Međutim, pod određenim uvjetima, voda može uzrokovati probleme u biodizelu, kao što su hidroliza, korozija i mikrobiološko onečišćenje. Biodizel se može raspasti na masne kiseline ako se izloži vodi i kisiku, što može dovesti do smanjenja kvalitete i stabilnosti goriva. Stoga je važno osigurati da biodizel bude pravilno pohranjen i zaštićen od vlage. Masne kiseline zbog svoje korozivnosti mogu uzrokovati velike štete na motorima. Ako se voda i gorivo ne pomiješaju u spremnicima, dolazi do stvaranja sloja vode ispod goriva. U tom sloju se mogu razviti mikroorganizmi koji omogućuju razvoj algi i bakterija. Organski spojevi mogu dovesti do stvaranja taloga i začepljenja filtara, što može otežati rad motora. Zato je važno redovito kontrolirati kvalitetu goriva i spriječiti pojavu vode u spremnicima. Biodizel se danas proizvodi u mnogim zemljama svijeta. Uz Maleziju, Njemačku, Sjedinjene Američke Države, biodizel isto tako proizvode i Španjolska, Indonezija, Kanada, Švedska, Austrija i mnoge druge. Proizvodnja biodizela je globalna industrija koja raste iz godine u godinu kako bi se smanjile emisije štetnih plinova i zaštitio okoliš. Iako biodizel ima nižu ogrjevnu vrijednost i višu temperaturu tečenja u usporedbi s klasičnim dizelskim gorivom, ima niže emisije štetnih plinova, što ga čini ekološki prihvatljivijim. U kombinaciji s drugim gorivima, poput klasičnog dizela ili plinovitih goriva, biodizel bi mogao pronaći stalnu uporabu u pomorskom prometu budućnosti [9]. U Tablici 2 prikazana je usporedba svojstava dizelskog i biodizelskog goriva.

Tablica 2. Usporedba svojstava dizela i biodizela [9]

Svojstvo	Dizelsko gorivo	Biodizel
Ogrjevna vrijednost	Visoka	Niska
Gustoća	Visoka	Srednja
Viskozitet	Nizak	Visok
Temperatura tečenja	Niska	Visoka
Cetanski broj	Visok	Srednji
Emisije CO ₂	Visoke	Niske
Emisije čestica	Visoke	Niske

2.1.5 Ukapljeni prirodni plin (LNG)

Prirodni plin ili zemni plin je smjesa plinova koji se prirodno pojavljuju u podzemnim nalazištima, a sastoji se uglavnom od metana, etana, propana, butana i ugljičnog dioksida, kao i manjih količina drugih plinova i nečistoća. Metan je najzastupljeniji sastojak u prirodnom plinu, s udjelom od 70-90 %, dok se ostali plinovi nalaze u manjim udjelima [10]. Prirodni plin nastaje u zemljinoj unutrašnjosti kada se organske tvari poput algi, biljaka i životinja raspadaju pod određenim uvjetima. Tijekom tog procesa, organske tvari se pretvaraju u plin koji se nakuplja u stijenama i sedimentima. Ugljikovodici u prirodnom plinu su uglavnom metan (CH_4), ali mogu sadržavati i manje količine etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}) i drugih viših ugljikovodika. Sumpor i voda mogu biti prisutni u manjim količinama. Prirodni plin je vrlo zapaljiv i eksplozivan plin, ali to ne znači da će se sam od sebe zapaliti ili eksplodirati. Za to su potrebni posebni uvjeti, poput prisutnosti zraka (kisika) i izvora paljenja. Prirodni plin zapaljuje se pri temperaturi od $640\text{ }^\circ\text{C}$ i gori plavičastim plamenom. Pri izgaranju prirodnog plina oslobađa se velika količina energije [11]. Prije korištenja prirodnog plina kao goriva treba izdvojiti sve elemente osim metana (CH_4). Da bi se prirodni plin pretvorio u tekuće stanje pri atmosferskom tlaku, potrebno ga je pothladiti na temperaturu od oko $-162\text{ }^\circ\text{C}$, pri čemu će njegova gustoća biti oko $0,425\text{ kg/dm}^3$. Ovaj postupak se naziva kondenzacija prirodnog plina, a provodi se u specijaliziranim postrojenjima zvanim LNG (eng. *Liquefied Natural Gas*) postrojenja. Značajno smanjenje volumena od 600 % posljedica je činjenice da se plinoviti prirodni plin komprimira i ohladi na temperaturu ispod točke kondenzacije kako bi se pretvorio u tekuću fazu, što rezultira visokom gustoćom tekućeg prirodnog plina. Ovo smanjenje volumena je važno za transport i skladištenje prirodnog plina, jer se tekući prirodni plin može spremati u manje spremnike nego plinoviti prirodni plin i transportirati na dužim udaljenostima. To čini tekući prirodni plin ekonomičnim za prijevoz i skladištenje, osobito na velikim udaljenostima i u područjima koja nisu povezana s mrežom cjevovoda. Opasnost od eksplozije postoji kada se koncentracija od 5-15 % prirodnog plina nalazi u smjesi sa zrakom.

Prirodni plin gorivo je fosilnog podrijetla, ali je povoljno, neotrovno i nekorozivno gorivo čiji nizak sadržaj ugljika (niži od HFO-a) predstavlja veoma bitnu karakteristiku za smanjenje stakleničkih plinova u atmosferi te ga čini konkurentnim gorivom u pomorskom prometu [6]. Zapaljiv je pri temperaturi od otprilike $640\text{ }^\circ\text{C}$. Prirodni plin desetljećima se upotrebljava kao brodsko gorivo. Povećanu pozornost privlači posljednjih godina kao alternativno gorivo koje zadovoljava nametnute stroge ekološke propise [4]. Kada se prirodni plin koristi kao izvor energije, emitira se oko 30 % manje CO_2 u usporedbi s naftom, što ga čini čistijim izvorom

energije. Osim manjih emisija CO₂, korištenje prirodnog plina kao izvora energije također rezultira manjim emisijama dušičnih oksida (NO_x), čestica i čađe, kao i 100 % manjim emisijama sumpornih spojeva. Stoga LNG kao alternativno gorivo uzrokuje manji štetni učinak na okoliš i nalazi se u skladu sa nametnutim normama koje Europska unija treba donijeti, kako bi reducirala negativne učinke uzrokovane emisijama štetnih plinova. Uporabom ukapljenog prirodnog plina kao brodskog goriva zbog smanjenog habanja produžuje se vijek rada motora, koje rezultira nižim postotkom čestica ugljika, sumpora i drugih štetnih tvari [12]. U Tablici 3 prikazana je usporedba emisija štetnih plinova ukapljenog prirodnog plina s teškim dizelskim gorivom i lakim dizelskim gorivom.

Tablica 3. Usporedba faktora emisija štetnih plinova (g/g goriva) [13]

Emisije	Teško gorivo	Brodsko lako dizelsko gorivo	LNG
SO _x	0,049	0,003	u tragovima
CO ₂	3,114	3,206	2,75
CH ₄	u tragovima	u tragovima	0,051
NO _x	0,093	0,087	0,008
PM	0,007	0,001	u tragovima

LNG tankeri se koriste se za prijevoz ukapljenog prirodnog plina između zemalja koje ga proizvode i zemalja koje ga uvoze, to su specijalizirani brodovi za prijevoz LNG-a te u prosjeku imaju kapacitet od oko 120000 do 170000 m³. Postoje naručeni brodovi koji imaju kapacitet od 260000 m³, što je gotovo dvostruko veći kapacitet u usporedbi s trenutnim LNG tankerima [11].

Podjela LNG brodova s obzirom na oblik spremnika tereta:

- Membranski LNG brodovi – spremnici su izrađeni od slojeva materijala različitih svojstava koji su oblikovani u membransku konstrukciju. Ova vrsta spremnika je laka i fleksibilna, omogućujući da se savijaju pod pritiskom LNG-a.
- SPB (eng. *Self-supporting prismatic shape IMO type B*) LNG brodovi - ovaj tip ima pravokutni oblik, posebno pogodna za velike količine tereta.
- Sferični LNG brodovi - spremnici su izrađeni u obliku sfere i pružaju stabilnu konstrukciju. Ova vrsta spremnika je također laka i fleksibilna, a najčešće se koristi na manjim LNG brodovima [13].

Prazni spremnici se prvo ispune zrakom kako bi se omogućilo održavanje tankova i pumpi, a potom počinje ciklus ukrcanja prirodnog plina. Prilikom ukrcanja LNG-a, prvo se mora ispumpati

zrak iz spremnika kako bi se spriječila pojava eksplozivne atmosfere zbog prisutnosti kisika. Također, brza promjena temperature uzrokovana ukrcavanjem LNG-a na $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ može oštetiti konstrukciju spremnika. Stoga se LNG najprije pohranjuje u posebne spremnike prije nego što se prebaci u krajnji spremnik. Zbog toga spremnici moraju prvo biti inertirani kako bi se eliminirao nastanak eksplozije. Kada brod odlazi u luku, najprije se provodi proces "uplinjavanja" tj. zamjena inertnog plina s LNG parom. Nakon toga, brod se hladi jer se LNG još ne može izravno ukrcati u spremnik. To je zato što bi CO_2 smrznuo i mogao oštetiti pumpe. Tekući prirodni plin se dovozi na brod, nakon čega se odvodi duž linije raspršivanja do glavnog isparivača koji pretvara tekućinu u plin. Zatim se zagrijava na oko $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ uz pomoć plinskih grijača te se upuhuje izravno u spremnike kako bi se istisnuo inertni plin („uplinjavanje“). Proces uplinjavanja se nastavlja sve dok se sav CO_2 ne ukloni iz spremnika. Ukoliko se CO_2 ne ukloni u potpunosti, ostaci CO_2 će biti ispušteni u atmosferu. Kada sadržaj ugljikovodika dosegne 5 % (nižu granicu zapaljivosti metana), inertni plin se preusmjerava pomoću razdjelnog priključka i cjevovoda u kompresore. Kako bi se izbjegle opasnosti od velikih količina zapaljivih ugljikovodika, koje bi mogle uzrokovati eksploziju, obalni terminal sagorijeva ovaj plin [15]. Kada je brod „uplinjen“ spremnici se još uvijek nalaze na normalnoj temperaturi i ispunjeni su plinom. Nakon uplinjavanja dolazi faza hlađenja. Pomoću glave za raspršivanje, LNG se raspršuje u spremnike. Raspršivanjem, LNG isparava i time počinje hladiti spremnike. Višak plina odvodi se na obalu kako bi se mogao ponovno koristiti. Kada se spremnici ohlade do temperature od oko $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$, tada su spremni za ukrcaj LNG-a. Ukrcaj se odvija pomoću pumpi koje s kopna dovode prirodni plin u brodske spremnike tereta. Proces ukrcaja odvija se dok kapacitet spremnika ne dosegne 98,5 % zbog širenja ili stezanja prirodnog plina [16].

2.1.6 Vodik

Vodik se pojavljuje u plinovitom stanju na Zemlji u malim količinama, nalazi se u zemljinoj atmosferi, dio je prirodnog plina i ispušta se erupcijama vulkana. Osim toga, prisutan je kao komponenta vode, hidrata, kiselina i baza, hidrida, ugljikovodika te gotovo svih drugih organskih spojeva [17]. Vodik je plin, bez boje, mirisa i okusa međutim rijetko se pronalazi vodik u čistom obliku. Najčešće se dobiva iz prirodnog plina, ali može ga se proizvesti i iz biomase te elektrolizom. Vodik se na brodu može skladištiti kao ukapljeni vodik, komprimirani vodik ili kemijski vezan vodik u nosačima vodika, tj. gorivima bogatim vodikom kao što su

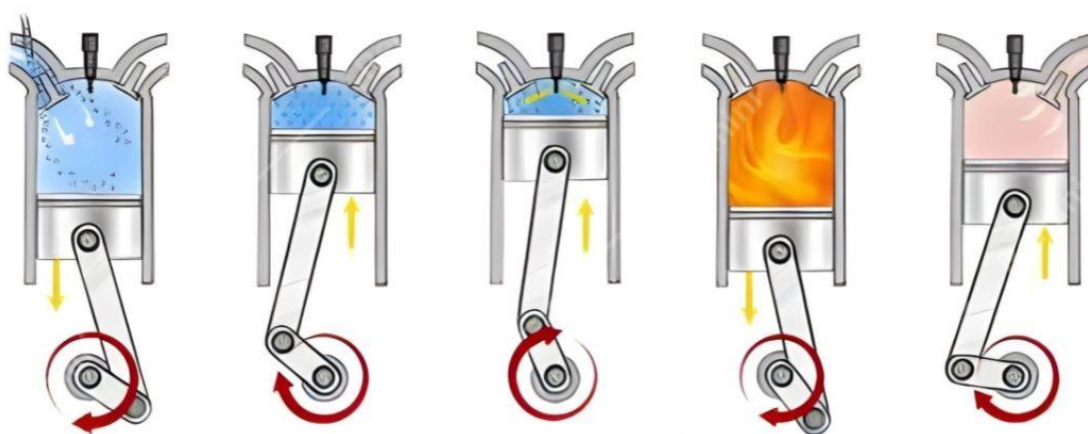
prirodni plin, amonijak, metanol itd. Lako zapaljivo gorivo, vodik tvori eksplozivnu smjesu s kisikom koja se naziva plinom praskavcem. Mješavina klora i vodika ne smije biti na izravnoj svjetlosti zbog eksplozivnosti pri izlaganju istoj, a mješavina fluora i vodika toliko je eksplozivna da se eksplozija može dogoditi i bez svjetla. U kontaktu s ostalim elementima, vodik ne reagira eksplozivno, već reakcija zahtijeva zagrijavanje ili prisutnost katalizatora. Procesom izgaranja vodika uz pomoć kisika nastaje voda, koja se može ponovno upotrijebiti u proizvodnji vodika postupkom elektrolize [18]. Svojstva vodika kao goriva kod motora koji se pale svjećicom su brzo širenje plamena, niska energija paljenja i širok raspon zapaljivosti što omogućuje optimizaciju i poboljšanje procesa izgaranja. Smanjenje omjera gorivo/zrak snižava temperaturu izgaranja i uz to NO_x emisije. U motorima koji koriste svjećicu, vodik se može ubrizgavati na sljedeće načine:

- Uz pomoć usisnog kolektora: vodik se pri niskoj temperaturi uvodi u motor putem kanala kojim upravlja ventil,
- Izravno dovođenje: za skladištenje vodika koristi se kriogeni cilindar.

Ubrizgavanje hladnog vodika u motor može biti učinkovit način za smanjenje pretpaljenja i emisija dušikovih oksida (NO_x) prilikom izgaranja. Kada se hladni vodik ubrizga u motor, on brzo hladi okolne plinove i površine cilindra, čime se smanjuje temperatura unutar cilindra. To može spriječiti pretpaljenje goriva i značajno smanjiti emisije NO_x [19].

Vodik može biti ubrizgan direktno u cilindar ili dovođen u motor s unutarnjim izgaranjem za naknadno paljenje uz pomoć kompresijskog omjera. Slika 3 prikazuje princip rada motora na vodik. Vodik se prvo ubrizgava u usisni tok i aspirira u cilindar tijekom usisnog takta. Zatim se vodik miješa u jednoličnu i homogenu smjesu tijekom takta kompresije. Nakon toga se, mala količina goriva (dizelsko gorivo) ubrizgava u komoru neposredno prije paljenja. Slijedi automatsko paljenje dizelskog goriva (zbog visoke temperature i tlaka) i sagorijevanje s vodikom, te se stvara pritisak na klip tijekom pogonskog udara [20]. Međutim, nepravilno izgaranje vodika može izazvati opasnosti poput kasnog pretpaljenja, pretpaljenja, izgaranja kucanjem i povratnog paljenja. U motorima s unutarnjim izgaranjem, upravljanje tlakom ubrizgavanja vodika, brzinama, koncentracijom i temperaturom iznimno je važno za postizanje pravilnog vremena paljenja i željene učinkovitosti. Zato je uloženi trud u razvoj naprednih motora s unutarnjim izgaranjem na vodik s poboljšanom gustoćom snage [21]. Vodik se kao pogonsko gorivo može koristiti i u plinskim turbinama te zbog svoje brze elektrokemijske kinetike, i u gorivnim člancima. U pomorskom prometu relativno nova tehnologija gorivnih

članaka temelji se na izravnoj pretvorbi kemijske energije goriva u električnu energiju pomoću elektrokemijskih reakcija. Za skladištenje vodika na brodu potrebno je osigurati nisku temperaturu i nizak radni tlak, brzo punjenje spremnika, zanemarivo odvođenje topline i gubitke energije prilikom punjenja i pražnjenja spremnika, reverzibilnost, afinitet na kisik i vlagu, niske troškove infrastrukture te sigurnost u radnim uvjetima [22]. Postoje tri mogućnosti skladištenja vodika na brodu: u krutom, tekućem i plinovitom stanju. Sustav skladištenja u krutom stanju se razlikuje od skladištenja u plinovitom i tekućem stanju jer se u tom sustavu čestice vodika apsorbiraju u krutinama, poput metalnih hidrida [23].



Slika 3. Princip rada motora na vodik [20]

2.1.7 Amonijak

Amonijak je jedna od najzastupljenijih sintetičkih kemikalija na svijetu, mješavina je dušika i vodika s formulom NH_3 . Amonijak se najčešće proizvodi pomoću Haber-Boschov procesa, na $300\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$ i $200\text{-}350$ bara preko Fe-Ni ili Ru-baziranog katalizatora. Budući da amonijak ne sadrži atome ugljika u molekulama, ne emitira CO_2 tijekom izgaranja. Iz perspektive proizvodnje, amonijak postaje gorivo bez emisije ugljika samo kada se proizvodi iz obnovljivih izvora energije, kao što su hidroelektrane, vjetar ili solarna energija. Emisije onečišćujućih tvari koje su povezane s ugljikom kao što su čađa, neizgoreni ugljikovodici, ispuštanje metana i ugljikov monoksid biti će skoro sasvim eliminirani [24]. Amonijak u tekućem stanju jako je toksičan, stoga ga je potrebno skladištiti u čvrstom agregatnom stanju, u tvarima kao što su urea, metalni solni amin ili amonijev karbonat. Tada mu se povećava masa i potreban prostor za skladištenje. To zahtijeva dodatnu energiju za oslobađanje amonijaka, što povećava

troškove. Amonijak je lakši od zraka, jeftiniji za skladištenje i transport i te se može koristiti kao nosač vodika. Tada njegovim razgrađivanjem nastaju dušik i vodik. Amonijak ne sadržava sumpor i ugljik, stoga nema rizika od trovanja ugljičnim monoksidom ili sumpornim spojevima. Dobar primjer za korištenje amonijaka kao izravnog goriva za gorivne članke su čvrste oksidne gorivne ćelije (eng. *solid oxide fuel cell*), koje koriste izravni dotok amonijaka koji se može razgraditi uz pomoć katalizatora na visokim radnim temperaturama [24]. Razlikujemo 3 vrste amonijaka prema načinu utjecaja na okoliš [25]:

1. Smeđi (sivi) amonijak, proizvodi se klasičnim načinom iz vodika, takav proces uzrokuje velike emisije CO₂.
2. Plavi amonijak, proizveden je isto tako klasičnim putem ali koristi se tehnologija izdvajanja i skladištenja CO₂.
3. Zeleni amonijak ne proizvodi se klasičnim putem već se energija dobiva iz obnovljivih izvora energije [25].

2.1.8 Metanol

Metanol je pri sobnoj temperaturi zapaljiva i hlapljiva, bezbojna tekućina, neugodnog mirisa. Vrelište mu je na 64,5 °C, a talište na -98 °C, gustoća mu je 792 kg/m³. Metanol se može proizvesti iz različitih sirovina, uključujući fosilna goriva, poljoprivredne proizvode, komunalni otpad, drvo i biomase. Isto tako, istražuje se i mogućnost proizvodnje amonijaka iz ugljikovog dioksida [26]. Metanol se široko koristi u proizvodnji različitih kemikalija, te se sve češće koristi kao gorivo ili aditiv gorivu. Bitna prednost metanola kao alternativnog goriva u pomorskom prometu je znatno manja emisija štetnih plinova u odnosu na fosilna goriva, isto tako ima učinkovito izgaranje visok oktanski broj, nisku cijenu te postoji mogućnost relativno jednostavne prilagodbe na postojeće dizelske motore. Neki od nedostataka metanola su niska energetska gustoća u usporedbi s dizelskim gorivima. Isto tako metanol ima korozivno djelovanje prema određenim metalima, poput aluminijsa, cinka i mangana, pokretanje motora na čisti metanol može predstavljati izazov, a učinkovitost motora je niska dok se ne dostigne radna temperatura. Korištenje čistog metanola kao goriva za brodove ima puno prednosti u odnosu na klasična dizelska goriva, međutim metanol u pomorskom prometu još uvijek ne nalazi svoje mjesto. Industrija metanola zaslužna je za 36 milijardi dolara na godišnjoj razini u svijetu i zapošljava 100 000 ljudi, a metanol je jedna od pet najbitnijih kemikalija koje se transportiraju širom svijeta. Brodarska industrija suočena je sa strožim propisima, posebno u

zonama s kontrolom emisija. To će zahtijevati velike promjene u brodskim gorivima, jer postojeća goriva imaju štetne učinke na okoliš. Korištenje čistog metanola kao alternativnog goriva za brodove ima mnoge prednosti za okoliš, ali primjena ove tehnologije još uvijek je u začetku [27]. U Tablici 4 navedene su prednosti i nedostaci brodskih goriva.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci brodskih goriva [28]

GORIVO	PREDNOSTI	NEDOSTACI
Teško brodsko gorivo (HFO)	<ul style="list-style-type: none"> • Poznata tehnologija izrade • Niska cijena 	<ul style="list-style-type: none"> • Fosilno gorivo s visokim udjelom ugljika (87%)
Lako brodsko gorivo (MDO)	<ul style="list-style-type: none"> • Nije potrebno zagrijavanje 	<ul style="list-style-type: none"> • Nedostupnost
LNG	<ul style="list-style-type: none"> • Povoljna cijena (jeftiniji od HFO i MDO) • Dostupna infrastruktura i tehnologija • Visoka gustoća energije • 30% niže emisije GHG 	<ul style="list-style-type: none"> • Fosilno gorivo • Problemi skladištenja (izolirani spremnici na -162 °C) • Uzimaju puno korisnog prostora zbog velikog volumena
VODIK	<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost plovidbe bez emisija • Izgaranjem vodika proizvode se velike količine vode koje se mogu koristiti dalje u brodu 	<ul style="list-style-type: none"> • Mala gustoća snage • Problemi skladištenja • Nerazvijena infrastruktura dobave i skladištenja • Zapaljiv, bez mirisa i boje
AMONIJAK	<ul style="list-style-type: none"> • Ne sadrži ugljik • Mogućnost primjene u motorima s unutarnjim izgaranjem • Cjenovno prihvatljiv 	<ul style="list-style-type: none"> • Vrlo toksičan • Visoki troškovi održavanja • Proizvodnja uzrokuje velike količine stakleničkih plinova • Potrebno naći rješenja za smanjenje korozivnog učinka
BIODIZEL	<ul style="list-style-type: none"> • Lako prilagodljiv u postojeći motor • Do 20 % udjela bio dizela ne zahtjeva modifikacije na motoru 	<ul style="list-style-type: none"> • Izgaranjem se ispuštaju velike količine GHG • Proizvodnjom biodizela od jestive biomase može doći do krize u prehrambenoj industriji
METANOL	<ul style="list-style-type: none"> • Jednostavna integracija u postojeći sustav pogona, dostupno i jeftino gorivo • Nizak udio ugljika 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoki troškovi proizvodnje zelenog metanola • Toksičan

3 PREGLED ALTERNATIVNIH KONFIGURACIJA BRODSKIH ENERGETSKIH SUSTAVA

Glavna karakteristika tradicionalnih energetske sustava na brodovima je podjela na glavni i pomoćni energetski sustav. Glavni sustav proizvodi energiju potrebnu za poriv broda, dok se pomoćni sustav koristi za proizvodnju električne energije za glavni sustav i druge potrošače na brodu. Glavni sustav uključuje glavni pogonski stroj, dok se pomoćni sustav sastoji od pomoćnog stroja koji je spojen na generator električne energije [29].

Sporokretni dizelski motori najčešće se koriste kao pogonski strojevi na brodovima. Prema podacima proizvođača motora, najmanje 95 % brodova koristilo je sporokretni dizelski motor kao pogonski stroj. Međutim, taj se postotak sada mijenja zbog promjena u cijenama goriva, propisa o zaštiti okoliša i regulativa o emisijama štetnih plinova. Unatoč tome, prednosti sporokretnih dizelskih motora sigurno će ih i dalje učiniti prihvatljivim za vlasnike brodova u dužem vremenskom razdoblju [30]. Sporokretni dizelski motori su se pokazali vrlo pouzdanima i energetski efikasima kao izvori energije za pogon i proizvodnju pomoćne energije na brodu. Tehnologija izrade je dobro poznata, proizvođači imaju razgranatu mrežu servisa i dostupnosti rezervnih dijelova, a i strojari su dobro upoznati s radom i održavanjem takvih motora. Takvi motori su prilagođeni za rad na teško brodsko dizelsko gorivo (HFO) koje je široko dostupno i jeftino, jer je i mreža dobavljača goriva dobro razvijena širom svijeta [28]. Motori proizvode nominalnu snagu pri niskom broju okretaja vratila, što ih razlikuje od brzokretnih i srednjokretnih motora. Porivni sustavi koji koriste srednjokretne dizelske motore su česti na manjim brodovima ili Ro-Ro brodovima, dok se na velikim brodovima najčešće koriste za pogon generatora koji stvara električnu energiju. Toplinske, parne i plinske turbine rade na znatno većem broju okretaja, što zahtijeva uporabu reduktora u porivnom sustavu zbog velikog prijenosnog omjera. Razlikujemo više izvedbi kombiniranih sustava koje koriste jednu ili više plinskih i parnih turbina koje pokreću jedno ili više vratila [30].

3.1 Dizelski pogon

Dizelski motori predstavljaju glavni pogonski sustav većine današnjih brodova, što je prikazano na Slici 4. Toplinski strojevi su uređaji koji pretvaraju kemijsku energiju goriva u mehanički rad. Gorivo se sagorijevanjem (oksidacijom) pretvara u toplinu koja se ekspanzijom plinova koristi za pogon klipa ili stapa. Pravocrtno kretanje klipa uzduž košuljice pretvara se pomoću stapnog ili klipnog mehanizma u kružno gibanje koljeničastog vratila. Najčešće se gorivo

zapaljuje i sagorijeva unutar cilindra, ali kod nekih izvedbi motora, sagorijevanje se događa u pretkomorama ili vrtložnim komorama. Takvi toplinski strojevi se svrstavaju u motore s unutrašnjim izgaranjem. Podjela dizelskih motora prikazana je na Tablici 5.



Slika 4. Konfiguracija dizelskog pogona [28]

[30]

Tablica 5. Podjela dizelskih motora [30]

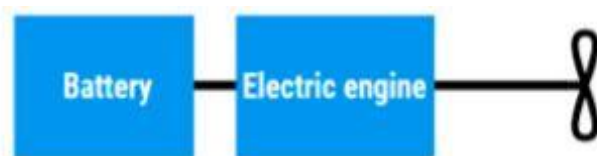
Prema odvijanju radnog ciklusa	2 (dvotaktni)
	4 (četverotaktni)
Prema načinu djelovanja	Jednoradni
	Dvoradni
Prema vrsti goriva	Tekuće
	Plinovito
	Dvojno
Prema punjenju cilindra zrakom	S prednabijanjem
	Bez prednabijanja
Prema geometriji prostora izgaranja	Jednkomorni prostori za izgaranje (direktno ubrizgavanje)
	Dvokomorni prostori za izgaranje (s pretkomorom ili vrtložnom komorom)
Prema okretnosti	Sporokretni (do 200 ili 300 o/min)
	Srednjekretni (od 200-300 do 800-1000 o/min)
	Brzokretni (više od 800 do 1000 o/min)

Najčešće se koriste dvotaktni dizelski motori za poriv brodova. Ovi motori su jednoradni i koriste teško tekuće gorivo. Također, oni imaju turbopunjač, direktno ubrizgavanje goriva u cilindarski prostor, izvode se s križnom glavom i sporokretni su. Prema podacima proizvođača, novi tipovi brodskih sporokretnih motora trebali bi imati specifičnu potrošnju goriva manju od 170 g/kWh. Brodski dizelski motori koriste tzv. ostatno gorivo, koje se naziva teška nafta ili mazut. Ovo gorivo je gusta tekućina koja se dobiva frakcijskom destilacijom nafte. Sporokretni dizelski motori su pouzdani i nude provjerena tehnološka rješenja. Danas postoje tri vodeća proizvođača takvih motora s neznatnim konstrukcijskim razlikama. Posade su dobro upoznate s greškama motora, praćenju rada, održavanju i drugim aspektima, što pozitivno utječe na

sigurnost pogona. Ako posada nije u mogućnosti otkloniti kvar, servisi su osigurani u gotovo svim većim lukama svijeta. Takvi porivni sustavi nemaju reduktor, što povoljno utječe na investicijske troškove [30].

3.2 Električni pogon

Brodске konfiguracije pokretane elektromotorima i baterijama, prikazane na Slici 5, svakako predstavljaju budućnost, omogućavajući plovidbu bez ispuštanja emisijama štetnih plinova u atmosferu. Za sada zbog vremena punjenja baterija i visokih troškova početne investicije, koja je znatno veća nego za dizelski motor jednake snage, imaju ograničenu primjenu u pomorskom sektoru. Većinom se koriste kod priobalnih brodova koji prometuju na kratkim relacijama te imaju mogućnost punjenja na dnevnoj bazi. Propulzija broda može se ostvariti korištenjem istosmjernih ili izmjeničnih elektromotora. Ranije su se češće koristili istosmjerni motori, dok se danas sve više koriste izmjenični trofazni elektromotori, što se naziva AC/AC propulzijom. Oba načina omogućuju preciznu kontrolu broja okretaja vijka i položaja broda. U odnosu na tradicionalne, sporokretne dizelske motore, konstrukcija strojarnice se razlikuje. Nema dugog vratila, a generatorska stanica ne mora biti u neposrednoj blizini elektromotora koji pogoni brodski vijak. Stoga se strojarnice mogu organizirati na povoljniji način, što omogućava veći prostor za teret, putnike ili posadu [30].



Slika 5. Konfiguracija električnog pogona [28]

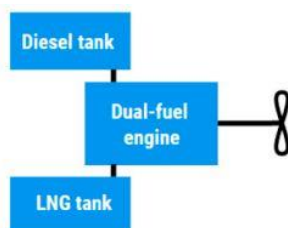
3.3 Dizel - električni pogon

Jedna od konfiguracija, posebice kod trajekata, je „dizel-električni“ sustav. Brodski energetske sustavi koji koriste elektromotore sve se češće primjenjuju. U takvim sustavima, prvopokretač obično je srednjokretni brodski dizelski motor, koji je direktno povezan s generatorom električne energije. Generator proizvodi struju za pogon elektromotora, koji može biti povezan izravno na brodski vijak ili spojen preko reduktora. Takav sustav omogućuje rad motora u optimalnom režimu, bez obzira na nametnuto opterećenje. Na taj način se povećava korisnost

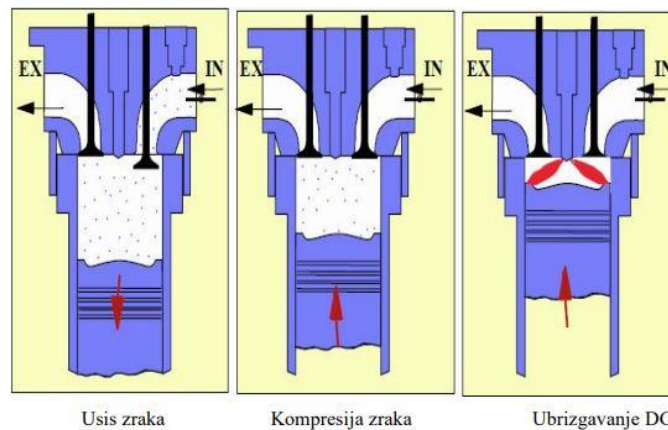
sustava i smanjuje potrošnja goriva, što smanjuje emisiju štetnih spojeva. U ovakvom sustavu, prvopokretač više nije potrebno smjestiti bliže propulzoru na krmu, nego se može smjestiti na bilo koje mjesto na brodu. Korištenjem baterija, ukupna korisnost takvog sustava može se još više uvećati zato što baterije omogućuju isključivanje brodskog dizelskog motora pri manjem opterećenju, što omogućuje plovidbu bez ispuha štetnih čestica u atmosferu. Međutim, zbog pretvaranja mehaničke energije u električnu, te gubitka u elektromotoru i generatoru, dio energije će se izgubiti. To je zbog nedostatka mehaničke veze između prvopokretačke jedinice i propulzora. Stoga je taj sustav najprikladniji za brodove koji se učestalo nalaze u lukama i ne prelaze velike udaljenosti [29].

3.4 Dual fuel Dizel- LNG pogon

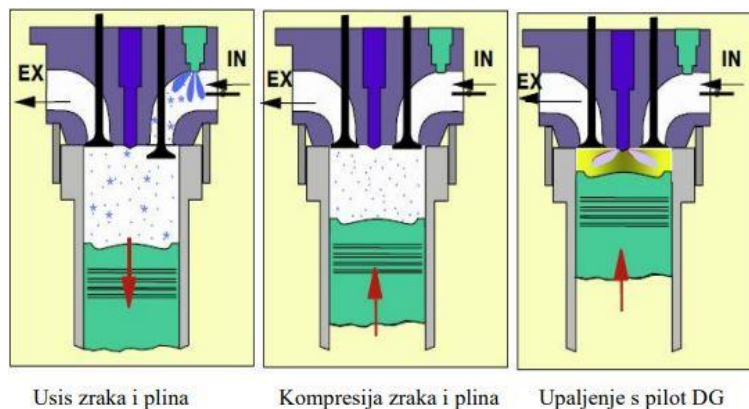
Dvojno gorivo se sastoji od dizelskog goriva i prirodnog plina, čija konfiguracija je prikazana na Slici 6, pri čemu su dizelska goriva HFO ili MDO, a plinska goriva LNG ili CNG (tekući prirodni plin ili stlačeni prirodni plin). LNG je prirodni plin, koji se kao tekućina nalazi pothlađen na $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Međutim, zbog niskog cetanskog broja i visoke temperature samozapaljenja (oko $640\text{ }^{\circ}\text{C}$), prirodni plin se ne može koristiti kao gorivo za klasičan dizelski motor bez velikog kompresijskog omjera i vanjskog dovođenja topline u cilindar. Kako bi se riješio ovaj problem, u brodskom motoru se odvija elektroničko ubrizgavanje prirodnog plina, u točno određenom trenutku. Ubrizgavanje prirodnog plina može biti visokog ili niskog tlaka (200-300 bara ili 7-13 bara). Trenutak ubrizgavanja prirodnog plina prije GMT-a, klip tlačno djeluje na smjesu zraka koja sadrži ubrizgani prirodni plin. Neposredno prije GMT-a, u cilindru se odvija ubrizgavanje male količine dizelskog (pilot) goriva koje se zbog tlaka može samozapaliti i pokrenuti izgaranje mješavine plina i tekućeg dizela u cilindru. Na Slici 7 prikazan je rad motora u dizelskom načinu dok je na Slici 8 prikazan rad motora u plinskom načinu rada.



Slika 6. Konfiguracija Dual fuel Dizel-LNG [28]



Slika 7. Motor na dvojno gorivo u dizelskom režimu rada [4]



Slika 8. Motor na dvojno gorivo u plinskom režimu rada [4]

Elektroničko upravljanje kontrolira točno vrijeme, trajanje i količinu ubrizgavanja prirodnog plina. Motor uvijek kreće raditi isključivo na dizelsko gorivo, a prebacivanje na dvostruko gorivo, odnosno prirodni plin, događa se tek nakon što se rad motora na dizelsko gorivo stabilizira. Prilikom prebacivanja na dvostruko gorivo potrebno je izbjeći bogatu smjesu zraka i plinskog goriva, zbog mogućnosti detonacije. Motori na dvojna goriva koriste siromašniju smjesu zbog mogućnosti detonacije, pa se omjer zraka i goriva kreće između 1,9 - 2,3. Princip je temeljen na ubrizgavanju prirodnog plina pri visokom tlaku i paljenju dizelskog pilotskog goriva, koje može biti teško ili lako brodsko dizelsko gorivo, odgovarajuće temperature i viskoziteta. Dvogorivni brodski dizelski motor može raditi u normalnom režimu koristeći plin (LNG) kao gorivo, s minimumom udjela broskog dizelskog goriva kao pilotskog goriva, ili raditi samo na teškom gorivu (HFO) ili drugom dizelskom gorivu (MDO) [4].

3.5 Dual fuel Dizel - Vodik pogon

Vodik se može koristiti kao dopunsko ili mješovito gorivo u konvencionalnim motorima i u dvogorivnim motorima (eng. *dual fuel*). Vodik lako izgara u motorima s unutarnjim izgaranjem koji koriste različite omjere mješavina zraka i goriva, zbog širokog raspona zapaljivosti vodika. Uspoređujući s ostalim gorivima, vodik zahtjeva puno nižu količinu energije potrebne za paljenje, za red veličina manju od količine potrebne za paljenje benzina. Vodik ima nisku energiju paljenja, što omogućuje brzo paljenje s čak siromašnijim smjesama. Međutim, visoka temperatura samozapaljenja vodika otežava paljenje smjese zraka i vodika samo povećanjem temperature tijekom kompresije. To ima utjecaj na određivanje kompresijskog omjera motora i na izlaznu snagu motora. Velika brzina plamena vodika omogućava brže izgaranje i povećava učinkovitost motora. Također, visoka difuzivnost vodika olakšava stvaranje jednoličnije smjese zraka i goriva, međutim brzo se raspršuje. Kod motora u kojima se vodik ubrizgava u cilindar, ispušni plinovi su NO_x i vodena para, a emisije kao što su CO_2 , CO, HC i SO_x su mnogo manje nego kod dizelskih motora. Međutim, pri ispuhu u manjim količinama može doći do pojave vodikovog peroksida. Ako se vodik koristi kao primarno gorivo, motori zahtijevaju određene modifikacije kako bi se optimiziralo vrijeme izgaranja i smanjilo detonacijsko izgaranje, takve promjene zahtijevaju veće cilindre motora. Osim toga, naknadni zahvati kako bi se eliminirale krute čestice i NO_x možda neće biti potrebni, to ovisi o omjeru zraka i goriva i emisijskim performansama motora. Vodik također može biti korišten u kombinaciji s drugim konvencionalnim brodskim dizelskim gorivom i pri izgaranju s prirodnim plinom. U dvogorivnim motorima vodik se ubrizgava u cilindre, komprimira i mala količina dizelskog goriva se ubrizgava za pokretanje izgaranja.

Navedene su najznačajnije promjene koje se trebaju odviti kako bi se motor prilagodio radu na vodik [31], [32]:

- Prostor izgaranja: uključuje izmjene na cilindrima motora, upravljačkim sustavima, sustavu ventilacije kućišta i motora te uljima za podmazivanje motora,
- Sustav prednabijanja motora: potreban je za postojan rad na visokoj brzini vrtnje motora, i pri visokom specifičnom opterećenju,
- Sustav ubrizgavanja goriva: uključuje injektore vodika, sustav dovoda vodika ovisno o tlaku te regulator tlaka plina,
- Sustav paljenja: važan za brzo paljenje smjese zraka i goriva u motoru,

- Sustav za naknadno obrađivanje ispušnih plinova: potreban za smanjenje emisije štetnih plinova iz ispušnih plinova, kao što su NO_x, HC, CO, CO₂ i SO_x.

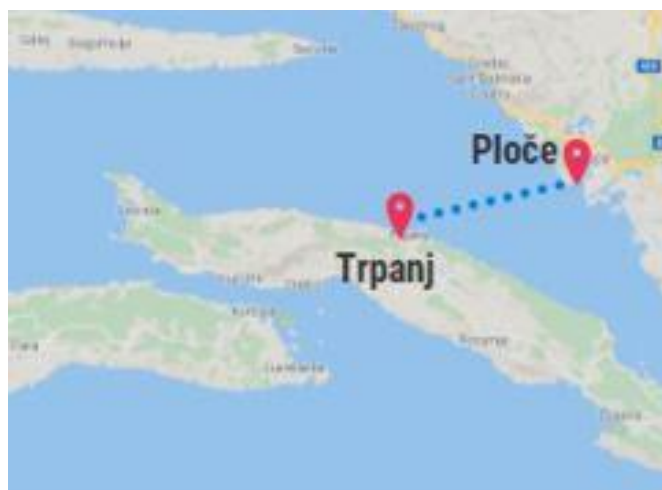
4 ANALIZA PRIMJENJIVOSTI ALTERNATIVNIH GORIVA NA PRIMJERU BRODA ZA UNUTARNJU I PREKOOCEANSKU PLOVIDBU

4.1 Trajekt Kornati

Analiza primjenjivosti alternativnih goriva provedena je na trajektu Kornati prikazanom na Slici 9 koji trenutno plovi na liniji Ploče-Trpanj u Republici Hrvatskoj, prikazanoj na Slici 10. Trajekt Kornati koristi se za lokalne linije. U sastavu je flote Jadrolinije u koju ulazi primopredajom održanom 17. lipnja 2014. Trajekt je porinut pod brojem gradnje 503 u siječnju 2014. u brodogradilištu Uljanik u Puli. Jedan je od četiri ista broda izgrađena za Jadroliniju u svrhu obnavljanja postojeće flote. Brod je pogonjen s četiri Volvo-Penta motora snage svakog 442 kW pri 1800 o/min [33]. Karakteristike trajekta Kornati i rute Ploče-Trpanj prikazane u Tablici 6.



Slika 9. Trajekt Kornati [34]



Slika 10. Ruta Ploče-Trpanj [35]

Tablica 6. Karakteristike trajekta i rute plovidbe [35]

Dužina između okomica, L_{pp} (m)	89,1
Širina, B (m)	17,5
Gaz, T (m)	2,4
Snaga glavnog motora, P_{ME} (kW)	1764
Snaga pomoćnog motora, P_{AE} (kW)	840
Projektna brzina broda, v_{de} (čv)	12,3
Kapacitet putnika	616
Kapacitet vozila	145
Trajanje puta, t (min)	60
Dužina puta, l (nm)	8,15
Godišnji broj ponavljanja, N_A	1740

Ruta Ploče – Trpanj predstavlja srednje dugu rutu plovidbe. Zbog rasporeda plovidbe, smanjenja potrošnje goriva i vremenskih uvjeta, brzina broda u realnim uvjetima razlikuje se od projektne brzine broda (v_{de}). Formule i proračunska metodologija preuzeti su iz [35]. Prosječna brzina broda (v_{ave}) računa se dijeljenjem dužine rute (l) s vremenom puta (t). Srednja brzina v_{ave} računa se prema:

$$v_{ave} = \frac{l}{t} \quad (1)$$

$$v_{ave} = 8,15 \text{ čv} \quad (2)$$

Prosječna snaga glavnog motora računa se kao snaga glavnog motora umanjena za 20 %, te pomnožena s kubom omjera srednje i projektne brzine:

$$P_{ME,ave} = (P_{ME} \cdot 0.8) \cdot \left(\frac{v_{ave}}{v_{de}}\right)^3 \quad (3)$$

$$P_{ME,ave} = 410,53 \text{ kW} \quad (4)$$

Pretpostavljeno opterećenje pomoćnog motora $P_{AE,ave}$ je 50 %:

$$P_{AE,ave} = 420 \text{ kW} \quad (5)$$

Sumiranjem $P_{AE,ave}$ i $P_{ME,ave}$ računa se P_{ave} :

$$P_{ave} = 830,53 \text{ kW} \quad (6)$$

Potrošnja energije po udaljenosti (EC), postojećeg broda pogonjenog dizelskim motorom omjer je srednje snage i prosječne brzine:

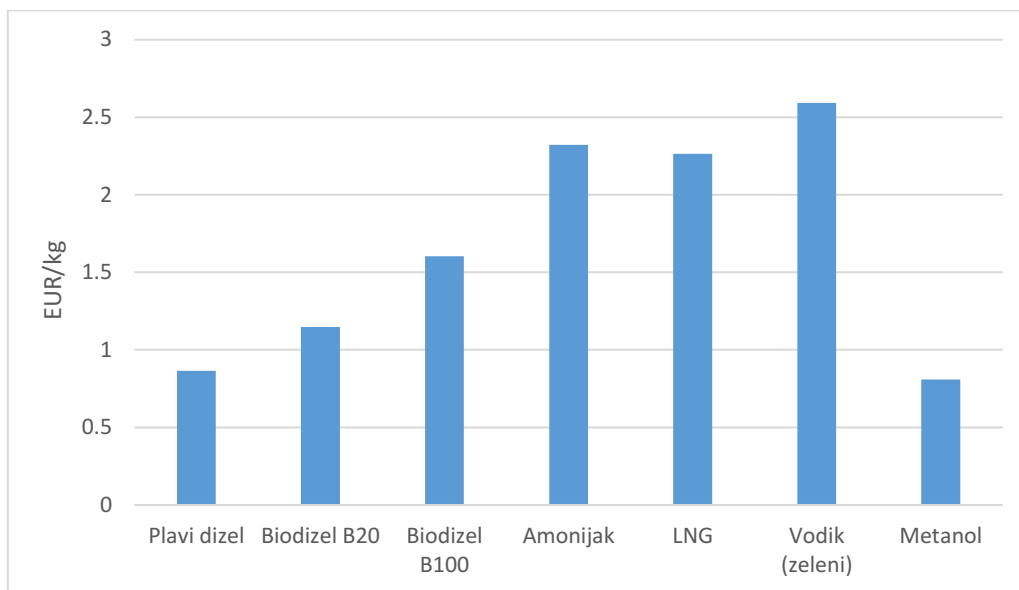
$$EC = \frac{P_{ave}}{v_{ave}} \quad (7)$$

$$EC = 101,9 \text{ kWh/nm} \quad (8)$$

U Tablici 7 i na Slici 11 navedene su specifične cijene brodskih goriva, koje su bile na snazi u listopadu 2022. u Rotterdamu, cijena plavog dizela kao pogonskog goriva trajekta Kornati, regulirana je od strane države te vrijedi od studenog 2022.

Tablica 7. Specifična cijena analiziranih goriva [36]

Vrsta goriva	Cijena, EUR/kg
Plavi dizel	0,864
Biodizel B20	1,149
Biodizel B100	1,604
Amonijak	2,322
LNG	2,264
Vodik (zeleni)	2,593
Metanol	0,808

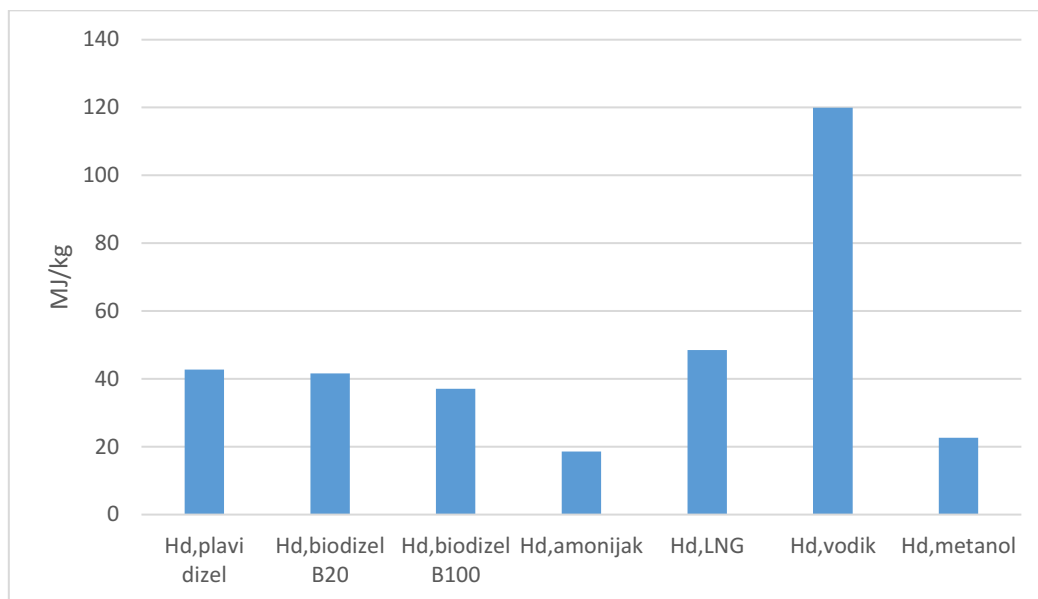


Slika 11. Specifična cijena analiziranih goriva

U Tablici 8 i na Slici 12 navedene su donje ogrjevne moći analiziranih goriva.

Tablica 8. Donja ogrjevna moć analiziranih goriva [37]

Donja ogrjevna moć	MJ/kg
H_d , plavi dizel	42,71
H_d , biodizel B20	41,6
H_d , biodizel B100	37,1
H_d , amonijak	18,6
H_d , LNG	48,5
H_d , vodik	119,9
H_d , metanol	22,66

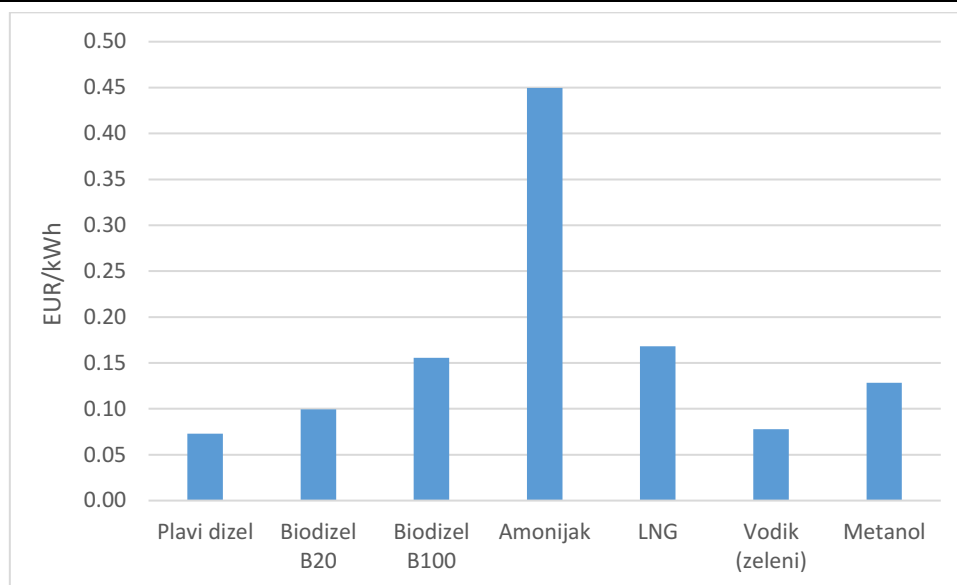


Slika 12. Donja ogrjevna moć analiziranih goriva

U Tablici 9 i na Slici 13 navedene su vrijednosti u EUR/kWh za svako od analiziranih goriva

Tablica 9. Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva

Vrsta goriva	EUR/kWh
Plavi dizel	0,073
Biodizel B20	0,099
Biodizel B100	0,156
Amonijak	0,445
LNG	0,168
Vodik (zeleni)	0,078
Metanol	0,129

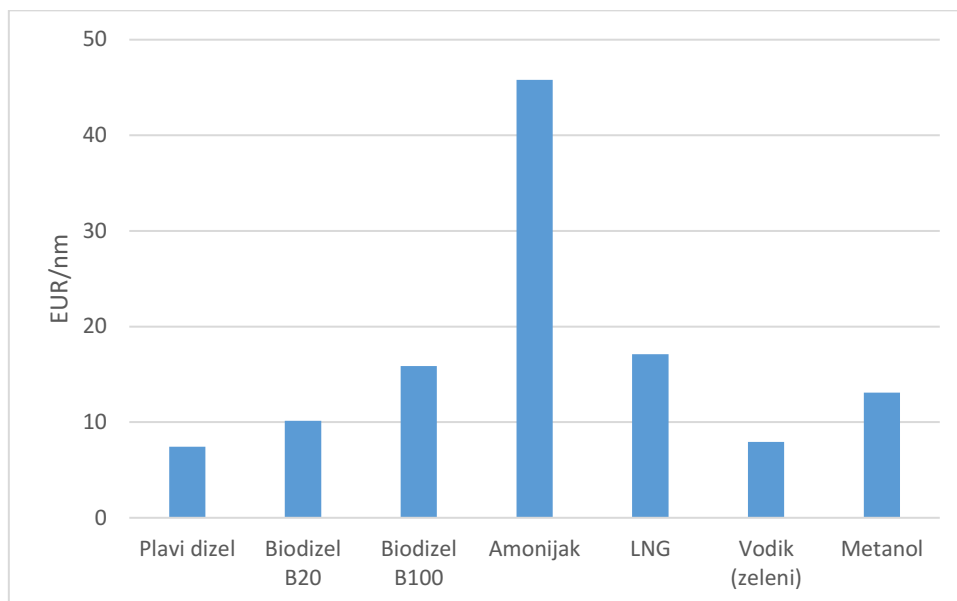


Slika 13. Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva

U Tablici 10 i na Slici 14 navedeni su troškovi u EUR/nm za svako od analiziranih goriva.

Tablica 10. Trošak po prijeđenoj udaljenosti za analizirana goriva

Vrsta goriva	EUR/nm
Plavi dizel	7,42
Biodizel B20	10,13
Biodizel B100	15,86
Amonijak	45,8
LNG	17,12
Vodik (zeleni)	7,93
Metanol	13,09

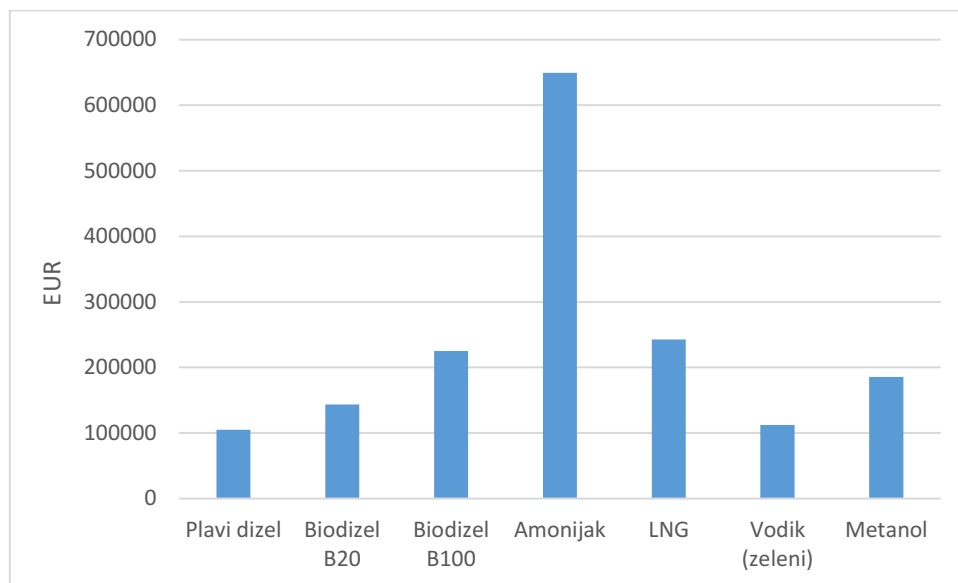


Slika 14. Trošak po prijedenoj udaljenosti za analizirana goriva

U Tablici 11 i na Slici 15 navedeni su troškovi goriva u jednoj godini za svako od analiziranih goriva.

Tablica 11. Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za trajekt

Vrsta goriva	EUR
Plavi dizel	105211
Biodizel B20	143628
Biodizel B100	224948
Amonijak	649489
LNG	242798
Vodik (zeleni)	112497
Metanol	185666



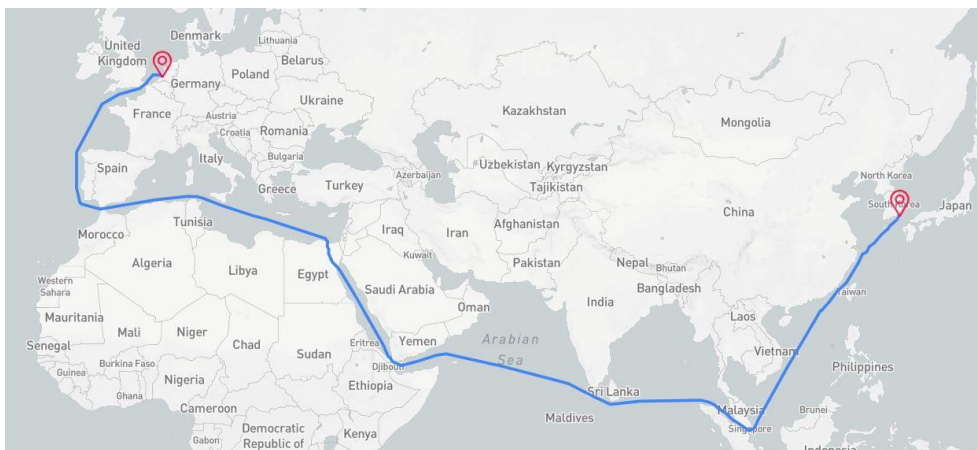
Slika 15. Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za trajekt

4.2 Kontejnerski brod One Mackinac

Kontejnerski brod One Mackinac, prikazan na Slici 16, izgrađen je 2015. godine i plovi pod zastavom Japana. Ima nosivost 13900 kontejnera. Analizirana ruta plovidbe je Rotterdam-Busan, prikazana na Slici 17.



Slika 16. Kontejnerski brod One Mackinac [38]



Slika 17. Ruta Rotterdam-Busan [39]

Podaci za analizu broda i rute prikazani su u Tablici 12.

Tablica 12. Karakteristike kontejnerskog broda i rute plovidbe[40]

Dužina između okomica, L_{pp} (m)	366
Širina, B (m)	52
Gaz, T (m)	15
Snaga glavnog motora, P_{ME} (kW)	65200
Snaga pomoćnog motora, P_{AE} (kW)	7000
Projektna brzina broda, v_{de} (čv)	22
TEU	13900
Nosivost (t)	146867
Trajanje puta, t (h)	600
Dužina puta, l (nm)	12515
Godišnji broj ponavljanja, N_A	6

Zbog rasporeda plovidbe, smanjenja potrošnje goriva i vremenskih uvjeta, brzina broda u realnim uvjetima razlikuje se od projektne brzine broda (v_{de}). Formule i proračunska metodologija preuzeti su iz [35]. Prosječna brzina broda (v_{ave}) računa se dijeljenjem dužine rute (l) s vremenom puta (t). Srednja brzina v_{ave} računa se prema:

$$v_{ave} = \frac{l}{t} \quad (9)$$

$$v_{ave} = 20,86 \text{ čv} \quad (10)$$

Prosječna snaga glavnog motora ($P_{ME,ave}$) računa se kao 75 % snage glavnog motora (P_{ME})

[41]:

$$P_{ME,ave} = 0,75 \cdot P_{ME} \quad (11)$$

$$P_{ME,ave} = 48900 \text{ kW} \quad (12)$$

Pretpostavljeno opterećenje pomoćnog motora $P_{AE,ave}$ je 50 %:

$$P_{AE,ave} = 3500 \text{ kW} \quad (13)$$

Sumiranjem $P_{AE,ave}$ i $P_{ME,ave}$ računamo P_{ave} :

$$P_{ave} = 52400 \text{ kW} \quad (14)$$

Potrošnja energije po udaljenosti (EC), postojećeg broda pogonjenog dizelskim motorom omjer je srednje snage i prosječne brzine:

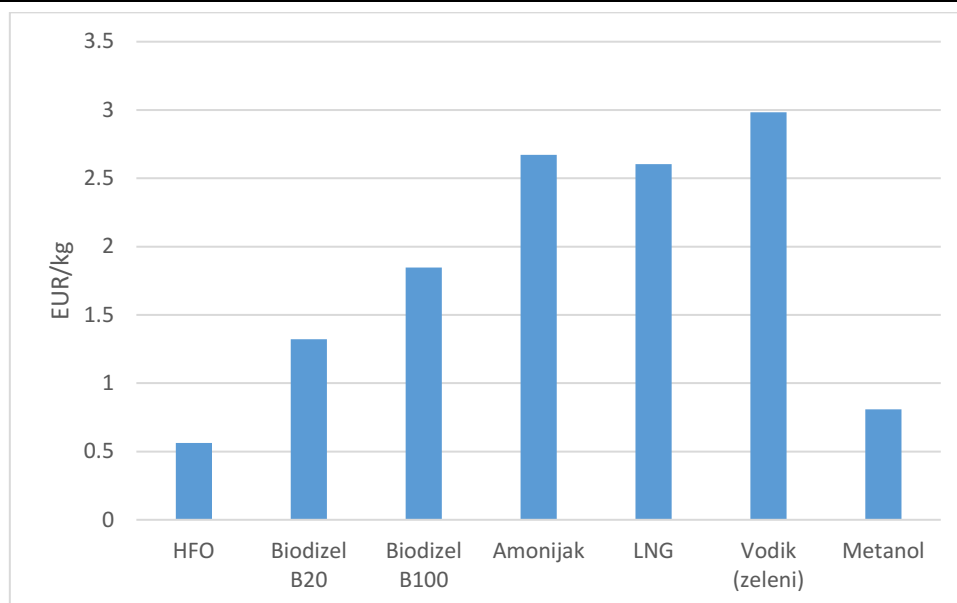
$$EC = \frac{P_{ave}}{v_{ave}} \quad (15)$$

$$EC = 2512,2 \text{ kWh/nm} \quad (16)$$

U Tablici 13 i na Slici 18 navedene su specifične cijene brodskih goriva, koje su bile na snazi u listopadu 2022. u Rotterdamu.

Tablica 13. Specifična cijena analiziranih goriva [36]

Vrsta goriva	Cijena, EUR/kg
HFO	0,562
Biodizel B20	1,322
Biodizel B100	1,846
Amonijak	2,672
LNG	2,604
Vodik (zeleni)	2,983
Metanol	0,808

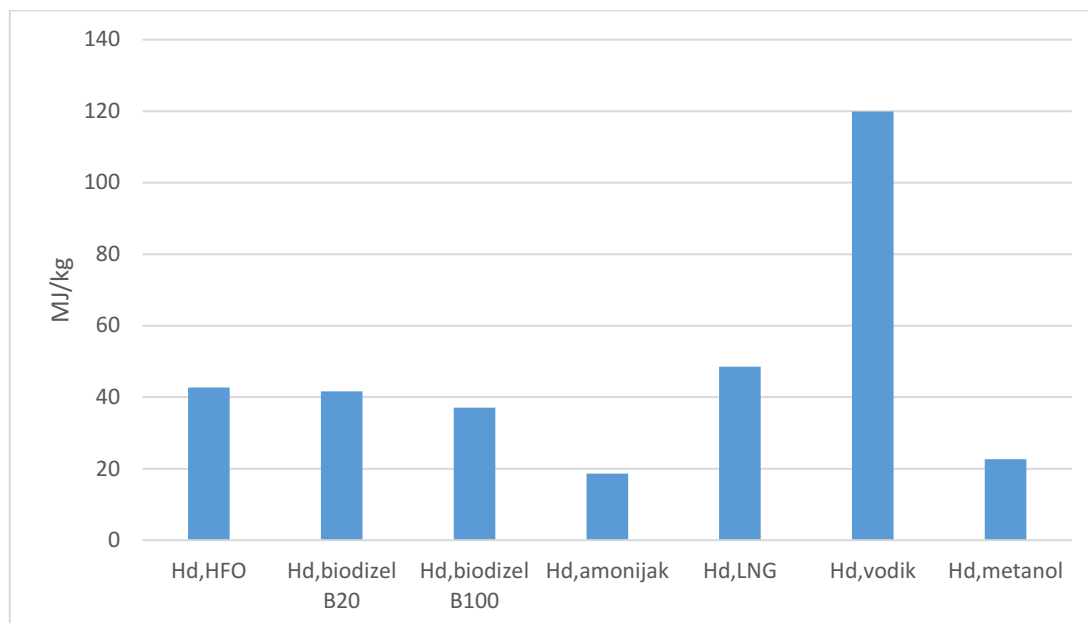


Slika 18. Specifična cijena analiziranih goriva

U Tablici 14 i na Slici 19 navedene su donje ogrjevne moći analiziranih goriva.

Tablica 14. Donja ogrjevna moć analiziranih goriva [37]

Donja ogrjevna moć	MJ/kg
H_d, HFO	42,71
$H_d, \text{biodizel B20}$	41,6
$H_d, \text{biodizel B100}$	37,1
$H_d, \text{amonijak}$	18,6
H_d, LNG	48,5
H_d, vodik	119,9
$H_d, \text{metanol}$	22,659

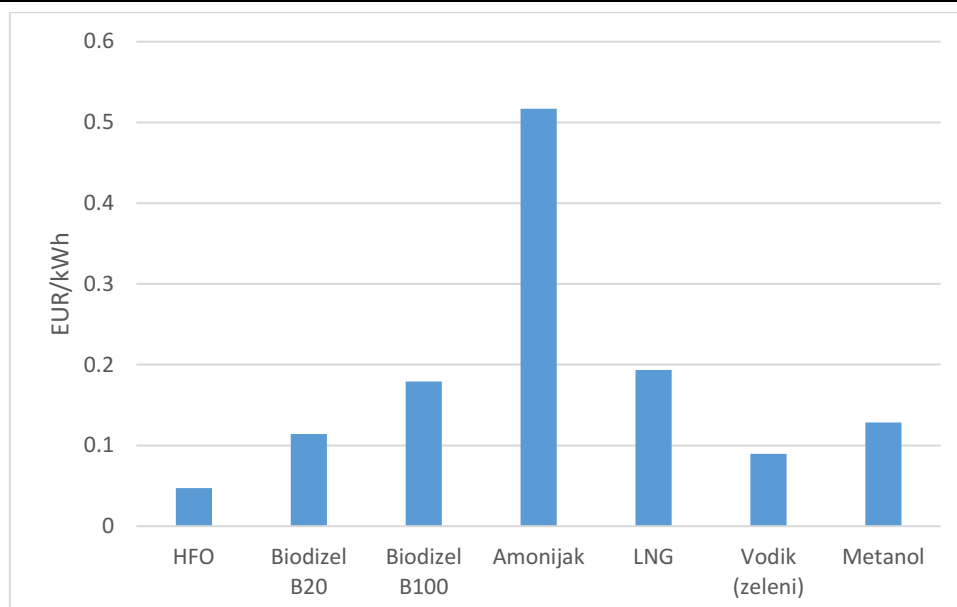


Slika 19- Donja ogrjevna moć analiziranih goriva

U Tablici 15 i na Slici 20 navedene su vrijednosti u EUR/kWh za svako od analiziranih goriva

Tablica 15. Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva

Vrsta goriva	EUR/kWh
HFO	0,047
Biodizel B20	0,114
Biodizel B100	0,179
Amonijak	0,517
LNG	0,193
Vodik (zeleni)	0,089
Metanol	0,128

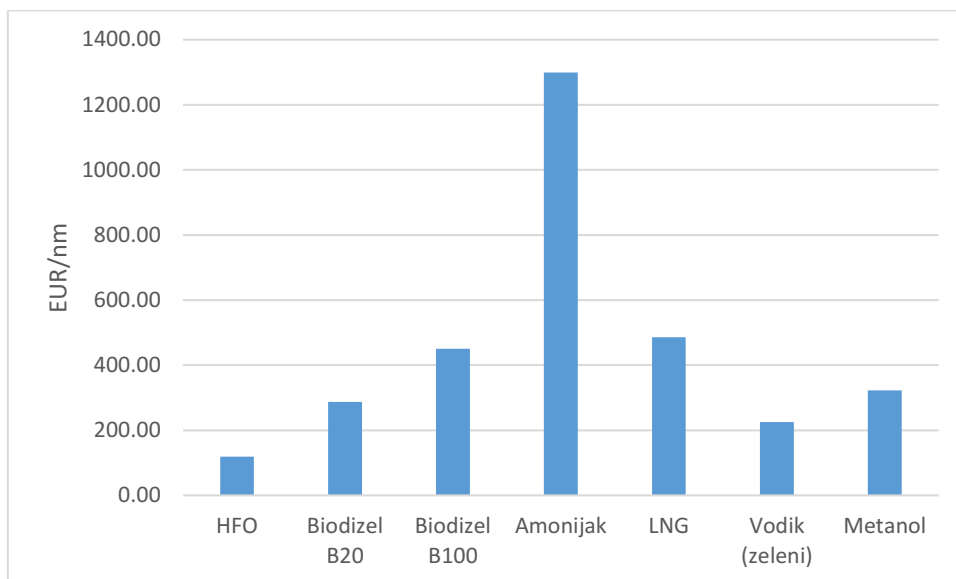


Slika 20. Vrijednost EUR/kWh za analizirana goriva

U Tablici 16 i Slici 21 navedeni su troškovi u EUR/nm za svako od analiziranih goriva.

Tablica 16. Trošak po prijedenoj udaljenosti za analizirana goriva

Vrsta goriva	EUR/nm
HFO	118,94
Biodizel B20	287,28
Biodizel B100	449,94
Amonijak	1299,10
LNG	485,64
Vodik (zeleni)	225,02
Metanol	322,56

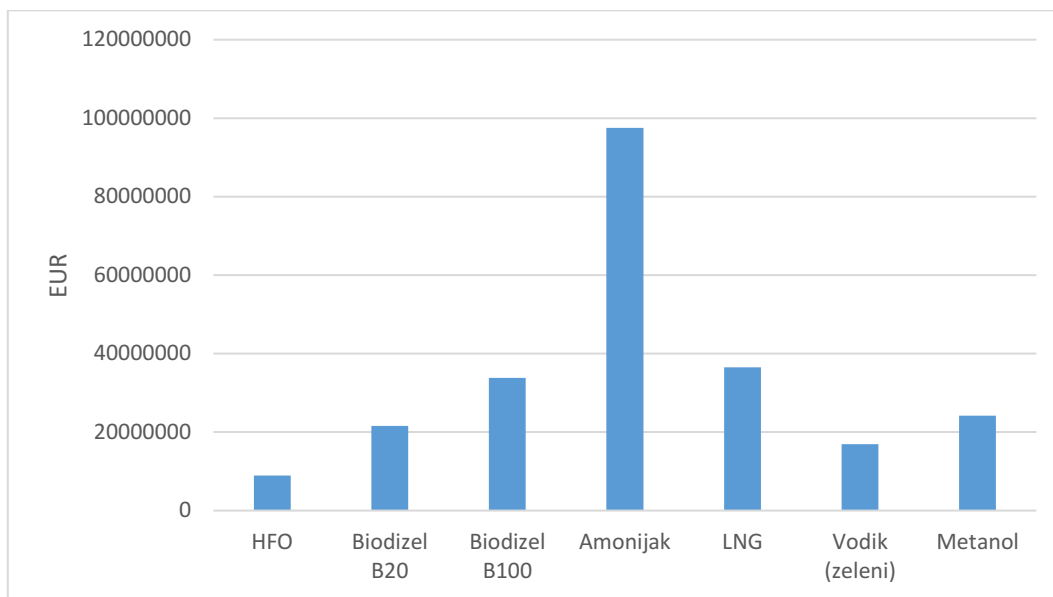


Slika 21. Trošak po prijedenoj udaljenosti za analizirana goriva

U Tablici 17 i na Slici 22 navedeni su troškovi goriva u jednoj godini za svako od analiziranih goriva.

Tablica 17. Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za kontejnerski brod

Vrsta goriva	EUR
HFO	8931545
Biodizel B20	21572163
Biodizel B100	33785882
Amonijak	97549639
LNG	36466905
Vodik (zeleni)	16896379
Metanol	24221346



Slika 22. Troškovi analiziranih goriva u jednoj godini za kontejnerski brod

5 ANALIZA REZULTATA

Provedenom ekonomskom analizom na trajektu Kornati i kontejnerskom brodu One Mackinac, možemo zaključiti da klasično brodsko dizelsko gorivo predstavlja za sada najjeftiniju opciju za pogon broda. Međutim, nametanjem dodatnih trošarina na goriva fosilnog podrijetla i plaćanjem nameta za količine ispušnih plinova koje brod proizvede, ekonomska analiza pokazati će drugačije rezultate. Analizom alternativnih goriva možemo potvrditi da ispuštaju mnogo manje štetnih plinova u atmosferu i samim time biti će u skladu s nametnutim normama MARPOL-a, te neće biti podvrgnuti dodatnim nametima. Biodizelsko gorivo zbog načina nastajanja ne spada u fosilna goriva i samim time emitira puno manje emisija štetnih plinova nego klasičan dizel, ali zbog načina proizvodnje ne može biti masovno korišten kao pogonsko gorivo. Ukapljeni prirodni plin alternativno je gorivo koje već sada, zbog svojih prednosti nailazi svoje mjesto u pomorskom prometu, ponajviše u brodovima koji ga transportiraju. Vodik predstavlja gorivo koje ima najveći potencijal u budućnosti, može se proizvoditi iz svih oblika obnovljive energije (vjetar, geotermalna, solarna energija), trenutno je najveća mana vodika visoka cijena, no prema projekcijama cijena vodika bi trebala padati svake godine sve više, što će ga činiti sve boljom alternativnom opcijom goriva. Prednost metanola kao alternativnog goriva je niska nabavna cijena što ga u kombinaciji s dobrom ogrjevnom moći, te lakoj prilagodljivosti na postojeći dizelski sustav, čini dobrom opcijom za pogon brodova. Amonijak kao alternativno gorivo, ima visoku cijenu, te zahtjeva visoke standarde za skladištenje, što ga čini najmanje pogodnim izborom. Analiza primjenjivosti alternativnih goriva, provedena u ovom radu uključuje određena pojednostavljena, pretpostavke i ograničenja, kao što su:

- Energetski zahtjevi broda na temelju kojih se određuje potreba za određenim gorivima procijenjeni su približnim modelima i za točnije rezultate nužno je detaljnije razmatranje stvarne potrošnje energije,
- Cijene brodskih goriva uzete su kao konstantne vrijednosti, iako je riječ o izrazito fluktuirajućim veličinama u posljednje vrijeme, čime bi kvalitetnija interpretacija rezultata zahtijevala i analizu senzitivnosti,
- U daljnjim analizama u obzir bi trebalo uzeti specifičnosti područja u kojem brod plovi u smislu ocjene dostupnosti pojedinih goriva i njihove cijene na ciljanom lokalitetu,
- Viša razina točnosti ekonomske analize uključila bi i investicijske troškove brodskog energetskog sustava, za svako od analiziranih goriva.

6 ZAKLJUČAK

Upotreba goriva fosilnog podrijetla zbog štetnog učinka na okoliš mora biti smanjena. Međunarodna pomorska organizacija nastoji putem regulativa smanjiti emisije štetnih plinova u pomorskom prometu, te je vidljiva tendencija ka sve strožim regulatornim okvirima koji ograničavaju štetne emisije s brodova. U težnji za zamjenom klasičnih goriva fosilnog podrijetla, javljaju se alternativne opcije koje emitiraju znatno manje količine štetnih plinova u okoliš prilikom proizvodnje te u eksploatacijskim uvjetima. U ovom radu razmatrana su alternativna goriva te usporedba s klasičnim gorivima fosilnog podrijetla, isto tako proveden je pregled konfiguracija brodskih energetske sustava pogonjenih isključivo alternativnim gorivima ili „dual fuel“ konfiguracijom pogona. Ekonomska analiza provedena je na trajektu Kornati te kontejnerskom brodu One Mackinac. Vodik se nameće kao alternativno gorivo budućnosti, predstavlja veliki potencijal za smanjenje štetnih plinova i usporavanje globalnog zatopljenja zbog činjenice da vodik kao gorivo izgara bez štetnih emisija. Najveća barijera u primjeni vodika je što u tekućem i plinovitom stanju ima vrlo malu gustoću, te zauzima veliki volumen u usporedbi sa standardnim dizelskim gorivima, isto tako barijeru predstavlja manjak dostupnih punionica, prevelika cijena, te slaba ukupna učinkovitost s obzirom na ostale alternativne opcije pogona. Isto tako biodizel ima potencijal da bude jedna od alternativnih opcija goriva. Biodizel može u budućnosti zamijeniti klasična brodska dizelska goriva. Ima karakteristike klasičnog dizelskog goriva uz znatno manje emisije. Glavni nedostatak biodizela je što se proizvodi većinski iz usjeva koji služe za prehranu ljudi i stoke, te sve dok se ne nađe način za rješenje tog problema neće se moći proizvoditi u većim količinama. Valja napomenuti da analiza provedena u ovom radu obuhvaća samo cijene goriva te njihov energetski potencijal, dok detaljnija analiza zahtijeva proširenje granica sustava na investicijske troškove remotorizacije analiziranih energetske postrojenja, kao i detaljniju analizu dostupnosti goriva duž plovne rute analiziranih brodova. Isto tako, posebnu pozornost treba posvetiti i sigurnosti pojedinih goriva, što nije jednostavno uključiti u ekonomsku analizu. Traženje idealnog rješenja složeno je jer ne postoji jedno alternativno gorivo i tehnologija koja je idealna u svim aspektima.

LITERATURA

- [1] https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0131_HR.html (pristup: 20.11.2022.).
- [2] *United Nations Framework Convention Climate Change (UNFCCC). Climate Change Information kit*, <https://unfccc.int/resource/iuckit/cckit2001en.pdf>, 2001. (pristup: 20.11.2022.).
- [3] *Flagships*, <https://flagships.eu/about/> (pristup: 22.12.2022.).
- [4] Ivandić, I., *Sustav goriva brodskih dizelskih motora*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Završni rad, 2018.
- [5] Šarčević, L., *Sustav pripreme i dobave goriva na brodu za kružna putovanja*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Završni rad, 2022.
- [6] Chen L., Yip T.L., Mou J.: Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 280-291, 2018.
- [7] Giljanović, T., *Vodik kao gorivo za pogon plovnog objekta*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Diplomski rad, 2022.
- [8] *DNV*, <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/How-newbuilds-can-comply-with-IMOs-2030-CO2-reduction-targets.html> (pristup: 17.1.2023.).
- [9] Bužimkić, A., *Biodizelsko gorivo i njegova primjena u pomorstvu*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Završni rad, 2022.
- [10] Jurišić, V., *IGF Pravilnik i uporaba LNG-a kao brodskog goriva*, Sveučilište u Dubrovniku, Pomorski odjel, Završni rad, 2020.
- [11] *HEP Plin*, <https://www.hep.hr/plin/o-nama/o-plinu/1533> (pristup: 17.1.2023.).
- [12] <https://hrcak.srce.hr/file/285971> (pristup: 17.1.2023.).
- [13] Le Fevre C., *A review of demand prospects for LNG as a marine transport fuel*, The Oxford Institute for Energy studies, June, 2018.
- [14] *Types of LNG Carriers* (mastermariners.org.au) (pristup: 18.1.2023.).
- [15] Bronzan, B., *LNG(ukapljeni prirodni plin)*, Energetika marketing, Zagreb, 1999.
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/LNG_carrier (pristup: 18.1.2023.).

- [17] *Hrvatska enciklopedija*, vodik | Hrvatska enciklopedija (pristup: 18.1.2023.).
- [18] Ustolin F, Paltrinieri N, Berto F., *Loss of integrity of hydrogen technologies: A critical review*. International Journal of Hydrogen Energy, 45(43), 23809-23480, 2020.
- [19] Negurescu, N.; Pana, C.; Cernat, A.: „*Aspects of using hydrogen in SI engine*“, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 74., 2012.
- [20] ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf (maritimecyprus.com) (pristup: 21.1.2023.).
- [21] Seddiek, I. S.; Mohamed, M. E.; Ammar, N. R.: „The hydrogen-fuelled internal combustion for marine applications with a case study“, Brodogradnja, 66, 23-38, 2015.
- [22] Abe JO, Popoola API, Ajenifuja E, Popoola OM. *Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation*, International Journal of Hydrogen Energy, 44(29): 15072-15086, 2019.
- [23] *ENERGY.GOV*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (pristup: 22.1.2023.).
- [24] Šupraha, L., *Amonijak kao alternativno gorivo budućnosti*, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Diplomski rad, 2022.
- [25] Senčić, T., „*Podloge s predavanja kolegija Goriva, maziva i voda – Alternativna goriva*“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2022.
- [26] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Metanol> (pristup: 23.1.2023.).
- [27] Vidović, E., *Metanol – zvijezda među kemikalijama*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, Vol 55, Issue 2, 84-100, 2016.
- [28] Vladimir, N., Bakica, A., Perčić M., Jovanović I., *Modular Approach in the Design of Small Passenger Vessels for Mediterranean*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol 10, 117, 2022.
- [29] Ančić, I., *Energetska učinkovitost i ekološka prihvatljivost brodskih integriranih energetske sustava*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Disertacija, 2016.
- [30] Kralj, P., *Brodski energetske sustavi*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Autorska knjiga-stručna knjiga, 2017.

- [31] Zbigniew, S., *A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges*, Compedium of Hydrogen Energy, Vol 3, 177-217, 2016.
- [32] Eichlseder, H.; Grabner, P.; Schaffer, K., *Internal Combustion Engine- An Alternative Energy Convertor for Hydrogen*, Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, Vol 23, 3130, 2020.
- [33] https://hr.wikipedia.org/wiki/M/T_Kornati (pristup: 24.1.2023.).
- [34] <http://www.duing.hr/novosti/svecana-primopredaja-mt-kornati> (pristup: 24.1.2023.).
- [35] Perčić M., Vladimir, N., Fan, A., *Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia*, Applied Energy, Vol 279, 1-18, 2020.
- [36] *Lloyd's list*, <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1142012/In-search-of-price-feasible-alternative-marine-fuel> (pristup: 24.1.2023.).
- [37] Halasz, B., *Toplinske tablice*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [38] *Vesseltracker*, <https://www.vesseltracker.com/en/Ships/One-Mackinac-9689603.html> (pristup: 24.1.2023.).
- [39] *Better ways*, <https://www.cma-cgm.com/products-services/line-services/flyer/FAL>, (pristup: 24.1.2023.).
- [40] Jovanović, I., Perčić, M., Koričan, M., Vladimir, N., Fan, A., *Investigation of the Viability of Unmanned Autonomous Container Ships under Different Carbon Pricing Scenarios*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol 10, 1991, 2022.
- [41] Ančić, I., Vladimir, N., Cho, D., S., *Determining environmental pollution from ships using Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility (I4E)*, Marine Policy, Vol 95, 1-7, 2018.