

# Usporedba učinkovitosti tradicionalnih i alternativnih brodskih goriva za brodske motore

---

Radovčić, Jerko

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:169529>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



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

Repository / Repozitorij:

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



**uniri** DIGITALNA  
KNJIŽNICA



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**JERKO RADOVČIĆ**

**USPOREDBA UČINKOVITOSTI TRADICIONALNIH I  
ALTERNATIVNIH BRODSKIH GORIVA ZA BRODSKE  
MOTORE  
ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**USPOREDBA UČINKOVITOSTI TRADICIONALNIH I  
ALTERNATIVNIH BRODSKIH GORIVA ZA BRODSKE  
MOTORE**

**COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF TRADITIONAL  
AND ALTERNATIVE MARINE FUELS FOR SHIP ENGINES**

**ZAVRŠNI RAD  
BACHELOR THESIS**

Kolegij: Brodski motori

Mentor: prof. dr. sc. Dean Bernečić

Student: Jerko Radovčić

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112083588

Rijeka, rujan 2024.

Student: Jerko Radovčić

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112083588

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom  
**„Usporedba učinkovitosti tradicionalnih i alternativnih goriva za brodske motore“** izradio

samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Deana Bernečića

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

Student:

JRadovčić

Ime i prezime studenta:

Jerko Radovčić

Student: Jerko Radovčić

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112083588

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor

JRadovčić

## SAŽETAK

U završnom radu pod nazivom „Usporedba učinkovitosti tradicionalnih i alternativnih goriva za brodske motore” analizirana je tema koja se tiče pomorske industrije i održivosti. U radu su istražene karakteristike tradicionalnih goriva poput dizela i teškog goriva te alternativnih goriva kao što su LNG, vodik, amonijak i metanol u kontekstu njihove primjene u brodskim motorima. Kroz energetske učinkovitost, emisiju štetnih plinova, ekonomsku održivost, autor je prikazao prednosti i nedostatke svake vrste goriva u kontekstu brodskih motora. Rezultati istraživanja pružaju uvid u potencijalne mogućnosti smanjenja emisija štetnih plinova i povećanja energetske učinkovitosti u pomorskoj industriji kroz primjenu alternativnih goriva. Ovaj rad pruža korisne smjernice za donošenje informiranih odluka o odabiru goriva za brodske motore s ciljem postizanja održivijeg pomorskog sektora u budućnosti.

**Ključne riječi:** alternativna goriva, energetska učinkovitost, emisije štetnih plinova, smanjenje emisija štetnih plinova, tradicionalna goriva.

## **SUMMARY**

The final thesis titled "Comparison of the Efficiency of Traditional and Alternative Fuels for Ship Engines" analyzes an important topic concerning the maritime industry and sustainability. The thesis investigates the characteristics of traditional fuels such as diesel and heavy fuel oil, as well as alternative fuels like LNG, hydrogen, ammonia, and methanol, in the context of their application in marine engines. Through the analysis of energy efficiency, emissions of harmful gases, and economic sustainability, the author presents the advantages and disadvantages of each type of fuel in the context of marine engines. The research results provide insight into potential opportunities for reducing harmful gas emissions and increasing energy efficiency in the maritime industry through the use of alternative fuels. This thesis offers valuable guidelines for making informed decisions on fuel selection for marine engines with the goal of achieving a more sustainable maritime sector in the future.

**Keywords:** traditional fuels, alternative fuels, energy efficiency, harmful gas emissions, reduction of harmful gas emissions.

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. VAŽNOST USPOEDBE UČINKOVITOSTI .....	2
1.2. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	2
2.1. EMISIJE CO <sub>2</sub> .....	3
2.2. EMISIJE NO <sub>x</sub> .....	3
2.3. EMISIJE SO <sub>x</sub> .....	5
3.1. SEEMP.....	7
3.2. EEDI .....	7
4.1. TEŠKO GORIVO (HFO) .....	9
4.2. GORIVO (MDO-marine diesel oil) .....	9
5.1. LNG.....	10
5.2. VODIK.....	12
5.3. METANOL .....	13
5.4. AMONIJAK.....	15
6.1. USPOREDBA GORIVA PREMA OGRJEVNOJ MOĆI .....	17
6.2. USPOREDBA TROŠKOVA METANOLA LNG-A I VODIKA .....	19
6.3. USPOREDBA LNG I TEŠKOG GORIVA .....	20
6.4. USPOREDBA EMISIJA LNG, HFO I MDO GORIVA .....	21
6.5. USPOREDBA VODIKA, AMONIJAKA I METANOLA.....	23
6.6. PRETPOSTAVKE CIJENE GORIVA .....	25
6.7. „HVATANNJE“ UGLJIKA .....	26
ZAKLJUČAK.....	27



LITERATURA .....	29
KAZALO KRATICA.....	33
POPIS SLIKA:.....	34

# 1. UVOD

Brodaska industrija predstavlja ključni segment svjetske trgovine i čini preko 80% ukupnog transporta na Zemlji. Prednjači nad ostalim oblicima transporta zbog mogućnosti iznimno velike pohrane tereta uz bolju ekološku i ekonomsku učinkovitost, što čini brodarstvo neophodnim za funkcioniranje globalnog gospodarstva. Već desetljećima tradicionalna goriva, poput dizela i teškog goriva, osnovni su izbor za pogon brodskih motora zahvaljujući svojoj relativno niskoj cijeni, visokoj energetske gustoći, omogućavajući brodovima dugotrajnost i pouzdanu plovidbu. Iako imaju svoje prednosti, fosilna goriva su također glavni izvor zagađenja okoliša budući da izgaranjem emitiraju stakleničke plinove, sumporove i dušikove okside i ostale štetne plinove. Zagađenje zraka predstavlja ozbiljan problem koji utječe na čovjeka izazivajući zdravstvene probleme, poput respiratornih bolesti, te na okoliš stvarajući kisele kiše koje narušavaju biljni svijet, na klimatske promjene koje mogu uzrokovati ekstremne vremenske uvjete i utjecati na globalne ekosustave.

Klimatske promjene čine jedan od najvećih izazova koje čeka čovječanstvo, a odnose se na dugoročne promjene temperature koje mogu uzrokovati globalno zatopljenje čime dolazi do drastičnih promjena za čovjeka i njegovu okolinu, kao što su otapanje leda i time povećanje razine mora. Međutim, kako svijest o klimatskim promjenama raste, međunarodne regulacije postaju sve strože, brodska industrija prisiljena je na daljnje iznalaženje rješenja, odnosno odgovarajućeg izvora i vrste goriva koje bi odgovaralo u ekološkom, a isto tako i u ekonomskom smislu. Za regulaciju je zadužena Međunarodna pomorska organizacija (IMO) koja u prvi plan stavlja smanjenje emisija, usmjeravajući industriju prema razvoju održivih izvora energije i zadužena je za implementaciju propisa, poput ograničenja sumpora i poticanje energetske učinkovitosti brodova. Kako bi ispunili cilj o smanjenju zagađenja zraka iz brodova, brodska industrija usmjerava se prema alternativnim gorivima koja ispunjavaju ekološke regulative, poput emisija stakleničkih plinova, emisije sumporovih i dušikovih oksida. Osim smanjenja emisija, alternativna goriva bi mogla pridonijeti i poboljšanju energetske učinkovitosti, smanjenju operativnih troškova i omogućiti stabilnost cijena goriva.

## 1.1. VAŽNOST USPOREDBE UČINKOVITOSTI

Istraživanje učinkovitosti različitih vrsta goriva za brodске motore ključno je zbog nekoliko važnih razloga. Prvo, ekonomske prednosti optimalne učinkovitosti goriva omogućuju značajno smanjenje operativnih troškova u brođarskoj industriji, što je izuzetno važno u kontekstu globalne ekonomije. Pored ekonomskih razloga, ekološki aspekt je također važan brođska industrija je veliki izvor emisija stakleničkih plinova i zagađivača, pa učinkovita goriva mogu pomoći u smanjenju negativnog utjecaja na okoliš. Nadalje, mnoge zemlje i međunarodne organizacije uvode sve strože ekološke regulacije i standarde koji ograničavaju emisije s brodova zbog čega je pronalaženje goriva koja ispunjavaju ove zahtjeve ključno za usklađivanje s regulacijama. Dugoročna održivost predstavlja još jedan izazov zato što su fosilna goriva ograničen resurs koji će se na kraju iscrpiti; istraživanje alternativnih goriva može osigurati prijelaz na održivije izvore energije. Također, performanse i pouzdanost brođskih motora mogu varirati ovisno o vrsti goriva, pa otkrivanje goriva koja poboljšavaju učinkovitost i smanjuju potrebe za održavanjem može značajno produžiti vijek trajanja motora. Konačno, sigurnost je još jedan kritičan faktor jer neka goriva mogu biti sigurnija za rukovanje i skladištenje, smanjujući rizik od nezgoda i povećavajući sigurnost posade i tereta. Svi ovi faktori zajedno ističu važnost temeljitog istraživanja učinkovitosti različitih vrsta goriva, kako bi se brođska industrija mogla suočiti s budućim izazovima i postati ekološki i ekonomski održivija.

## 1.2. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Glavni cilj završnog rada je istražiti i analizirati razlike između različitih vrsta goriva kako bi se utvrdilo koje gorivo pruža optimalnu učinkovitost za brođske motore. Kroz analizu ogrjevnе moći, emisija stakleničkih plinova, utjecaja na okoliš, istraživanje će pružiti uvid u prednosti, mane i potencijalne izazove korištenja tradicionalnih i alternativnih goriva u brođarskoj industriji. Konačni cilj je ponuditi relevantne informacije i preporuke koje bi mogle koristiti u odlučivanju o budućim investicijama i politikama vezanim uz energetsку učinkovitost brođskih sustava. U tom kontekstu, istraživanje će uključivati pregled trenutnih trendova u uporabi goriva, analizu ekonomskih faktora te mogućnosti za prelazak na održivija rješenja.

## 2. GLAVNE EMISIJE S BRODOVA

### 2.1. EMISIJE CO<sub>2</sub>

Emisije CO<sub>2</sub> iz brodskih motora predstavljaju značajan izazov za zaštitu okoliša. Ugljik je sadržan u gotovo svim konvencionalnim brodskim gorivima te se prilikom izgaranja transformira u ugljikov dioksid. U slučaju nepotpunog izgaranja, koje rezultira stvaranjem ugljikovog monoksida CO, također dolazi do oksidacije u atmosferi i stvaranja ugljikovog dioksida [1]. CO<sub>2</sub>, odnosno ugljični dioksid jedan je od najučestalijih stakleničkih plinova u atmosferi [2]. Staklenički plinovi ponašaju se kao staklenici i zadržavaju toplinu u Zemljinoj atmosferi i na taj način dolazi do globalnog zatopljenja, a time do otapanja leda i povećanja razine mora. Staklenički efekt se povećava ispuštanjem određenih plinova, a CO<sub>2</sub> čini oko 85% stakleničkih plinova (GHG) koji se ispuštaju u SAD-u [3].

Uz globalno zatopljenje CO<sub>2</sub> ima utjecaj i na klimatske promjene, kiselost oceana, ekološke i ekonomske posljedice te na ljudsko zdravlje. Međutim, kroz kombinaciju regulatornih mjera, kao što su korištenje raznih drugih alternativnih goriva, smanjenje brzine plovidbe ili optimizacija pomorskih ruta, naprednih tehnologija, kao što je korištenje „*scrubbers*“ (uređaj za ispiranje dimnih plinova na izlazu iz motora) ili ugradnjom električnih ili hibridnih sustava, moguće je značajno smanjiti ovaj negativni utjecaj na globalnu klimu. Međunarodna pomorska organizacija (IMO) postavila je ciljeve za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> iz brodova. Cilj je smanjiti emisije CO<sub>2</sub> za najmanje 40% do 2030. godine i 70% do 2050. godine u usporedbi s razinama iz 2008. godine [4].

### 2.2. EMISIJE NO<sub>x</sub>

Dizelski motori putem ispušnih plinova zagađuju atmosferu. Jedan od zagađivača jesu dušikovi oksidi. NO<sub>x</sub> je pojam za sve plinove koji u sebi sadrže dušik, a najpoznatiji je dušikov dioksid NO<sub>2</sub> koji nastaje oksidacijom dušikovog monoksida NO. Dušikovi oksidi nastaju izgaranjem fosilnog goriva uz prisutnost kisika i predstavljaju značajne probleme za čovječanstvo, kao što su formiranje troposferskog ozona i smoga, stvaranje kiselih kiša, uzročnici su povećanja razine toksina u vodama koji štete ribama i ostalim vodenim organizmima. Isto tako imaju direktan utjecaj na ljudsko zdravlje jer mogu izazvati astmu i bronhitis te oštećuju plućno tkivo. Stoga je uvedena kontrola emisija NO<sub>x</sub> od strane IMO s

usvajanjem priloga VI. Međunarodne konvencije o sprječavanju onečišćenja s brodova (MARPOL) koji je stupio na snagu 19. svibnja 2005. godine.

Kontrola emisija NO<sub>x</sub> odnosi se na dizelske motore snage veće od 130 kW bez obzira na tonažu broda.

### **TIER 1**

U Tier 1 ulaze svi brodovi proizvedeni nakon 1. siječnja 2000. godine. Ovi brodovi ne smiju ispuštati više od 17,0 g/kWh emisija u atmosferu pri broju okretaja motora manjim od 130 okretaja/min. Za motore s brojem okretaja između 130 i 1999 okretaja/min, dozvoljena količina emisija računa se prema formuli  $45 \cdot n(-0.2)$  gdje je "n" broj okretaja motora. Za motore s brojem okretaja od 2000 okretaja/min ili više emisije ne smiju prelaziti 9,0 g/kWh [5].

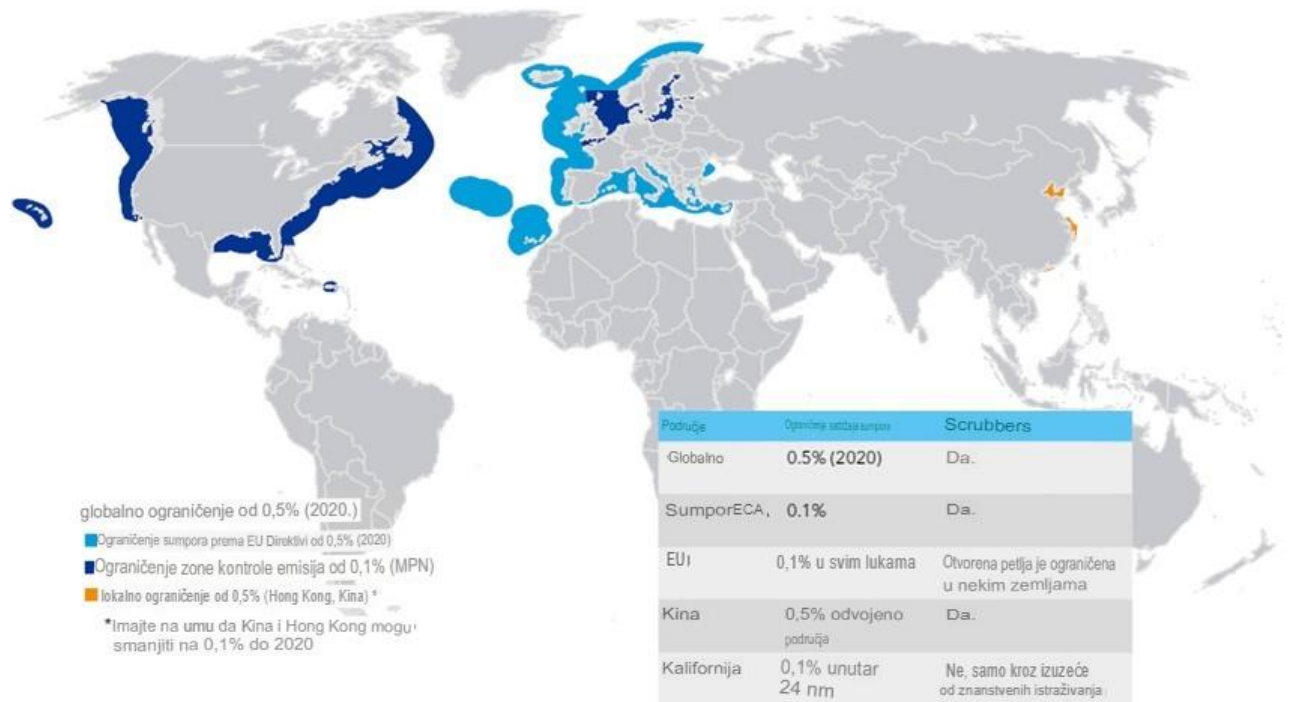
### **TIER 2**

Tier 2 obuhvaća motore proizvedene 1. siječnja 2011. ili kasnije. Ovi motori s brojem okretaja manjim od 130 okretaja/min ne smiju ispuštati više od 14,4 g/kWh. Za motore s brojem okretaja između 130 i 1999 okretaja/min, dozvoljena emisija izračunava se prema formuli  $44 \cdot n(-0.23)$ . Motori s brojem okretaja većim od 2000 okretaja/min ne smiju ispuštati više od 7,7 g/kWh [5].

### **TIER 3**

Tier 3 se primjenjuje od 1. siječnja 2016. godine u posebnim područjima s rigoroznim propisima o emisijama (Emission Control Areas, "ECA"). Ta područja uključuju Sjevernu Ameriku i Karipsko more Sjedinjenih Država, a od 1. siječnja 2021. godine i Baltičko i Sjeverno more. U tim područjima emisije ispušnih plinova za određene brodove ograničene su na 3,4 g/kWh pri okretajima motora manjim od 130 okretaja/min, dok pri okretajima motora većim od 2000 okretaja/min emisije ne smiju prelaziti 2,0 g/kWh. Za sve brzine između tih vrijednosti, količina NO<sub>x</sub> emisija računa se prema formuli  $9 \cdot n(-0.2)$  [5].

### 2.3. EMISIJE SO<sub>x</sub>



Slika 1: prikaz ECA zona [6]

Sumporovi oksidi SO<sub>x</sub> nastaju prilikom izgaranja goriva koje sadrži sumpor. Izgaranjem goriva nastaje sumporov oksid SO<sub>2</sub>, a u prisustvu viška kisika nastaje sumporov trioksid SO<sub>3</sub> [8,9]. Oba od navedenih oksida mogu izazvati formiranje sumporne kiseline H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u određenim uvjetima. SO<sub>x</sub> štetno djeluju na čovječanstvo tako što pridonose stvaranje kiselih kiša te mogu izazvati brojne bolesti. U Europi pomorstvo čini približno 4 – 9% emitiranih SO<sub>x</sub>, ali se očekuje da će se taj udio povećati u narednim godinama jer kopneni izvori relativno više smanjuju svoje emisije SO<sub>x</sub> nego pomorstvo. Ako se trend nastavi, pomorstvo će postati najvažniji izvor emisija SO<sub>x</sub> u Europi [10].

Međunarodna pomorska organizacija putem Priloga VI MARPOL konvencije postavlja stroge regulacije emisija SO<sub>x</sub> za brodске motore.

U prilogu VI MARPOL konvencije navodi se:

Globalno ograničenje: nakon 1. siječnja 2020. za sva područja osim kontroliranih emisijskih zona dozvoljena razina sumpora u gorivu je 0,5 % m/m [7].

Globalna ograničenja sumpora u morskim gorivima  
maseni postotak



Slika 2: prikaz dozvoljene količine sumpora u globalnim i kontroliranim emisijskim zonama [7]

Kontrolirane emisijske zone (Emission Control Areas – ECA): Unutar ECA područja (koja uključuju, Baltičko more, Sjeverno more, Sjevernoameričku ECA i Karipsko područje SAD-a), dozvoljena količina sumpora u gorivu je još niža, smanjena na 0,10 % m/m.

### 3. NASLOV POGLAVLJA

#### 3.1. SEEMP

SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) je plan upravljanja energetskom učinkovitošću broda, uspostavljen od strane Međunarodne pomorske organizacije (IMO) s ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova i poboljšanja energetske učinkovitosti brodova. Od 1. siječnja 2013. svi brodovi veći od 400 GT moraju posjedovati SEEMP [11]. SEEMP pruža pristup brodograđevnim tvrtkama da lakše kontroliraju korištenje (potrošnju) goriva.

Ciljevi SEEMP-a uključuju poboljšanje energetske učinkovitosti putem identifikacije i primjene praksi koje povećavaju učinkovitost broda, zatim smanjenje emisija stakleničkih plinova kroz učinkovitije korištenje goriva i optimizaciju rada broda, te osiguranje sustavnog praćenja energetske performansi broda i redovito izvještavanje o postignutim rezultatima.

Struktura SEEMP-a uključuje procjenu učinka koja se odnosi na trenutnu energetsku učinkovitost broda, uključujući potrošnju goriva, emisije i druge relevantne parametre. Također obuhvaća razvoj strategija za poboljšanje energetske učinkovitosti, implementaciju mjera, kontinuirano praćenje i analizu izvedbe mjera te redovitu reviziju i poboljšanje plana kako bi se osigurali ciljevi i identificirala područja za daljnje poboljšanje.

Prednosti SEEMP-a uključuju ekološke prednosti, kao što je smanjenje emisije stakleničkih plinova i drugih zagađivača, čime se pridonosi zaštiti okoliša. Pored toga, smanjena potrošnja goriva može rezultirati značajnim uštedama operativnih troškova. Također, SEEMP osigurava da brodovi ispunjavaju međunarodne standarde i regulative, izbjegavajući moguće kazne i sankcije.

#### 3.2. EEDI

EEDI (Indeks energetske učinkovitosti dizajna) je omjer emisije ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) po toni tereta prevezenoj na jednu nautičku milju. Uvođenje EEDI-a potrebno je zbog nastojanja da se poboljša energetski sustav broda i poveća njegova učinkovitost. Glavni cilj uvođenja EEDI-a je optimizacija potrošnje goriva kroz dizajnerske i operativne mjere, što bi dovelo do smanjenja emisija čestica nastalih izgaranjem goriva.

Za svaki novi brod u međunarodnoj plovidbi kapaciteta 400 GT i više potrebno je izračunati postignuti EEDI koji ne smije premašiti zahtijevani EEDI. Zahtijevani EEDI



izračunava se na temelju vrijednosti referentne EEDI krivulje i faktora smanjenja X. Parametri za izračun zahtijevanog EEDI-a, ovisno o vrsti i veličini broda te vremenskom periodu, određeni su rezolucijom MEPC.

EEDI se zalaže za kontrolu kvalitete goriva globalno, a za neka područja provode se stroži zahtjevi za emisije SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ili PM.

Područja koja su definirana u Prilogu VI kao područja strože kontrole:

1. Baltičko more
2. Sjeverno more
3. Sjevernoameričko područje, američka i kanadska obala
4. Područje oko Kariba [12]

## 4. KONVENCIONALNA BRODSKA GORIVA

### 4.1. TEŠKO GORIVO (HFO)

Teško gorivo poznato kao HFO (heavy fuel oil) nastaje destilacijom sirove nafte u rafinerijama. Većinski sadržaj teškog goriva čini visokorezidni ostatak koji čine teški ugljikovodici poput asfaltena i smole, sumpora i metala poput natrija. Tipično ostatno gorivo spoj je više vrsta ugljikovodika, počevši od spoja ugljikovodika koji sadrži pretežno od 15 do 57 atoma ugljika u molekuli. Zbog svoje velike viskoznosti na niskim temperaturama potrebno ga je dodatno zagrijavati kako bi se dovelo u stanje u kojem ima mogućnost tečenja kroz sustav. Može sadržavati visoke koncentracije sumpora i prilikom izgaranja emitiraju se velike količine sumporovih oksida SO<sub>2</sub>, a osim sumpora može sadržavati i teške metale poput nikla i vanadija koji djeluju korozivno na motor i također prilikom izgaranja negativno utječu na okoliš. Stoga je uvedena regulacija od strane IMO-a i ograničava sadržaj sumpora na 0,5% što je značajan napredak u odnosu na prijašnjih 3,5% [7]. Udio sumpora može varirati, no uz današnju tehnologiju moguće je dobiti teško gorivo sa sadržajem sumpora manjim od 1%.

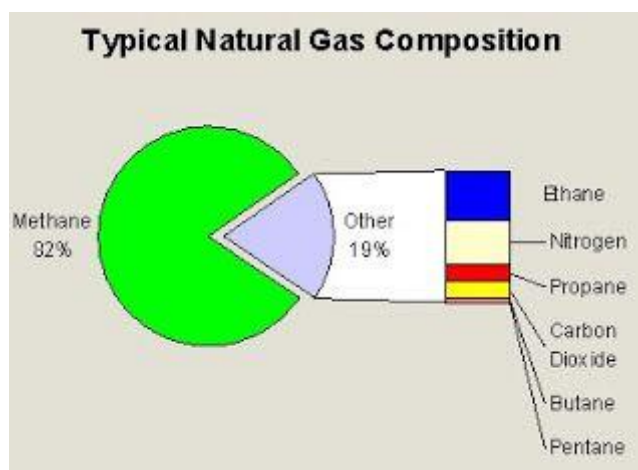
### 4.2. DIZELSKO GORIVO (MDO - Marine Diesel Oil)

Tipično dizelsko gorivo spoj je više vrsta ugljikovodika, počevši od spoja ugljikovodika koji sadrži pretežno 9 do 23 atoma u molekuli. Marine Diesel Oil (MDO) je vrsta brodskog goriva koja se koristi za pogon glavnih i pomoćnih motora te generatora u obalnim područjima i područjima strože regulacije emisija. Sličan je dizelskom gorivu uz nešto veću gustoću koja iznosi od oko 890 kg/m<sup>3</sup> [13]. MDO može biti sastavljen od različitih mješavina destilata i teškog goriva, a omjeri mješavina mogu se kontrolirati u rafinerijama. Rafinerije mogu prilagođavati omjere mješavina kako bi proizvele gorivo koje zadovoljava potrebne karakteristike, uključujući viskoznost, točku izgaranja i sadržaj sumpora. Također, gotove mješavine goriva mogu se dodatno prilagođavati prema potrebama brodova i uvjetima pod kojima se koriste. Ovi omjeri su važni jer utječu na efikasnost motora, emisije i ekonomičnost plovidbe. Postoje vrste MDO-a koje sadrže mali udio teškog goriva, a to su DMB i RMA te vrste s većim udjelima koje se još nazivaju IFO (180, 380). DMB gorivo s manjim udjelom teškog goriva u odnosu na RMA ima maksimalni udio sumpora od 2% i tamno smeđe je boje dok RMA ima maksimalni dopušten udio sumpora od 3,5% te je vidno tamniji od DMB-a [14].

Što se tiče goriva s većim udjelom teškog goriva odnosno IFO gorivom, imamo nekoliko vrsta, a to su RME, RMG i RMK. Bitno je napomenuti da zbog svoje manje viskoznosti u usporedbi s HFO gorivom, MDO nije potrebno dodatno grijati, a također prednjači i u čistoći, stoga ne zahtijeva dodatne filtre.

## 5. ALTERNATIVNA BRODSKA GORIVA

### 5.1. LNG



Slika 3: prikaz sastava LNG-a [15]

LNG je tekući prirodni plin koji se uglavnom sastoji od metana, a može sadržavati i manji postotak drugih ugljikovodika poput etana, propana i butana [16]. To je bezbojan, bezmirisan te vrlo hlapljiv plin što ga čini zapaljivim u kontaktu sa zrakom [17]. Ukapljeni prirodni plin na atmosferskom tlaku ima talište na  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , točku paljenja na  $187,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , te temperature samozapaljenja  $537\text{ }^{\circ}\text{C}$  [18]. Pri temperaturi od  $-163,5^{\circ}\text{C}$  gustoća mu je oko  $468\text{ kg/m}^3$  što ga čini lakšim od zraka [19].

Ukapljeni prirodni plin (LNG) koristi se kao brodsko gorivo već dugi niz godina, prvenstveno na LNG tankerima, gdje se koristi kao „boil-off“ plin, koji nastaje zbog isparavanja tereta i upotrebljava se kao gorivo za pogon broda. Koristi se u brodskim

generatorima pare ili motorima na plin. Značaj LNG-a kao goriva raste zbog njegove sposobnosti da smanji emisije štetnih tvari u usporedbi s tradicionalnim gorivima. Rast spomenutog tržišta uglavnom je posljedica strogih propisa o zaštiti okoliša u obalnim područjima. S obzirom na to da su kopnene industrije smanjile emisije, emisije brodova postaju proporcionalno značajniji dio ukupnih emisija. Procjenjuje se da emisije brodarstva čine 2 – 4% globalnih emisija CO<sub>2</sub>, 10–20% globalnih emisija NO<sub>x</sub>-a i 4 – 8% globalnih emisija SO<sub>x</sub>-a [15].

LNG je prirodni plin koji se hladi na -161°C čime se pretvara iz plinovitog u tekuće stanje. Ovaj proces omogućava smanjenje volumena plina za otprilike 1/600 u odnosu na njegov prvobitni volumen [1]. Ova značajna promjena volumena omogućava učinkovitiji transport i skladištenje prirodnog plina. Nakon ukapljivanja LNG se prevozi posebno dizajniranim LNG tankerima koji su konstruirani tako da moraju imati dvostruku oplatu i da mogu podnositi vrlo niske temperature LNG-a. Po dolasku na terminal LNG se prebacuje u izolirane tankove, posebno konstruirane za skladištenje tekućine. Ovi tankovi moraju održavati nisku temperaturu i minimalizirati isparavanje plinova. Ispuštanje se mora događati jer bi u suprotnom, da nema isparavanja, došlo do rasta temperature i tlaka. Ispušteni plin iz tankova može se koristiti kao gorivo za pretovar i spremanje LNG-a. Kada se tankovi u kojima se nalazi tekući prirodni plin otvore radi pretovara ili pristupa unutrašnjosti spremnika, dolazi do izlivanja ili ispuštanja plina. Ispušteni plin koji se oslobađa može se koristiti kao gorivo ili izvor energije za napajanje procesa pretovara (prijenosa) tekućeg prirodnog plina i njegovog skladištenja. To znači da se taj ispušteni plin nije samo otpadni proizvod već se može koristiti za pokretanje operacija koje su potrebne za rukovanje tekućim prirodnim plinom. Koristeći ispušteni plin kao gorivo za proces pretovara i skladištenja LNG-a, postiže se održivost i efikasnost u korištenju resursa te se smanjuje otpadni plin koji bi se inače mogao izgubiti ili emitirati u okoliš.

Granice zapaljivosti po volumenu: Donja granica eksplozivnosti (LEL) je 5%, a gornja granica eksplozivnosti (UEL) je 15% (s malim promjenama ovisno o sastavu plina). Specifična težina tekućine je 0,45, a plina 0,6 [22, 23].

U usporedbi s tankovima za teška goriva (HFO), tankovi za LNG trebaju biti otprilike 2,5 puta veći zbog manje gustoće i potrebne toplinske zaštite [23]. Ovo predstavlja jedan od nedostataka korištenja LNG-a, jer zahtijeva veće volumene spremnika. LNG se skladišti u membranskim tankovima ili u tankovima s jednom stijenom pri čemu membranski tankovi koriste tanki sloj od nehrđajućeg čelika za održavanje tekuće faze plina i pružaju bolju izolaciju, dok tankovi s

jednom stijenom često zahtijevaju dodatne slojeve izolacije kako bi se održala niska temperatura i spriječilo isparavanje.

Cijena LNG-a ovisi već dugi niz godina o cijeni HFO-a, ali je često jeftinija. Uzimajući u obzir donju ogrjevnu moć (LHV) goriva i njihove cijene, trošak LNG-a je oko 60% troška HFO-a. Na plinskim brodovima trošak isparenog plina smanjuje se zbog ušteda na procesu ponovnog ukapljivanja. Cijene prirodnog plina smanjene su posljednje dvije godine zbog uvođenja plina iz škriljevca na američko tržište. To je razlog zbog kojeg je LNG postao konkurentniji u odnosu na HFO, osobito na područjima ECA (kontroliranih emisija) gdje je potrebno pročišćavanje ispušnih plinova.

Do 2050. godine ukapljeni prirodni plin (LNG) mogao bi zadovoljiti 32% energetske potrebe u pomorskom prometu [15].

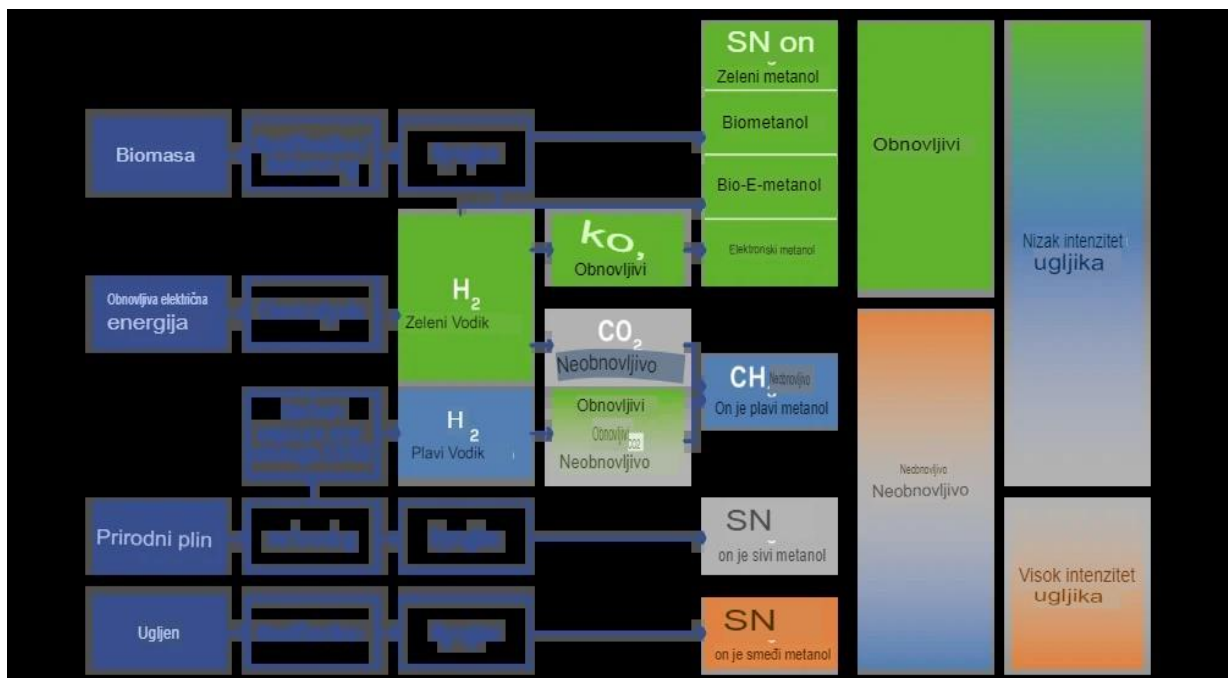
## 5.2. VODIK

Vodik je najlakši i najzastupljeniji kemijski element kojemu je relativna masa 1,0079 i nalazi se svuda po svemiru. Sastoji se od jednog protona i jednog elektrona što ga čini najjednostavnijim među svim atomima. To je netoksičan plin bez boje i mirisa, znatno je lakši od zraka s gustoćom energije 142 KJ/kg [25]. Kao gorivo primjenjuje se u plinskim turbinama i motorima s unutarnjim izgaranjem, a posebnu važnost ima u gorivim člancima gdje dostiže najveću iskoristivost.

Vodik se proizvodi na više načina; metodom parnog reformiranja sivi i plavi vodik, elektrolizom vode zeleni vodik te pirolizom metana tirkizni vodik. Oko tri četvrtine globalne potražnje za vodikom trenutno se zadovoljava reformiranjem metana parom (SMR) s prirodnim plinom kao sirovinom. Karakterizirano visokom učinkovitošću i niskim troškovima proizvodnje, ovo također dovodi do velikih količina emisija stakleničkih plinova. Elektroliza koja koristi obnovljive izvore energije može osigurati čistu proizvodnju vodika, no trenutno čini samo 2% ukupne globalne proizvodnje vodika. Sigurnost vodika zahtijeva poseban oprez zbog nekoliko ključnih faktora. Najvažnija sigurnosna zabrinutost je mogućnost da ako curenje ostane neotkriveno i plin se nakupi u zatvorenom prostoru, može doći do zapaljenja i eksplozije. Vodik ima širok raspon zapaljivih koncentracija u zraku (4% – 75%) i nisku energiju potrebnu za paljenje, što dodatno povećava rizik. Također, vodik može uzrokovati krhkost metala i oštećenja materijala na mjestu curenja, što zahtijeva pažljiv odabir materijala za sustave vodika.

Da bi se osigurala sigurna upotreba vodika, ključno je temeljito razumijevanje njegovih svojstava i dizajniranje sigurnosnih značajki u vodikovim sustavima. Također je bitna obuka za sigurno skladištenje i rukovanje vodikom. Prema američkom Ministarstvu energetike, kako se provodi sve više demonstracija s vodikom, sigurnosni aspekti ovog plina može se poboljšati, čime se stvara povjerenje da vodik može biti jednako siguran kao i druga goriva koja su trenutno u širokoj upotrebi.

### 5.3. METANOL



Slika 4: prikaz različitih načina dobivanja metanola [53]

Metanol je najjednostavniji plin koji je pri atmosferskom tlaku u tekućem stanju, što ga čini praktičnim za skladištenje i ekonomičnijim izborom u usporedbi sa složenijim tekućinama, kao što su LNG, vodik  $H_2$  i amonijak  $NH_3$ . Ovaj toksičan, hlapljiv i zapaljiv fluid karakterizira visok omjer vodika i ugljika (H/C), povećani sadržaj kisika te visok broj oktana u odnosu na konvencionalna goriva. Također, prisutnost kisika u njegovu sastavu olakšava potpunije izgaranje. Metanol ima visoku temperaturu samozapaljenja, zbog čega ga je teže zapaliti samo kompresijom već su potrebni dodatni načini. Proizvodnja metanola moguća je iz različitih izvora, uključujući ugljikom bogate sirovine, biomasu i ne-biološku obnovljivu energiju. Većina svjetske proizvodnje metanola ostvaruje se katalitičkom konverzijom sinteznog plina

(CO i H<sub>2</sub>) dobivenog iz reformiranja prirodnog plina, proces u kojem se prirodni plin (uglavnom metan) zagrijava i kemijski transformira u sintezni plin ili plinskomifikacije ugljena, proces u kojem se ugljen zagrijava na visokoj temperaturi u prisutnosti male količine kisika ili pare, čime se pretvara u sintezni plin. Sintezni plin je smjesa ugljičnog monoksida (CO) i vodika (H<sub>2</sub>). Ova smjesa se pretvara u metanol kroz kemijsku reakciju koja se odvija uz pomoć katalizatora. Katalizator je tvar koja ubrzava kemijsku reakciju, a da se sama pritom ne troši. Metanol se koristi u gorivim člancima i u motorima s unutarnjim izgaranjem, pri čemu su gorivi članci u razvoju, a motori s unutarnjim izgaranjem već su prilagođeni za korištenje metanola kao alternativnog goriva. Primjena metanola u motorima s unutarnjim izgaranjem može biti kombinirano s benzinom, potpuno sagorijevati ili koristiti neizravno (neizravno podrazumijeva korištenje plinova poput H<sub>2</sub> i CO koji nastaju reformiranjem i razlaganjem metanola za izgaranje u cilindru). Ključna prednost upotrebe metanola kao goriva je smanjeni potencijal za formiranje NO<sub>x</sub>-a zbog niske temperature izgaranja u cilindru. Ispitivanja na svjetski prvom brodu pogonjenom metanolom, „Stena Germanica“, pokazala su da prelazak s teških goriva na metanol može znatno smanjiti emisije, SO<sub>x</sub>-a za 99%, NO<sub>x</sub>-a za 60% i CO<sub>2</sub> za 25% tijekom plovidbe broda [41].

Prednosti metanola su njegova niska viskoznost, što pospješuje ubrizgavanje te pridonosi boljoj smjesi sa zrakom i visok isparivački učinak hlađenja koji poboljšava volumetrijsku učinkovitost tijekom usisa i kompresije.

Postoje dva glavna načina za korištenje metanola u dizelskim motorima: prethodno pomiješano gorivo i odvojeno ubrizgavanje. U metodi prethodno pomiješanog goriva metanol se miješa s dizelskim gorivom ili loživim uljem. Glavni izazov u ovom pristupu je sprječavanje fazne separacije alkohola, što se može riješiti dodavanjem odgovarajućeg otapala. U metodi odvojenog ubrizgavanja metanol se ubrizgava odvojeno od dizelskog goriva ili loživog ulja. Fumigacija uključuje ubrizgavanje metanola u usisni razvodnik, dok dualna metoda goriva uključuje ubrizgavanje ovih alkohola izravno u cilindar iz zasebnog ubrizgača. Omjer mješanja metanola može biti od 30% do 50% u metodi fumigacije, dok se u dualnoj metodi goriva dizelsko gorivo koristi kao pilot gorivo za paljenje glavnog goriva.

Studije o metanolu na komercijalnim brodovima su češće. Tvrtke poput „Stena Line, Wärtsilä i MAN B&W“ aktivno istražuju upotrebu metanola na svojim plovilima ili dizelskim motorima, pri čemu Stena Line preuređuje neka svoja plovila za dvostruko gorivo metanol-dizelsko gorivo.

## 5.4. AMONIJAK

Amonijak je alternativno gorivo, sastoji se od jednog atoma dušika i tri atoma vodika [24]. Bezbojan je te oštrog mirisa i iznimno male gustoće (0.73 kg/m<sup>3</sup> u plinovitom stanju). Karakterističan je po svojoj izuzetnoj topivosti u vodi koju ima zbog svoje molekularne strukture (molekule amonijaka imaju trigonalno-piramidalnu strukturu s atomom dušika). Na 0 °C jedan volumen može apsorbirati do 1200 volumena NH<sub>3</sub>. Amonijak je također prepoznat kao gorivo bez ugljika koje može poslužiti kao dobro sredstvo za pohranu energije. Ima gustoću energije od 12,7 MJ/l, što je trećina gustoće energije HFO-a, a veličina spremnika za skladištenje je otprilike tri puta veća od spremnika za uobičajena konvencionalna goriva. Također, amonijak ima nižu granicu zapaljivosti u odnosu na vodik što znači da je manje sklon paljenju i eksplozijama. Ova karakteristika povećava sigurnost tijekom transporta i rukovanja, posebno u scenarijima gdje može doći do slučajnog curenja ili izlivanja. Amonijak se može skladištiti pod pritiskom ili u tekućem stanju na relativno niskim temperaturama, što ga čini praktičnijim i sigurnijim u usporedbi s vodikom, koji obično zahtijeva visokotlačne spremnike. Ova jednostavnost skladištenja smanjuje rizik od gubitka goriva i pojednostavljuje infrastrukturne zahtjeve. Amonijak ima vrelište na -33,3 °C i mora se čuvati ili pod tlakom ili na niskim temperaturama kako bi ostao u tekućem stanju. Povećanjem tlaka na otprilike 10 bara pri temperaturi između 20 i 25 °C, amonijak se može održati u tekućem stanju. Kao izvrstan transportni medij vodika i sredstvo za skladištenje energije, amonijak nudi značajnu prednost kod brodova s ograničenim kapacitetom. Ovisno o kapacitetu spremnika, amonijak se može komprimirati i pohraniti kao tekućina u atmosferskim ili tlačnim spremnicima. Za pouzdano funkcioniranje takvog sustava, neophodni su sigurnosni mehanizmi koji osiguravaju održavanje konstantne niske temperature i tlaka. Kada se skladišti u velikim količinama iznad 10.000 tona, tlak u spremniku je blizu atmosferskog, a temperatura je -33,3 °C. Za količine između 100 i 1.000 tona, tlak u spremniku je nekoliko bara, dok je temperatura oko 0 °C. U spremnicima s kapacitetom manjim od 100 tona amonijak se obično skladišti na ambijentalnoj temperaturi i do tlaka od 20 bara. Amonijak se može klasificirati prema izvorima energije i tehnologije proizvodnje, pa tako imamo smeđi amonijak dobiven iz fosilnih goriva, plavi iz fosilnih goriva, ali koristi tehnologiju hvatanja i skladištenja ugljika, zeleni bez ugljični amonijak dobiva se iz obnovljivih izvora energije te hibridni amonijak koji se dobiva kombinacijom iz fosilnih goriva i obnovljivih izvora. Osim toga amonijak ima i svoje nedostatke, kao što je toksičnost koja predstavlja rizik za ljudsko zdravlje i okoliš što zahtijeva primjenu strogih sigurnosnih mjera prilikom rukovanja, skladištenja i uporabe [25]. Ublažavanje ovih rizika povećava složenost i



troškove njegove primjene kao goriva. Kao nedostatak, važno je istaknuti nisku kalorijsku vrijednost amonijaka, što bi značilo da je za proizvodnju iste količine energije potrebna veća količina amonijaka u usporedbi, na primjer, s vodikom. Uz to, amonijak ima uski raspon zapaljivosti, što dodatno otežava kontrolu procesa izgaranja i može predstavljati izazov u sigurnosnim protokolima pri njegovoj upotrebi u energetske sustavima.

## 6. USPOREDBA TRADICIONALNIH I ALTERNATIVNIH GORIVA

### 6.1. USPOREDBA GORIVA PREMA OGRJEVNOJ MOĆI

Toplinska vrijednost ili ogrjevna moć je količina topline koja se oslobađa izgaranjem jedinice mase volumena koja je sadržana u plinovima izgaranja. Ogrjevna moć određuje koliko energije može biti oslobođeno iz određene količine goriva. Goriva s višom ogrjevnom moći pružaju više energije po jedinici mase. Postoje dvije vrste ogrjevne moći, a to su donja ogrjevna moć (LHV- Low Heating Value) i gornja ogrjevna moć (HHV-High Heating Value):

1. LHV je količina topline dobivena izgaranjem određene količine goriva (na 25 °C), a temperatura produkata izgaranja vrati se na 150 °C.

Izračun:  $Hd=33,9\cdot c+117,2\cdot h-14,6\cdot o+10,4\cdot s-2,5\cdot W$  MJ/kg , gdje je:

$c$  kg<sub>c</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio ugljika u gorivu

$h$  kg<sub>h</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio vodika u gorivu

$o$  kg<sub>o</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio kisika u gorivu

$s$  kg<sub>s</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio sumpora u goriv

$w$  kg<sub>w</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio vlage u gorivu

$W$  kg<sub>w</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio vlage u nastalim plinovima izgaranja goriva

HHV je količina topline dobivena izgaranjem određene količine goriva (na 25 °C), a temperatura produkata izgaranja vrati se na 25 °C.

Razlika između LHV i HHV je to što gornja uzima u obzir latentnu toplinu isparavanja vode iz produkata izgaranja, a donja ne uzima. Iz tog razloga LHV nam prikazuje realnu situaciju pojedinog goriva, dok HHV prikazuje teorijski maksimum i potencijal goriva.

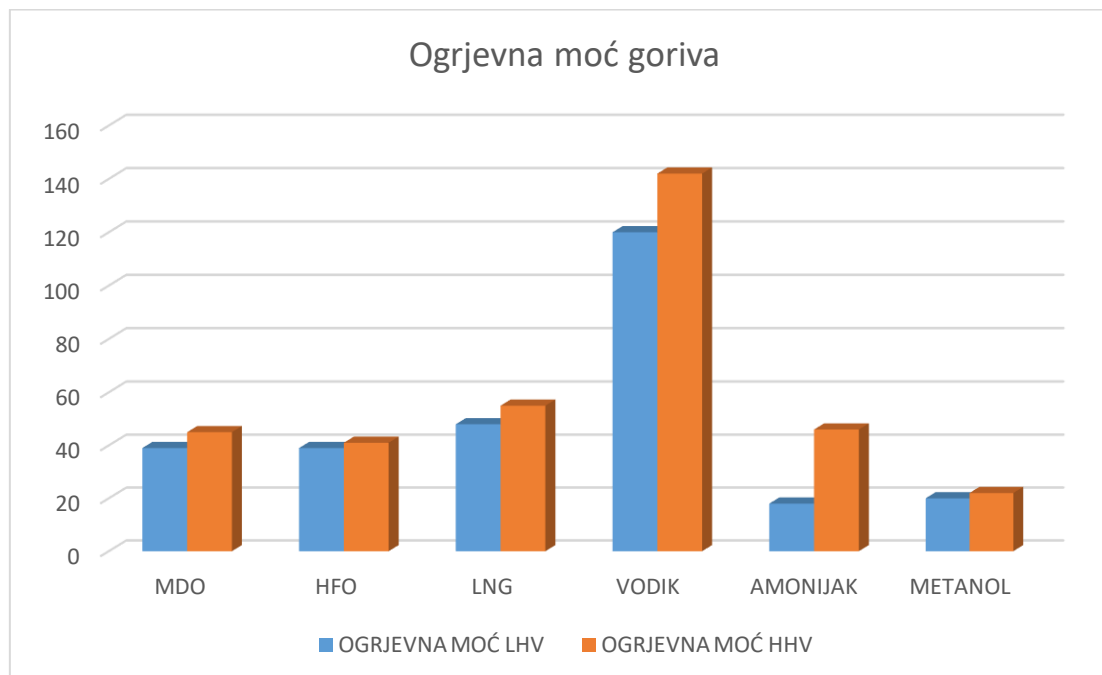
Računski prikaz razlike LHV i HHV:

$$H_d = H_g - 2,5 W \text{ MJ/kg}_g \quad \text{gdje je: } 2,5 \text{ MJ/kg}_w \text{ toplina isparavanja vode}$$

$h$  kgH<sub>2</sub>/kg<sub>g</sub> maseni udio vodika u gorivu

$w$  kgH<sub>2</sub>O/kg<sub>g</sub> maseni udio vode u gorivu

Sljedeća slika prikazuje usporedbu ogrjevnih moći konvencionalnih i alternativnih goriva iz kojeg je vidljivo da vodik daleko prednjači nad ostalim gorivima s donjom ogrjevnom moći od 120,21 MJ/kg te gornjom od 142,18 MJ/kg [26]. Međutim, tekući vodik ima manju gustoću energije po volumenu u usporedbi s ostalim gorivima. U plinovitom stanju ima dobru gustoću energije po težini, ali lošu gustoću energije po volumenu, stoga je potreban veći spremnik za pohranu [27, 28, 29]. Zatim slijedi LNG s donjom ogrjevnom moći od 48,6 MJ/kg te gornjom od 55,2 MJ/kg što ga čini vrlo učinkovitim gorivom za razne industrijske i energetske primjene [26, 30]. Slijede MDO dizelsko gorivo s donjom ogrjevnom moći od 39,2 MJ/kg i gornjom 42,7 MJ/kg te HFO sa donjom 39 MJ/kg i gornjom 40 MJ/kg [29, 31, 32]. Metanol i amonijak čine goriva s najnižom vrijednosti, metanol s donjom 20 MJ/kg i gornjom 22,8 MJ/kg te amonijak sa 18,6 MJ/kg i 22,5 MJ/kg [26, 29, 33, 34].



Slika 5: prikaz ogrjevnih moći goriva u MJ/t

## 6.2. USPOREDBA TROŠKOVA METANOLA LNG-A I VODIKA

Investicijski troškovi su važan dio ukupnih troškova vezanih za cijenu alternativnog goriva. Investicijski troškovi po definiciji su troškovi vezani za komponente sustava, modifikaciju strojarne i preinake motora. Što se LNG-a tiče, njegovi investicijski troškovi vezani su za spremnike za skladištenje i za sigurnosne sustave koji ga zbog svojih visokih cijena guraju kao vodećeg, odnosno najskupljeg alternativnog goriva u ovom pogledu. Spremnik za skladištenje LNG-a košta oko 3000 USD/m<sup>3</sup> [36].

Troškovi metanola vezani su za sigurnosni sustav strojarne te preinake na motoru, a troškovi vodika uključuju pumpe, cjevovod, jedinicu elektrolizne ćelije te sigurnosne sustave. Vodik sam po sebi ne treba spremnik za skladištenje, što ga po ovom pitanju čini super opcijom jer se proizvodi putem alkalnog elektroliznog sustava na brodu gdje mu je potrebna samo voda koja se dobiva iz generatora slatke vode.

Troškovi održavanja vezani su za intervale održavanja motora i može se očekivati da će se korištenjem LNG-a kao pogonskog goriva intervali održavanja produžiti, a korištenjem metanola i vodika smanjiti, što govori da je LNG vodeći u tom pogledu u odnosu na vodik i metanol.

Troškovi potrošnog materijala uključuju troškove ulja za podmazivanje, troškove rezervnih dijelova i dodatne troškove za rad gdje se LNG pokazuje kao najbolja alternativa jer sadrži mali udio sumpora. Upravo radi toga smanjeni su troškovi potrošnog materijala jer je smanjena potreba za dodatnim aditivima i mazivima. Također, korištenjem LNG-a smanjuje se nastanak čađe i time dolazi do manjeg habanja između pojedinih dijelova motora i samim tim smanjena je potrošnja rezervnih dijelova. Dodatan trošak za metanol stvara aditiv za otapalo koji je potrebno dodati ukoliko su unaprijed pomiješani metanol s dizelom ili teškim gorivom u spremniku kako bi se spriječila separacija metanola iz goriva. Što se vodika tiče njegovi dodatni troškovi vezani su za troškove čiste vode koji mogu biti značajni ukoliko nema generatora slatke vode. Isto tako troškove vodika čini kalijev hidroksid KOH (služi za dobivanje alkalne vode iz slatke kako bi se poboljšala električna vodljivost) koji se koristi kod alkalnog elektroliznog sustava za dobivanje vodika.

Troškovi alternativnog goriva mogu se dobiti sljedećim formulama [36]:

$$1. \text{ } CEP_{ji} = CWP_i \times ESP_{ji}$$

$CEP_{ji}$ – broj ocjene troška za  $j$  vrstu alternativnog goriva  $i$  vrstu stavke troška.

$CWP_i$ – težinski broj troška za  $i$  vrstu stavke troška.

$ESP_{ji}$ – broj evaluacijske ljestvice za  $j$  vrstu alternativnog goriva kod  $i$  stavke troška.

$$2. \text{ } CEP_j, TOT = \Sigma CEP_{ji}$$

$CEP_j, TOT$ - ukupni bod ocjene troška za  $j$  vrstu alternativnog goriva.

$\Sigma CEP_{ji}$  označava sumu svih bodova ocjene troška ( $CEP_{ji}$ ) za sve stavke troška ( $i$ ) povezane s  $j$  vrstom alternativnog goriva.

Formula koristi za dobivanje ukupne ocjene troška za alternativno gorivo temeljem svih pojedinačnih stavki troška.

$$3. \text{ } CWPTOT = \Sigma (CWP_i \times 5)$$

$CWPTOT$ – ukupni težinski bod troška za sve stavke troška.

$\Sigma (CWP_i \times 5)$ - označava zbroj svih težinskih bodova troška ( $CWP_i$ ) za svaku stavku ponovljenih 5 puta. Ovaj faktor (5) može predstavljati maksimalnu ocjenu ili neku vrstu normalizacije.

Formula koristi za dobivanje ukupnog težinskog boda troška unutar cijelog sustava, a može se koristiti za usporedbu s ukupnim bodovima ocjene troška.

### 6.3. USPOREDBA LNG I TEŠKOG GORIVA

Glavni razlog prelaska s teškog goriva na alternativno LNG gorivo jest ekološka regulativa izdana od strane Međunarodne pomorske organizacije (IMO) koja ograničava emisije sumpora na 3,5%. Na 70. MEPC sastanku IMO-a u listopadu 2016. godine, donesena je odluka o smanjenju emisija sumpora na 3,5%, a zatim 1. siječnja 2020. na 0,5% [35]. Bitna prednost LNG-a nad HFO teškim gorivom je potpuna eliminacija sumporovih oksida što

predstavlja značajnu ekološku prednost. Također, korištenjem LNG-a, emisije CO<sub>2</sub> se smanjuju u rasponima od 15% do 25% te emisije NO<sub>x</sub> od 40% do 90%, ovisno uspoređujemo li LNG s HFO sustavom ili bez njega. Međutim, LNG se većinski sastoji od metana koji ima 25 do 30 puta veći učinak stakleničkih plinova nego CO<sub>2</sub>, gdje dolazi do takozvanog metanskog kliza, odnosno oslobađanja neizgorenog metana, što smanjuje prednost LNG-a nad HFO konvencionalnim gorivom.

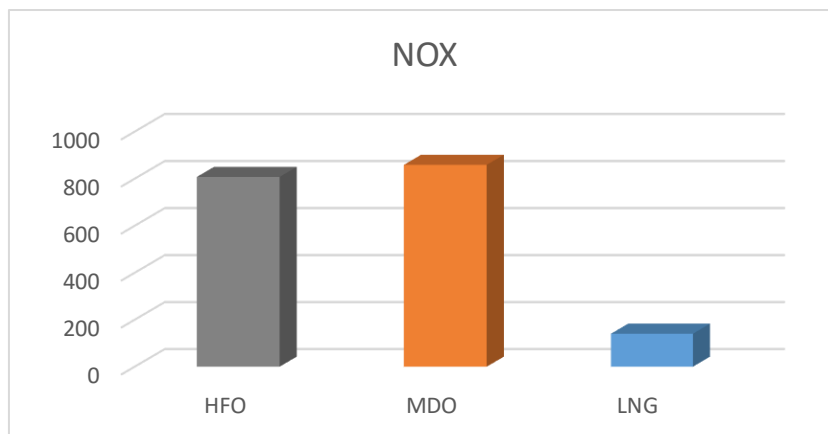
Cijena ukapljenog prirodnog plina (LNG) otprilike iznosi 60% troška teškog loživog ulja (HFO), što ga čini privlačnom alternativom u brodarskoj industriji [35]. Ova razlika u troškovima može značajno utjecati na operativne odluke brodarskih tvrtki, posebno kada se uzmu u obzir sve rigoroznije međunarodne regulativa u vezi s emisijama i zagađenjem.

LNG prednjači nad konvencionalnim gorivom zbog svoje veće ogrjevne moći i jeftinijih troškova održavanja, međutim kad se radi o investicijskim troškovima, tu dolazi do nedostatka u odnosu na HFO zbog izrazito visoke cijene skladišnih tankova i sigurnosnih sustava.

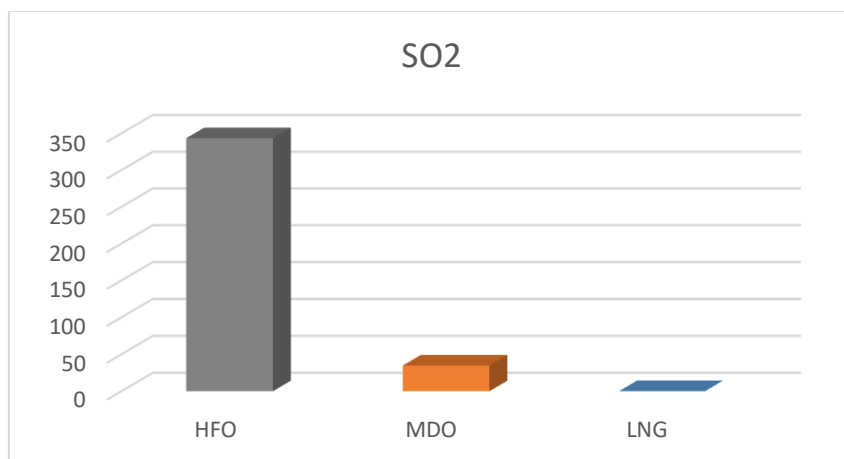
Još jedan od trenutnih nedostataka LNG-a jest manjak infrastrukture i postrojenja za ukrcaj [35]. Ipak postoje moguća rješenja poput motora na vojno gorivo koji uz LNG koriste i konvencionalna goriva. S vremenom broj LNG brodova znatno raste te se prognozira da bi do 2026. godine broj trebao doseći 357.

#### 6.4. USPOREDBA EMISIJA LNG, HFO I MDO GORIVA

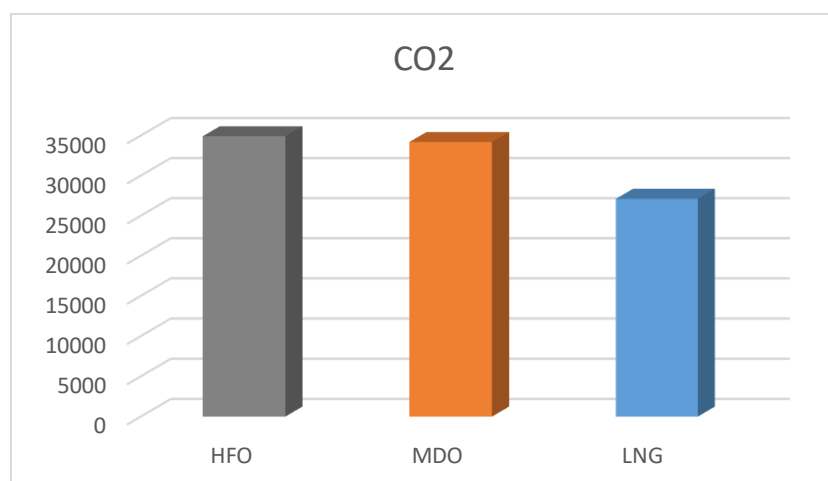
U Grčkoj luci Heraklion 2018. godine uspoređene su emisije s 5 različitih vrsta brodova korištenjem MDO, HFO i LNG goriva. Emisije su izračunate ovisno o kategoriji broda, načinu rada te vrsti goriva. Kada je u pitanju dizelsko MDO gorivo, zbroj emisija NO<sub>x</sub> iz svih brodova iznosio je 858,73 tona (2,44%), SO<sub>2</sub> 34,85 tona (0,10%) i CO<sub>2</sub> 34194,31 tona (97,34%). Korištenjem HFO goriva emisije NO<sub>x</sub> iznosile su 807,45 t, SO<sub>2</sub> bile su 343,51 t te emisije CO<sub>2</sub> 34915,53 t. Za brodove koji su koristili alternativno LNG gorivo ukupni zbroj emisija NO<sub>x</sub> iznosio je 140,47 tona (0,51%), SO<sub>2</sub> 0,35 tona (0,10%) i CO<sub>2</sub> 27113,04 tone, odnosno 98%. Iz dobivenih podataka vidljivo je da su se korištenjem LNG-a kao pogonskog goriva gotovo 100% smanjile emisije SO<sub>2</sub> dok su se emisije NO<sub>x</sub> smanjile za 83,66% te emisije CO<sub>2</sub> za 20,70% [42].



Slika 6: prikaz emisija NO<sub>x</sub> za MDO, LNG i HFO[42]



Slika7: prikaz emisija SO<sub>2</sub> za MDO, LNG i HFO [42]



Slika 8: prikaz emisija CO<sub>2</sub> za MDO, LNG i HFO [42]

## 6.5. USPOREDBA VODIKA, AMONIJAKA I METANOLA

Kao produkt izgaranja metanol ispušta CO<sub>2</sub> i niže emisije NO<sub>x</sub>-a zbog svoje niske ogrjevne moći. Korištenjem metanola kao pogonskog goriva značajno se smanjuju emisije ispušnih plinova u odnosu na HFO konvencionalno gorivo: CO<sub>2</sub> može se smanjiti za 7%, SO<sub>x</sub> za 99% te NO<sub>x</sub> za 60% [37]. Proizvodi se iz prirodnog plina što emitira emisije CO<sub>2</sub> i ne predstavlja na taj način potencijalno rješenje u budućnosti. Može se proizvesti i obnovljivim izvorima energije iz biomase ili CO<sub>2</sub>. Metanol se može koristiti direktno u motoru kao gorivo, može se pumpati i u posebni „reformerski“ sustav. Reformerski sustav za metanol je tehnološki proces koji pretvara metanol u vodik i ugljični monoksid putem kemijske reakcije poznate kao parno reformiranje. U procesu parnog reformiranja miješaju se metanol i voda i obrađuju u membranskom reformeru koji razdvaja smjesu u vodik (H<sub>2</sub>) ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>). Vodik se koristi kao pogonsko gorivo, a ugljični dioksid se pohranjuje na brodu te dolaskom u luku koristi za proizvodnju zelenog metanola. Proizvodnja metanola iz CO<sub>2</sub> ima veliku perspektivu jer pridonosi iskorištavanju i uklanjanju CO<sub>2</sub>, što smanjuje emisije CO<sub>2</sub> za 97%, NO<sub>x</sub> za 80% i SO<sub>x</sub> za 100%. Zeleni metanol ima niske emisije stakleničkih plinova što ga uz već dovoljno razvijenu tehnologiju i već postojeće sustave plasira kao dobrog kandidata kao buduće gorivo. Prednjači nad amonijakom jer ne zahtijeva nikakav dodatni sustav obrade, kao npr. SCR (selektivna katalitička redukcija), niti skladištenje pod pritiskom i niskim temperaturama, manje je toksičan, lakše rukovanje te je biorazgradiv ukoliko dođe do curenja u more [38]. Trenutno je najveća prepreka metanola pronalaženje opskrbe izvora metanola s niskim i nultim emisijama.

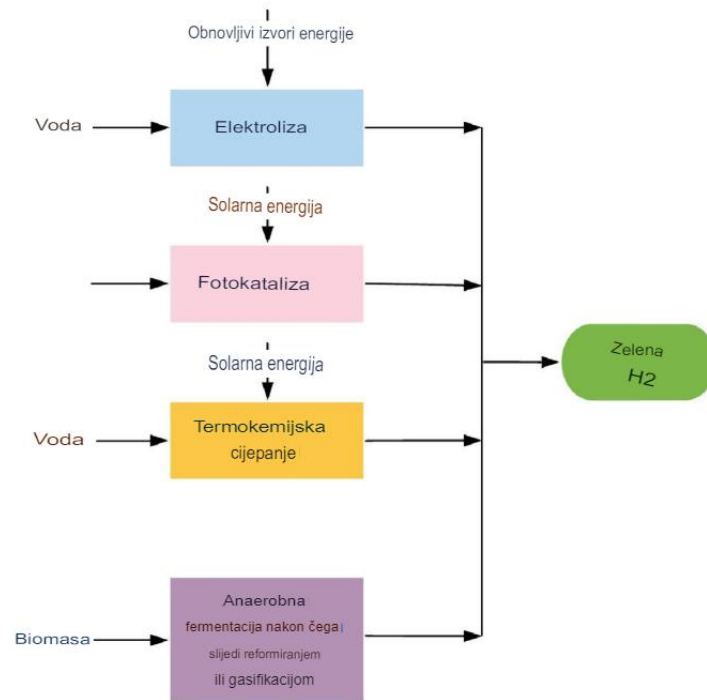
Amonijak kao potencijalno alternativno gorivo ima mogućnost značajnog smanjenja emisija CO<sub>2</sub>. Predstavlja sigurniju alternativu od vodika zahvaljujući višoj temperaturi paljenja i širem rasponu zapaljivih koncentracija u zraku, također bolju održivost, odnosno lakše ga je skladištiti zbog već dostupnih sistema za transport i skladištenje, a isto tako može ga se više pohraniti u brodovima. Problem kod amonijaka predstavlja njegova toksičnost, koja je veća nego kod metanola, zbog čega se primjenjuju strože sigurnosne mjere, uključujući sustave za detekciju curenja, ventilaciju, neutralizaciju isparenja. Zbog visokih troškova i nerazvijenosti tehnologije amonijak se dobiva iz prirodnog plina, te na taj način emitira velike količine CO<sub>2</sub> i metana. Zeleni amonijak, još poznat kao održivi ili obnovljivi amonijak, smatra se najperspektivnijim gorivom za smanjenje emisija stakleničkih plinova, a dobiva se obnovljivim izvorima energije poput vjetroelektrana, hidroelektrana, solara i slično. Ima mogućnost



upotrebe u sustavima na dvojno gorivo gdje je moguće smanjiti emisije stakleničkih plinova i do 33,5% te samostalno čak za 69% [39]. Međutim dobivanje zelenog amonijaka predstavlja izazov zbog visokih troškova proizvodnje, a problem predstavljaju i brojni drugi faktori, poput posebne regulacije toksičnosti i dostupnosti. Korištenje amonijaka kao goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem otvara vrata značajnim mogućnostima, no istovremeno donosi i izazove koje je potrebno pažljivo analizirati. Iako se ne predviđaju nepremostive prepreke, još uvijek postoji potreba za detaljnim istraživanjima kako bi se kvantificirale potrebne količine pilot-goriva za paljenje amonijaka, kao i razina emisija različitih plinova poput  $\text{NO}_x$ -a,  $\text{NH}_3$  i  $\text{N}_2\text{O}$ . Većina proizvođača motora u pomorskoj industriji smatra da je Dieslov ciklus trenutno najprikladniji za izgaranje amonijaka u ranoj fazi primjene, iako se istražuju i druge tehnologije izgaranja. Optimizacija emisija predstavlja značajan izazov, posebno kada je riječ o kontroli  $\text{N}_2\text{O}$  emisija i propuštanja amonijaka, što zahtijeva održavanje visokih temperatura izgaranja. No, važno je uzeti u obzir da visoke temperature mogu dovesti do povećanih razina  $\text{NO}_x$ -a, što također treba imati na umu tijekom optimizacije. Kako bi se osiguralo stabilno izgaranje amonijaka, upotreba pilot-goriva je od ključne važnosti. Motori s unutarnjim izgaranjem koji koriste amonijak vjerojatno će trebati koristiti postojeće tehnologije za naknadnu obradu te dodatne katalizatore za smanjenje  $\text{N}_2\text{O}$  emisija. Srećom, tehnologije kao što je SCR već su dostupne i mogu biti učinkovito primijenjene kako bi se minimalizirali negativni utjecaji na okoliš. Vodik se smatra jednim od potencijalnih goriva za uklanjanje emisija stakleničkih plinova i prelaska na obnovljive energetske izvore. Može se proizvesti na nekoliko načina iz različitih izvora energije, sivi vodik dobiva se putem parnog procesa, njegovom proizvodnjom emitiraju se velike količine  $\text{CO}_2$ . Plavi vodik dobiva se hvatanjem i skladištenjem, a ukupne emisije  $\text{CO}_2$  su 9 – 12% niže nego kod sivog. Plavo-zeleni vodik dobiva se pirolizom metana, a zatim zagrijavanjem metana kako bi se dobio ugljik i vodik. Zatim imamo zeleni vodik koji podrazumijeva proizvodnju bez ugljika iz obnovljivih izvora, a jedan od njih je elektroliza vode [39]. Kao takav zeleni vodik ne emitira nikakve emisije i predstavlja ključni alat u borbi protiv klimatskih promjena. Jedan od izazova vodika jest curenje vodika. Molekula je vrlo mala i lako može procuriti u atmosferu što narušava sigurnost i učinkovitost goriva. Stoga minimalizacija curenja predstavlja ključnu strategiju koja će učiniti vodik održivim gorivom.

Zaključno, zeleni amonijak, zeleni metanol i zeleni vodik moći će uskoro konkurirati fosilnim gorivima zahvaljujući smanjenju troškova proizvodnje, napretku tehnologije te njihovoj sve većoj dostupnosti. Budući da amonijak, metanol i vodik trenutno nisu u istim fazama razvoja, njihove mogućnosti za konkurenciju s fosilnim gorivima razlikuju se s obzirom

na različite tehnološke izazove, proizvodne kapacitete i stupanj prihvaćenosti u industriji. Trenutno zeleni amonijak i zeleni metanol prednjače zbog lakšeg transporta i skladištenja te veće energetske gustoće i smatraju se najperspektivnijim gorivima sljedećeg desetljeća. Zeleni vodik trenutno još ne predstavlja rješenje, ali se smatra da bi u budućnosti mogao biti najpovoljnije i najmanje štetno gorivo za okolinu.

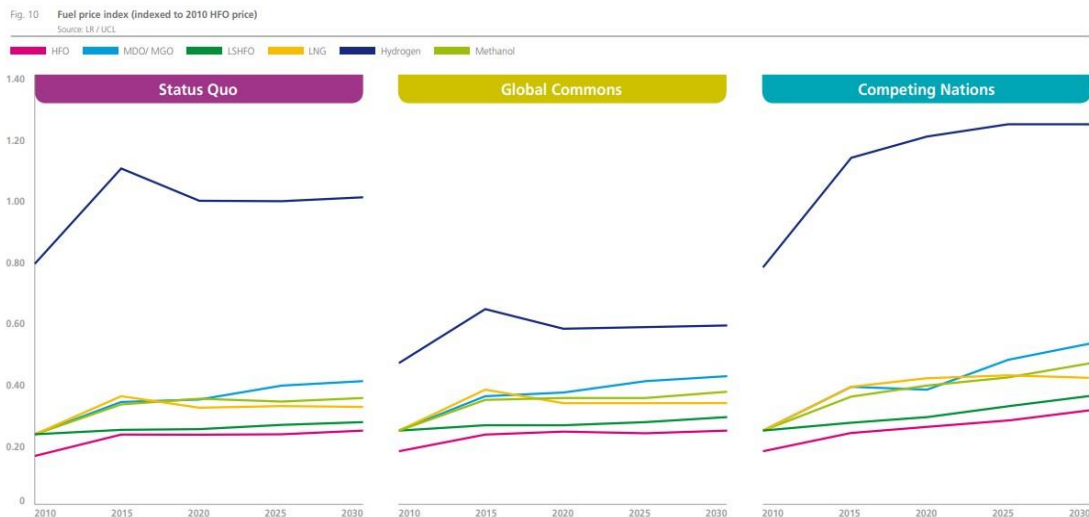


Slika 9:prikaz 4 načina dobivanja zelenog vodika [43]

## 6.6. PRETPOSTAVKE CIJENE GORIVA

Za ovu studiju korišteni su scenariji cijena nafte i plina iz DECC-a (Ministarstvo za energiju i klimatske promjene 2012.), a rezultati su uspoređeni s tri različita scenarija (Status Quo, Global Commons, Competing Nations) pomorskog sektora opisana u GMT 2030 (Global Maritime Trends) [40]. Do 2020. godine cijene HFO i MDO dobivene su tako što su povijesni omjeri cijena tih goriva u odnosu na cijenu nafte Brent pomnoženi s prognozama cijena nafte iz DECC-a (Ministarstvo energetike i klimatskih promjena, 2012.), a nakon cijene će ovisiti o tome kako tržište bude ispunjavalo propise o emisijama. Za metanol dobiven iz fosilnih goriva pretpostavlja se da će pratiti stalni odnos s IFO 380. Prognoze cijena LNG-a preuzete su iz GloTraM (Global Transport Model) vanjskih faktora, a dobivene su sustavom cijelog lanca opskrbe LNG-a, od trenutka ukapljivanja u zemlji uvoznici, zatim skladištenja i transporta, do

dostavljanja u zemlji uvoznici [40]. U cijenu ulaze potrošnja goriva, investicijski troškovi i trošak plina. Prognoze za vodik uzete su iz GloTraM vanjskih faktora gdje se vodik dobiva iz plina putem prerade metana s tehnologijom hvatanja i skladištenja ugljika (CCS) te transporta kroz cjevovod dug 20 km gdje se ukapljuje za skladištenje.



Slika 10: prikaz cijena konvencionalnih i alternativnih goriva [57]

## 6.7. „HVATANJE“ UGLJIKA

Budući da se kroz rad u nekoliko navrata spominje tehnika “hvatanja“ ugljika, slijedi i kratko objašnjenje. „Hvatanje“ ugljika tehnologija je koja se koristi na brodovima i pokazalo se da ima veliki potencijal za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> u borbi protiv klimatskih promjena. Tehnologije „hvatanja“ ugljika obuhvaćaju hvatanje i skladištenje ugljika (CCS) te „hvatanje“ i korištenje ugljika (CCU). „Hvatanje“ i skladištenje ugljika (CCS) tehnologija je ključna u borbi protiv klimatskih promjena jer omogućuje hvatanje CO<sub>2</sub> iz različitih izvora emisija te sigurno skladištenje u geološkim formacijama ili podmorju, sprječavajući tako njegovo ispuštanje u atmosferu. „Hvatanje“ i korištenje ugljika (CCU) tehnologija pruža inovativan pristup smanjenju emisija CO<sub>2</sub> tako što uhvaćeni CO<sub>2</sub> koristi kao resurs u različitim industrijskim sektorima, poput prehrambene, farmaceutske i industrije pića, otvarajući put prema održivijoj i cirkularnoj ekonomiji. Iako su se ove metode pokazale jako učinkovite i obećavajuće u kopnenim postrojenjima, veliki troškovi prilagodbe i kompleksnost sustava predstavljaju značajnu prepreku za širu primjenu.

## ZAKLJUČAK

Konvencionalna goriva, poput HFO i MDO, odigrala su ključnu ulogu u industrijskom razvoju i modernom društvu, ali njihovi ekološki, ekonomski i politički problemi dovode do njihovog postepenog izumiranja. Prijelaz na obnovljive izvore energije i čišća alternativna rješenja sve je ozbiljnija i zanimljivija tema na kojoj se napreduje i radi svakodnevno.

LNG se sve više upotrebljava kao alternativno gorivo, izgrađuju se novi projekti, proširuje se kapacitet te jača transportna mreža. U zadnjih nekoliko godina fleksibilnost i dostupnost LNG-a znatno je napredovala, posebno u Aziji i Europi. Naravno, kao kod svakog alternativnog goriva najbitnija razlika u odnosu na konvencionalna goriva je znatno smanjenje emisije štetnih plinova, SO<sub>x</sub>-a u odnosu na HFO te u usporedbi s MDO. Isto tako svoju prednost nad konvencionalnim gorivima pokazuje svojom većom ogrjevnom moći te višom energetsom gustoćom. Ono što bi LNG moglo kočiti kao buduće alternativno gorivo je propuštanje metana, metanski skliz, koji se ponaša kao staklenički plin poput CO<sub>2</sub> te neutralizira prednosti LNG-a u ekološkoj učinkovitosti. Bitno je napomenuti da se i dalje u brojnim regijama LNG ne koristi zato što su početni troškovi infrastruktura izrazito veliki.

Vodik predstavlja zanimljivo alternativno gorivo zato što ima sposobnost da bude gorivo bez emisija ukoliko se proizvodi iz obnovljivih izvora energije. Njegova izrazito velika ogrjevna moć u usporedbi s ostalim alternativnim gorivima isto je jedan od ključnih faktora zašto bi vodik mogao biti gorivo budućnosti. Iako ima veliki potencijal kao gorivo s nultom emisijom, vodik nosi sa sobom nekoliko izazova za koje još nema konačnog rješenja. Najveći su nedostatak infrastrukture i visoki troškovi proizvodnje. Primjenjivost vodika još je jedan od izazova vodika da postane upotrebljiv u dugim pomorskim rutama jer trenutna tehnologija i nerazvijenost infrastrukture dozvoljavaju uporabu samo na kraćim rutama zbog visoke cijene spremnika i niske gustoće vodika.

Metanol je jedno od mogućih alternativnih goriva budućnosti jer ima već dobro razvijene infrastrukturne temelje za proizvodnju i distribuciju. Prednost nad ostalim alternativnim gorivima je njegova primjenjivost jer može koristiti već postojeću tehnologiju, a također se može primjenjivati u kombinaciji s drugim gorivima što povećava energetska učinkovitost. Bitno je napomenuti da što se cijene tankova tiče, isto tako prednjači nad ostalim alternativnim gorivima poput vodika ili LNG-a. Nedostatak metanola je trenutni način proizvodnje, a to je iz fosilnih goriva, što značajno smanjuje ekološku učinkovitost. Budućnost

metanola predstavlja zeleni vodik koji je trenutno preskup, ali pridonosi ekološkoj učinkovitosti jer se dobiva putem obnovljivih izvora energije.

Amonijak trenutno privlači sve više pažnje kao alternativno gorivo budućnosti zbog svoje veće gustoće od vodika, što znači da može pohraniti više energije u manjem volumenu, a to je jako bitan faktor zbog ograničenog broskog prostora. Također, pokazalo se da amonijak može dovesti do smanjenja emisija stakleničkih plinova, ali to vrijedi ukoliko se proizvodi iz obnovljivih izvora energije, što trenutno nije tako zbog nerazvijene infrastrukture i visokih troškova. Budući da se amonijak i dalje proizvodi iz fosilnih goriva, što financijski predstavlja bolje rješenje, emisije stakleničkih plinova ostaju visoke i ne ispunjavaju ekološke propise i standarde.

## LITERATURA

- [1]. Jun, P., Gillenwater, M. and Barbour, W., 1999. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from transportation - water-borne navigation. Statistics Norway.
- [2]. Vlaamse Milieumaatschappij, 2005. Luchtkwaliteit in het Vlaamse Gewest - 2004. Aalst: Vlaamse Milieumaatschappij.
- [3]. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2015. Greenhouse gas (GHG) emissions and removals. [online] Available at: <https://www.epa.gov/ghgemissions> [Accessed 21 August 2024].
- [4]. Europees Parlement, 2024. Smanjenje emisija ugljičnih plinova: ciljevi i mjere EU-a. [online] Available at: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20180305STO99003/smanjenje-emisija-ugljicnih-plinova-ciljevi-i-mjere-eu-a> [Accessed 21 August 2024].
- [5]. IMO, 2024. Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>) – Regulation 13. [online] Available at: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx) [Accessed 21 August 2024].
- [6]. ResearchGate, 2024. ECA areas under MARPOL Annex VI. [online] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/327009082/figure/fig2/AS:779397757931524@1562834314278/ECA-areas-under-MARPOL-Annex-VI-Source-MRV-2018.png> [Accessed 21 August 2024].
- [7]. U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018. Coming changes in marine fuel sulfur limits will affect global oil markets. Today In Energy.
- [8]. U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018. Coming changes in marine fuel sulfur limits will affect global oil markets. [online] Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37793> [Accessed 21 August 2024].
- [9]. Ferguson, C. and Kirkpatrick, A., 2001. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. Wiley.
- [10]. Stevens, B., 2000. Luchtverontreiniging door zeeschepen. Scriptie, Hogere Zeevaartschool Antwerpen.
- [11]. U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018. Coming changes in marine fuel sulfur limits will affect global oil markets. [online] Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37793> [Accessed 21 August 2024].

- [12]. DNV, 2024. SEEMP. [online] Available at: <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/keydrivers/regulations/imo-regulations/seemp/> [Accessed 21 August 2024].
- [13]. IMO, 2024. Special areas under MARPOL. [online] Available at: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx> [Accessed 21 August 2024].
- [14]. Wfscorp.com, 2024. ISO 8217:2010 Tables. [online] Available at: <https://marine.wfscorp.com/sites/default/files/d7/documents/sites/default/files/ISO-8217-2010-Tables-1-amp-2-1.pdf> [Accessed 21 August 2024].
- [15]. Mrak, S., 2016. Methane and natural gas, the dummy comparison. [online] Blogspot.com. Available at: <https://antisocialnetwork2labz.blogspot.com/2016/11/methane-and-natural-gas-dummy-way.html?sref=pi> [Accessed 21 August 2024].
- [16]. Energometan.hr, 2024. Osnovni podaci o prirodnom plinu. [online] Available at: <https://www.energometan.hr/page.asp?pageID=103> [Accessed 21 August 2024].
- [17]. Shell Global, 2021. Natural gas explained, Liquefied natural gas (LNG). [Accessed 25 August 2021].
- [18]. Energy Prime, 2017. LNG - ukapljeni zemni plin. [online] Available at: <https://energyprime.hr/lng/> [Accessed 21 August 2024].
- [19]. Unitrove, 2024. LNG density calculator. [online] Available at: <https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/liquefied-natural-gas-density> [Accessed 21 August 2024].
- [20]. Brett, B.C., 2006. Potential Market for LNG Fuelled Marine Vessels in the United States. Massachusetts Institute of Technology.
- [21]. Scribd.com, 2024. LNG Properties. [online] Available at: <http://www.scribd.com/doc/51840654/6/LNG-Properties> [Accessed 21 August 2024].
- [22]. Edu.pl, 2024. [online] Available at: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ5-0039-0022> [Accessed 21 August 2024].
- [23]. Stančin, H., Mikulčić, H., Wang, X. and Duić, N., 2020. A review on alternative fuels in future energy system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [online] 128(109927). Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927> [Accessed 21 August 2024].

- [24]. Sciencealpha, 2019. Amonijak, priprema, Svojstva, kemijske reakcije. [online] Available at: <https://sciencealpha.com/hr/ammonia-preparation-properties-chemical-reactions/> [Accessed 21 August 2024].
- [25]. Gilje-gas.com, 2024. Amonijak. [online] Available at: <https://gilje-gas.com/tehnicki-gasovi/amonijak/> [Accessed 21 August 2024].
- [26]. Illinois.edu, 2024. Liquid fuels Btu/gal [2] Btu/lb [3] MJ/kg [4]. [online] Available at: [https://courses.grainger.illinois.edu/npre470/sp2018/web/Lower\\_and\\_Higher\\_Heating\\_Values\\_of\\_Gas\\_Liquid\\_and\\_Solid\\_Fuels.pdf](https://courses.grainger.illinois.edu/npre470/sp2018/web/Lower_and_Higher_Heating_Values_of_Gas_Liquid_and_Solid_Fuels.pdf) [Accessed 21 August 2024].
- [27]. Vincent, I. and Bessarabov, D., 2018. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp.1690-1704.
- [28]. Dawood, F., Anda, M. and Shafiullah, G.M., 2020. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, [online] 45(7), pp.3847–3869. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059> [Accessed 21 August 2024].
- [29]. Bilgili, L., 2021. Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 144(110985). Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110985> [Accessed 21 August 2024].
- [30]. Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesieme, U., Pazouki, K. and Murphy, A., 2018. Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production*, [online] 172, pp.855-866. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.165> [Accessed 21 August 2024].
- [31]. Engineeringtoolbox.com, 2003. Fuels - higher and lower calorific values. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html) [Accessed 21 August 2024].
- [32]. Wild, Y., 2005. Determination of energy cost of electrical energy on board sea-going vessels.
- [33]. Zamfirescu, C. and Dincer, I., 2008. Using ammonia as a sustainable fuel. *Journal of Power Sources*, [online] 185(1), pp.459-465. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.097> [Accessed 21 August 2024].
- [34]. Wang, W., Herreros, J.M., Tsolakis, A. and York, A.P.E., 2013. Ammonia as hydrogen carrier for transportation; Investigation of the ammonia exhaust gas fuel reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, pp.9907-9917.



- [35]. Merien-Paul, R.H., Enshaei, H. and Jayasinghe, S.G., 2019. Effects of fuel-specific energy and operational demands on cost/emission estimates: A case study on heavy fuel-oil vs liquefied natural gas. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, pp.77-89. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.031> [Accessed 21 August 2024].
- [36]. Deniz, C. and Zincir, B., 2016. Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*, 113, pp.438-449. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.089> [Accessed 21 August 2024].
- [37]. Wärtsilä, 2023. Methanol as marine fuel – is it the solution you are looking for? [online] Available at: <https://www.wartsila.com/insights/article/methanol-fuel-for-thought-in-our-deep-dive-q-a> [Accessed 21 August 2024].
- [38]. The Maritime Executive, 2024. The decarbonization tradeoffs for ammonia, methanol and H<sub>2</sub>. [online] Available at: <https://maritime-executive.com/editorials/the-decarbonization-tradeoffs-for-ammonia-methanol-and-h2> [Accessed 21 August 2024].
- [39]. Shi, J., Zhu, Y., Feng, Y., Yang, J. and Xia, C., 2023. A prompt decarbonization pathway for shipping: Green hydrogen, ammonia, and methanol production and utilization in marine engines. *Atmosphere*, [online] 14(3), p.584. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/584> [Accessed 21 August 2024].
- [40]. Hirdaris, S., 2014. Marine Fuel Trends 2030. [Unpublished]. Available at: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4261.5045> [Accessed 21 August 2024].
- [41]. Wärtsilä (20230220) Methanol as marine fuel – is it the solution you are looking for?, Wärtsilä. Available at: <https://www.wartsila.com/insights/article/methanol-fuel-for-thought-in-our-deep-dive-q-a> (Accessed: September 2, 2024)
- [42]. Livaniou, S. and Papadopoulos, G. A. (2022) “Liquefied natural gas (LNG) as a transitional choice replacing marine conventional fuels (heavy fuel oil/marine diesel oil), towards the era of decarbonisation,” *Sustainability*, 14(24), p. 16364. doi: 10.3390/su142416364.
- [43]. Al-Aboosi, F. Y. et al. (2021) “Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry,” *Current opinion in chemical engineering*, 31(100670), p. 100670. doi: 10.1016/j.coche.2021.100670

## KAZALO KRATICA

IMO – International Maritime Organization

CO<sub>2</sub> – Carbon Dioxide

SO<sub>2</sub> – Sulfur Diokside

NO<sub>x</sub> – Nitrogen Oxides

GHG – Greenhouse Gases

NO – nitrogen oxide

ECA – Emmision Control Areas

SEEMP – Ship Energy Efficiency Management Plan

EEDI – Energy Efficiency Design Index

HFO – Heavy Fuel Oil

MDO – Maritime Diesel Oil

LNG – Liquified Natural Gas

IFO – Intermediate Fuel Oil

H<sub>2</sub> – Hydrogen

NH<sub>3</sub> – Ammonia

HHV – High Heating Value

LHV – Low Heating Value

KOH – Potassium Hydroxide

SCR – Selective Catalic Reduction

DECC – Department of Energy and Climate Change

CCS – Carbon Capture and Storage

CCU – Carbon Capture and Utilization

## POPIS SLIKA:

Slika 1 prikaz ECA zona [6]

Slika 2 prikaz dozvoljene količine sumpora u globalnim i kontroliranim emisijskim zonama [7]

Slika 3 prikaz građe LNG-a [15]

Slika 4 prikaz različitih načina dobivanja metanola [53]

Slika 5 prikaz ogrjevnih moći goriva u MJ/t

Slika 6 prikaz emisija NO<sub>x</sub> za MDO, LNG i HFO [42]

Slika 7 prikaz emisija SO<sub>2</sub> za MDO, LNG i HFO [42]

Slika 8 prikaz emisija CO<sub>2</sub> za MDO, LNG i HFO [42]

Slika 9 prikaz 4 načina dobivanja zelenog vodika [43]

Slika 10 prikaz cijena konvencionalnih i alternativnih goriva [57]