

# E-goriva i njihov potencijal primjene u prometnom sektoru u budućnosti

---

Lučić, Ilija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

*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:235:690802>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ilija Lučić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Ljubas, dipl. ing.

Student:

Ilija Lučić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem prof. dr. sc. Davoru Ljubasu na izdvojenom vremenu, kvalitetnom mentorstvu, korisnim savjetima i stručnoj pomoći kroz cjelokupnu izradu završnog rada.

Najveće zahvale idu mojoj obitelji, posebno mojim roditeljima na bezuvjetnoj potpori i pomoći tijekom mog dosadašnjeg studiranja.

Ilija Lučić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ilija Lučić** JMBAG: **0035220615**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **E-goriva i njihov potencijal primjene u prometnom sektoru u budućnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **E-fuels and their application potential in the transport sector in the future**

Opis zadatka:

Goriva koja se većim dijelom danas koriste u prometnom sektoru spadaju u grupu fosilnih goriva. Ona su odgovorna za intenzivne emisije, između ostalog, stakleničkih plinova koji utječu na globalno zagrijavanje i intenziviraju klimatske promjene. U neposrednoj budućnosti potrebno je pronaći alternativu fosilnim gorivima kako bi se umanjilo i onečišćenje okoliša, ali i smanjilo globalno zagrijavanje. Jedna od potencijalnih mogućnosti kojom bi se to djelomično moglo ostvariti je primjena tzv. e-goriva.

Stoga je u ovome radu potrebno:

- objasniti pojam „e-goriva“
- prepoznati i objasniti osnovne razlike između klasičnih fosilnih goriva i e-goriva koja bi se mogla koristiti u budućnosti u prometnom sektoru
- definirati i kritički raspraviti prednosti i nedostatke e-goriva te tehnologije njihove proizvodnje
- prikazati trenutno važeće strukovne smjernice/norme kojima se regulira sastav goriva u prometnom sektoru te provjeriti jesu li one prikladne za e-goriva
- posebno obratiti pažnju na zahtjeve prema e-gorivima za slučajeve skladištenja i odlaganja, uz poseban osvrt na konstrukcijska ograničenja spremnika, materijale izrade te probleme koji bi se mogli pojaviti tijekom njihovog održavanja
- predvidjeti moguće utjecaje na okoliš e-goriva u slučajevima normalnog korištenja te u slučajevima nepravilnog skladištenja ili nepravilne primjene.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Davor I. Jubaš

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
2. GORIVO .....	2
2.1. Vrste i podjele goriva .....	2
2.2. Štetnost fosilnih goriva .....	4
2.3. Konfuzija pojmova .....	5
3. SINTETIČKA GORIVA .....	7
3.1. Definicija i povijest.....	7
3.2. Procesi proizvodnje.....	7
4. ELEKTROGORIVA .....	11
4.1. Definicija.....	11
4.2. Proizvodnja.....	11
4.3. Kapljevita e-goriva .....	12
4.4. Plinovita e-goriva.....	14
4.5. Troškovi .....	14
4.6. Izvori hvatanja ugljika .....	17
4.7. Sinteza goriva .....	18
4.8. Utjecaj na okoliš .....	20
4.9. E-goriva i cestovni promet .....	21
4.10. E-goriva i vodni promet.....	23
4.11. E-goriva i zrakoplovstvo .....	25
4.12. Pravila i regulativa .....	27
5. ALTERNATIVE FOSILNIM I E-GORIVIMA.....	29

5.1. Vodik .....	30
5.2. Amonijak .....	31
5.3. Biogoriva .....	32
6. ZAKLJUČAK .....	37
7. LITERATURA .....	38

**POPIS SLIKA**

SLIKA 1. UGLJEN [2] .....	2
SLIKA 2. NAFTNE BUŠOTINE [3] .....	3
SLIKA 3. POSTROJENJA PRIRODNOG PLINA [4].....	4
SLIKA 4. POJEDNOSTAVLJENI PRIKAZ FISCHER-TROPSCH SINTEZE [10] .....	8
SLIKA 5. ORGANSKE MOLEKULE OD KOJIH SE SASTOJI DIZEL GORIVO [13].....	13
SLIKA 6. MOLEKULA VODIKA [29] .....	30
SLIKA 7. MOLEKULA AMONIJAKA [30].....	32
SLIKA 8. STABLO BAGREMA [31].....	34
SLIKA 9. CRVENE, SMEĐE I ZELENE ALGE [32].....	35
SLIKA 10. MIKROALGE [33].....	36



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$T'$	°C	Temperatura u stupnjevima Celzijevim
$T$	K	Temperatura u Kelvinima
$T''$	F	Temperatura u Fahrenheitima
$p$	Pa	Tlak
$E$	J	Energija

## SAŽETAK

Gorivo su svi materijali koji mogu reagirati s drugim tvarima kako bi se oslobodila energija koja se koristi za rad, a najčešći izvori goriva su ugljikovodici i srodne organske molekule. Fosilna goriva kao što su nafta, prirodni plin i ugljen u svakodnevnoj su uporabi, a njihovim izgaranjem nastaju, između ostalog, i otpadni plinovi koji utječu na zagađenje atmosfere i uzrokuju klimatske promjene. Kako bi se pokušao riješiti ovaj problem razvijaju su e-goriva koja se proizvode korištenjem ugljikovog dioksida ili monoksida zajedno s vodikom dobivenim iz vode, razdvajanjem molekule pomoću električne energije koja je dobivena iz održivih izvora. Ovisno o vrsti tehnologije, moguće je sintetizirati e-metan, e-metanol, e-benzin, e-dizel, e-mlazno gorivo te e-amonijak. Osim toga, cilj je prilagoditi ovu vrstu goriva trenutnim tehnologijama vozila kako bi ulaganja resursa bila što manja, jer je cjelokupan proces prelaska na e-goriva izrazito skup. Na razvoj e-goriva utječu i političke odluke te zakonodavstvo koji određuju u kojoj mjeri te do kojeg vremenskog roka je potrebno smanjiti emisije stakleničkih plinova, a jedna od takvih regulativa je i RED II Direktiva koja je na snazi u Europskoj Uniji. Osim e-goriva, razvijaju se i razna biogoriva čiji su izvori sirovine kao što su poljoprivredni i šumarski proizvodi, alge i slično.

## **SUMMARY**

Fuel is any material that can react with other substances to release energy that is used for work, and the most common sources of fuel are hydrocarbons and related organic molecules. Fossil fuels such as oil, natural gas and coal are in daily use, and their combustion produces waste gases that affect atmospheric pollution and cause climate change. To solve this problem, e-fuels have been developed that are produced using carbon dioxide or monoxide together with hydrogen obtained from water, separated by sustainable sources of electricity. Depending on the type of technology, it is possible to synthesize e-methane, e-methanol, e-gasoline, e-diesel, e-jet fuel and e-ammonia. In addition, the goal is to adapt this type of fuel to current vehicle technologies so that resource investments are as low as possible, because the entire process of switching to e-fuels is extremely expensive. The development of e-fuels is also influenced by political decisions and regulations that determine to what extent and by what time frame it is necessary to reduce greenhouse gas emissions, and one such regulation is the RED II Directive, which is in force in the European Union. In addition to e-fuels, various biofuels are also being developed, the sources of which are raw materials such as agricultural and forestry products, algae etc.

## 1. UVOD

Svakodnevno funkcioniranje svijeta ovisi o velikom broju faktora, a jedan od njih su i goriva koja koristimo. Od jednostavne aktivnosti kao što je kuhanje ili grijanje prostora, preko prometa i napajanja raznih postrojenja, vidljivo je koliko su goriva trenutno korištena. Postoje razne vrste goriva koje se koriste za određena područja te su u skladu sa tehnologijama koje se koriste. Preveliko oslanjanje na fosilna goriva, koja izazivaju emisije stakleničkih plinova u atmosferu te na taj način dovode do globalnog zagrijavanja i klimatskih promjena rezultiralo je potrebom za pronalaskom goriva koja će imati ili manje štetne utjecaje na klimatske promjene ili će biti potpuno lišeni takvih utjecaja.

Pojavio se jedan smjer u razvoju goriva - razvoj elektrogoriva, koja su samo jedna od vrsta zamjenskog goriva koje se može koristiti kako bi se potencijalno smanjili utjecaji stakleničkih plinova. Konstantan je napredak razvoja tehnologija koje omogućavaju primjenu i daljnji razvoj e-goriva, no potrebni su izuzetno veliki resursi kako bi se razvile optimalne verzije goriva koje će se vrlo lako implementirati u svakodnevno funkcioniranje, a ponajviše u prometni sektor. U određenim državama potrebna su velika financijska ulaganja te promjena infrastrukture kako bi prijelaz sa konvencionalnih goriva na e-goriva bio moguć. Vrlo su velike razlike između različitih vrsta prijevoza u prometnom sektoru, kao npr. između cestovnog prometa i zrakoplovnog prometa, a sve to otežava pronalazak jednog jednostavnog rješenja koje bi bilo primjenjivo u svim područjima. Zbog visokih troškova i drugih resursa koji su potrebni, razvijaju se i druge opcije koje bi mogle zamijeniti korištenje neobnovljivih fosilnih goriva, kao što su biogoriva i slično.

## 2. GORIVO

### 2.1. Vrste i podjele goriva

Gorivo se može definirati kao svaki materijal koji može reagirati s drugim tvarima tako da se oslobodi energija, npr. toplinska energija ili se koristi za rad. Toplinska energija koja se oslobađa može se pretvarati i u mehaničku energiju, može se koristiti za toplinu, kuhanje, industrijske procese itd. Danas su najčešći izvori goriva ugljikovodici te srodne organske molekule, no moguće je koristiti i druge tvari kao što su npr. radioaktivni metali. Goriva se mogu podijeliti s obzirom na agregatna stanja, s obzirom na njihov nastanak, s obzirom na vrstu izvora energije, s obzirom na primjenu samih goriva itd. [1].

Goriva prema agregatnom stanju dijele se na:

- a) kruta goriva (npr. ugljen);
- b) kapljevita goriva (npr. naftni derivati);
- c) plinovita goriva (npr. prirodni plin).

Jedna od vrsta fosilnih goriva je ugljen. Odnosi se na crne ili crno-smeđe sedimentne stijene čiji je kemijski sastav određen prvenstveno ugljikom sa dodacima sumpornih i dušikovih spojeva. U odnosu na fosilna goriva koja se također koriste, ugljen se koristi najdulji niz godina [1].



Slika 1. Ugljen [2]

Drugo važno gorivo, odnosno izvor za druga brojna goriva, je nafta. Radi se o kapljevitom gorivu koje je akumulirano u Zemljinoj kori, a bojom varira od svjetložute do tamnosmeđe. Ukoliko se sagleda kemijski sastav, jasno je da se sastoji od smjese tekućih ugljikovodika, te u manjoj mjeri su zastupljene druge komponente. Nastanak nafte veže se uz organske tvari od davno izumrlih morskih i kopnenih organizama [1].



**Slika 2. Naftne bušotine [3]**

Zemni ili prirodni plin po svom kemijskom sastavu sastoji se od alifatskih ugljikovodika, među kojima se ističe metan, a manji su udjeli etana, propana i viših ugljikovodika. Nalazi se u prirodnim podzemnim ležištima te može biti u plinovitom stanju ili otopljen u sirovoj nafti. Ponajviše se koristi kao gorivo u kućanstvima, no može se koristiti i u petrokemijskoj industriji za proizvodnju raznih kemijskih spojeva [1].



**Slika 3. Postrojenja prirodnog plina [4]**

Podjela goriva prema nastanku odnosi se na:

- a) prirodna (uglavnom fosilna goriva – ugljen, nafta te biljnog porijekla - drvo);
- b) umjetna goriva (goriva dobivena preradom prirodnih goriva ili goriva dobivena sintezom iz tvari koje se ne smatraju gorivom – vodik dobiven iz vode).

Ukoliko se sagleda podjela goriva prema vrsti izvora energije jasno je da postoje kemijska i nuklearna goriva, a posljednja podjela odnosi se na podjelu goriva prema primjeni. Tako postoje goriva za peći i ložišta, motore s unutarnjim izgaranjem i nuklearne reaktore [1].

## **2.2. Štetnost fosilnih goriva**

Izgaranjem fosilnih goriva nastaju otpadni plinovi poznati kao produkti izgaranja koji se ispuštaju u atmosferu. Najistaknutiji produkt izgaranja je ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), bistar plin bez mirisa. Razine  $\text{CO}_2$  u Zemljinoj atmosferi u stalnom su porastu od početka industrijske revolucije i povezane su s ljudskim izgaranjem fosilnih goriva. Ugljikov dioksid apsorbira infracrveno zračenje i zadržava toplinu, odnosno njegova povećana koncentracija blokira uobičajeni proces ohlađivanja Zemlje emisijom zračenja u svemir. Povišene koncentracije  $\text{CO}_2$  zagrijavaju atmosferu, što je poremetilo globalnu klimu. Fizika ovoga vrlo je dobro poznata, i to već duži niz godina. Geološki zapisi pokazuju jasne primjere klimatskih promjena u prošlosti koje su povezane s promjenama u koncentracijama ugljikova dioksida i drugih plinova koji zadržavaju toplinu u atmosferi. Unatoč poricanju određenog dijela populacije, znanost je jasna, dokazi su uvjerljivi, a veze su vrlo očite. Ostali staklenički plinovi uključuju metan, primarnu

komponentu prirodnog plina i također nusproizvod anaerobnih bioloških procesa,  $N_2O$ ,  $SF_6$ ,  $NF_3$  te klorofluorouglikje (CFC), koji su se nekoć naširoko koristili kao rashladna sredstva [5].

Iako izgaranje nafte i prirodnog plina doprinosi razini stakleničkih plinova, najveći „krivac“ je ugljen. Pozivi na zabranu fraktiranja zbog klimatskih promjena ne rješavaju stvarni problem. Zabrana fraktiranja samo će dovesti do nestašice prirodnog plina i ograničenja korištenja plina za proizvodnju električne energije, gdje će se vjerojatno zamijeniti ugljenom. Izgaranjem ugljena proizvodi se dvostruko više  $CO_2$  nego prirodnim plinom po jedinici energije. Nema sumnje da se fosilna goriva moraju zamijeniti u sljedećih 30 godina, ali to treba činiti promišljeno i logično. Čovječanstvo provodi eksperiment sa stakleničkim plinovima (GHG) i klimatskim promjenama, bez jasne ideje kako bi to moglo ispasti. Međunarodni panel o klimatskim promjenama (IPCC) predviđa oko 15% šansi da će globalne temperature porasti manje od  $2\text{ }^\circ\text{C}$  u sljedećem stoljeću i izgubiti se u pozadini. Također postoji oko 15% šansi da globalna temperatura poraste za više od  $9\text{ }^\circ\text{C}$ , što će dovesti do katastrofalnog porasta razine mora, jakih oluja, suša i ubojitih toplinskih valova. S obzirom na navedeno pojavila se potreba za pronalaskom opcija koje će zamijeniti fosilna goriva koja se trenutno koriste i biti jednako učinkovita, no istovremeno ne smiju biti štetna za okoliš. Među alternativama pojavljuje se jedna grupa goriva nazvana elektrogorivima, vrsta sintetičkih goriva i biogoriva, a o svemu navedenom će više riječi biti u nastavku [5].

### 2.3. Konfuzija pojmova

Promet je okosnica našeg društva i pravi pokazatelj gospodarstva i razvoja jedne zemlje. U prometnom sektoru s rastućom potražnjom, obnovljiva goriva sve više postaju od vitalnog značaja za održivu budućnost. Prometni sustav je vrlo složen s različitim potrebama i načinima; stoga, prelazak na obnovljivi sustav goriva s niskim udjelom ugljika vrlo je spor [6].

Postojeća prometna infrastruktura je dobro razvijena za tekuća goriva dobivena iz nafte, zadovoljavajući više od 90% transportne potražnje. Promjena infrastrukture je vrlo skup i dugotrajan proces. Ovo drugo ne bi trebalo zanemariti pri uvođenju različitih alternativnih goriva kojima se postiže smanjenje emisija, povećava održivost i pomak prema prijevozu bez ugljika. Mnoge predložene alternative za gorivo zahtijevaju značajne izmjene prometne infrastrukture, budući da njihova tehnička svojstva nisu kompatibilna uz postojeću infrastrukturu. Kako bi se izbjegla transformacija cjelokupne infrastrukture, trebalo bi pronaći



goriva koja se mogu koristiti u postojećoj infrastrukturi. Važno je uzeti u obzir i ponašanje potrošača koji se moraju prilagoditi na novi prijevoz te dodatno platiti za nove opcije [6].

Korištenje pojmova „obnovljiva goriva“ i „alternativna goriva“ treba razumjeti i ne koristiti ih kao sinonime jer se ne moraju nužno odnositi na ista goriva. Obnovljiva goriva koriste obnovljive izvore za proizvodnju, uključujući različita goriva koja koriste biomasu i druge procese obnovljivih izvora energije. Alternativna goriva, s druge strane, definiraju se kao bilo koja alternativa za npr. motorni benzin ili dizelsko gorivo (npr. benzin i dizelsko gorivo dobiveno iz nafte iz škriljaca) koji se može proizvoditi bez ograničenja vrste sirovine, što znači da se oni mogu proizvesti iz obnovljivih, ali i fosilnih izvora. S obzirom da u literaturi često dolazi i do konfuzije oko korištenja pojmova sintetička goriva i elektrogoriva potrebno je dodatno pojasniti i te pojmove.

Pregledom literature do 2015. godine utvrđeno je da se sintetičko gorivo kao pojam najčešće koristi za tehnologije pretvaranja ugljena, plina i biomase u tekućinu (tj. kapljevinu i/ili plin), koji predstavljaju termokemijsku pretvorbu. Pretraživanje pojma elektrogorivo rezultiralo je sa nešto manje rezultata zbog relativne novosti pojma, te u određenim člancima pojam može imati različito značenje. Pojam se većinski koristi za dva glavna načina korištenja – onaj koji se odnosi na gorivo proizvedeno biološkom pretvorbom ugljikova dioksida i na onaj koji se odnosi na proizvodnju goriva kombinacijom CO<sub>2</sub> i vodika [6].

### 3. SINTETIČKA GORIVA

#### 3.1. Definicija i povijest

Sintetička goriva su plinovita i kapljevita goriva dobivena od ugljena, prirodnog plina, ulja škriljevca (škriljaca) ili biomase. Osim toga, sintetička goriva mogu se proizvesti i od raznih vrsta krutog otpada kao što su polimeri ili gume za kotače vozila. Ponekad, no ipak nešto rjeđe, ovaj se naziv odnosi i na plinovita goriva koja se proizvode na sličan način. Goriva proizvedena Fischer-Tropsch procesom, odnosno pretvorbom metanola u benzin ili direktnim ukapljivanjem ugljena mogu se nazivati sintetička goriva [7].

Ovisno o udruzi za energetske informacije sintetičko gorivo može se odnositi na različite tipove goriva. Ukoliko se sagleda definicija Međunarodne energetske agencije, bilo koje gorivo dobiveno od ugljena ili prirodnog plina definira se kao sintetičko gorivo. S druge strane, američka udruga za energetske informacije sintetičkim plinom smatra bilo koje gorivo proizvedeno od ugljena, prirodnog plina, biomase ili čak hrane za životinje kroz kemijske pretvorbe [7].

Sintetička goriva prvotno su razvijena u Njemačkoj putem direktne pretvorbe ugljena u sintetičko gorivo. Početno se koristio Bergiusov proces kojeg je razvio Friedrich Bergius, nešto kasnije razvija se nova metoda odnosno metoda indirektna konverzije, također u Njemačkoj. Ovu metodu razvili su Franz Fischer i Hans Tropsch [8].

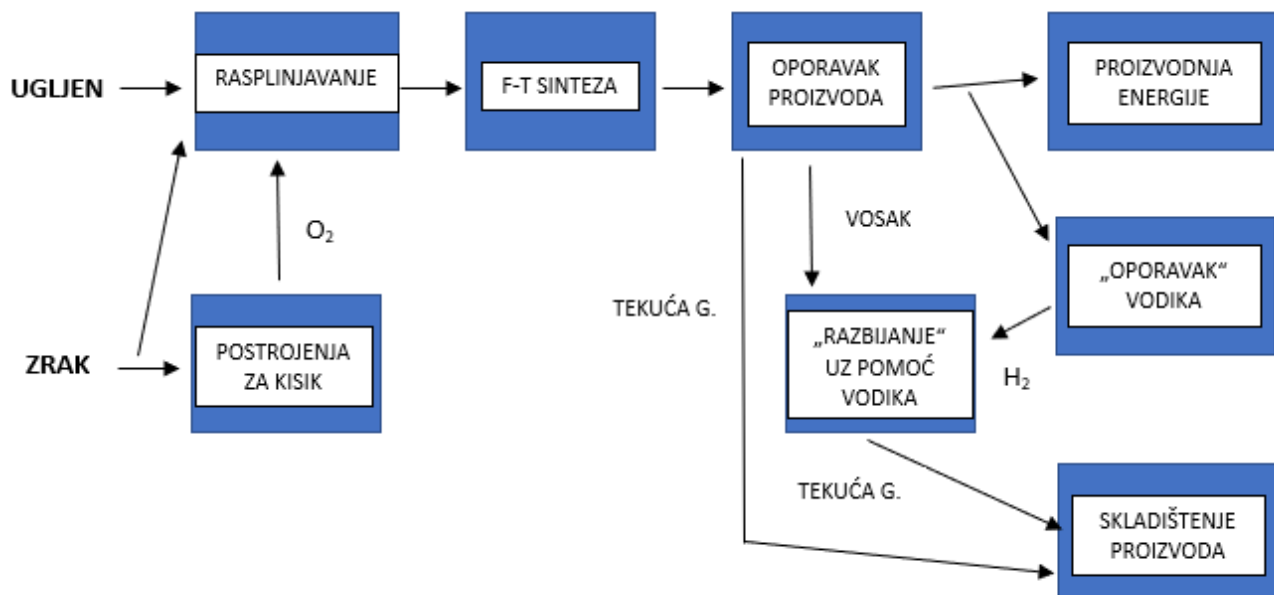
#### 3.2. Procesi proizvodnje

Za proizvodnju sintetičkih goriva mogu se koristiti brojni procesi koji se mogu podijeliti u tri skupine: indirektni, direktni i procesi proizvodnje biogoriva [9].

##### 2.2.1. Indirektna konverzija

Prvi među njima je indirektna konverzija koja je doživjela najveći razvoj, te se ovim procesom dnevno proizvede oko 260 000 barela (1 barel = 158,98 litara) sintetičkih goriva. Ona se odnosi na različite procese u kojima se ugljen, prirodni plin ili biomasa pretvaraju u mješavinu vodika i ugljikovog monoksida ili preko rasplinjavanja ili pretvaranja para metana. Fischer-Tropsch sinteza i Mobil proces (metanol u gorivo, MTG) su primarne tehnologije korištene u procesu

produkcije sintetičkih goriva iz sintetičkih plinova. U prvom navedenom procesu proizvodnje, Fischer-Tropsch sintezi, sintetički plin reagira u prisutnosti katalizatora pri čemu se pretvara u tekuće gorivo. Među tekućim gorivima koja nastaju ovim procesom ističu se dizelsko gorivo i mlazno gorivo. Sintetička goriva koja se proizvode procesom indirektna konverzije ponekad se naziva i procesom ugljen u kapljevinu (CTL), plin u kapljevinu (GTL) ili biomasa u kapljevinu (BTL). Ovisno o sirovini koja se koristi u početku procesa korišteno ime varira od slučaja do slučaja. Kombinirajući sirovine ugljena i biomase nastaju hibridna sintetička goriva čiji je proces proizvodnje poznatiji kao ugljen i biomasa u tekućine (CBTL). Ovim procesom koriste se barem tri poznata projekta što su Ohio River Fuels, Illinois Clean Fuels i Rentech Natchez. Tehnologije korištene u procesu indirektna konverzije mogu se koristiti i pri proizvodnji ugljika, koji se može koristiti u vozilima ili kao dodatni proizvod ili kao primarni produkt [9].



Slika 4. Pojednostavljeni prikaz Fischer-Tropsch sinteze [10]

### 2.2.2. Direktna konverzija

Direktna konverzija drugi je proces koji se koristi za proizvodnju sintetičkih goriva. Ona se odnosi na sve procese u kojima se sirovine ugljena ili biomase izravno pretvaraju u međuproizvode ili finalne proizvode, preskačući korak u kojemu se događa pretvorba u sintetički plin rasplinjavanjem [9].

Dvije su različite metode direktne konverzije, a one se odnose na 1) pirolizu i karbonizaciju te 2) hidrogenaciju. Piroliza je kemijski proces razgradnje organskih tvari djelovanjem topline na visokoj temperaturi, bez prisutnosti kisika i vode, karbonizacija se odnosi na proces pougljenjivanja čime organske tvari postaju ugljen. Proces može biti brz ili polagan. Brzi proces vrlo se rijetko događa u prirodi – npr. suha destilacija drva. Polagani proces odvija se u vremenski dugim periodima i bez pristupa zraka, a što je trajanje procesa duže to je udio ugljika veći. Posljednji je proces koji je važno definirati je proces hidrogenacije – ovaj proces odnosi se na vezanje odnosno adiciju vodika na višestruke veze nezasićenih organskih spojeva. Kao što je ranije rečeno, jedna od korištenih metoda direktne konverzije je postupak hidrogenacije, odnosno za izravnu pretvorbu ugljena u tekućinu ovim postupkom koristi se Bergiusov proces [9].

Ovaj proces odvija se na način da se ugljen ukapljuje zagrijavanjem u prisutnosti plinovitog vodika. Nakon toga se suhi ugljen miješa sa teškim uljima recikliranim iz procesa, a katalizatori se također dodaju u smjesu. Reakcija se odvija između 400 i 500 °C i tlaka vodika od 20 do 70 MPa [9].

Drugi procesi hidrogenacije koji se mogu koristiti za proizvodnju sintetičkih plinova su Exxon donor solvent proces, Imhausenov visokotlačni proces i Conoso cinkov klorid proces. Tijekom vremena razvijeno je i nekoliko dvostupanjskih direktnih postupaka ukapljivanja, kao što su katalitički dvostupanjski proces ukapljivanja, proces ekstrakcije tekućim otapalom tvrtke British Coal i japanski proces ukapljivanja smeđeg ugljena. Jedinstven proces čiji je izumitelj Joel W. Rosenthal – CCLP ili Chevron Coal Liquefaction Process je proces bliskog spoja nekatalitičkog otapala i katalitičke hidroprocesne jedinice. Ulje proizvedeno na ovakav način imalo je svojstva jedinstvena u usporedbi s drugim uljima od ugljena. Neke od razlika su vidljive u njegovoj manjoj masi u odnosu na druga ulja, kao i činjenica da je imao manje nečistoća heteroatoma [9].

Druga metoda, odnosno karbonizacijska pretvorba događa se pirolizom ili destruktivnom destilacijom, a proizvodi kondenzirajući ugljeni katran, ulje i vodenu paru, sintetički plin koji se ne može kondenzirati i čvrsti ostatak odnosno ugljen. Kondenzirani katran ugljena i ulje se zatim dalje obrađuju hidrogenacijom kako bi se uklonile vrste sumpora i dušika, nakon čega se prerađuju u goriva. Jedan od najboljih primjera karbonizacije je Karrickov proces izumitelja Lewisa Cassa Karricka. Karrickov proces odnosi se na proces karbonizacije pri niskim temperaturama pri čemu se ugljen zagrijava od 360 do 750 °C u odsutnosti zraka. Pri navedenim

temperaturama optimizira se proces proizvodnje katrana ugljena bogatijeg lakšim ugljikovodicima od uobičajenog katrana ugljena.

Glavni proizvodi ovog procesa su polukoks, kruto i bezdimno gorivo, dok su nusproizvodi tekućine. Drugi, sličan proces pod nazivom COED proces koristi fluidizirani sloj za obradu, u kombinaciji s povećanjem temperature kroz 4 stupnja pirolize. Proces se odvija kroz sljedeće korake – toplina se prenosi vrućim plinovima koji nastaju izgaranjem dijela proizvedenog ugljena. Modifikacija navedenog procesa uključuje dodatak rasplinjavanja pougljenog materijala, a naziva se COGAS proces. Proces TOSCOAL analogan je procesu retortiranja uljanog škriljevca TOSCO II i Lurgi-Ruhrgas procesu, koji se također koristi za ekstrakciju nafte iz škriljevca, koristi vruće reciklirane krutine za prijenos topline. Tekući prinosi pirolize i Karrickovih procesa općenito su niski za praktičnu uporabu za proizvodnju sintetičkog tekućeg goriva. Nadalje, nastale tekućine su niske kvalitete i zahtijevaju daljnju obradu prije nego što se mogu koristiti kao motorna goriva. Ukratko, mala je mogućnost da će ovaj proces dati ekonomski održive količine tekućeg goriva [9].

## 4. ELEKTROGORIVA

### 4.1. Definicija

Elektrogoriva ili e-goriva su klasa sintetičkih goriva, vrsta su zamjenskog goriva koja se mogu koristiti u postojećoj infrastrukturi, posebno prometnoj. Proizvode se korištenjem prikupljenog ili uhvaćenog ugljikova dioksida iz atmosfere (engl. captured carbon) ili ugljikova monoksida, zajedno s vodikom dobivenim iz vode razdvojenom održivim izvorima električne energije kao što su vjetar, solarna ili korištenjem nuklearne energije uz koju se veže vrlo niska emisija stakleničkih plinova. Proces koristi ugljikov dioksid u proizvodnji goriva i ispušta otprilike istu količinu ugljikovog dioksida nazad u zrak kada gorivo izgara, tj. takov gorivo ima ukupno vrlo niski ugljikov otisak. E-goriva su stoga opcija za smanjenje emisija stakleničkih plinova iz prometa, posebno za dugolinijski teretni, pomorski i zračni promet. Primarna ciljana goriva su metanol i dizel, ali uključuju i druge alkohole i plinove koji sadrže ugljik kao što su metan i butan [11].

### 4.2. Proizvodnja

E-goriva ili obnovljiva sintetička goriva proizvode se su uz pomoć solarne energije ili energije vjetra (tj. obnovljive energije). Za proizvodnju e-goriva električna energija, koristi se za razdvajanje vode na vodik i kisik. Proizvodnja e-goriva može se podijeliti u pojedinačne korake – proizvodnja električne energije, elektroliza za proizvodnju vodika, hvatanje ili prikupljanje (*capturing*) CO<sub>2</sub> i sinteza goriva [11].

Proces sinteze u proizvodnji elektrogoriva temelji se na spajanju vodika (proizvedenim iz električne energije) i ugljika (obično CO<sub>2</sub>) ili dušika (N<sub>2</sub>) za stvaranje raznih goriva. CO<sub>2</sub> može biti dobiven iz proizvodnje biogoriva ili zahvaćen iz zraka, dok se dušik zahvaća iz zraka. Tržišni nusproizvodi su kisik visoke čistoće te toplina. U ovom slučaju, riječ je o e-gorivima proizvedenim kada se vodik izravno dodaje u biogorivo u proizvodnim pogonima čime se izbjegavaju troškovi hvatanja ugljika. E-goriva proizvedena korištenjem CO<sub>2</sub> zahvaćenog iz biogenih ili fosilnih izvora ili zahvaćenog iz atmosfere nazivaju se i samostalna e-goriva. Ovisno o specifičnoj proizvodnoj tehnologiji, niz tekućina i plinova može se sintetizirati, npr. mogu se sintetizirati elektro-metan, elektro-metanol, elektro-benzin, elektrodizel, elektromlazno gorivo i elektroamonijak. Glavna privlačnost e-goriva je u tome što su mnoga

kompatibilna s postojećim vozilima, brodovima i zrakoplovima te s postojećim sustavima distribucije i maloprodaje tekućeg goriva. E-dizel, e-benzin i e-mlazno gorivo su tzv. drop-in goriva koja mogu biti u potpunosti zamjenjiva sa konvencionalnim gorivima. S obzirom na dug životni vijek postojećih vozila, brodova i zrakoplova te na hitnost rješavanja klimatskih promjena, korištenje drop-in e-goriva može biti važan element u aktivnostima za smanjenje emisija stakleničkih plinova iz prometa. Inače, obnovljiva goriva u prometu općenito zahtijevaju nova ili prilagođena vozila i infrastrukturu što zahtijeva dodatne resurse [11].

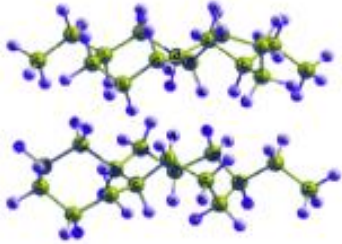
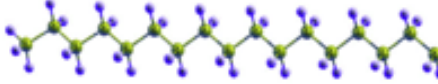

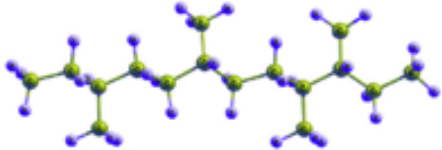
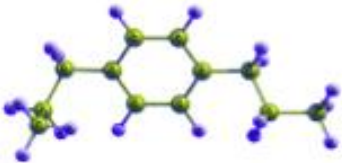
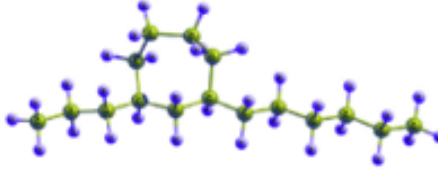
Glavni nedostaci e-goriva su niska učinkovitost pretvorbe energije iz električne energije u energiju kotača i bio baziranih analoga. To dovodi do povećane potrebe za električnom energijom, što dodatno povećava troškove. Osim toga, e-goriva imaju visoke energetske zahtjeve, što znači da je potrebno pet do šest puta više električne energije nego za baterijska električna vozila kako bi se postigle iste vozne performanse. Ovi nedostaci, u kombinaciji s nedavnim pomacima u tehnologiji električnih vozila kao što su cijena baterije i učinkovitost te zabrinutost da e-goriva mogu doprinijeti ovisnosti o fosilnim gorivima, doveli su do značajne neizvjesnosti u budućoj dostupnosti e-goriva [11].

### 4.3. Kapljevita e-goriva

Među kapljevitim e-gorivima ističu se ponajviše e-dizel i e-benzin. E-dizel jedna je od vrsta sintetičkog goriva koja je stvorena od strane korporacije Audi kako bi se koristila u automobilima, te je njegov razvoj i dalje pod nadzorom Audijevog istraživačkog odjela. Ova vrsta goriva nastaje od ugljikovog dioksida, vode i električne energije, te se smatra i neutralnim gorivom jer ne dolazi do izdvajanja novog ugljika. U usporedbi sa konvencionalnim dizelom, e-dizel ima nešto nižu stabilnost, nisku točku paljenja, vrlo lako isparava i ima nižu sposobnost podmazivanja. Ista tvrtka bavi se proizvodnjom e-benzina kojeg koristi također za vlastite automobile. Ukratko, e-benzin je izooktansko gorivo koje ne sadrži sulfate i benzene. Proizvodi se iz biomase u dvofaznom procesu [12].

Kapljevita e-goriva općenito najviše ograničavaju viši FPC (usporedba cijena goriva) i kriterijske emisije u usporedbi sa plinovitim gorivima kao što su e-metan i e-DME (dimetil eter) i izravnim korištenjem električne energije. E-benzin, e-dizel i e-mlazno gorivo imaju prednost u odnosu na druga e-goriva jer su zamjenjiva s postojećim gorivima, kompatibilna su s postojećim vozilima i sustavima distribucije goriva. Njihova visoka energetska gustoća znači manji utjecaj na sposobnosti vozila kao što su velik domet i brzo punjenje gorivom, te ima

najmanji utjecaj na volumen i masu vozila. E-benzin i e-dizel su najsloženija i skupa e-goriva za sintetiziranje, a njihova proizvodnja ima najveću potražnju za obnovljivom električnom energijom. Osim toga, Ottovi (koriste motorni benzin ili LPG) i Dieselovi motori (koriste dizelsko gorivo) koriste širok raspon ugljikovodika, bez obzira na njihovo podrijetlo, koji proizvode emisije tijekom izgaranja. Unatoč napretku u tehnologiji motora, naknadnim obradama i velikim smanjenjima kriterijskih emisija buduća prospekti koji zahtijevaju vozila s nultom stopom emisija predstavljaju velik izazov za vozila. E-metanol, zajedno sa drugim tekućim e-gorivima koja sadrže veći udio kisika imaju mnoge prednosti u odnosu na e-dizel i e-benzin, ali zahtijevaju novi sustav distribucije i opskrbe gorivom ili barem modifikaciju postojećeg sustava. Iako ih je relativno jednostavno distribuirati, dozirati i koristiti u vozilima, trenutno ne postoji uspostavljen distribucijski sustav ili vozni park vozila koja mogu koristiti e-metanol [12].

<p><b>dietilbikloheptan,</b> <b>C<sub>16</sub>H<sub>30</sub> +</b> <b>etilcikloheptan-</b> <b>ciklononan C<sub>16</sub>H<sub>30</sub></b></p> <p>(eng. diethylbicycloheptan + ethylcycloheptan- cyclononane)</p>		<p><b>n-didecil, C<sub>20</sub>H<sub>42</sub></b></p> <p>(eng. n-didecyl)</p>	
<p><b>pentilindan, C<sub>14</sub>H<sub>20</sub></b></p> <p>(eng. penty lindane)</p>		<p><b>3,6,9,10-metil-</b> <b>dodekan, C<sub>16</sub>H<sub>34</sub></b></p> <p>(eng. 3,6,9,10- methyl-dodecane)</p>	
<p><b>1,4-dipropilbenzen,</b> <b>C<sub>12</sub>H<sub>18</sub></b></p> <p>(eng. 1,4- dipropylbenzene)</p>		<p><b>1-propil-3-heksil-</b> <b>cikloheptan, C<sub>16</sub>H<sub>32</sub></b></p> <p>(eng. 1-propyl-3- hexyl-cycloheptan)</p>	

Slika 5. Organske molekule od kojih se sastoji dizel gorivo [13]



#### 4.4. Plinovita e-goriva

Plinovita e-goriva kao što su e-metan, e-DME i e-propan razmatraju se na jedinstven način jer moraju biti ukapljeni za učinkovito skladištenje u vozilu. E-DME i e-propan se ukapljaju kroz blagu kompresiju, dok se e-metan ukapluje snižavanjem temperature na oko  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Distribucija goriva je komplicirana jer zahtjeva dodatnu opremu potrebnu za distribuciju, komprimiranje i raspršivanje navedenih goriva. Nadalje, rukovanje i skladištenje goriva u vozilima također je dodatno zakomplicirano potrebom za višim tlakom i većim volumenom i masom sustava za skladištenje goriva. Dok komprimirani metan ima visoku gustoću energije u odnosu na baterijsko skladištenje električne energije, niža je gustoća energije u odnosu na tekuća e-goriva. Međutim, metan je već dobro uspostavljeno alternativno gorivo za cestovni promet i primjenjuje se uglavnom za teške terete [12]. Jedna od prednosti e-metana jest upravo ta da se na određenim lokacijama mogu koristiti trenutne distribucijske mreže prirodnog plina. Bez obzira na izvor metana, njegov potencijal utjecaja na globalno zagrijavanje je oko 30 puta veći od  $\text{CO}_2$  za razdoblje od sto godina, što znači da se svako curenje metana mora strogo kontrolirati u svim fazama proizvodnje, distribucije i uporabe kako bi se postigla njegova korisnost u emisiji stakleničkih plinova. Navedeno vrijedi za sve oblike transporta. Za usporedbu e-metana, komprimirani vodik zahtjeva manje koraka za proizvodnju od različitih e-goriva, ali još nije dovoljno dobro razvijen u kontekstu goriva za prijevoz [12]. Postoji nekoliko načina za proizvodnju vodika iz obnovljivih i neobnovljivih izvora energije. Obnovljivi načini uključuju elektrolizu, termolizu i termokemijski ciklus. Najčešće se koristi elektroliza. Elektroliza koristi električnu energiju kao glavni izvor energije. Voda se razdvaja na vodik i kisik strujom između dvije elektrode koje su odvojene i uronjene u elektrolit za povećanje ionske vodljivosti. Dijafragma ili separator se koristi kako bi se izbjegla rekombinacija kisika i vodika. Tipovi elektrolizatora o kojima se najviše raspravlja su alkalni, membrana zamjene protona i čvrsti oksid [12].

#### 4.5. Troškovi

Na cijenu e-goriva uvelike utječe trošak proizvodnje vodika [12]. De Saint Jean i suradnici sugeriraju da su cijena elektrolizatora i njegova izvedba dva glavna parametra koja utječu na ukupne troškove i cijene goriva. Također, na povećanje ili smanjenje, tj. varijacije u troškovima mogu utjecati i različiti načini proizvodnje FT-tekućina, efikasnost uklanjanja  $\text{CO}_2$  iz

postrojenja, te stopa u kojoj dolazi do pretvorbe CO<sub>2</sub>. Mohseni i suradnici sugeriraju da je trošak električne energije glavni čimbenik koji utječe na cijenu proizvodnje metana. Zahtjeva se pronalazak jeftinije električne energije koja je dostupna svakodnevno, kako bi se smanjili troškovi proizvodnje e-goriva [14].

Većina studija utvrdila je da je kapitalni trošak upravo elektrolizator, kao i životni vijek dimnjaka te potreba za zamjenom dimnjaka, u kombinaciji sa cijenom električne energije glavni su parametri koji utječu na trošak proizvodnje e-goriva. Drugi čimbenici kao što su razmatranje prihoda od nusproizvoda, kao i razmjer pogona za proizvodnju elektrogoriva ne mogu se zanemariti. Cijena hvatanja CO<sub>2</sub> i cijena vode manji su udjeli u ukupnim troškovima. Neke studije naglašavaju da je potreban i značajan napor kako bi elektrogoriva bila konkurentna na globalnom tržištu [12].

Najveći troškovi odnose se na dimnjak, energetske elektrone i uređaj za plin. Za alkalne i PEM elektrolizatore, trošak skupa obično iznosi oko polovicu troška kapitala. Troškovi rada i održavanja svih elektrolizatora su u rasponu od 2-5% godišnje od početnog troška kapitala, obično ne uključuju trošak zamjene stega na kraju životnog vijeka. Kapitalni troškovi za elektrolizator ovise o veličini, ali su dio operativnih troškova koji ovise o radu. Operativni troškovi nisu linearni sa veličinom sustava, te se njihovi troškovi od 2 do 5% po godini od inicijalnog kapitala troškova za 10MW do 1MW postrojenja [12].

Alkalni elektrolizatori koriste se u elektrolizi više od 100 godina u kemijskoj i metalurškoj industriji i za proizvodnje gnojiva. Čelija se sastoji od dvije elektrode odvojen dijafragmom uronjenom u vodenu alkalnu otopinu (KOH, NaOH ili NaCl). Nositelj naboja u alkalnoj elektrolizi je OH<sup>-</sup>. Radna temperatura je obično u rasponu od 60-80 °C. Alkalna elektroliza može raditi pod atmosferskim tlakom. Glavna prednost korištenja višeg tlaka je manja energija potrebna za proizvodnju stlačenog vodika. Međutim to smanjuje učinkovitost i čistoću plina. Komercijalni alkalni elektrolizatorski sustavi imaju učinkovitost u rasponu od 43 do 69 posto, s troškovima koji variraju od 600 do 2600 EUR/kW (eura po kilovatu električne energije), ovisno o kapacitetu proizvodnje i učinkovitosti, s većinom procjena oko 1100 EUR/kW. Kapitalni troškovi buduće alkalne elektrolize procijenjeni su na 400-900 EUR/kW. Glavne prednosti današnjih alkalnih elektrolizatora u usporedbi s PEM i SOEC su niski kapitalni troškovi, dostupnost velikih postrojenja i dug životni vijek, dok su nedostaci niska gustoća struje i visoki troškovi održavanja (jer je sustav vrlo korozivan). Vrijeme hladnog pokretanja je od minuta do sati [15].

PEM elektrolizatori nisu tako dugo na tržištu kao alkalni elektrolizatori, tako da imaju manje proizvodnih tvrtki i uglavnom su prilagođeni manjim kapacitetima. Danas, PEM elektrolizatori su dostupni na MW-skali. Za razliku od alkalnih elektrolizatora, PEM elektrolizatori nemaju tekući elektrolit. Umjesto elektrolita koristi se tanka polimerna membrana, obično niafon. Elektrode se obično sastoje od plemenitih metala kao što su platina i iridij. Nositelj naboja je  $H^+$ , a radna temperatura je u rasponu od 50-80 °C. PEM elektrolizatori mogu raditi pod višim tlakom od alkalnog; neki modeli dosežu 80 bara ili više. Konfiguracije tlaka dopuštaju strani katode (vodik) biti pod pritiskom, bez pritiska na strani anode, čime se izbjegava opasnost rukovanja kisikom pod visokim tlakom. Sadašnji PEM elektrolizatori imaju sličnu učinkovitost pretvorbe kao alkalni elektrolizatori, 40-69%, ali su skuplji uglavnom zbog membrane plemenitih metala. Investicijski trošak je u rasponu od 1900-3700 EUR/kW do 2030. godine. Prednosti PEM elektrolizatora su velike gustoće snage, broj korozivne tvari, te mogućnost rada pri visokom tlaku, većem od 100 bara. Moguć je i dinamičniji rad, hladni start vrijeme je od sekundi do minuta, a prijelazni rad je bolji u odnosu na alkalne elektrolizatore, a moguće su i dinamičke prilagodbe. Nedostaci su visoki troškovi i brzina degradacije [16].

Visokotemperaturni SOEC-ovi jedni su od nedavno razvijenih tehnologija elektrolize i još uvijek su na laboratorijskoj razini, ali mogu ući na tržište u bliskoj budućnosti. Jedan SOEC se sastoji od gustog sloja elektrolita i dvije porozne elektrode. Elektrolit se sastoji od cirkonija dopiranog itrijem nazvanog YSZ (cirkonijev oksid stabiliziran itrijem), koji ima dobru ionsku vodljivost pri visokim radnim temperaturama. Katoda obično porozni kermet od nikla YSZ, dok je anoda obično kompozit YSZ i na primjer lantan manganit dopiran stroncijem (LSM). Elektrolit osigurava put za prijenosnik naboja  $O_2^-$ . SOECs rade na temperaturama od 600-1000 °C što omogućuje učinkovitost pretvorbe iznad 80%. Visoka učinkovitost pretvorbe električne energije u vodik uzrokovana je povećanom mogućnosti opskrbe energijom u obliku topline umjesto električne energije. Zbog toga je upotreba SOEC-a od posebnog interesa u situacijama u kojima je dostupna visoka temperatura i izvor topline. SOEC-ovi se također mogu koristiti za koelektrolizu, gdje se odvijaju reakcije  $CO_2$  u  $CO$  i  $H_2O$  u  $H_2$  istovremeno što dovodi do proizvodnje sintetičkog plina. Prednosti SOEC-a za sada su uglavnom visoka učinkovitost pretvorbe električne energije u vodik i mogućnost integracije viška topline, dok su nedostaci limitirana dugoročna stabilnost ćelija i limitirana prikladnost u fluktuirajućim sustavima. Troškovi su neizvjesni u rasponu od 2500-6100 EUR/m<sup>2</sup> za najsuvremenije i buduće ciljeve [12].

#### 4.6. Izvori hvatanja ugljika

Različiti izvori i aktivnosti daju mogućnost hvatanja (zahvaćanja, prikupljanja) viška CO<sub>2</sub> koji se može uhvatiti su npr. proizvodnja biogoriva, dimni plinovi iz fosilnih i postrojenja za izgaranje biomase, industrijska postrojenja kao što su postrojenja za željezo i čelik, celuloze, papira i cementa, kao i geotermalne aktivnosti, aktivnosti zraka i morske vode. Koncentracije CO<sub>2</sub> u različitim izvorima variraju od vrlo malih (400 ppm u zraku) do gotovo 100% u nekim biogorivima [17].

Velike koncentracije CO<sub>2</sub> čiji su izvori mikroorganizmi koje proizvode etanol kroz fermentaciju šećera, mikroorganizmi gdje se anaerobno probavom kućnog otpada proizvodi bioplina, a postrojenja gdje se rasplinjavanje biomase proizvodi sintetski plin koji se dalje pretvara u metan, kao i postrojenja za proizvodnju amonijaka. Iskorištavanjem viška CO<sub>2</sub> iz proizvodnje biogoriva, proizvodnja e-goriva je način povećanja prinosa od iste količine biomase [17].

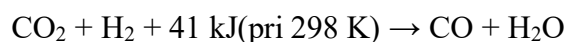
Studija Mohsenija tvrdi da se u proizvodnji prinos može povećati za 44-136% pri proizvodnji metana iz digestije ili rasplinjavanja biomase ako se ulaže u nove reaktore za sintezu koji dopuštaju reakciju CO<sub>2</sub> oslobođenog u procesu dodavanja vodika. Izvor CO<sub>2</sub> mora biti nefosilni izvor kako bi se proizvelo klimatski neutralno gorivo. Studija koju je izradio Trost sa suradnicima identificira velik potencijal za biogene izvore CO<sub>2</sub> u Njemačkoj, kao što su postrojenja za poboljšanje bioplina, postrojenja za proizvodnju bioetanol i postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. S druge strane, studija Reitera i Lindorfera otkriva da samo mali udio emisija CO<sub>2</sub> dolazi od poboljšanja proizvodnje bioplina i bioetanol te da su najveći izvori CO<sub>2</sub> u Austriji neobnovljivi kao što su industrija željeza, čelika i cementa zajedno sa električnim i toplinskim postrojenjima [12,17].

Koncentracija CO<sub>2</sub> u izvorima utječe na troškove hvatanja i učinkovitost. Relativno niski troškovi hvatanja mogu se postići npr. postrojenjima bioetanol, gdje ispušni tok ima visoku koncentraciju CO<sub>2</sub> i nije potreban dodatni velik korak pročišćavanja ili dodatna energija za proces hvatanja CO<sub>2</sub>. Fermentacija kućnog otpada u bioplina dovodi do sirovog bioplina koji sadrži metan, CO<sub>2</sub> i neke komponente u tragovima. Nadogradnja sirovog bioplina na kvalitetu goriva, zahtijevaju korak čišćenja za uklanjanje CO<sub>2</sub> i troškove nadogradnje postrojenja za hvatanje ima slične troškove kao i postrojenja za bioetanol. U slučajevima kada je potreban dodatni korak pročišćavanja, on povećava troškove hvatanja CO<sub>2</sub> iz industrije, kao što su petrokemija, rafinerija, cementa, željeza, čelika kao i postrojenja za izgaranje fosilnih goriva ili biomase [17].

Za hvatanje CO<sub>2</sub> iz zraka zahtjeva se 2-4 puta više energije u usporedbi sa hvatanjem CO<sub>2</sub> iz dimnih plinova. Jake baze, kao npr. natrijev hidroksid, kalijev hidroksid i kalcijev hidroksid mogu očistiti CO<sub>2</sub> iz atmosfere, ali je energetska jako intenzivan proces za regeneraciju baza. Energetski učinkovitiji materijali su u razvoju što ukazuje da bi proces mogao biti isplativiji u budućnosti. Troškovi hvatanja CO<sub>2</sub> iz zraka su visoki, no Ranjan i Herzog smatraju da su podcijenjeni, sve tehnologije za hvatanje zraka još su uvijek u ranim fazama razvoja i potrebno je daljnje istraživanje kako bi se bolje razumjeli procesi i trošak hvatanja CO<sub>2</sub> iz zraka [17].

#### 4.7. Sinteza goriva

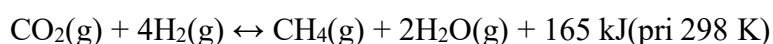
Vodik i CO<sub>2</sub> mogu se kombinirati za stvaranje različite energije u procesima sinteze goriva, kao što je sinteza metanola i Fischer-Tropsch sinteza. Novi inovativni nositelji energije također se mogu proizvesti iz CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub> korištenjem, npr. metoda razvijenih za proizvodnju sintetičkih goriva iz biomase ili iz skladištenja vodika pomoću tekućih organskih tvari. CO<sub>2</sub> se može koristiti izravno u nekim reaktorima, npr. pomoću Sabatierove reakcije koja proizvodi metan, dok drugi putovi reakcije polaze od CO kao u Fischer-Tropscheovoj sintezi. CO<sub>2</sub> se može reducirati u CO putem reakcije obrnutog pomaka vode i plina (RWGS):



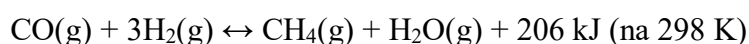
Reakcija je endotermna i visoke temperature su korisne za reakciju, koja daje gotovo punu konverziju na temperaturama višim od 830 °C [12].

Metan se može proizvesti iz H<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>/CO katalitičkim i biološkim metaniranjem. Proces se koristi za proizvodnju sintetskog prirodnog plina iz ugljena i biomase. Tri su glavne reakcije uključene u katalitičku metanaciju:

a) Sabatierova reakcija:



b) hidrogenacija:



c) RWGS reakcija

Sabatierova reakcija može biti promatrana kao kombinacija posljednje dvije reakcije. Moguće je pretvoriti više od 99,5% sintetiziranog plina (mješavine ugljikovog dioksida i vodika) u metan. Proces sinteze je egzoterman, dakle najviša učinkovitost se postiže pri niskim temperaturama. Reaktori s fiksnim slojem obično se koriste za katalitičku metanaciju, ali novi

koncepti reaktora kao što su trofazna metanizacija i mikroreaktori su u razvoju. U biološkoj metanaciji, mikrobi su zamjena za katalizatore. Ovaj proces je od sve većeg interesa u znanstvenoj zajednici, ali još uvijek u razvoju. Biološko metaniranje može se povezati s procesima proizvodnje bioplina dodavanjem vodika ili se može postaviti kao samoodrživa operacija. Biološka metanacija zahtijeva stalnu temperaturu, što smanjuje učinkovitost postrojenja. Investicijski troškovi za katalitičku i biološku metanaciju procjenjuju se na 30–900 EUR/kW, za različite veličine tvornica i tehnološke zrelosti [12].

Metanol je vrlo fleksibilan alkohol - može se koristiti i kao gorivo i u kemijskoj industriji. Vidljiv je pomak od ekonomije „nafte i plina“ prema “ekonomija metanola”. Metanol se može proizvesti iz CO<sub>2</sub> u jednom ili dva koraka. Proces u dva koraka počinje pretvaranjem CO<sub>2</sub> u CO reakcijom RWGS, nakon čega slijedi hidrogeniranje u metanol. U sintezi metanola izravnim hidrogeniranjem CO<sub>2</sub>, procesu u jednom koraku, općenito postoje tri natjecateljske reakcije:

a) izravna sinteza metanola iz CO<sub>2</sub>:



b) hidrogenacija:

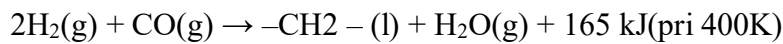


c) RWGS reakcija

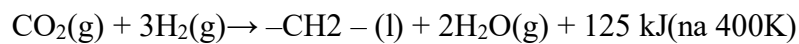
Tipična konverzija CO<sub>2</sub> u reaktoru s fiksnim slojem je u rasponu od 20-40% bez recikliranja, a stvaranje CO je značajno, što rezultira potrebom za recikliranjem neizreagiranog CO<sub>2</sub>, CO i H<sub>2</sub> kako bi se postigla gotovo puna konverziju CO<sub>2</sub> i visoku selektivnost metanola. Dobiveni produkt je smjesa metanola i vode koja treba biti destilirana kako bi se dobio čišći metanol. Investicijski troškovi za sintezu metanola procijenjeni su na 200–1200 EUR/kW u literaturi, za različite veličine tvornica [12].

Postoje dva puta za sintezu DME-a, izravna ili u dva koraka - sinteza metanola i dehidracija metanola. Izravna sinteza DME trenutno nije u komercijalnoj upotrebi, ali je termodinamički i ekonomski povoljniji za proizvodnju nego DME iz metanola. Investicijski troškovi za izravnu sintezu DME-a bili su procijenjeni na 300–1200 EUR/kW, za različite veličine tvornica [12].

Različiti ugljikovodici, uključujući benzin i dizel, mogu biti proizvedeni Fischer-Tropschevom sintezom. Kemijska reakcija:



gdje je  $-\text{CH}_2 -$  dio lanca ugljikovodika. Rast lanca ovisi o katalizatorima (npr. željezo, kobalt, nikal ili rutenij) i sastavu sintetičkog plina kao i o temperaturi i tlaku u reaktoru. Također je moguće proizvesti više ugljikovodika u jednom koraku, procesom izravne hidrogenacije:



Međutim, ovo je još uvijek u različitim fazama istraživanja, a ne gotova tehnologija koja se može koristiti. Troškovi ulaganja za FT tekućine procijenjeni su na 300–2100 EUR/kW za različite veličine postrojenja. Investicijski troškovi za procese pretvaranja metanola u benzin (MTG) procijenjeni su na oko 500-2000 EUR/kW u literaturi, za različite veličine postrojenja [12].

#### 4.8. Utjecaj na okoliš

Kako bi bio usuglašen s klimatskim ciljevima, prometni sektor mora smanjiti svoje emisije stakleničkih plinova (GHG) u znatnoj količini. Prijevoz koji uključuje cestovni, željeznički, zračni i vodni odgovoran je otprilike za 24% globalnih emisija  $\text{CO}_2$  iz fosilnih goriva i očekuje se da će se emisije dodatno povećati ukoliko se ne uvedu dodatne mjere opreza. Vozila s unutarnjim izgaranjem (ICEV) činila su oko 99% postojećih globalnih lakih vozila voznog parka (LDV) i 97% prodaje novih lakih vozila u 2019. godini. Kao i kod cestovnog prometa, fosilna goriva dominiraju i u vodnom prometu i u zrakoplovstvu. Potrebno je uvođenje alternativnih mogućnosti prijevoza kako bi se dekarbonizirao prometni sektor [18]. Prometni sektor ima četiri opcije za dekarbonizaciju čiji su razmjeri veliki. Svi pristupi dekarbonizaciji temelje se na dostupnosti električne energije s niskom ili nultom emisijom  $\text{CO}_2$ . Četiri opcije koje se ističu su:

- a) obnovljiva električna energija sa baterijskim električnim pogonom;
- b) obnovljivi vodik u gorivim ćelijama ili motorima s unutarnjim izgaranjem (ICE)
- c) obnovljiva goriva na bazi ugljika (ili amonijaka) u gorivim ćelijama ili motorima s unutarnjim izgaranjem
- d) nastavak korištenja fosilnih goriva u kombinaciji sa hvatanjem i skladištenjem ugljika

Tzv. plug-in hibridna električna vozila (vozila koja imaju pogon motorom s unutarnjim izgaranjem i električnim motorom za čiji pogon se može koristiti električna energija pohranjena u bateriju koja se može puniti vanjskim izvorom električne energije) su kombinacija opcija 1 i

2, 3 ili 4. Prve tri navedene opcije potencijalno mogu biti ugljično neutralne ako se postižu korištenjem obnovljive energije kao primarnim izvorom energije. Najprivlačnija opcija za određenu primjenu ovisi o specifičnim zahtjevima izvedbe vozila, budućoj tehnologiji vozila i troškovima energije te potrebnoj pratećoj infrastrukturi. Kompenzacija emisija korištenjem hvatanja i skladištenja ugljika iz bioenergije ili izravnog hvatanja iz zraka je temeljno drugačiji pristup i može se suočiti s društvenim i regulatornim otporom zbog pitanja o održivosti, npr. kapacitet izdvajanja CO<sub>2</sub> tijekom dugog vremenskog razdoblja i kontinuirano oslanjanje na fosilna goriva za prijevoz [18].

#### 4.9. E-goriva i cestovni promet

E-goriva koja se razmatraju za cestovni promet mogu se podijeliti na: Ottove motore (motore u kojima se smjesa zrak-gorivo zapaljuje iskrom sa svjećice ili Dieslove motore – tj. motore s kompresijskim paljenjem smjese, uslijed zagrijavanja stlačenog zraka na temperature iznad temperature zapaljenja goriva koje se ubrizgava u motor. E-goriva koja se najčešće identificiraju za primjenu u Ottovom motoru uključuju metan, metanol i ugljikovodike u rasponu benzina (5-11 atoma ugljika u molekuli ugljikovodika). E-goriva za motore druge vrste, odnosno Dieslove motore tzv. dizelske ugljikovodike (12-20 atoma ugljika u molekuli ugljikovodika).

Razne studije uspoređivale su cijenu i ekološku učinkovitost teških pogona konvencionalnog dizela, e-metana, e-metanola i sl. te se ne pronalazi jasan „pobjednik“ za primjenu u vozilima za cestovni promet. Različite opcije obnovljivih e-goriva uključuju značajne razlike u pogonskim sklopovima, tehničkoj spremnosti, troškovima goriva, atributima izvedbe, potrebne infrastrukture što su razlozi nemogućnosti pronalaska jednog konačnog pobjednika odnosno najbolje opcije [18].

U istraživanju Holmgrena i suradnika, procijenjeni su troškovi sklopova za teške uvjete rada, odnosno dva tipa kamiona, koji koriste e-dizel, e-metanol, e-etanol, e-ukapljeni bioplin i biogoriva. Zaključak ove studije bio je da se troškovi korištenja e-goriva nalaze u višem rasponu troškova mobilnosti u usporedbi s ostalim dostupnim opcijama. Ukoliko se sagledaju različite perspektive za budućnost, postoje scenariji koji su povoljni za e-goriva, što bi do 2070. godine značilo da će e-goriva osigurati približno 15% globalne energetske potražnje za promet [19].



S druge strane, postoji i nešto nepovoljniji scenarij za e-goriva u kojem ona nisu troškovno učinkovito rješenje – jer se klimatski ciljevi mogu postići uz niže ukupne troškove energetske sustava. Malins u svojoj studiji opisuje četiri scenarija za uvođenje e-goriva u Europskoj Uniji do 2050. godine. Scenariji su uključivali 10 i 50 posto ukupne potražnje za energijom u prometu, 50% ukupne potražnje za energijom za kamione, te jedan scenarij za sektor zrakoplovstva [20].

Connolly i suradnici predstavljaju scenarij za sustav 100% obnovljive energije u Europi do 2050. godine gdje je jedna pretpostavka uvođenje e-goriva u obliku DME-a i metanola za teška cestovna vozila, brodarstvo i zrakoplovstvo što odgovara polovici njihove ukupne potražnje za gorivom [21].

U svojim scenarijima za EU do 2050. godine, Blanco i suradnici otkrivaju da e-goriva pružaju do 50-60% ukupne potražnje za dizelskim gorivom za cestovni prijevoz i otpremu. Također su procijenili i troškove, pokretače i prepreke za potencijalno korištenje e-metana u EU. Smatraju da je potražnja za e-metanom za prijevoz znatno varirala u procijenjenim scenarijima, s mogućnosti korištenja ukapljenog metana za prijevoz teških tereta i oceanski prijevoz [22].

Lester i suradnici analizirali su potencijalno uvođenje e-goriva u danski energetske sustav do 2050. godine i otkrili su da se većina proizvedenih e-goriva koristi u cestovnom sektoru, osim u slučaju kada nema dopuštenog uvoza biomase. U navedenom slučaju e-goriva dominiraju i cestovnim i prekooceanskim i zračnim prometom [23].

Troškovi za proizvodnju različitih opcija e-goriva uključuju i distribuciju goriva i troškove vozila. Novo gorivo, koje se trenutno ne proizvodi i distribuira u velikom obujmu zahtijevalo bi novi sustav proizvodnje i distribucije goriva. Navedeno uključuje nove cjevovode, terminale za gorivo, kamione, cisterne i benzinske postaje. Izuzetak su e-goriva koja su sastavom ekvivalentna postojećim gorivima kao što su e-benzin, e-dizel, e-metan. Plinovita goriva povećavaju troškove zbog opreme i energije potrebne za komprimiranje i/ili ukapljivanje goriva za transport i punjenje goriva, dodatna vozila za rukovanje i skladištenje goriva. Prijelazi na alternative do 2030. godine zahtijevale bi političke mjere kao što su porezi na fosilna goriva ili subvencije za alternative. E-goriva u prednosti su u odnosu na biogoriva zbog svoje teorijske neograničenosti, dok su biogoriva ograničena dostupnošću biomase [18].

Gnann i suradnici zaključuju da se cijene goriva za vozila s masom 3,500 kilograma (HGV40 (*Heavy Goods Vehicle, 40-ograničenje brzine*), HDV i BEV (*Battery Electric Vehicles*)) procjenjuju kao niže u odnosu na bilo koje e-gorivo ili bio-e-gorivo. No valja naglasiti da ovi

zaključci ovise o vrsti teškog vozila i načinu rada te se upravo to treba uzeti u obzir pri procjeni troškova. Troškovi smanjenja ugljika za e-goriva u cestovnom prometu u studiji Granna i suradnika procjenjuju se na 150-1140 EUR/t CO<sub>2</sub> ovisno o putu e-goriva i primjeni na cesti. Širok raspon procijenjenog troška smanjenja ugljika za e-goriva uglavnom se odnosi na nesigurnost u e-FPC. Laki cestovni prijevoz je u donjem dijelu raspona, dok je teški u gornjem dijelu raspona [24].

#### 4.10. E-goriva i vodni promet

Međunarodna pomorska organizacija (IMO) ima za cilj smanjiti emisiju ugljika na svim brodovima, kako brodovima u novogradnji tako i postojećim brodovima za najmanje 40% do 2030. godine. U usporedbi sa planovima iz 2008. godine za postizanje nulte ili niske razine ugljika, glavne mogućnosti su:

- a) obnovljiva električna energija s potpuno baterijskim električnim pogonom
- b) obnovljivi vodik ili amonijak u motorima s unutarnjim izgaranjem
- c) obnovljiva e-goriva ili biogoriva
- d) jedra i vjetar
- e) nastavak korištenja fosilnih goriva u kombinaciji sa hvatanjem ugljika na brodovima [18].

Međutim, postoji nedovoljno smjernica o tome koja su goriva prikladna za različite segmente brodarstva. Vodik, amonijak ili baterija sa električnim pogonima glavne su opcije o kojima se raspravlja kako bi se postigle niske ili nulte emisije stakleničkih plinova u pomorskom prometu. Potencijal biogoriva i e-goriva raspravljan je u mnogim studijama, kao i mogućnost hvatanja ugljika na brodovima te korištenje jedara i energije vjetra. Brodovi su tradicionalno koristili jeftina goriva u obliku teških loživih ulja i dizelskih goriva s visokim sadržajem sumpora što je posebno važno kada se raspravlja o troškovima i prijelazu na goriva bez ugljika. Ima nekoliko različitih kategorija brodova s različitim operativnim profilima, npr. obalni brodovi, brodovi za unutarnju plovidbu i preoceanski brodovi, koji utječu na to koje su opcije dekarbonizacije poželjne. Do sada je glavna promjena goriva u brodarstvu uvođenje ukapljenog prirodnog plina. Ovaj uvod u promjene vođen je prvenstveno regulativama o sumporu, a ne dekarbonizacijom te je daljnji rad i dalje potreban. Postoji nekoliko inicijativa za uvođenje obnovljivih izvora energije u pomorskom prometu kao što su vodik, metan i

metanol. Unutar dvije kategorije – obalne plovidbe i plovidbe unutarnjim vodama, već postoji nekoliko električnih brodova koji su u funkciji, dok za preoceanske brodove koji putu velikim udaljenostima što onemogućava punjenje baterija, ovakav oblik nije vjerojatna opcija [18].

Vergara i suradnici predlažu korištenje e-goriva u oceanskom prijevozu, a na kopnu izgradnju namjenskih rafinerija sintetičkih goriva [25].

Korberg i suradnici procijenili su ukupne troškove za četiri vrste brodova – veliki trajekt, prijevoznike generalnog tereta, prijevoznike rasutog tereta i kontejnerske brodove i tri operativna profila za biogoriva, bio-e-goriva i e-goriva za sedam mogućih nositelja energije. Otkrili su da su opcije e-goriva skuplje od odgovarajućih opcija biogoriva. Također, uporaba vodika, amonijaka, sintetskog metana, sintetskog metanola i sintetskog etanola procijenjeni su od 3 do 11 puta skupljim u odnosu na troškove za loživo ulje [26].

Blanco i suradnici zaključili su da je u pomorskom prometu povećano korištenje biogoriva i e-goriva ukoliko je dostupnost biomase povećana. Ukoliko se govori o e-metanu, Blanco zaključuje da je izbor goriva u pomorskom prometu pod velikim utjecajem cijene goriva i njegove efikasnosti, te da bi ova industrija mogla smatrati tekući e-metan izrazito zanimljivim te uporabljivim [22].

Connolly i suradnici predstavili su scenarij za sustav potpuno obnovljive energije u Europi do 2050. godine, kojim pretpostavljaju da će polovica potražnje za gorivom u pomorskom sektoru biti zadovoljena e-gorivima u obliku DME i metanola [21]. Ovakve pretpostavke vrijede i za cestovni promet i zrakoplovstvo.

Lester i suradnici analizirali su uvođenje e-goriva u danski energetska sustav, te predlažu da se u njihovom slučaju koriste biogoriva ili amonijak ukoliko bi se ograničio uvoz biomase. E-goriva su u proizvodnji vezana sa biomasom i uglavnom se koriste u cestovnom prometu [23]. S druge strane, Connolly analizira i scenarije u kojem su e-goriva glavni izbor za dekarbonizaciju u sektoru prometa i zaključuje da zamjena konvencionalnih fosilnih goriva u kamionima, brodovima i zrakoplovima povećava ukupne troškove energetskog sustava za oko 3 posto [21].

Sve opcije e-goriva znatno su skuplje od postojećih goriva u brodarstvu. Proizvodnja goriva najviše doprinosi troškovima za dvije vrste broda (veliki trajekt i kontejnerski brod). Bio-e-goriva imaju niže troškove mobilnosti u odnosu na samostalna e-goriva. Najjeftinije opcije su bio-e-metanol za motore s unutarnjim izgaranjem, bio-e-DME i pogon na električne baterije

za kategoriju velikih trajekata, dok su bio-e-metanol ICE, bio-e-metanol FC, bio-e-DME ICE za kategoriju kontejnerskih brodova. U slučaju kategorije kontejnerskih brodova korištenje električnih baterija nije raspoloživa opcija. U usporedbi sa cestovnim prometom, u pomorskom prometu su potrebni još veći poticaji kako bi e-goriva bila cjenovno konkurentna u usporedbi sa konvencionalnim brodskim gorivima. Procijenjeni troškovi smanjenja ugljika za različita uključena e-goriva za brodarstvo su 150-1250 EUR/tona CO<sub>2</sub>. Trošak smanjenja za goriva na bazi metana u određenoj su mjeri uzrokovani ispuštanjem metana iz broskog motora s unutarnjim izgaranjem, ali i većim troškovima distribucije goriva i skladištenja u vozilu. Troškovi smanjenja ugljika za bio-e-goriva mogli bi se povećati ako je biomasa povezana s višim životnim ciklusom emisija stakleničkih plinova zbog izravne i neizravne promjene korištenja zemljišta [18].

#### 4.11. E-goriva i zrakoplovstvo

Zrakoplovni sektor u posljednjih nekoliko godina pokazuje značajan interes za rješenja goriva s niskim udjelom stakleničkih plinova. Međunarodno udruženje zračnog prometa obvezalo se smanjiti emisije CO<sub>2</sub> iz zrakoplovstva za 50% do 2050. godine, te postići neutralan rast od 2019. godine. Za postizanje ovih ciljeva, niske ili nulte emisije potrebna su alternativna zrakoplovna goriva, poput vodika, e-goriva ili biogoriva. Glavne opcije za goriva s niskim udjelom stakleničkih plinova uključuju bio-mlazna goriva, vodik u mlaznim motorima, baterijski električni pogon i e-goriva. Potpuni baterijski električni pogon smatra se opcijom za zrakoplove kratkog dometa, dok se o hibridnom pogonu govori kao opciji za sve raspone leta [18].

E-goriva za zrakoplovstvo mogu se koristiti na dva načina. Prvi način je korištenje u modificiranim mlaznim motorima, dok se drugi način odnosi na korištenje u gorivim ćelijama. Ovisno o vrsti e-goriva mogu postojati različite modifikacije konvencionalnih mlaznih motora. Najčešće e-gorivo za zrakoplovstvo je e-mlazno gorivo proizvedeno Fischer-Tropsch sintezom. Jedno od e-goriva koje se razmatra za upotrebu u zrakoplovima je metanol-to-jet koje je proizvedeno procesima potpune elektrokemijske sinteze [18]. Goldmann i suradnici u svom istraživanju kao jednu od mogućih opcija spominju i amonijak, no on se može koristiti samo u kombinacijama s gorivima koja olakšavaju paljenje u motorima zrakoplova, kao što je npr. vodik [27]. Malins procjenjuje da će se 50% potražnje za energijom u zrakoplovstvu u EU zadovoljiti e-gorivima u obliku e-kerozina, no to bi zahtijevalo 25% povećanje u generiranju

električne energije [20]. Connolly i za zrakoplovni sektor postavlja potencijalne scenarije, te smatra da će u Europi do 2050. godine sektor zrakoplovstva koristiti e-goriva u obliku DME-a i metanola, kao što je slučaj i sa cestovnim i pomorskim prometom. E-mlazno gorivo dobiveno putem metanola sastoji se od više od 90% izoparafina koji imaju dobra svojstva hladnog tečenja za zrakoplovne motore. Autori također izvještavaju da osim e-n-oktana, ostala e-jet goriva nisu kompatibilna sa postojećim mlaznim motorima zbog razlike u svojstvima izgaranja u usporedbi sa jet A-1. Glavni nedostatak e-vodika i drugih e-goriva, kao što su e-metan i e-amonijak je njihova niska volumetrijska gustoća energije, koja zahtjeva veće i visokotlačne sustave spremnika i modifikacije trupa, motora kao i sustava opskrbe gorivom. Može se protumačiti i da e-mlazno gorivo dobiveno putem FT sinteze ne bi trebalo biti odobreno od američkog Društva za ispitivanje materijala, s obzirom da je FT sinteza certificiran proces za miješanje 50 postotnih FT baziranih goriva, a e-jet goriva imaju kemijske i fizičke specifikacije za miješanje sa konvencionalnim jet gorivima [21].

Ukoliko se sagledaju troškovi, Schmidt i suradnici utvrdili su da je trošak proizvodnje e-mlaznog goriva proizvedenog putem FT sinteze veći od troškova proizvodnje metanola. Za dva tipa zrakoplova, najjeftinije opcije goriva bile su bio-e-LMG tj. bioplina i bio-e-jet gorivo. Za zrakoplove srednjeg dometa sva e-goriva i bio-e-goriva jeftinija su opcija od opcije vodika, dok je za zrakoplove dugog dometa opcija vodika jeftinija od nekih e-goriva (e-mlazno gorivo dobiveno FT sintezom). Troškovi smanjenja ugljika za različita uključena e-goriva za zrakoplovstvo procjenjuju se na 250-1210 EUR/tona CO<sub>2</sub> [18].

E-goriva ne rješavaju izravno želje za kontinuiranim smanjenjem emisijskih plinova koji nastaju radom motora s unutarnjim izgaranjem. Dok bi e-benzin i e-dizel mogli imati manju kriterijsku korist od emisija smanjujući sadržaj aromatskih ugljikovodika i olefina, nekonvencionalna e-goriva mogu ponuditi različite stupnjeve mogućnosti za smanjenje emisija, iako su uz to vezane i određene nesigurnosti. Metanol, metan, DME i H<sub>2</sub> privlačne su opcije jer imaju tendenciju stvaranja vrlo malo emisijskih čestica. E-goriva također imaju i niže sadržaje sumpora od konvencionalnih fosilnih goriva, smanjujući emisije sumpora i „trovanje“ katalitičkih konvertera u sustavima naknadne obrade. Navedeno je vrlo korisno za vodni promet, jer trenutno u vodnom prometu prevladavaju brodovi koji koriste bunkere goriva s visokim sadržajem sumpora. Ograničavanjem broja onečišćujućih tvari koje je potrebno kontrolirati, naknadni tretmani se potencijalno mogu pojednostaviti, može se povisiti njihova učinkovitost te se mogu smanjiti troškovi. S obzirom na to da bi vozila s e-gorivima u IC

motorima imala neke kriterijske emisije u svojim ispušnim plinovima, ova vozila ne bi zadovoljila većinu trenutnih odredbi [18].

#### 4.12. Pravila i regulativa

Politika je ključna za uvođenje e-goriva, neovisno o načinu prijevoza i prometnom sektoru. Politika i propisi povezani s e-gorivima razlikuju se u mnogim državama, no ovdje će pobliže biti opisane regulative i pravila Europske Unije. Dok nije objavljena Direktiva o obnovljivoj energiji (RED II Direktiva) u 2018. godini, te njene implementacije sredinom 2021. godine u svim državama članicama Europske Unije, e-goriva nisu bila smatrana alternativnim gorivima koja bi se koristila umjesto konvencionalnih goriva. RED I Direktiva uglavnom uključuje izravnu upotrebu vodika i primjenu biogoriva. Zašto su upravo ovakve odredbe prethodile e-gorivima kao alternativa? Jer su tehnologije za razvoj ovih goriva prethodile razvoju tehnologija za e-goriva. Europska strategija iz 2010. godine o čistim i energetske učinkovitim vozilima priznavala je samo kapljevit biogoriva i plinovita goriva kao što je bioplina, te vozila na vodikove gorive ćelije i električna vozila. E-goriva u tom trenutku nisu bila prepoznata kao sredstva za smanjenje CO<sub>2</sub> [28]. Obnovljiva goriva na bazi CO<sub>2</sub> potiču se u Njemačkoj Direktivom o neizravnoj promjeni korištenja zemljišta kao dio njihovih nacionalnih ciljeva. Točnije, tada važeća Direktiva o kvaliteti goriva iz 2009. godine dopušta da se goriva na bazi CO<sub>2</sub> koriste za doprinosenje ciljevima smanjenja emisija. Međutim, u slučaju mješavina goriva i vozila na benzin, Direktiva postavlja određena ograničenja na neka tekuća e-goriva kao što su metanol i eteri. Prema Europskom zelenom planu, koji sadrži skup novih pravila i regulativa za održiva alternativna goriva za različite načine prijevoza objavljena je 2021. godine. Prema Direktivi RED II, obnovljiva goriva nebiološkog podrijetla uključuju e-goriva koja potječu od emisija ugljika s vjerojatnom iznimkom biogenog CO<sub>2</sub>. Neobnovljiva e-goriva podrijetlom iz otpadnog plina ili ispušnog plina, koji se nazivaju recikliranim ugljikovim gorivima nisu definirana kao obnovljiva goriva, ali se mogu uključiti za ispunjavanje ciljeva obnovljive energije u prometnom sektoru. Kako bi se e-goriva nebiološkog podrijetla definirala kao obnovljiva, dobiveni energetske sadržaj mora doći iz obnovljivih izvora osim biomase. Kao tumačenje Direktive RED II, e-goriva biološkog podrijetla mogu se prepoznati kao napredna biogoriva, o čemu bi se moglo raspravljati u fazi implementacije regulativa [28].

U pogledu podrijetla električne energije, članak 27. navodi da bi se definirali kao tekuća i plinovita goriva nebiološkog podrijetla, električna energija mora biti definirana kao potpuno

obnovljiva. Za e-goriva ovo znači da se korištena električna energija mora definirati kao potpuno obnovljiva, a ako je iz električne mreže može zahtijevati uporabu samo u jednom sektoru. Direktiva RED II nadalje zahtijeva da jedinice za proizvodnju e-goriva budu izravno spojene na obnovljivu električnu energiju, a ne u mrežu. Time se ograničavaju mogućnosti e-goriva kao sredstva za skladištenje. Direktiva također navodi da se od proizvođača e-goriva traži da se doda implementacija obnovljivih izvora energije ili da se financira proizvodnja obnovljivih izvora energije. Dodano je i da električna energija koja se koristi za proizvodnju obnovljivih goriva nebiološkog podrijetla ne treba biti uračunata u udio obnovljivih izvora energije, kako bi se izbjeglo dvostruko računanje. Predlaže se i posebno promoviranje korištenja e-goriva u zračnom i pomorskom prometu. Općenito, potrebno je unijeti određene promjene kako bi se unijela jasnoća u direktivama vezana uz e-goriva [\[28\]](#).

## 5. ALTERNATIVE FOSILNIM I E-GORIVIMA

Trenutno je glavna pokretačka snaga industrije u smislu proizvodnje materijala i kemikalija temeljena na neobnovljivim izvorima energije. Ispunjavanje Pariškog sporazuma COP21 (*The 21st Conference of Parties*, ili 21. Konferencija stranaka) zahtjeva smanjenje i konačni kraj ovisnosti o fosilnim gorivima, što će biti potrebno za smanjenje emisija štetnih stakleničkih plinova koji uzrokuju klimatske promjene. COP21 konferencija je Ujedinjenih naroda o klimatskim promjena, a održala se u Parizu od 30. studenog do 12. prosinca 2015. godine. Ovaj sporazum predstavlja konsenzus predstavnika 196 nazočnih stranaka po pitanju ograničavanja globalnog zagrijavanja 1,5 do 2 °C u usporedbi s preindustrijskim razinama.

Kako bi se ispunili zahtjevi COP21 potrebno je uspješno razvijati tehnologije za izravno korištenje obnovljivih energija, uključujući one sunca, vjetra, geotermalnih izvora, oceana i izvora dobivenih iz biomase. Dvije kemikalije za koje se predviđa da se mogu lako proizvesti korištenjem obnovljivih izvora energije su vodik i amonijak, koji su neovisni o ugljikovim materijalima i imaju široku u industriji i društvu. Proširenje proizvodnje biogoriva bit će uvelike od pomoći u korištenju obnovljivih izvora energije. Biogoriva su dobivena iz biljaka, koje jednostavno recikliraju ugljikov dioksid koristeći sunčevu svjetlost i mogla bi lako zamijeniti fosilna goriva [29]. Očuvanje energije i poboljšanja u učinkovitosti potrošnje energije uvijek su poželjni za bolje korištenje bilo kojeg izvora energije uključujući obnovljive izvore energije. Postoje barem tri pristupa korištenju obnovljivih izvora energije:

- a) mali sustavi za grijanje
- b) mali sustavi za hlađenje
- c) proizvodnja električne energije koja služi stambenim objektima, trgovačkoj i prometnoj djelatnosti pojedinačnih subjekata i malih zajednica.

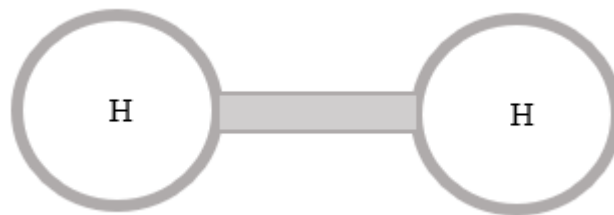
Korištenje obnovljivih izvora energije u malim razmjerima za grijanje, hlađenje i rasvjetu zgrada trenutno predstavlja velik udio ukupne primjene obnovljive energije. Geotermalna, solarna i energija vjetra tipični su obnovljivi izvori energije koji su razvijeni za upotrebu u malom opsegu. Tehnologija grijanja solarnom energijom također je dobro poznata i mnoge su zgrade sada opremljene solarnim kolektorima za grijanje i proizvodnju električne energije. Ove vrste tehnologija za iskorištavanje obnovljive energije sada su široko dostupne i mnoge zajednice diljem svijeta postaju energetske neovisne korištenjem ovih pristupa.



Korištenjem obnovljivih izvora energije u velikim razmjerima u transportu, industriji i komercijalnim primjenama zahtijeva odgovarajuće gorivo dobiveno prema određenim standardima, te da bi se koristilo u ovim primjenama, ono mora biti neovisno o korištenju fosilnih goriva [29].

### 5.1. Vodik

Vodik je sasvim prikladan kao gorivo za gorivne ćelije i motore s unutarnjim izgaranjem. Može se proizvesti korištenjem obnovljivih izvora energije disocijacijom (elektrolizom) vode ili procesom rasplinjavanja. Međutim, bitne poteškoće nastaju u transportu i skladištenju vodika. Pojavni oblik plina vodika o kojemu se govori u ovom radu je zapravo molekula koja se sastoji od dva atoma vodika .

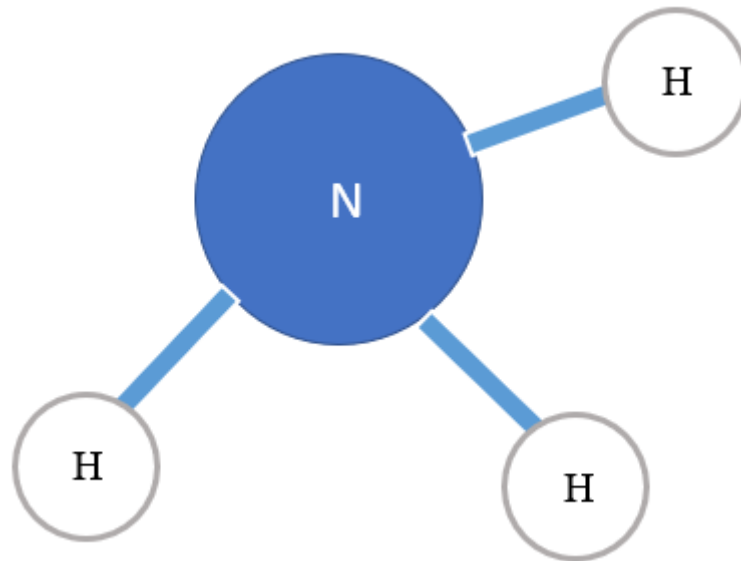


Slika 6. Molekula vodika [29]

Molekula vodika je vrlo mala molekula, bez mirisa i iznimno je podložna curenju iz spremnika. Vodik se obično u spremnicima komprimira do tlaka od oko 3-8 MPa, a zatim se dovodi u prijenosni cjevovod. U određenim dijelovima Europe, neke benzinske postaje nude punjenje električnih automobila dopunom vodika. Ukoliko se sagledaju trenutno postojeće tehnologije, troškovi proizvodnje tzv. zelenog vodika putem solarne energije ili putem vjetroturbina mogu se smanjiti troškovi proizvodnje i distribucije vodika. Tehnički je zahtjevno izvesti nepropusnost cjevovoda za vodik zbog pokretljivosti molekule vodika, a razvoj sustava bez propuštanja značajno povećava troškove skladištenja i distribucije, što također treba uzeti u obzir pri procjenama. Dodatan problem koji je vezan za tehnički zahtjevnije cjevovode je i lokacija stanica za istakanje koje moraju biti blizu krajnjih korisnika, a istovremeno moraju imati i dovoljan međuspremnik i sigurnosne mjere [29].

## 5.2. Amonijak

S druge strane amonijak je spoj dušika i vodika, kutovi H-N veza međusobno su udaljeni 107 stupnjeva jer se H-atomi odbijaju od usamljenog para elektrona na N-atomu, kao što se može vidjeti na slici 7. Amonijak je u normalnim uvjetima bezbojan plin karakterističnog neugodnog mirisa te je otrovan. Može se koristiti kao sredstvo za čišćenje i dezinfekciju. Neke skupine za istraživanje i razvoj predlažu proizvodnju amonijaka korištenjem obnovljivih izvora energije te njegovo skladištenje, transport i korištenje. Za razvoj goriva namijenjenih transportu, komercijalnom i industrijskom sektoru potrebno je uložiti mnogo truda, no mogao bi se koristiti kao alternativno gorivo u zamjenu za konvencionalna goriva. Tehnologija za skladištenje i transport amonijaka već je dostupna, te se trenutno oko 90% proizvedenog amonijaka koristi za proizvodnju gnojiva. Trenutno se proizvodnja amonijaka u industrijskim razmjerima temelji isključivo na upotrebi fosilnih goriva, a upravo takve industrije emitiraju više stakleničkih plinova nego bilo koji drugi proces proizvodnje kemikalija. Procjenjuje se da globalna proizvodnja amonijaka trenutno doprinosi gotovo 11% industrijskih emisija ugljikovog dioksida. Infrastruktura za skladištenje i transport amonijaka su već dostupne, što je pozitivno jer bi time barem dio troškova bio smanjen. Korištenje obnovljivih izvora energije u proizvodnji amonijaka vrlo je poželjno u kontekstu smanjenja emisije stakleničkih plinova [29]. Trenutna istraživanja potencijalne primjene amonijaka kao goriva uključuju korištenje u industrijskim pećima, turbinama i gorivnim ćelijama za proizvodnju električne energije. Dokazano je da suspaljivanjem vodika, odnosno amonijaka s prirodnim plinom ili ugljenom, generatori električne energije bi mogli sustavno smanjiti emisije ugljika, sve uz izbjegavanje značajnih kapitalnih ulaganja. Potrebno je naglasiti određene nedostatke kao što su vrlo neugodan miris koji se javlja čak i pri niskim koncentracijama emisije, vrlo je visoka toksičnost ovog plina u visokim koncentracijama, ima i vrlo nisku energiju po jedinici mase za korištenje kao gorivo za izgaranje, te ima vrlo nisku učinkovitost disocijacije za proizvodnju vodika. Proizvodnja amonijaka iz obnovljivih izvora energije, te njegova upotreba kao nosača vodika i njegova disocijacija za proizvodnju vodika za gorivo su poprilično energetski intenzivni. Značajan dio izvorne obnovljive energije gubi se u procesu. Ukoliko se sagleda primjena amonijaka kao goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem nailazi se na vrlo velik izazov zbog niske zapaljivosti i visoku emisiju NO. Važno je napomenuti i razne sigurnosne probleme vezane uz amonijak – gutanje amonijaka može izazvati opekline u ustima, grlu i želucu što može rezultirati i smrtnim ishodom. Amonijak u kontaktu sa kožom izaziva crvenilo, bol, iritaciju i opekline, te je sveukupno toksičan za čovjeka u visokim koncentracijama [29].



Slika 7. Molekula amonijaka [30]

### 5.3. Biogoriva

Biogoriva su jedna od alternativa fosilnim gorivima. Biogoriva prve generacije dobivaju se iz žetvenih sirovina poput šećerne trske i kukuruza, koji su dugoročno neodrživi i imaju intenzivnu konkurenciju u prehrambenoj industriji. Ova biogoriva uključuju etanol proizveden fermentacijom ugljikohidrata i šećera korištenjem enzima i mikroorganizama, biodizel koji je produkt transesterifikacije biljnih ulja ili masti i zeleni dizel proizveden iz ulja frakcijskom destilacijom. Biogoriva druge generacije su goriva napravljena od lignoceluloznih materijala, koji sadrže velike količine celuloze. Biogoriva treće generacije povezana su s metabolizmom mikroorganizama, posebice algi i mikroba [29]. Mikroalge su obećavajući izvor obnovljivih goriva jer mogu proizvesti i biometan, biovodik i biodizel. Osim toga, žetva algi provodi se velikom brzinom, a ne zahtijevaju velike površine. Biogoriva četvrte generacije također se temelje na bioalgama, fokusirajući se na metabolički inženjering fotosintetskih mikroorganizama za proizvodnju biogoriva. Korištenje biogoriva prve generacije potencijalno bi povećalo stopu krčenja šuma što bi uzrokovalo dodatne probleme po pitanju kontrole emisije stakleničkih plinova, jer šumske biljke ovise o CO<sub>2</sub> za fotosintezu. S obzirom da kukuruz i drugi poljoprivredni proizvodi zahtijevaju uzgoj, sakupljanje, sušu i fermentiranje za proizvodnju alkohola, a svaka od ovih faza zahtijeva korištenje energije, prva generacija biogoriva postaje neodrživa i neekonomična opcija [29].

Potencijal za proizvodnju biogoriva koji ima vrlo visoke energetske omjere učinkovitosti postoji u drugoj, trećoj i četvrtoj generaciji klasa biogoriva. To bi moglo uvelike pridonijeti budućem napretku obnovljive energije kada se prestanu koristiti fosilna goriva. Velika dostupnost ostataka biomase dobivena iz djelatnosti poljoprivrede i šumarstva ukazuje na pozitivnu ekonomsku održivost usjeva s niskim utjecajem. Mnoge tehnologije za pretvorbu poljoprivrednog celuloznog otpada, poput kukuruzne peći u etanol, vrlo su dobro razvijene [29]. Količina kukuruzovine iz tih usjeva bila bi dovoljna za opskrbu postrojenja za proizvodnju etanola s procijenjenim kapacitetom od 291 000 tona dnevno kada bi cijena etanola bila 56,7 USD po barelu. Drvena biomasa koja se koristi karakterizirana je kao šumski ostaci, primarni ostaci mlina, sekundarni ostaci mlina i gradski drveni ostaci. Budući da drveni materijali imaju visoku gustoću energije, mogu proizvesti velike količine biogoriva po toni sirovine. Energetski sadržaj biomase može biti procijenjen toplinskom vrijednošću karakteriziran kao viša ogrjevna vrijednost (HHV) i niža ogrjevna vrijednost (LHV). Materijali bogati celulozom skloniji su obradi metodama toplinske izgradnje, ali mnogo ostataka drvene biomase sadrži velike količine lignina. Materijali bogati ligninom recikliraju se alternativnim metodama ili su podvrgnuti ekstrakciji lignina koja je našla vrijedne primjene [29]. U strukturi integrirane biorafinerije, ostaci bogati ligninom iz biokemijskog procesa također se mogu termokemijski pretvoriti u bioulje, premaze i kemijske intermedijere.

Postoje i namjenski energetske usjevi koji se definiraju kao obnovljivi energetske usjevi sa lignoceluloznim materijalima, posebno se razvijaju i uzgajaju za proizvodnju biogoriva zbog svojih energetskih prinosa. Energija se može generirati izravnim putem izgaranja usjeva ili rasplinjavanjem za proizvodnju električne energije ili pretvorbom usjeva u tekuća goriva kao što su etanol za uporabu u transportnoj industriji [29].

Drvenasti energetske usjevi kratke ophodnje su kulture drveća koje su uzgajaju u kratkim ophodnjama, obično s intenzivnijim gospodarenjem od šumskih plantaža. Šumarstvo kratke ophodnje odnosi se na praksu uzgoja brzorastućih stabala koja postižu svoju ekonomski optimalnu veličinu u dobi između 8 i 20 godina. Oni uključuju srebrni javor, pamuk, bagrem, topolu i vrbu [29].



**Slika 8. Stablo bagrema [31]**

Tehnologija uzgoja makroalgi i mikroalgi kao biomase i njihov doprinos smanjenju stakleničkih plinova dobro je utvrđen. Alge mogu učinkovito pretvarati ugljikov dioksid u biomase pod utjecajem sunčevog zračenja. Alge potencijalno mogu postići veću stopu proizvodnje biomase u usporedbi sa usjevima na kopnu. Makroalge i mikroalge mogu rasti u bilo kojoj vrsti vodenog sustava koristeći fotosintezu za stvaranje biomase. One mogu biti ili heterotrofne ili autotrofne, autotrofne alge trebaju anorganske spojeve kao što je ugljikov dioksid i izvor svjetlosne energije za rast. Heterotrofne alge nisu fotosintetske i zahtijevaju vanjske hranjive tvari za rast. Makroalge koje su poznatije kao morske alge brzo su rastuće višestanične biljke koje mogu narasti i do 60 metara dužine. Na temelju njihove pigmentacije ove se biljke svrstavaju u tri široke skupine:

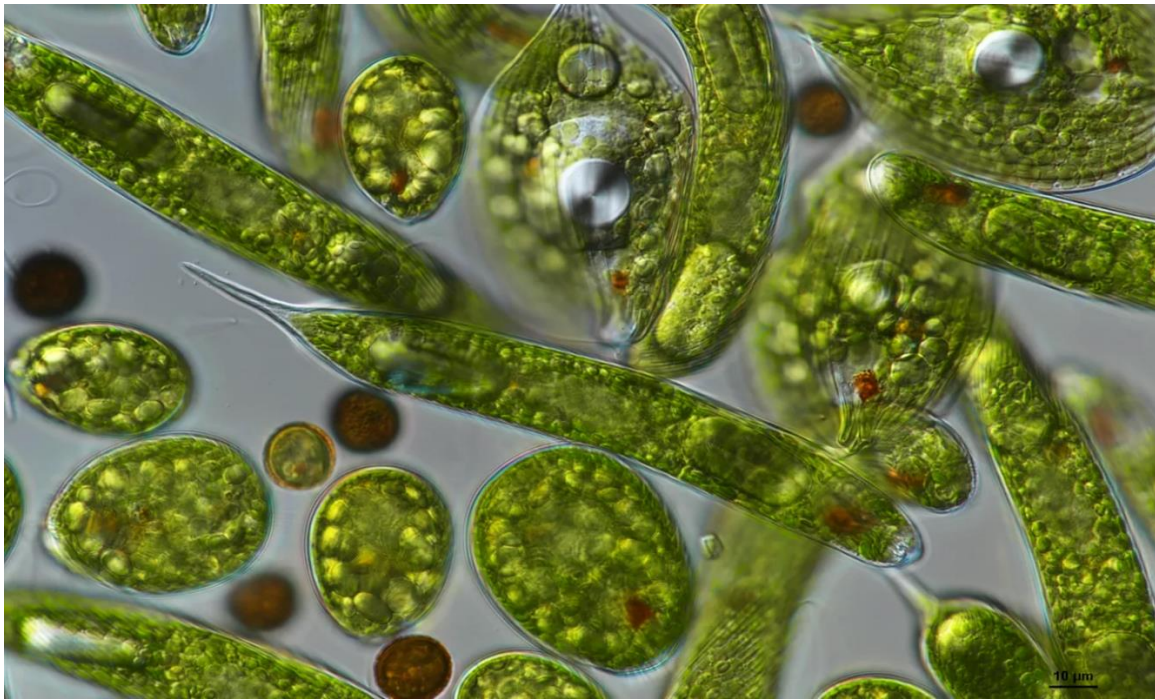
- a) smeđe morske alge (Phaeophyceae)
- b) crvene morske alge (Rhodophyceae)
- c) zelene morske alge (Chlorophyceae) [29].



**Slika 9. Crvene, smeđe i zelene alge [32]**

Uglavnom se morske alge koriste za proizvodnju hrane i ekstrakciju hidrokoloida. Mikroalge su mikroskopske talofitne biljke odnosno biljke bez lišća, stabljike i korijena, a najvažnije klase mikroalgi su:

- a) dijatomeje (Bacillariophyceae)
- b) zelene alge (Chlorophyceae)
- c) zlatne alge (Chrysophyceae) [29].



**Slika 10. Mikroalge [33]**

Dijatomeje, koje su dominantne vrste fitoplanktona, mogu biti najveća skupina proizvođača biomase na Zemlji. Zelenih algi posebno ima u slatkim vodama, a pohranjuju energiju uglavnom u obliku škroba i lipida. Zlatne alge slične su dijatomejama i proizvode ulja i ugljikohidrate. Mikroalge imaju sposobnost proizvodnje vodika, etanola i biogoriva. Njihovi metabolički putevi su usklađeni kroz složene mehanizme koji reguliraju fotosintetski učinak za sintezu proteina, nukleinskih kiselina, ugljikohidrata, lipida i vodika. One imaju i širok bioenergetski potencijal, jer se mogu koristiti za proizvodnju tekućih goriva za prijevoz, uključujući biodizel, bioetanol, goriva za grijanje i bio-mlazna goriva. Na temelju korištenja kopnene površine, mikroalge mogu proizvesti 15-300 puta više nafte za biodizel od tradicionalnih usjeva [29].

## 6. ZAKLJUČAK

Kao što je ranije rečeno, razvijaju se različite alternative korištenju konvencionalnih fosilnih goriva koja imaju vrlo negativan utjecaj na atmosferu, a posljedično i na klimu. Pristup korištenja e-goriva omogućuje smanjenje emisija stakleničkih plinova iz prometa, no zahtjeva izuzetno visoke financijske i druge resurse. Troškovi električne energije potrebne za rad elektrolizatora, same cijene postrojenja i opreme, te visoki troškovi prilagodbe ili promjene infrastrukture koje bi bile potrebne ukoliko bi se proizvodila i koristila samo e-goriva teško je i procijeniti. Jedna od glavnih prednosti upravo ove opcije je što su e-goriva u određenoj mjeri kompatibilna sa konvencionalnim gorivima te u određenim područjima neće zahtijevati prevelike promjene u postojećoj infrastrukturi vezanoj uz promet. S druge strane, visoki troškovi i postavljanje pravila i regulativa kako bi procesi proizvodnje i primjene bili regulirani i zaista doprinosili svojoj početnoj svrsi samo su neki od nedostataka e-goriva.

Potrebno je donijeti i zaključke u kojoj mjeri ova goriva doprinose smanjenju klimatskih promjena te postoje li druge opcije koje zahtijevaju korištenje manje resursa, a imaju jednak ili bolji učinak u smanjenju klimatskih promjena.

Sve navedeno zahtijeva dodatno istraživanje u ovom području.



## 7. LITERATURA

1. Sandberg, David V., Roger D. Ottmar, and Geoffrey H. Cushon. "Characterizing fuels in the 21st century." *International Journal of Wildland Fire* 10.4 (2001): 381-387.
2. [https://www.google.com/search?sca\\_esv=602360094&q=coal&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiOzLzp6oKEAxXSwQIHHeF\\_AHUQ0pQJegQICRAB&biw=1517&bih=712&dpr=0.9#imgrc=IMHzmOEVPJ8P0M](https://www.google.com/search?sca_esv=602360094&q=coal&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiOzLzp6oKEAxXSwQIHHeF_AHUQ0pQJegQICRAB&biw=1517&bih=712&dpr=0.9#imgrc=IMHzmOEVPJ8P0M) preuzeto 28.1.2024.
3. <https://www.njuskalo.hr/sve-ostalo/naftna-busotina-oglas-23433263> preuzeto 28.1.2024.
4. <https://www.energetika-net.com/plin/ina-ce-u-molvama-procicavati-madjarski-plin> preuzeto 28.1.2024.
5. Soeder, Daniel J., and Daniel J. Soeder. "Fossil fuels and climate change." *Fracking and the Environment: A scientific assessment of the environmental risks from hydraulic fracturing and fossil fuels* (2021): 155-185.
6. Ridjan, Iva, Brian Vad Mathiesen, and David Connolly. "Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review." *Journal of cleaner production* 112 (2016): 3709-3720.
7. Ruth, John C., and Gregory Stephanopoulos. "Synthetic fuels: what are they and where do they come from?." *Current Opinion in Biotechnology* 81 (2023).
8. Hänggi, Severin, et al. "A review of synthetic fuels for passenger vehicles." *Energy Reports* 5 (2019): 555-569.
9. Haarlemmer, Geert, et al. "Investment and production costs of synthetic fuels—A literature survey." *Energy* 66 (2014): 667-676.
10. <https://www.netl.doe.gov/research/carbon-management/energy-systems/gasification/gasifipedia/ftsynthesis> preuzeto 28.1.2024.
11. Ramirez, Adrian, S. Mani Sarathy, and Jorge Gascon. "CO<sub>2</sub> derived E-fuels: research trends, misconceptions, and future directions." *Trends in chemistry* 2.9 (2020): 785-795.
12. Brynolf, Selma, et al. "Electrofuels for the transport sector: A review of production costs." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018): 1887-1905.
13. [https://www.researchgate.net/figure/fig-Fig-A1-The-structures-of-some-organic-components-of-Diesel-fuel\\_fig7\\_261765046](https://www.researchgate.net/figure/fig-Fig-A1-The-structures-of-some-organic-components-of-Diesel-fuel_fig7_261765046) preuzeto 28.1.2024.

14. De Saint Jean, Myriam, et al. "Economic assessment of a power-to-substitute-natural-gas process including high-temperature steam electrolysis." *International Journal of Hydrogen Energy* 40.20 (2015): 6487-6500.
15. Kreuter, W., and H. Hofmann. "Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy." *International Journal of Hydrogen Energy* 23.8 (1998): 661-666.
16. Götz, Manuel, et al. "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review." *Renewable energy* 85 (2016): 1371-1390.
17. Kuramochi, Takeshi, et al. "Comparative assessment of CO<sub>2</sub> capture technologies for carbon-intensive industrial processes." *Progress in energy and combustion science* 38.1 (2012): 87-112.
18. Brynolf, Selma, et al. "Review of electrofuel feasibility—prospects for road, ocean, and air transport." *Progress in Energy* 4.4 (2022): 042007.
19. Holmgren, Kristina, et al. "KNOGA. Fossilfri framdrift för tunga långväga transporter på väg: Kostnadsfördelning och risker för olika aktörer." (2021).
20. Malins, Chris. "What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future." *Cerulogy Report* (2017).
21. Connolly, David, Henrik Lund, and Brian Vad Mathiesen. "Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016): 1634-1653.
22. Blanco H, Nijs W, Ruf J and Faaij A 2018 Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization *Appl. Energy* 232 617–39
23. Lester M S, Bramstoft R and Münster M 2020 Analysis on electrofuels in future energy systems: a 2050 case study *Energy* 199 117408
24. Gnann T, Funke S, Jakobsson N, Plötz P, Sprei F and Bennehag A 2018 Fast charging infrastructure for electric vehicles: today's situation and future needs *Transp. Res. D* 62 314–29
25. Vergara J, McKesson C and Walczak M 2012 Sustainable energy for the marine sector *Energy Policy* 49 333–45
26. Korberg A D, Brynolf S, Grahn M and Skov I R 2021 Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships *Renew. Sustain. Energy Rev.* 142.

27. Goldman A et al 2018 A study on electrofuels in aviation *Energies*.
28. Skov, Iva Ridjan, and Noémi Schneider. "Incentive structures for power-to-X and e-fuel pathways for transport in EU and member states." *Energy Policy* 168 (2022).
29. Mansoori, G. Ali, et al. "Fuels of the Future for Renewable Energy Sources (Ammonia, Biofuels, Hydrogen)." arXiv preprint arXiv:2102.00439 (2021).
30. [https://www.mozaweb.com/hr/Extra-3D\\_scene-Amonijak\\_NH-3976](https://www.mozaweb.com/hr/Extra-3D_scene-Amonijak_NH-3976) preuzeto 28.1.2024.
31. <https://www.medonosnobilje.com/bagrem> preuzeto 6.2.2024.
32. <https://www.flickr.com/photos/johnwturnbull/46069543761> preuzeto 28.1.2024.
33. <https://thefishsite.com/articles/researchers-hail-industry-potential-of-newly-discovered-microalgae> preuzeto 28.1.2024.