

# Moguća uloga sustava za prikupljanje i korištenje ugljikovog dioksida u svrhu zaštite okoliša

---

Čatlak, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:774488>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**MOGUĆA ULOGA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE I KORIŠTENJE  
UGLJIKOVOG DIOKSIDA U SVRHU ZAŠTITE OKOLIŠA**

Diplomski rad

Lucija Čatlak

N372

Zagreb, 2023.

MOGUĆA ULOGA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE I KORIŠTENJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA U  
SVRHU ZAŠTITE OKOLIŠA

Lucija Čatlak

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Ovaj diplomski rad daje pregled tehnologija hvatanja, skladištenja i korištenja ugljikovog dioksida. Tehnologije su poznatije pod skraćenim nazivom CCUS (engl. *Carbon Capture, Utilization and Storage*). Sukladno svim predviđanjima za dostizanje ugljične neutralnosti i nulte stope emisija, ovaj skup tehnologija ima važnu ulogu. Poseban značaj je za neke industrije koje zasad nemaju niti jednu prihvatljivu alternativu. Obzirom da je za sva ulaganja potrebno imati pozitivan omjer troškova i koristi, CCUS metode još su u procesu adaptacije i traženja adekvatne primjene uhvaćenog ugljikovog dioksida kako bi se omogućila tolika raširenost da uistinu mogu pridonijeti zaštiti okoliša i borbi s emisijama.

Ključne riječi: nulta stopa emisija, ugljikov dioksid, skladištenje, niskougljični vodik

Diplomski rad sadrži: 40 stranica, 2 tablice, 19 slika, i 43 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Nikola Vištica, docent RGNf-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Nikola Vištica, docent RGNf-a  
Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf-a  
Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf-a

POSSIBLE ROLE OF SYSTEMS FOR CARBON CAPTURING AND UTILIZATION IN TERMS OF  
ENVIRONMENTAL PROTECTION

Lucija Čatlak

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This Master's thesis gives an overview of Carbon Capture, Utilization and Storage technologies which are better known under the abbreviation CCUS. According to all predictions, a set of these technologies plays an important role in reaching carbon neutrality and net zero emissions. It is especially significant for some industries for which until now there hasn't been any acceptable alternatives. Considering that all investments demand a positive cost and benefit ratio, CCUS methods are still in the process of adaptation and search for adequate application of captured carbon dioxide in order to spread its use so that it can contribute to environmental protection and fight against emissions.

Keywords: net zero emission, carbon dioxide, storage, low carbon hydrogen

Thesis contains: 40 pages, 2 tables, 19 figures, and 43 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Associate Professor Nikola Vištica, PhD

Reviewers: Associate Professor Nikola Vištica, Ph.D.  
Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, Ph.D.  
Full Professor Domagoj Vulin, Ph.D.

## Sadržaj

<b>POPIS SLIKA</b> .....	III
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA</b> .....	IV
<b>POPIS TABLICA</b> .....	VI
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA</b> .....	VII
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. POSTOJEĆE I PLANIRANO STANJE</b> .....	3
<b>3. HVATANJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA</b> .....	6
<b>3.1. Glavne tehnologije hvatanja CO<sub>2</sub></b> .....	7
3.1.1    Kemijska apsorpcija .....	7
3.1.2    Fizikalna separacija .....	9
3.1.3    Oxy-fuel separacija.....	9
3.1.4    Membranska separacija .....	10
3.1.5    Kalcij petlja.....	10
3.1.6    Kemijska petlja.....	11
<b>4. SKLADIŠTENJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA</b> .....	12
<b>5. MOGUĆA ULOGA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE CO<sub>2</sub> U KRITIČNIM INDUSTRIJAMA</b> .....	14
<b>5.1. Pomorska industrija</b> .....	14
<b>5.2. Industrija cementa</b> .....	15
<b>5.3. Industrije željeza i čelika</b> .....	15
<b>5.4. Naftna industrija</b> .....	16
<b>6. PRIMJERI POSTROJENJA ZA HVATANJE I SKLADIŠTENJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA</b> .....	20
<b>6.1. Postrojenje Orca</b> .....	20
<b>7. KORIŠTENJE UHVAĆENOG UGLJIKOVOG DIOKSIDA S PRIMJERIMA</b> 22	
<b>7.1. Exxon Mobil Baytown postrojenje za proizvodnju vodika</b> .....	25
<b>7.2. Dimensional Energy i umjetna fotosinteza</b> .....	25
<b>7.3. Novonutrients</b> .....	26
<b>7.4. CCm Technologies</b> .....	26
<b>7.5. Blue Planet</b> .....	27
<b>7.6. Clean O<sub>2</sub></b> .....	27
<b>7.7. Newlight Technologies</b> .....	28
<b>7.8. Carbon Recycling International</b> .....	28

<b>8. CCUS U HRVATSKOJ .....</b>	<b>30</b>
<b>8.1. Hibridna termoelektrana Slavonski Brod .....</b>	<b>30</b>
<b>8.2. Cementara Koromačno – projekt KodeCO .....</b>	<b>32</b>
<b>8.3. Cementara NEXE – projekt CO<sub>2</sub>NTESSA.....</b>	<b>34</b>
<b>9. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>36</b>
<b>10. LITERATURA .....</b>	<b>37</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Previđeni udio CCUS tehnologije za Scenarij održivog razvoja .....	4
Slika 2-2. Postojeći i predviđeni kapacitet hvatanja po regijama.....	4
Slika 2-3. Kapacitet hvatanja po sektorima .....	5
Slika 2-4. Kapacitet hvatanja po statusu funkcionira postrojenja .....	5
Slika 3-1. Prikaz kemijske apsorpcije.....	8
Slika 3-2. Prikaz Oxy-fuel separacije .....	9
Slika 3-3. Prikaz membranske separacije .....	10
Slika 3-4. Prikaz kalcij petlje.....	10
Slika 3-5. Prikaz kemijske petlje .....	11
Slika 5-1. Konceptualna shema CO <sub>2</sub> -EOR.....	17
Slika 5-2. Sustavi za praćenje emisija CO <sub>2</sub> u metodi CO <sub>2</sub> -EOR kroz cijeli životni vijek...	18
Slika 6-1. Jedinica za hvatanje ugljikovog dioksida na postrojenju Orca.....	20
Slika 6-2. Utiskivanje CO <sub>2</sub> na Carbfix postrojenju .....	21
Slika 8-1. Planirani izgled dovršenog postrojenja hibridne termoelektrane SB.....	30
Slika 8-2. Prikaz koncepta rada recirkulirajuće plinske turbine.....	31
Slika 8-3. Mjesečna prosječna cijena električne energije na hrvatskom tržištu .....	31
Slika 8-4. Hibridna termoelektrana u brojkama .....	32
Slika 8-5. Projekti tvrtke Holcim diljem svijeta.....	33
Slika 8-6. CO <sub>2</sub> NTESSA.....	35

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

- ABS – Američki institut za brodarstvo (engl.*American Bureau of Shipping*)
- BECCS – bioenergija s hvatanjem i skladištenjem ugljikovog dioksida (engl.*Bioenergy Carbon Capture and Storage*)
- CaO – kalcijev oksid
- CaCO<sub>3</sub> – kalcijev karbonat
- CCUS – hvatanje, korištenje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl.*Carbon Capture, Utilization and Storage*)
- CCS – hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Storage*)
- CH<sub>4</sub> – metan
- CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid
- CRI – (engl.*Carbon Recycling International*)
- DAC – izravno hvatanje izraka (engl.*Direct Air Capture*)
- DE – Dimensional Energy
- EU – Europska Unija
- EUR – euro
- H<sub>2</sub> – vodik
- H<sub>2</sub>O – voda
- ICCT – Međunarodno vijeće o čistom tranportu (engl.*International Council on Clean Transportation*)
- IEA – Međunarodna agencija za energiju (engl.*International Energy Agency*)
- IMO – Međunarodna pomorska organizacija (engl.*International Maritime Organization*)
- IPCC – Međunarodni panel o klimatskim promjenama (International Panel on Climate Change)
- K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – kalijev karbonat
- MEA – monoetanolamin
- MeO<sub>x/y</sub> – metalni oksidi
- MEPC – Udruženje za zaštitu morskog okoliša (engl.*Marine Environment Protection Comitee*)



Mlrd. – milijarda

N<sub>2</sub> – dušik

NO<sub>2</sub> – dušikov dioksid

NO<sub>x</sub> - dušikovi oksidi

O<sub>2</sub> – kisik

PHB – polihidroksibutirat

SB – Slavonski Brod

SO<sub>2</sub> - sumporov dioksid

SO<sub>x</sub> – sumporovi oksidi

UNFCCC – Okvirna konvencija Ujedinjenih Naroda o promjeni klime (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*)

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2-1. CCUS s obzirom na Scenarij održivog razvoja .....	3
Tablica 5-1. Prednosti i mane različitih metoda hvatanja CO <sub>2</sub> u industriji željeza i čelika	16

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

°C – stupnjeva Celzijusa

t – tona

Mt – milijun tona

ppm – (engl. *parts per million*)

m<sup>2</sup> – kvadratni metar

kg – kilogram

TWh – teravat sati

MW – megavat

Q - toplina

## 1. UVOD

Klimatske promjene koje su nastale isključivo zbog ljudskog faktora uključuju sve češće i intenzivnije ekstremne događaje. Utjecaji, gubici i šteta vidljivi su na životima ljudi i prirodi diljem Zemlje. Ti utjecaji i rizici postaju sve kompleksniji i teži za upravljanje. Svijet, a poglavito Europa, posljednjih godina ulaže velike napore kako bi se taj negativni utjecaj smanjio. Važnu ulogu u borbi s emisijama ima Pariški sporazum kojim su se države članice obvezale na izradu vlastitih planova djelovanja s adekvatnim mjerama i politikama za zaustavljanje globalnog zatopljenja. Tim sporazumom nastoji se ograničiti povećanje prosječne svjetske temperature ispod 2°C iznad preindustrijskih razina, a potiče se i limitiranje na 1,5°C. Pariški sporazum donesen je 2015. godine na sastanku stranaka Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change* [UNFCCC] ) (Međunarodni panel o klimatskim promjenama, engl. *International Panel on Climate Change* [IPCC], 2018). Predmet ovog diplomskog rada je analiza raspoloživih načina uklanjanja ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) iz atmosfere kao jednog od najznačajnijih stakleničkih plinova.

Hvatanje, korištenje i skladištenje CO<sub>2</sub> moglo bi biti od velike važnosti za postizanje klimatske neutralnosti kojoj Europska unija teži. Postizanje klimatskih ciljeva bez metoda uklanjanja CO<sub>2</sub> bit će gotovo nemoguće. EU je u svojim planovima navela cilj nultih (engl. *net-zero*) emisija stakleničkih plinova do 2050. To znači da bi se do 2050. količina emitiranih stakleničkih plinova trebala izjednačiti s količinom emisija koje se uklanjaju iz atmosfere. Hrvatska se kao članica Europske Unije također obvezala na doprinos smanjenju klimatskih promjena. Svijet se nalazi u trenutku kada ogromne količine stakleničkog plina već postoje u atmosferi i potrebna je tehnologija koja će ukloniti postojeći ispušteni plin. Prema Međunarodnoj agenciji za energiju (engl. *International Energy Agency*, [IEA] ), da bi se postigli klimatski ciljevi, oko 4·10<sup>9</sup> t CO<sub>2</sub> godišnje mora biti uhvaćeno i uskladišteno do 2040. godine. Masa godišnje uhvaćenog ugljikovog dioksida koristeći metode hvatanja CO<sub>2</sub> trebala bi porasti s 40 Mt u 2020. godini na 5,6 Gt u 2050. prema Scenariju održivog razvoja (International Energy Agency [IEA], 2016). Koristan alat pritom su sustavi za prikupljanje i korištenje ugljikovog dioksida. Velik spektar industrija i kompanija iz različitih sektora investira u tehnologije hvatanja, skladištenja i korištenja ugljikovog dioksida (engl. *Carbon capture, utilization and storage*, CCUS), a s ciljem zadovoljavanja zakonskih zahtjeva za dekarbonizacijom. EU

također nastoji diverzificirati svoje energetske izvore te samim time smanjiti ovisnost o uvozu fosilnih goriva. Velike izazove u procesu dekarbonizacije predstavlja pomorski i zračni promet, kao i industrija cementa i željeza. Jedni od najvećih ulagača u projekte hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida su naftne i plinske kompanije, jer su upravo ti projekti od ključne važnosti za opstanak te industrije. Razlog zašto tehnologije hvatanja, korištenja i skladištenja ugljika nisu u dovoljnoj mjeri zaživjele jest u ekonomici. Implementacija sustava za hvatanje je skup proces koji bez daljnje primjene ili prodaje produkata nema pozitivan ekonomski učinak za kompanije. EU je svojim članicama omogućila sustav trgovanja ugljikom kako bi vlade država dobile dodatni poticaj za smanjenje emisija. To je tržišni sustav kojim se nastoji povećati ekonomska korist pri hvatanju CO<sub>2</sub>. U posljednje vrijeme su kompanije u različitim industrijama pronašle različite načine da na adekvatan i financijski zadovoljavajući način uspiju uključiti CCS sustave na svoja postrojenja. Dosad se većina prihoda, koristeći ove sustave, odnosila na prodaju uhvaćenog ugljikovog dioksida naftnim kompanijama koje su to iskorištavale za projekte povećanja iscrpka nafte (engl. *Enhanced oil recovery*, EOR). CCUS postrojenja u nekim industrijama postoje već desetljećima, ali su još uvijek u ranom stadiju razvoja za one grane koje najviše i trebaju te metode. Dosad je primjena najveća bila u procesima obrade prirodnog plina i proizvodnji gnojiva, gdje su troškovi relativno niski. U problematičnim industrijama poput proizvodnje čelika i cementa zasad nema alternativa tehnologijama hvatanja ugljikovog dioksida, a njihova primjena se u tim granama odvija relativno sporo.

## 2. POSTOJEĆE I PLANIRANO STANJE

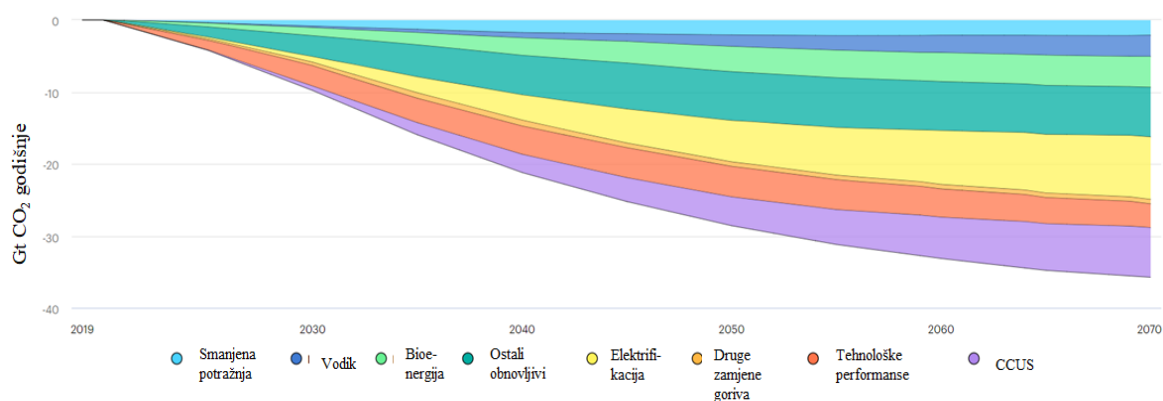
Brže dostizanje klimatskih ciljeva ujedno znači i veću potrebu za CCUS tehnologijama. U Tablici 2-1. je dan prikaz količine uhvaćenog ugljikovog dioksida po godinama iz različitih sektora te doprinos redukciji emisija iz perspektive Scenarija održivog razvoja (IEA, 2020). EU za cilj ima postići klimatsku neutralnost do 2050. godine, a to označava ekonomiju s nultom stopom emisija stakleničkih plinova. Taj cilj je i središnji dio Europskog Zelenog plana i u skladu je s obvezivanjem u sklopu Pariškog sporazuma.

Tablica 2-1. CCUS s obzirom na Scenarij održivog razvoja (IEA, 2020)

Godina	2030	2050	2070	KUMULATIVNO
<b>KOLIČINA UHVAĆENOG CO<sub>2</sub> (Mt)</b>	840	5635	10409	240255
OD UGLJENA	320	1709	2145	64399
OD NAFTE	21	141	230	5301
OD PRIRODNOG PLINA	96	1733	3209	72948
OD BIOMASE	81	955	3010	52257
OD INDUSTRIJSKIH PROCESA	312	979	1073	36562
DAC	11	117	741	8788
USKLADIŠTENO	650	5266	9533	220845
ISKORIŠTENO	180	369	877	19409
<b>KOLIČINA UHVACENOG CO<sub>2</sub> PO SEKTORIMA (Mt)</b>				
INDUSTRIJA	453	2038	2724	77092
ŽELJEZO I ČELIK	16	394	723	15772
KEMIJSKA INDUSTRIJA	178	461	571	18363
CEMENT	258	1174	1411	42614
KAŠA I PAPIR	0	8	18	343
PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	223	1877	4050	87529
OD UGLJENA	201	895	1031	34378
OD PRIRODNOG PLINA	21	605	1175	26942
OD BIOMASE	0	377	1844	26209
OSTALE TRANSFORMACIJE GORIVA	153	1603	2895	66846
<b>KOLIČINA UKLONJENOG CO<sub>2</sub> (Mt)</b>				
BIOENERGIJA SA SKLADISTENJEM CO <sub>2</sub> (BECCS)	75	802	2649	45000
DAC SA SKLADIŠTENJEM CO <sub>2</sub> (DACs)	1	19	271	2139
<b>DOPRINOS CCUS-A REDUKCIJI EMISIJA U POJEDINIM SEKTORIMA (%)</b>				
ŽELJEZO I ČELIK	4	25	31	25
CEMENT	47	63	61	61
KEMIJSKA INDUSTRIJA	10	31	33	28

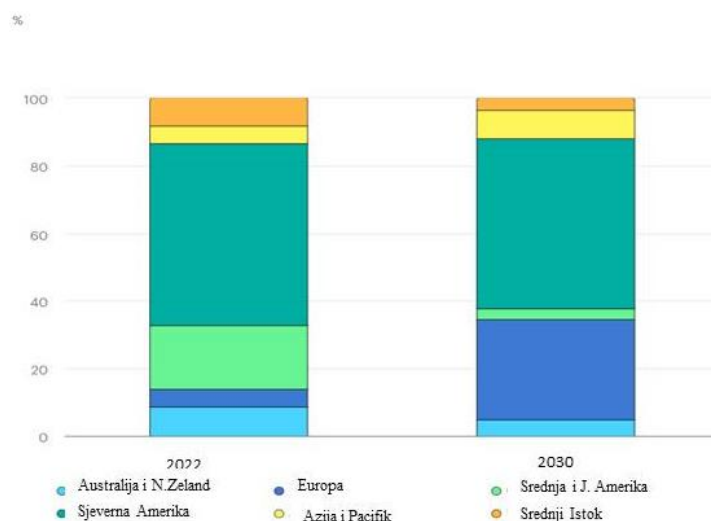
U narednim slikama prikazano je predviđeno potencijalno korištenje CCUS tehnologija u narednim godinama u svrhu dostizanja klimatskih ciljeva za pojedine regije i sektore djelatnosti.

U narednom grafu (Slika 2-1.) prikazan je predviđeni udio CCUS tehnologije za Scenarij održivog razvoja.



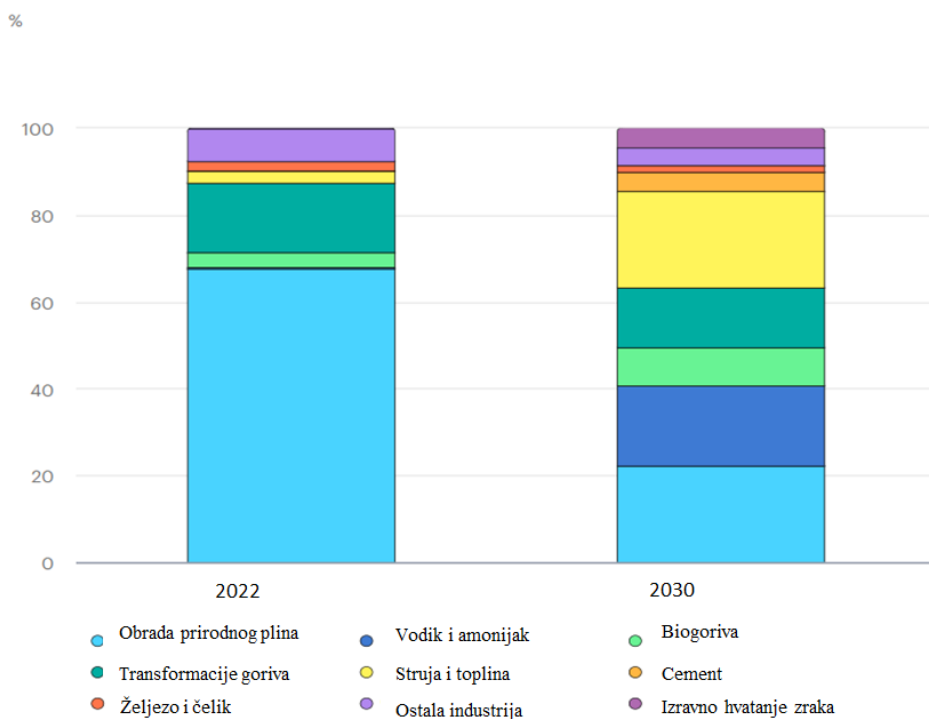
Slika 2-1. Previđeni udio CCUS tehnologije za Scenarij održivog razvoja (IEA, 2022)

U narednim dijagramima prikazano je trenutno stanje u svijetu s obzirom na postojeća i planirana postrojenja za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida. Prvi stupac na Slici 2-2. prikazuje kapacitet hvatanja koji je već u funkciji, a drugi prikazuje planirani, prikazano po regijama.



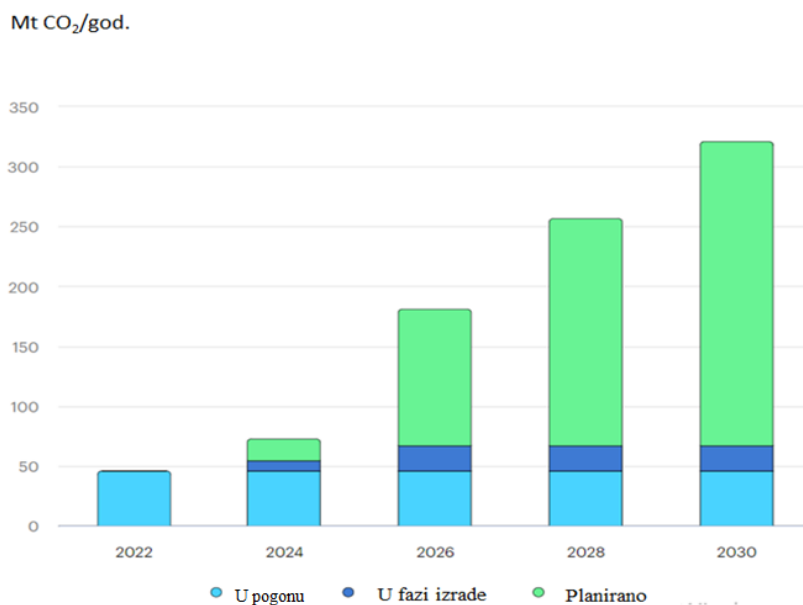
Slika 2-2. Postojeći i predviđeni kapacitet hvatanja po regijama (IEA, 2022)

Naredni dijagram (Slika 2-3.) prikazuje kapacitet hvatanja u funkciji i planirani po različitim sektorima.



Slika 2-3. Kapacitet hvatanja po sektorima (IEA, 2022)

U narednom dijagramu (Slika 2-4.) su prikazani kapaciteti hvatanja po statusu funkcioniranja.



Slika 2-4. Kapacitet hvatanja po statusu funkcionira postrojenja (IEA, 2022)

U nastavku diplomskog rada bit će obrađeni višestruki načini skupljanja i zarobljavanja ugljikovog dioksida kao i mogućnosti iskorištavanja izdvojenog plina.



### 3. HVATANJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Ugljikov dioksid može se hvatati primjenom tehnologija kojima se CO<sub>2</sub> uklanja prije, za vrijeme (korištenjem čistog kisika u oxy-fuel metodi) i poslije procesa izgaranja. Postoje dva načina hvatanja ugljikovog dioksida. To su direktno hvatanje CO<sub>2</sub> iz zraka (engl. *Direct air capture*, DAC) ili hvatanje ugljikovog dioksida na velikim izvorima sa skladištenjem ili upotrebom (CCS/CCUS).

Danas se najviše koristi metoda hvatanja ugljikovog dioksida s upotrebom kemikalije koja može uhvatiti CO<sub>2</sub> blizu samog toka plina na izvoru. Uhvaćeni CO<sub>2</sub> se potom otpušta i tlači kako bi se mogao transportirati plinovodima. Kemikalija koja se koristi u tim procesima može biti iznova korištena više puta (primjerice monoetanolamin, MEA). Izravno hvatanje se najviše koristi u proizvodnji cementa. Indirektno se grije vapnenac koristeći poseban kalciner. Tehnologija izravno izdvaja CO<sub>2</sub> bez miješanja s drugim plinovima izgaranja čime se smanjuju troškovi separacije. Tehnologije izravnog hvatanja uklanjaju CO<sub>2</sub> iz atmosfere čak i ako je taj plin izdvojen prije više godina. DAC i CCS mogu koristiti iste kemikalije, ali neke su prikladnije jednoj ili drugoj metodi. Oprema na postrojenjima mora biti optimizirana za različite koncentracije CO<sub>2</sub> koje su uključene u te dvije tehnologije. Nakon hvatanja, daljnji postupci su jako slični u oba slučaja te se za komprimiranje, transport i skladištenje može koristiti identična oprema (Jones et al., 2022).

Hvatanjem ugljikovog dioksida poslije izgaranja dobiva se produkt koji je potrebno dalje obraditi. Zahtijeva se sušenje, čišćenje i komprimiranje prije transporta. To je najstarija tehnologija, ali niski parcijalni tlak CO<sub>2</sub> u ispušnom plinu je veliki nedostatak ovog načina. Ukoliko se CO<sub>2</sub> hvata prije samog izgaranja goriva to uključuje pretvorbu goriva u sintetički plin sastavljen uglavnom od vodika i ugljikovog dioksida. CO<sub>2</sub> se hvata prije izgaranja, a vodik je gorivo koje kada izgara otpušta vodenu paru. Treća opcija je izgaranje goriva uz pomoć korištenja čistog kisika umjesto mješavine zraka. Kao rezultat se dobiva tok čistog CO<sub>2</sub> i povećana energetska učinkovitost u usporedbi s drugim dvjema tehnologijama. U ovom procesu nema otpuštanja dušikovih oksida, a posljedično ni potrebe za odvajanjem ugljikovog dioksida i dušika. Nedostaci metode su velike potrebe za kisikom i visoke temperature u ćeliji za izgaranje (American Bureau of Shipping [ABS], 2022).

Hvatanje i trajno skladištenje ugljikovog dioksida dobivenog iz biomase (engl. *Bioenergy with carbon capture and storage*, BECCS) za dobivanje energije ili proizvodnju materijala jedna je od klimatski najpogodnijih opcija. To je ujedno i najstarija tehnologija hvatanja ugljika koju sačinjavaju proizvodnja bioenergije i hvatanja ugljika koje su odvojeno dokazane na komercijalnoj razini odavno. Ukoliko se biomasa uzgaja održivo, a potom se obrađuje u gorivo koje potom izgara, tada se ta tehnologija može poimati ugljično neutralnom. Ako se pak dio ili cijeli ugljikov dioksid, koji nastaje izgaranjem u procesu, hvata i trajno skladišti, tada se radi o ugljično negativnoj tehnologiji.

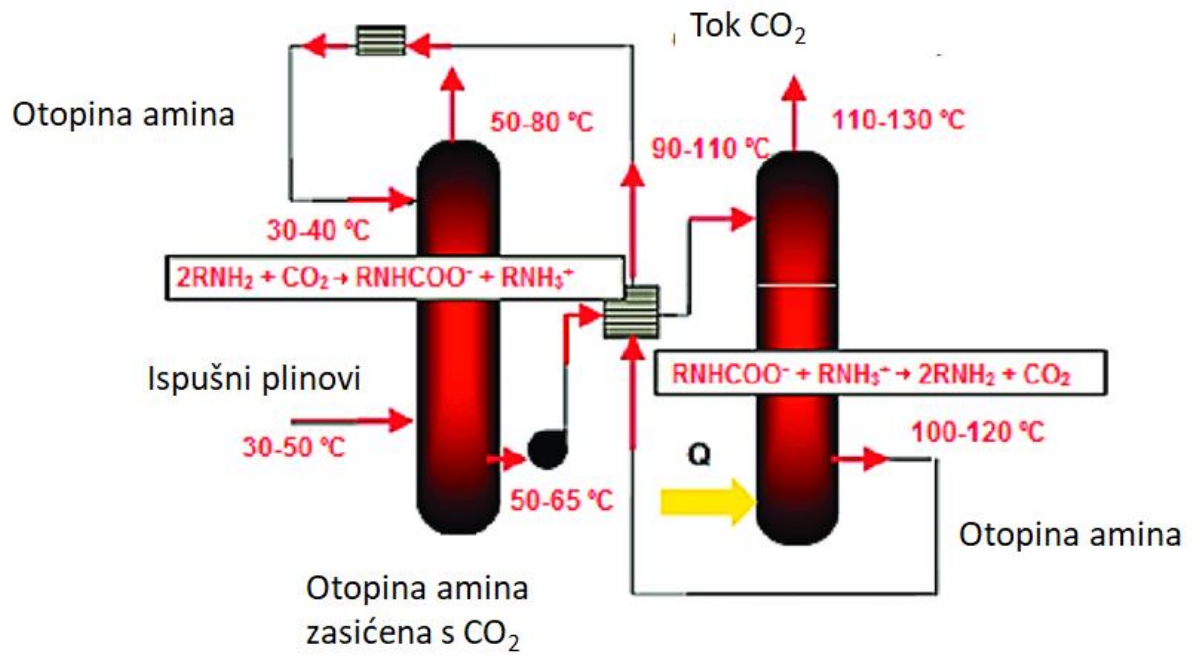
### **3.1. Glavne tehnologije hvatanja CO<sub>2</sub>**

#### **3.1.1 Kemijska apsorpcija**

Kemijska apsorpcija je danas najrasprostranjenija metoda. Radi se o tehnologiji hvatanja nakon procesa izgaranja. Kemijska apsorpcija se temelji na kemijskoj reakciji između ugljikovog dioksida i otapala. Obično se koriste dva stupca. U jednom se odvija apsorpcija, a drugi je na većoj temperaturi kako bi se izdvajao čisti ugljikov dioksid i regeneriralo otapalo. Korištenjem otapala na bazi amina ostvaruje se najbolja separacija.

Prije same apsorpcije, drugi kiseli plinovi poput SO<sub>2</sub> i NO<sub>2</sub> se moraju ukloniti da bi se spriječilo formiranje stabilnih soli s otapalom kao što je monoetanoalmin (MEA). Sumporovi oksidi se obično izdvajaju u posebnoj jedinici za desulfurizaciju, a dušikovi oksidi se uklanjaju selektivnom katalitičkom ili nekatalitičkom redukcijom. Neke sitne čestice, poput pepela, se izdvajaju elektrostatičkim precipitatorima ili prikladnim filterima kako ne bi dolazilo do nastanka pjene u stupcima što ima utjecaj na uspješnost sustava. Zahtijevana je i razina kisika ispod 1 ppm (Wang et al., 2011).

Na Slici 3-1. je prikazan primjer jedne jedinice za vršenje kemijske apsorpcije koristeći amine.



Slika 3-1. Prikaz kemijske apsorpcije (Pereira Santos i Gomes, 2016)

### 3.1.2 Fizikalna separacija

Fiziikalna separacija se najviše koristi u tehnologijama obrade prirodnog plina, a provodi se na više načina. To su:

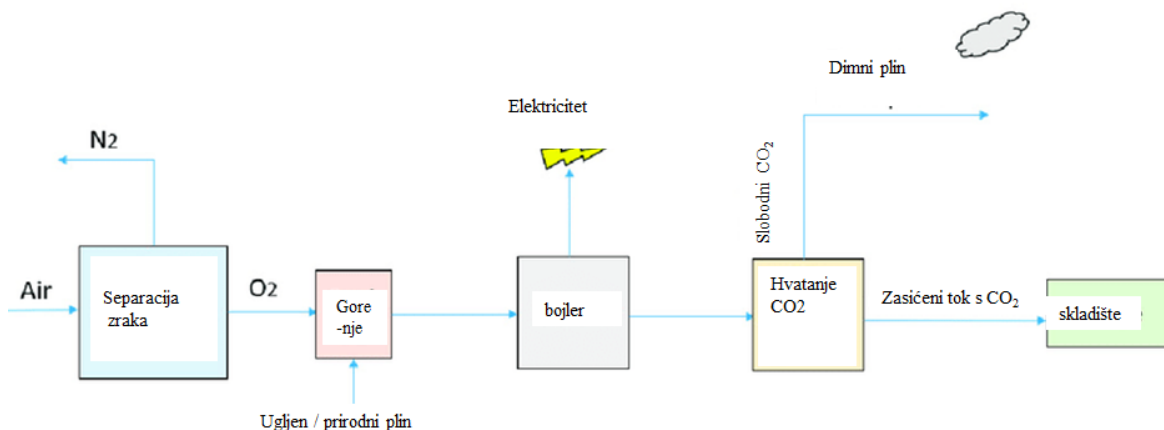
- adsorpcija (koristi se čvrsta površina poput aktivnog ugljena, aluminijskih oksida ili zeolita)
- fizikalna apsorpcija (koriste se tekuća otapala kao što su Selexol ili Rectisol)
- kriogeno odvajanje
- dehidracija i komprimiranje.

Kod metoda adsorpcije i fizikalne apsorpcije nakon što se CO<sub>2</sub> uhvati, odvaja se od adsorbensa ili apsorbensa povećavanjem tlaka ili temperature (IEA, 2020).

### 3.1.3 Oxy-fuel separacija

Oxy-fuel separacija uključuje izgaranje goriva koristeći čisti kisik (Slika 3-2). Budući da se takav ispušni plin sastoji gotovo isključivo od ugljikovog dioksida i vodene pare, lako se može dobiti čisti tok ugljikovog dioksida pomoću dehidracije. Kisik se proizvodi uglavnom putem niskotemperaturne separacije zraka koja je energetski visokog intenziteta zbog čega je ova metoda skupa.

Redukcija NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> emisija je dodatni benefit ove tehnologije. Obzirom da se koristi običan kisik i reciklirani dimni plin umjesto zraka, gotovo da i ne dolazi do formiranja NO<sub>x</sub>. NO<sub>x</sub> se reducira u procesu oxy-fuel izgaranja jer N-pare koje se sastoje od cijanida i amonijaka nastaju ponovnim gorenjem prisutnih NO<sub>x</sub> u recikliranom plinu (Yadav et al., 2022).

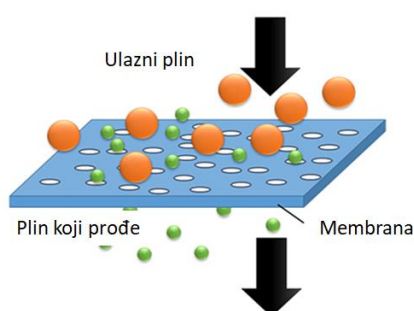


Slika 3-2. Prikaz Oxy-fuel separacije (Elhenawy et al., 2020)

### 3.1.4 Membranska separacija

Membranska separacija se temelji na polimernim ili anorganskim membranama s visokom selektivnošću za  $\text{CO}_2$  koje propuštaju  $\text{CO}_2$ , a ujedno predstavljaju barijeru drugim plinovima. Selektivnost membrane za rezultat ima separaciju plinske mješavine na željen način (Slika 3-3). Primjena membrana u hvatanju ugljikovog dioksida obično uključuje:

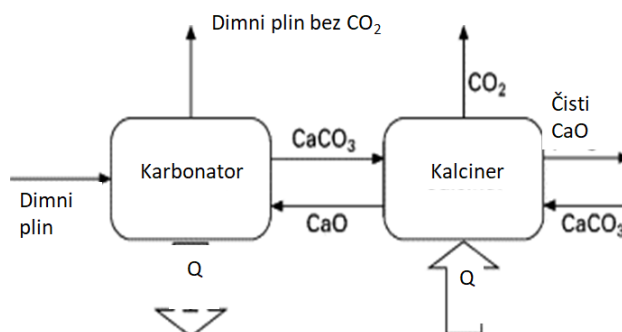
1. Separaciju  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  za tehnologije hvatanja prije izgaranja
2. Separaciju  $\text{CO}_2/\text{NO}_2$  za tehnologije hvatanja poslije izgaranja
3. Separaciju  $\text{O}_2/\text{N}_2$  za tehnologije Oxy-fuel (Guozhao et al., 2017).



Slika 3-3. Prikaz membranske separacije (Guozhao et al., 2017)

### 3.1.5 Kalcij petlja

Kalcij petlja je tehnologija koja uključuje hvatanje ugljikovog dioksida na visokoj temperaturi koristeći dva reaktora. U prvom reaktoru se koristi kalcijev oksid da bi se uhvatio  $\text{CO}_2$  iz plinskog toka te kako bi se formirali kalcijevi karbonati ( $\text{CaCO}_3$ ). Karbonati se prenose u drugi reaktor gdje se vrši regeneracija koja rezultira nastankom kalcijeva oksida i čistog toka  $\text{CO}_2$ . Kalcijev oksid se nakon toga vraća u prvi reaktor (Slika 3-4).

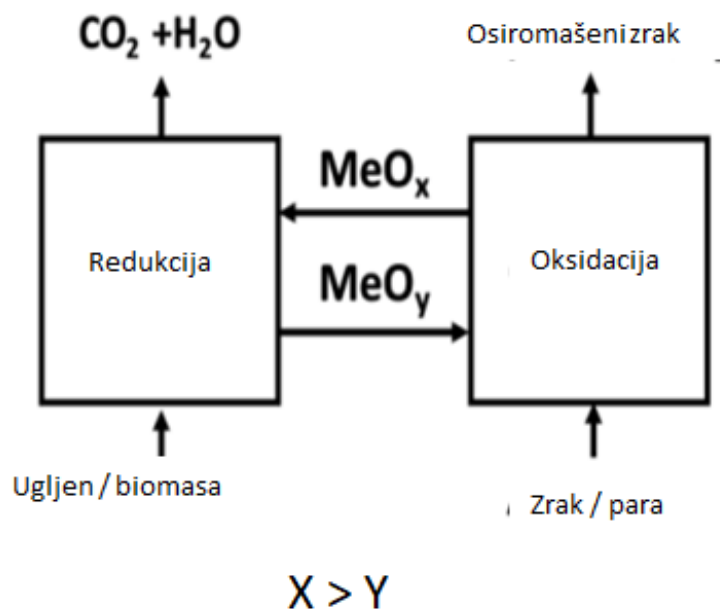


Slika 3-4. Prikaz kalcij petlje (Abanades, 2013)

Reverzibilna reakcija između CaO i CO<sub>2</sub> je izrazito obećavajuća metoda uklanjanja ugljikovog dioksida, poglavito iz ispušnih plinova na elektranama. Tehnologija je privukla puno pažnje u posljednje vrijeme zbog brojnih prednosti. Neke od njih su visoka učinkovitost, odlična mogućnost za integraciju s tvornicama cementa (potencijalno dekarboniziranje industrije cementa i industrije električne energije) te jeftini sorbens korišten u zahvatu (smrvljeni vapnenac) (Blamey et al., 2009).

### 3.1.6 Kemijska petlja

Ova metoda spada u tehnologije hvatanja ugljikovog dioksida prije izgaranja ili se svrstava u posebnu, četvrtu kategoriju. U kemijskoj petlji se također koriste dva reaktora kao i kod kalcij petlje. U prvom reaktoru se koriste male čestice metala (npr. željezo ili mangan) kako bi kisik iz zraka formirao metalne okside. Metalni oksidi se potom prenose do drugog reaktora gdje reagiraju s gorivom proizvodeći energiju i zasićeni tok ugljikovog dioksida uz regeneriranje reduciranog metala. Metal se vraća nazad u prvi reaktor kao što je vidljivo na Slici 3-5. (Najera et al., 2011).



Slika 3-5. Prikaz kemijske petlje (Strohle et al., 2014)

#### 4. SKLADIŠTENJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Skladištenje ugljikovog dioksida jest zapravo proces utiskivanja uhvaćenog ugljikovog dioksida u duboke podzemne geološke naslage koje su adekvatnog sastava za takve radnje. Glavno svojstvo tih naslaga je zarobljavanje plina i onemogućavanje migracije zarobljenog plina prema površini. Takve su geološke formacije slanah akvifera ili iscrpljena ležišta nafte i plina. CO<sub>2</sub> utisnut u stijensku masu putuje kroz nju i ispunjava porni prostor. Ugljikov dioksid se u većini slučajeva prvo stlačuje kako bi mu se povećala gustoća dovodeći ga do tekućeg stanja. Ukupni skladišni kapacitet za CO<sub>2</sub> u svijetu je teško preciznije odrediti no potencijalno je jako velik. Neka predviđanja navode iznos i do 55 000 Gt skladišnog kapaciteta (IEA, 2021).

Velika se polemika vodi oko mogućnosti da podzemni uskladišteni CO<sub>2</sub> može opet iscuriti na površinu no desetljeća iskustva pokazuju drugačije. Kako bi se sve provelo na siguran način nužno je i dalje pratiti ponašanje ugljikovog dioksida tijekom vremena, provoditi adekvatan monitoring i mjere. Iako je curenje u dubokim geološkim formacijama gotovo nemeoguće, ipak se u 1% skladišta u razdoblju od 1000 godina funkcioniranja dogodi takva pojava. Kod naftnih i plinskih ležišta to se događa malo učestalije. Na oko 7,5% bušotina dođe do curenja unutar 1000 godina što dovodi do zaključka da je monitoring gotovo najbitnija stavka kako bi skladištenje ugljikovog dioksida bilo kvalitetno i s isključivo pozitivnim utjecajem na zaštitu okoliša (International Council on Clean Transportation [ICCT], 2020).

Procjena rizika je prvi korak u strategiji menadžmenta i mjerama konrole kako bi se smanjili rizici za ovu djelatnost. Osim već spomenutog mogućeg curenja, postoje i druge opasnosti tj. rizici prilikom rukovanja uhvaćenim CO<sub>2</sub>, a to obuhvaća postupke transporta i utiskivanja prije samog skladištenja.

Rizik skladištenja CO<sub>2</sub> u geološke rezerve može se podijeliti u pet kategorija:

- Curenje CO<sub>2</sub> – migracija CO<sub>2</sub> u druge formacije odakle može otići u konačnici i u atmosferu
- Curenje CH<sub>4</sub> – utiskivanje CO<sub>2</sub> može uzrokovati da metan prisutan u stijeni migrira u okolne formacije i potencijalno u atmosferu
- Seizmičnost – nastajaje jako malih podrhtavanja uslijed procesa utiskivanja CO<sub>2</sub>

- Kretanje tla – slijeganje ili izdizanje površine tla kao posljedica promjene tlaka potaknute utiskivanjem CO<sub>2</sub>
- Razmještanje slane otopine – tok slane otopine u druge formacije (moguće i u slatke vode) zbog utiskivanja CO<sub>2</sub> u otvorene akvifere.

Potencijal curenja ovisi o krovnoj stijeni i mehanizmu zarobljavanja (Damen et al., 2006). Dok se dio uhvaćenog CO<sub>2</sub> može skladištiti u određene proizvode, geološko skladištenje će neminovno biti potrebno kako bi se dostiglo uklanjanje ugljikovog dioksida dovoljno velikog razmjera da bi pomoglo u zaštiti okoliša. Skladištenje ugljikovog dioksida se često poima kao jedno od glavnih sredstava pri proizvodnji negativnih emisija u drugoj polovici stoljeća kako bi se izbalansirale dosad ispuštene emisije. To obilježje mnogih klimatskih scenarija se ne bi trebalo poimati kao alternativa smanjenju emisija danas ili kao razlog za odgađanje djelovanja. To je samo jedna od tehnologija koje zajedno trebaju djelovati kako bi se dostigli zadani ciljevi u što kraćem vremenu.



## 5. MOGUĆA ULOGA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE CO<sub>2</sub> U KRITIČNIM INDUSTRIJAMA

Energetski intenzivne industrije su u posljednje vrijeme znatno smanjile emisije ugljika povećavajući efikasnost svojih postrojenja. Problem predstavljaju industrije proizvodnje cementa, željeza i čelika te naftna i plinska industrija koje neizbježno proizvode emisije. U Europi je cementna industrija odgovorna za 3-4%, a industrija željeza i čelika za 4-7% ukupnih emisija CO<sub>2</sub>. Jedino prihvatljivo rješenje za ove teške industrije predstavlja tehnologija hvatanja CO<sub>2</sub> (Fortes et al., 2014).

### 5.1. Pomorska industrija

Izuzev onda kada brod ili odobalno postrojenje ne izgara goriva bez ugljičnog sadržaja kao što su amonijak ili vodik, druga goriva (koja su u većini) bazirana na ugljiku poput ukapljenog prirodnog plina, ukapljenog naftnog plina, metanola, biodizela, obnovljenog dizela ili dimetila proizvodit će CO<sub>2</sub> kao nusprodukt u procesu izgaranja. Potreba za marinskim prometom je naglo rasla proteklih desetljeća što je rezultiralo proporcionalnim porastom emisija CO<sub>2</sub>. Strategija Međunarodne pomorske organizacije (engl. *International Maritime Organization*, IMO) za stakleničke plinove je prihvaćena u travnju 2018. Ona se sastoji od liste kratkoročnih, srednjeročnih i dugoročnih mjera. Zadani cilj je smanjivanje emisija CO<sub>2</sub> za najmanje 40% do 2030. te smanjivanje ukupnih emisija stakleničkih plinova za 50% do 2050. u usporedbi s razinama iz 2008. Tijekom 77. Sjednice Odbora za zaštitu morskog okoliša (engl. *Marine Environment Protection*, MEPC), koja se održala u studenom 2021., predloženo je da se klimatski ciljevi Međunarodne pomorske organizacije povećaju u cilju dostizanja nulte stope ukupnih emisija stakleničkih plinova do 2050., umjesto prvotno određenih 50%. Prijedlog nije usvojen no dogovoreno je unaprjeđenje inicijalne strategije (ABS, 2022). Pomorska industrija je svakako pod rastućim pritiskom kako bi se prilagodila ciljevima Međunarodne pomorske organizacije (IMO) za smanjivanje emisija stakleničkih plinova. Jedna od izglednih opcija je hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida. Taj koncept bi omogućio dekarbonizaciju brodova uz zadržavanje istog motora i pogonskog goriva. Izazov u marinskom okolišu je rukovanje i skladištenje uhvaćenog ugljikovog dioksida. Proces zahtijeva velike količine energije za ukapljivanje ili solidifikaciju da bi ga bilo moguće skladištiti. Skladištenje u plinovitom stanju nije opcija zbog prostornih ograničenja. Oprema za hvatanje ugljikovog dioksida koja se koristi na kopnu nije pogodna za brodove. Integracija ove tehnologije uključuje

dodatne kapitalne i operativne troškove i potrebno je ustanoviti čist vrijednosni lanac koji će omogućiti ekonomsku izvedivost i isplativost ovakvih projekata. Nekoliko pilot projekata je testirano i rezultati su obećavajući. Kroz više studija i projekata ustvrđeno je da su ovakve tehnologije izvedive i s pozitivnim rezultatima. U studijama se najčešće uzimala opcija kemijske apsorpcije s aminima i toplinskim striperima za hvatanje plina. Na većini se obavljalo ukapljivanje CO<sub>2</sub> na licu mjesta. Uhvaćeni plin potom se privremeno skladištio u prikladnim spremnicima te se dalje otpremao na iskrcaj u za to predviđenim mjestima (Mackenzie, 2022). Biranje pravog puta za dekarbonizaciju brodova je iznimno kompleksno no neminovno je to kombinacija tehnologije hvatanja ugljika i korištenja niskougljičnog goriva.

## **5.2. Industrija cementa**

Beton je najrasporostranjeniji materijal na Zemlji koji je čovjek proizveo. Uobičajena vezivna tvar u betonu jest Portland cement. Cement čini 10-15% ukupne mase materijala, ali je zaslužan za 80-90% emisija. Intenzitet emisija i raširenost korištenja čini cement glavnim izvorom klimatskog zagađenja. Cement je odgovoran za oko ¼ svih industrijskih emisija CO<sub>2</sub> te oko 7-8% svjetskih emisija CO<sub>2</sub>. Predviđanja korištenja CCUS metoda u ovoj industriji po predviđanjima IEA imaju udio od 18% smanjenja emisija za period 2017.-2060. s uhvaćenih 5 GtCO<sub>2</sub> do 2060.

Opcije za prikupljanje CO<sub>2</sub> u industriji cementa su (Stashwick, 2021):

- a) tehnologije koje hvataju CO<sub>2</sub> izravno na postrojenjima te se takav CO<sub>2</sub> dalje skladišti ili koristi
- b) mineralizacija ugljika koja obuhvaća hvatanje CO<sub>2</sub> i utiskivanje u svježi beton pri čemu se CO<sub>2</sub> trajno zarobljava uz istovremeno očvršćivanje betona.

## **5.3. Industrije željeza i čelika**

Sektor željeza i čelika je jedan od glavnih pokretača ekonomskog i socijalnog razvoja. Ta industrija nalazi svoju svrhu u različitim područjima poput zgradarstva i infrastrukture, mehaničke i električne opreme, raznih proizvoda od metala, transportnih sustava, a primjenu ima i u kućanstvima. Problem je što se radi o industriji koja je iznimno visokog energetskeg intenziteta zbog čega uvelike pridonosi globalnom zatopljenju. Ugljikov dioksid na ovim postrojenjima nastaje iz više izvora. Glavni izvor predstavlja samo

središte procesa – visoka peć. Visoka peć zahtijeva 70% ukupnih potreba za energijom na postrojenju. Drugi veliki izvor je koksara (Mio et al., 2022).

U Tablici 5-1. prikazane su prednosti i metode različitih metoda hvatanja u ovoj industriji.

Tablica 5-1. Prednosti i mane različitih metoda hvatanja CO<sub>2</sub> u industriji željeza i čelika (Mio et al., 2022)

<b>TEHNOLOGIJ</b>	<b>PREDNOSTI</b>	<b>NEDOSTACI</b>
<b>POSLIJE IZGARANJA</b>	<b>lako se naknadno ugradi na postojeća postrojenja</b>	<b> smanjena učinkovitost ako je parcijalni tlak CO<sub>2</sub> nizak, velika potreba za energijom, veliki troškovi ugradnje i rada</b>
<b>PRIJE IZGARANJA</b>	<b>povećana efikasnost ako je visok parcijalni tlak CO<sub>2</sub>, lako se naknadno ugradi, visoko razvijena tehnologija</b>	<b>problemi s postizanjem temperature, potrebe za regeneracijom sorbenta i visoki troškovi za sustav sorbenta</b>
<b>IZGARANJE S KISIKOM</b>	<b>visoka koncentracija CO<sub>2</sub> povećava efikasnost apsorpcije, prikladno za opremu sa smanjenim volumenom ispušnog plina</b>	<b>visoki troškovi proizvodnje kisika, sustav podložan koroziji</b>
<b>IZRAVNO HVATANJE ZRAKA</b>	<b>hvatanje atmosferskog CO<sub>2</sub>, visoka učinkovitost separacije</b>	<b>visoki troškovi zbog niže koncentracije CO<sub>2</sub> u zraku</b>

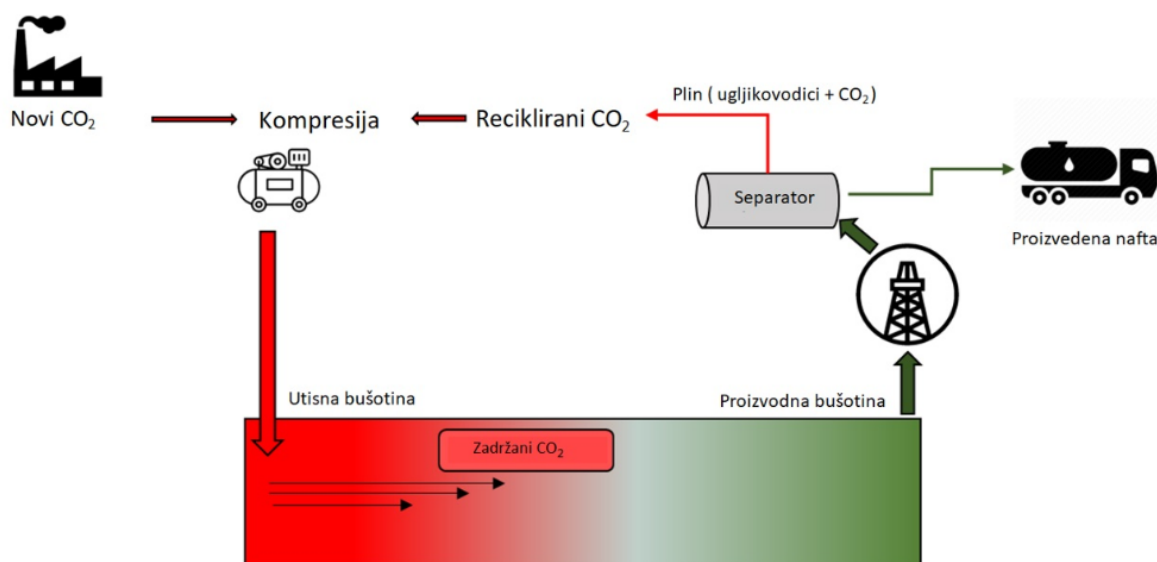
#### 5.4. Naftna industrija

Jedno od glavnih pitanja u sektoru energije u okviru postizanja klimatskih ciljeva jest ono vezano uz naftnu industriju. Dok se svijet još uvijek uvelike oslanja na dobivanje energije iz fosilnih goriva, velik problem predstavlja količina emisija koja posljedično odlazi u atmosferu. Fosilna goriva predstavljaju temelj za funkcioniranje zajednice i nagla promjena u hijerarhiji energenata bi potencijalno mogla destabilizirati svjetsku energetiku i

stoga se istražuju različite opcije kako bi se prilagodba izvršila kvalitetno. Glavni problem za većinu postrojenja i tehnologija iz različitih sektora ljudske djelatnosti predstavlja uspostavljanje ravnoteže između potrebnih prilagodbi koje će voditi k ostvarenju klimatskih ciljeva uz pogodan omjer troškova i koristi za takve kompanije.

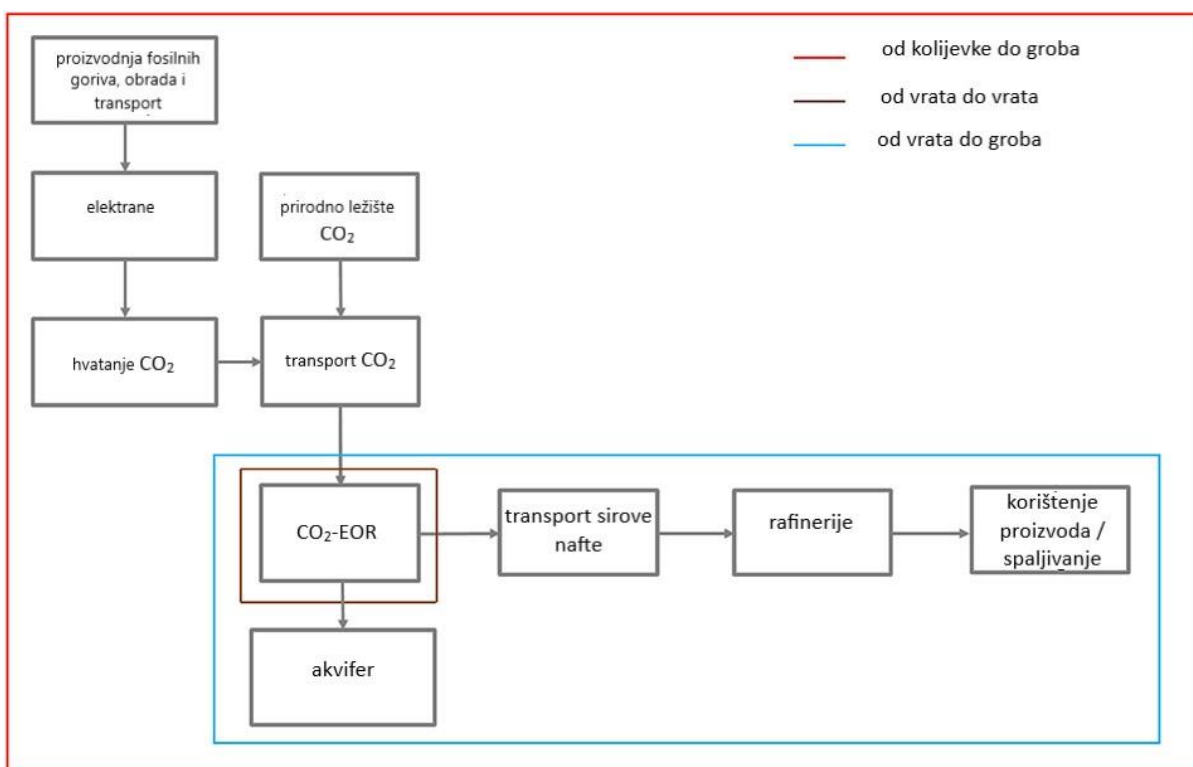
Naftna industrija svoje rješenje je pronašla u metodi povećanja iscrpka. Ta se metoda na naftnim poljima primjenjuje već dugi niz godina kako bi se potaknula i poboljšala proizvodnja dodatne količine nafte. Tom principu se pristupa u situacijama kada prirodna energija ležišta nije dostatna ili je došlo do zavodnjavanja ležišta (Arnaut, n.d.). Danas većina CO<sub>2</sub> koji se utiskuje u EOR projektima je CO<sub>2</sub> koji se pridobiva iz prirodnih podzemnih ležišta tog plina (Slika 5-1). Razlog tome je manjak dovoljne količine CO<sub>2</sub> dostupne u blizini naftnih polja. U današnje vrijeme je to paradoksalno jer nema nikakvih benefita za klimu, a radi se o velikom potencijalu. Konkretno u SAD-u je preko 70% utisnutog CO<sub>2</sub> upravo iz takvih prirodnih ležišta (IEA, 2019). CCUS iz sektora proizvodnje energije i industrijskih postrojenja bi sukladno IEA Scenariju održivog razvoja trebao rasti te do 2040. doseći vrijednost od 2400 Mt CO<sub>2</sub> uhvaćenog širom svijeta.

Za CO<sub>2</sub>-EOR je kroz povijest korišteno više uhvaćenog CO<sub>2</sub> nego iz bilo kojeg drugog industrijskog procesa, a ujedno se radi o jedinoj komercijalno uspostavljenoj opciji utilizacije ugljika koja pruža veliko trajno skladište za uhvaćeni CO<sub>2</sub>.



Slika 5-1. Konceptualna shema CO<sub>2</sub>-EOR (Arnaut, n.d.)

Nedavna studija je pokazala da sve CO<sub>2</sub>-EOR opcije stvaraju negativne emisije tijekom prvih nekoliko godina proizvodnje jer većina utisnutog CO<sub>2</sub> ostaje trajno zarobljena ispod površine. Projekti hvatanja ugljikovog dioksida su posebno logičan izbor na projektima gdje se primjenjuje EOR metoda jer profit od nafte pokriva troškove instalacije i razvitka tehnologije, a ujedno naftne kompanije približava ispunjavanjima klimatskih zahtjeva (Slika 5-2). Zarobljavanje fluida u CO<sub>2</sub>-EOR projektima u dubokim spremnicima je već demonstrirano i potvrđeno zbog postojanja same akumulacije ugljikovodike koja je zarobljena zbog istih uvjeta u podzemlju. Davno uspostavljena tehnologija EOR ima jasnu mrežu zakona, regulacija i standarda u sklopu naftne i plinske industrije no standardizacija i okvir za praćenje, kvantifikaciju i izvještavanje o zadržavanju CO<sub>2</sub> u ležište podosta zaostaju. Trenutna iskustva pokazuju da 90-95% utisnutog CO<sub>2</sub> ostaje geološki zarobljeno (Nunez-Lopez et al., 2019).



Slika 5-2. Sustavi za praćenje emisija CO<sub>2</sub> u metodi CO<sub>2</sub>-EOR kroz cijeli životni vijek (Nunez-Lopez et al., 2019)

Većina CO<sub>2</sub> koji se danas utiskuje u EOR projektima je onaj proizveden iz prirodnih podzemnih CO<sub>2</sub> ležišta. Razlog tome je manjak dostupnog CO<sub>2</sub> blizu naftnih polja. To nema nikakvih benefita u smislu intenziteta emisija. U SAD-u primjerice preko 70% utisnutog CO<sub>2</sub> je takvo (IEA, 2020).

Prva prilagodba za EOR je promijeniti izvor CO<sub>2</sub> iz prirodnog u onaj uhvaćeni s industrijskih emitera. Druga prilagodba je u smislu operativnih promjena zbog zahtjeva za potvrdom i praćenjem uskladištenog plina. IEA je razvila 3 modela koji kombiniraju proizvodnju nafte sa skladištenjem CO<sub>2</sub>:

- konvencionalni EOR+ : konvencionalna praksa koja maksimizira proizvodnju nafte i minimizira upotrebu CO<sub>2</sub>, ali koristi dodatne postupke praćenja i provjere
- unaprijeđeni EOR+ : povećavanje iscrpka nafte s većom količinom CO<sub>2</sub> koji se koristi
- EOR s maksimalnim skladištenjem: model fokusiran na maksimiziranje dugoročnog skladištenja CO<sub>2</sub> istovremeno dostižući iste nivoe proizvodnje kao kod unaprijeđenog EOR+.

Kod CO<sub>2</sub>-EOR projekata prihodi od prodaje nafte smanjuju ukupne projektne troškove i povećavaju količinu uskladištenog CO<sub>2</sub> po jedinici ulaganja (IEA, 2019).

## 6. PRIMJERI POSTROJENJA ZA HVATANJE I SKLADIŠTENJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA

### 6.1. Postrojenje Orca

Postrojenje Orca na Islandu predstavlja prvu jedinicu za izravno hvatanje zraka i skladištenje u svijetu. To je ujedno i najveća jedinica ove vrste u svijetu. Operater na ovom postrojenju je tvrtka Climeworks.

Jedinica ima 6 ćelija na svakoj kontejnerskoj jedinici (Slika 6-1). Svaka ćelija ima specijalizirani filter i ventilatore koji povlače zrak izvana. Ugljikov dioksid se hvata na te filtere. Kad se filter napuni, jedinica se zatvara i zagrijava na oko 100°C. Na taj način se otpušta CO<sub>2</sub> koji se hvata i vakuumski utiskuje u procesnu jedinicu gdje se dodatno obrađuje kako bi se dobio stopostotni CO<sub>2</sub> koji se dalje šalje podzemnim cjevovodom u postrojenje „Carbfix“ za proces mineralizacije.



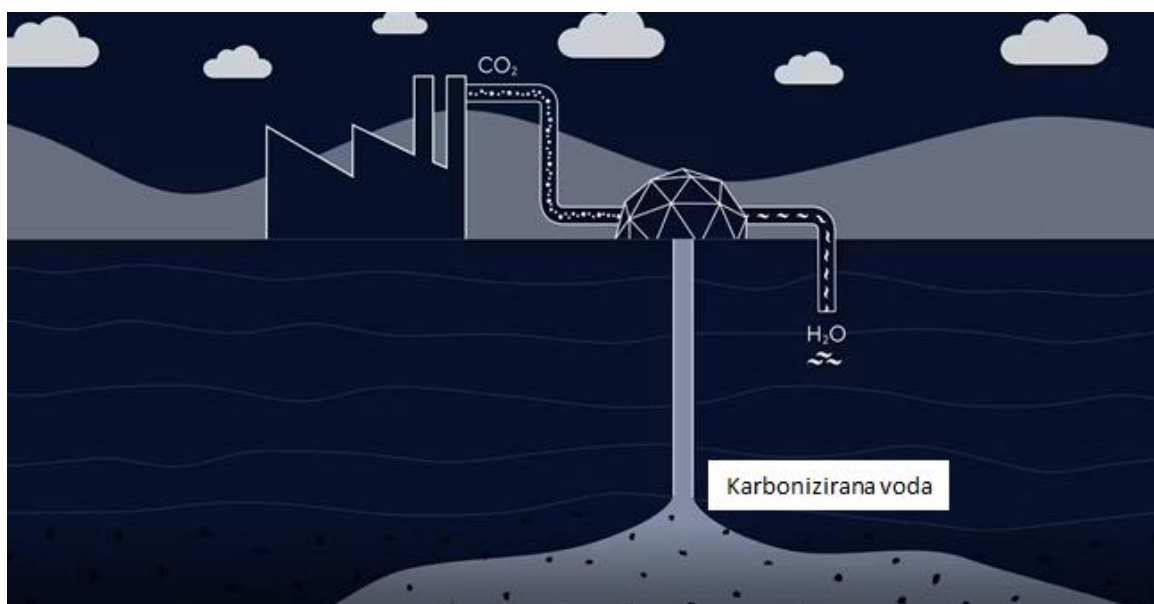
Slika 6-1. Jedinica za hvatanje ugljikovog dioksida na postrojenju Orca (Climeworks, n.d.)

Ovo postrojenje hvata 4000 tona CO<sub>2</sub> godišnje što je jednako količini koju proizvede 250 stanovnika SAD-a.

Prije oko 5000 godina na Islandu se dogodila eksplozija lave. Kada vulkani eruptiraju i ohlade se, ostavljaju za sobom mnogo bazalta. Bazaltne stijene su odlične u hvatanju CO<sub>2</sub>.

Bazalt je sačinjen od mnogo soli različitih metala poput željezovih, magnezijevih i kalcijevih. Kada ugljikov dioksid reagira s kalcijem nastaje kalcijev karbonat te se na takav način plin zarobljava u stijeni. „Carbfix“ imitira i ubrzava te prirodne procese kako bi se CO<sub>2</sub> što kvalitetnije i brže skladištio u bazaltne stijene.

Kada se na postrojenju Orca prikupi dovoljno ugljikovog dioksida, on se cjevovodima dovodi u Carbfix-ovu utisnu bušotinu (Slika 6-2). Paralelno se na tom mjestu kroz drugu utisnu bušotinu utiskuje voda kako bi se osiguralo da se ugljikov dioksid otopi u vodi. Kada se otopi i nastane gazirana voda, takav se fluid utiskuje u stijenu gdje posljedično dolazi do reakcije i otapanja metala u stijeni koji se konačno kombiniraju s ugljikovim dioksidom i okamenjuju. Takva naslaga zauvijek ostaje u toj formi.



Slika 6-2. Utiskivanje CO<sub>2</sub> na Carbfix postrojenju (Carbfix, n.d.)



## 7. KORIŠTENJE UHVAĆENOG UGLJIKOVOG DIOKSIDA S PRIMJERIMA

CO<sub>2</sub> se može koristiti kao sirovina ili polazna stavka za različite vrste proizvoda i usluga. Moguća primjena uključuje direktno korištenje ili pretvorbu u drugi koristan produkt. Danas se oko 230 Mt CO<sub>2</sub> koristi na svjetskoj razini svake godine. Najveći potrošač je industrija proizvodnje gnojiva. Ta industrija koristi 125 Mt/godišnje CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> se pritom koristi kao sirovina u proizvodnji ureje. Drugi najveći potrošač je naftna i plinska industrija, koja koristi između 70 i 80 Mt/godišnje za EOR projekte. Druga komercijalna upotreba uključuje proizvodnju hrane i pića, potrebe hlađenja i obrade vode.

Novi putevi za korištenje ugljikovog dioksida uključuju kemijske i biološke tehnologije, a time omogućavaju raznovrsne prilike za uporabu ugljikovog dioksida u budućnosti. Većina dosadašnjih projekata je još uvijek u početnoj fazi.

Tri su glavne kategorije proizvoda koji su bazirani na ugljikovom dioksidu:

- a) Goriva: Ugljik u ugljikovom dioksidu se može koristiti za konverziju vodika u sintetičko ugljikovodično gorivo koje je jednako jednostavno za primjenu i rukovanje poput plinovitih ili tekućih fosilnih goriva. Proizvodnja takvih goriva je pak visoko energetska intenzivna i ekonomički gledano je isplativo u situacijama niske cijene obnovljive energije i dostupnog CO<sub>2</sub>. Najveće takvo postrojenje trenutno je George Olah na Islandu. Na tom postrojenju godišnje se 5600 tona ugljikovog dioksida pretvara u metanol uz korištenje vodika koji je dobiven iz obnovljive električne energije.
- b) Kemikalije: Ugljik iz ugljikovog dioksida može se koristiti kao alternativa fosilnim gorivima u proizvodnji različitih kemijskih tvari koje trebaju ugljik za svoju strukturu i svojstva. To uključuje polimere i primarne kemijske spojeve kao što su etilen i metanol, a koji su gradivne tvari u proizvodnji mnogih složenijih kemikalija. Primjer aktivne kompanije je Covestro. To je kompanija smještena u gradu Dormagen u Njemačkoj, a proizvodi 5000 tona polimera godišnje pri čemu CO<sub>2</sub> zamjenjuje 20% uobičajeno korištenog ulaznog toka za te procese.
- c) Građevinski materijali: CO<sub>2</sub> se može koristiti u proizvodnji građevinskih materijala na način da nadomješta vodu u betonu ili kao sirovi materijal u komponentama betona kao što su cement ili konstrukcijski agregati. CO<sub>2</sub> reagira s mineralima ili otpadnim tokovima, poput željezne troske, a pritom nastaju karbonati tj. oblik ugljika od kojeg se sačinjava beton. Ova konverzija je obično manjeg energetskog

intenziviteta od konverzije u goriva ili građevinske materijale i uključuje trajno pohranjivanje CO<sub>2</sub> u materijale (IEA, 2022).

Neki energetske sustavi umjesto klasične pare ili plinova za pokretanje turbina koriste superkritični CO<sub>2</sub>. To je stanje iznad kritične temperature i tlaka. Superkritične turbine koriste gotovo čisti kisik za izgaranje goriva, a razlog tome je dobivanje ispušnim plinova koji se sastoje samo od CO<sub>2</sub> i vodene pare.

Predviđanja vezana uz stvaranje proizvoda konverzijom ugljikovog dioksida nije moguće u potpunosti odrediti s obzirom da su te tehnologije uglavnom u razvojnoj fazi. Veliku ulogu će odigrati politike i podrške raznih inicijativa jer su još uvijek te opcije puno skuplje od onih konvencionalnih zbog potrošnje energije. Očekuje se da će tržište za takve proizvode biti malo u bliskoj budućnosti, ali i da će dugoročno gledano jako i rapidno porasti.

Posebno je zanimljiv plavi vodik jer se proizvodi kada se prirodni plin razdvaja na H<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> uz preveniranje ispuštanja CO<sub>2</sub> u atmosferu. Plavi vodik zapravo je niskougljični vodik. Dominantno se koristi u Sjevernoj Americi i Istočnoj Aziji dok pobornici niskougljičnog vodika u Europi zasad preferiraju balansiranje zelenog i sivog vodika. U siječnju 2023., Njemačka je objavila planove za gradnju postrojenja za plavi vodik i veliki cjevovod do Norveške. Razlog je smanjivanje ovisnosti o tradicionalnim opskrbljivačima energije. Vodik izgara čisto tj. njegovo izgaranje ne proizvodi dodatan CO<sub>2</sub>, čestice ili emisije sumpora. Električna vozila s vodikovim gorivim ćelijama primjerice emitiraju samo vodenu paru i topli zrak. Prema Strategiji za vodik za klimatsko neutralnu Europu, koju je donijela Europska Komisija (2020), vodik je jedno od rješenja za dekarbonizaciju industrijskih procesa i gospodarskog sektora. Do 2050. godine predviđeno je ulaganje u niskougljični vodik u iznosu do 18 mlrd.eura. Procjenjuje se da je trenutna cijena vodika proizvedenog iz fosilnih goriva u EU oko 1,5 EUR po kilogramu, a znatno ovisi o cijeni prirodnog plina. Cijena vodika iz fosilnih goriva uz CCS procjenjuje se na oko 2 EUR/kg, a vodika iz obnovljivih izvora na 2,5 – 5,5 EUR/kg. Kako bi vodik iz fosilnih goriva uz CCS metode mogao konkurirati onom bez primjenjenih metoda hvatanja ugljikovog dioksida, cijene ugljikovog dioksida bi trebale iznositi između 55 i 90 EUR/t CO<sub>2</sub>.

Tehnologije hvatanja ugljikovog dioksida bi mogle odigrati važnu ulogu pri proizvodnji niskougljičnog vodika. Niskougljični vodik može biti korišten diljem

energetskog sektora. Poglavitito se radi o dalekosežnom transportu te proizvodnji kemikalija, željeza i čelika te proizvodnji toplinske i električne energije. Niskougljični vodik ima značajnu ulogu u Scenariju održivog razvoja za dekarbonizaciju transporta, industrije, zgradarstva i električne energije. Predviđa se povećanje potreba za vodikom na količine od 520 Mt do 2070. Po tim scenarijima, vodik će se koristiti u širokom rasponu djelatnosti te kao alternativa trenutnim gorivima i sirovim materijalima kao i transportno gorivo za automobile, kamione i brodove, u proizvodnji čelika, za proizvodnju topline u sektoru zgradarstva te industriji. Direktna upotreba vodika u prometu, zgradarstvu, industriji i proizvodnji električne energije će činiti 2/3 potrebe za vodikom u 2070., dok će se 1/4 vodika koristiti u proizvodnji sintetičkih ugljikovodičnih goriva, a 10% će se konvertirati u amonijak koji će se koristiti kao gorivo u sektoru pomorskog prometa.

Udjeli elektrolize vode i proizvodnje vodika uz pomoć CCS metoda iz fosilnih goriva bi trebala biti otprilike jednaka do 2030., s malom prednošću elektrolize vode s vremenom s obzirom na predviđanja za sniženje cijene elektrolizera i proizvodnje čiste obnovljive energije. Do 2070., proizvodnja niskougljičnog vodika s CCS metodama predviđa se na 40% ukupne svjetske proizvodnje vodika ili ukupno 210 Mt. Ta količina je oko 500 puta veća od ukupnog kapaciteta danas (IEA, 2022).

Pet je glavnih razmatranja u procjenjivanju klimatskih benefita kada se radi o upotrebi CO<sub>2</sub>:

- Konvencionalni proizvod ili usluge koje zamjenjuje novonastali proizvod ili usluga bazirana na ugljikovom dioksidu
- Vrijeme pohranjivanja ugljika u proizvodu
- Izvor ugljikovog dioksida (fosilna goriva, industrijski procesi, biomasa ili atmosferski zrak)
- Količina energije i oblik u kojem se koristi za provođenje konverzije CO<sub>2</sub>
- Mogućnost šire primjene

U nastavku su detaljnije opisana neke od uspješnijih primjena uhvaćenog ugljikovog dioksida.

## **7.1. Exxon Mobil Baytown postrojenje za proizvodnju vodika**

Vodik je savršeno čisto gorivo za izgaranje. Kad vodik gori, ne nastaju emisije ugljikovog dioksida. Dva su načina proizvodnje vodika. Jedan uključuje nastanak zelenog vodika korištenjem čiste energije. Drugi način je dobivanje plavog vodika izdvajanjem iz struje prirodnog plina. Plavi vodik je izvorno sivi vodik no umjesto emitiranja ugljikovog dioksida, sivi vodik se podliježe metodama hvatanja CO<sub>2</sub> kako bi se CO<sub>2</sub> odvojio od vodika. Proizvodnja vodika može potencijalno imati ključnu ulogu u energetsom razvoju korištenjem vodikovih gorivih ćelija. Čisti, tj. zeleni vodik se ne može proizvesti u dovoljno velikim količinama te po prihvatljivim cijenama.

Exxon Mobil planira postrojenje za plavi vodik svjetskih razmjera u području Baytown u Teksasu. Radi se o integriranom rafinerijskom i petrokemijskom kompleksu. U kombinaciji s metodama hvatanja ugljikovog dioksida, takva proizvodnja vodika podržava kompanijino obvezivanje na redukciju emisija u svojim operacijama.

Prirodni plin se uglavnom sastoji od metana i može se procesima reforminga pretvoriti u vodik. Jednom izdvojen vodik može se dalje koristiti za grijanje, transport i industrijske potrebe. U parnom metanskom reformingu prirodni plin i para se podliježu nizu reakcija i separacija da bi nastali vodik i ugljikov dioksid. Nastali CO<sub>2</sub> se prevozi na prikladne lokacije s kojih se utiskuje u podzemne stijenske formacije duboko ispod zemlje za trajno i sigurno skladištenje. Plan je da Exxon Mobil do 2040. uhvati i uskladišti 100 mil. t CO<sub>2</sub> uključujući ovo postrojenje i jedno s područja Houstona.

Dobiveni vodik bi se dovodio u područje Bayton što bi predstavljalo zamjenu prirodnog plina vodikom za pogon postrojenja za proizvodnju olefina, a to bi dovelo do smanjenja emisija CO<sub>2</sub> za 30% u usporedbi s trenutnim operacijama. U tok proizvedenog vodika dodavat će se tok etana kako bi se proizvela plastika. Na Bayton olefinskom postrojenju proizvodit će se etilen koji će se slati dalje u Mont Belvieu, postrojenje za proizvodnju plastike, gdje će se dobivati polietilen visokih performansi iz čega će se dalje proizvoditi niskougljični proizvodi (Exxon Mobil, n.d.).

## **7.2. Dimensional Energy i umjetna fotosinteza**

Dimensional Energy (DE) je kompanija koja uspješno konvertira ugljikov dioksid u korisni oblik. Proces koji koriste je umjetna fotosinteza, a produkti su ugljično neutralne

alternative fosilnim gorivima poput mlaznog goriva. Dobiveno mlazno gorivo će i dalje proizvoditi CO<sub>2</sub> tijekom korištenja no količina proizvedenog jednaka je količini uhvaćenog i iskorištenog u proizvodnji što dovodi do ugljične neutralnosti. S obzirom da je aviopromet nerješiv baterijama, ovo predstavlja jedno od potencijalnih održivih i prihvatljivih rješenja.

Biljke, alge i bakterije koje koriste fotosintezu trebaju 3 glavna sastojka: sunce, vodu i CO<sub>2</sub>. U biljkama primjerice korijenje crpi vodu, listovi hvataju sunčevu energiju i ugljikov dioksid, a stanice kloroplasta stvaraju nutrijente procesom Kalvinovog ciklusa. Umjetna fotosinteza koristi sličan proces. Metoda uključuje reaktor koji sadrži nanokatalistički materijal koji uspješno zamjenjuje komponente biljke potrebne za prirodnu fotosintezu. U reaktoru se monokatalizator i CO<sub>2</sub> izlažu sunčevoj svjetlosti i vodi, omogućavajući tako razdvajanje CO<sub>2</sub> i vode te reoblikovanje u organske komponente tj. ugljikovodike koji se mogu koristiti kao mlazno gorivo.

Kompanija DE je dizajnirala svoje rektore tako da budu modularni te se kao takvi mogu smjestiti na izvoru ugljičnih emisija, primjerice na čeličanama ili elektranama. DE za cilj ima energiju za svoje sustave dobivati isključivo od Sunca, prikupljajući je pomoću tehnologije tvrtke Heliogen koja skuplja koncentriranu sunčevu svjetlost kroz niz računalno kontroliranih zrcala (Salfi, n.d.)

### **7.3. Novonutrients**

Kompanija Novonutrients proizvodi proteine iz emisija CO<sub>2</sub> i ostalih plinova poput vodika. Ti plinovi ne moraju biti u čistoj formi već je jedinica specijalizirana za uporabu mješovitih plinova koji su i realnost.

Bakterije transformiraju emisije zajedno s vodikom i kisikom u potpuno sigurne i prirodne jednostanične proteine za hranu. Mikrobi brzo rastu u karboniziranoj vodenoj otopini koristeći minimalno vode. Nastali alternativni proteini se koriste za ljudsku i životinjsku hranu (Novonutrients, n.d.).

### **7.4. CCm Technologies**

Kompanija CCm Technologies koristi uhvaćeni CO<sub>2</sub> iz industrijske proizvodnje energije kako bi stabilizirali različite materijale poput amonijaka i fosfata iz agrikulture i

otpadnih industrijskih tokova te ih koriste za proizvodnju novih gnojiva sa značajno smanjenim ugljičnim otiskom. Otpadni CO<sub>2</sub> nastaje u procesima proizvodnje energije. CCm koriste taj CO<sub>2</sub> na način da reagira s amonijakom u stabilni dušik koji se potom miješa sa vlaknastim materijalima koji se koriste u procesima proizvodnje gnojiva. Dodatni CO<sub>2</sub> stabilizira hlapive kemijske spojeve unutar vlaknastog materijala. Stabiliziranje tih hlapivih kemikalija poboljšava zadržavanje nutrijenata unutar peleta gnojiva (CCm Technologies, n.d.).

### **7.5. Blue Planet**

Blue Planet patentirana mineralizacijska tehnologija je jedna od dokazano najuspješnijih metoda za hvatanje i trajno izdvajanje milijardi tona CO<sub>2</sub>. Proces može koristiti razrijeđeni CO<sub>2</sub> iz bilo kojeg izvora bilo koje koncentracije te ga pretvoriti u vrijedne građevinske materijale čime hvatanje ugljika postaje profit. Svaka tona agregata trajno mineralizira 440 kg CO<sub>2</sub>, ograničavajući ga tako od ispuštanja u atmosferu. U snazi, performansama i trošku, agregat s CO<sub>2</sub> kojeg proizvodi Blue Planet, jest ekvivalentan standardno korištenom agregatu. Agregat je najveća komponenta betona pa korištenje ovog može biti efektivan način za dobivanje ugljično negativnog betona. Standardni beton ima najveći ugljični otisak u projektima zgradarstva i infrastrukture. Sve to dobiva na još većem značaju, ako se uzme u obzir da se svake godine proizvede otprilike 4,4 mlrd. tona cementa. 8% emisija CO<sub>2</sub> predstavljaju upravo te iz proizvodnje cementa, a 75% betona čini agregat stoga koristeći ovaj modificirani agregat godišnje može biti uklonjeno oko 20 mlrd. tona CO<sub>2</sub>. Blue Planet tehnologija je i ekonomski isplativa. Jeftinija je od primjerice postupka hvatanja ugljikovog dioksida poslije izgaranja jer nema pročišćavanja ni ukapljivanja. Profitabilno je i neovisno o trenutnoj cijeni ugljika tj. ugljikovog dioksida na tržištu (Blue Planet, n.d.).

### **7.6. Clean O<sub>2</sub>**

Clean O<sub>2</sub>, kompanija iz Calgary-a, je kreirala uređaj za hvatanje ugljika veličine klima uređaja u kućanstvima. Uređaj se može postaviti uz bojler prirodnog plina za hvatanje CO<sub>2</sub> iz ispušnog plina. Uređaj pod nazivom Carbinx pretvara CO<sub>2</sub> u kalijev karbonat (potašu) koja se dalje koristi za proizvodnju deterdženata, sapuna i gnojiva. Jedinica se puni s kalijevim hidroksidom koji reagira s CO<sub>2</sub> pri čemu nastaje kalijev karbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Radi se o revolucionarnoj tehnologiji. Prilikom odvijanja te reakcije u uređaju, zbog prisutne

transformacije, CO<sub>2</sub> se ne otpušta u atmosferu čak niti poslije korištenja dobivenih proizvoda. Jedna jedinica Carbinx može ukloniti 6 do 8 tona CO<sub>2</sub> godišnje. To predstavlja ekvivalent 300 stabala.

Sam proces predstavlja uštedu energije i novca jer reakcija kojom se dobiva potaša ujedno proizvodi toplinu. To se kombinira s otpadnom toplinom ispušnih plinova te se ukupno dobije dovoljno topline da se zagrije hladna voda prije nego uđe u bojler primjerice neke zgrade u kojoj je uređaj instaliran. Time se smanjuje korištenje prirodnog plina i do 20% (Clean O<sub>2</sub>, n.d.)

### **7.7. Newlight Technologies**

Svakog dana mikroorganizmi konzumiraju metan i ugljikov dioksid za hranu te ih pretvaraju u biološki materijal pod nazivom polihidroksibutirat (PHB). PHB je topiv te se može koristiti kao zamjena za plastiku, tkaninu i kožu. EagleB je prva tehnologija svjetskog razmjera koja koristi mikroorganizme iz prirode za izdvajanje CO<sub>2</sub> iz stakleničkog plina i koristi ga kao izvor (Newlight technologies, n.d.).

### **7.8. Carbon Recycling International**

Carbon Recycling International (CRI) patentirana tehnologija Emisije-u-Kapljevine (engl.*Emissions-to-Liquids*) transformira emisije CO<sub>2</sub> i vodik u metanol. U 2012. Kompanija je postala prva u svijetu koja proizvodi obnovljivi metanol za industrijske potrebe, a u 2022. s radom je započelo i postrojenje za proizvodnju recikliranog ugljikovog metanola s kapacitetom proizvodnje 110 000 t/god.

Tehnologija pomaže proizvodnju obnovljenog ili recikliranog ugljikovog metanola po kompetitivnim tržišnim cijenama. Može biti primjenjeno na svim dijelovima postrojenja koja emitiraju CO<sub>2</sub> u atmosferu s pristupom obnovljivoj energiji kroz mrežu. Obnovljivi metanol, poznatiji pod nazivom E-metanol se dobiva od vodika koji je dobiven elektrolizom vode koristeći električnu energiju iz obnovljivih izvora u kombinaciji s CO<sub>2</sub>.

Ovi procesi imaju mali utjecaj na okoliš. Nema utjecaja na hranidbeni lanac ili upotrebu zemlje. Radi se o kontinuiranim operacijama sa smanjenim rizikom nestabilnih uvjeta u reakcijama. Plinska mješavina je manje otrovna u usporedbi s nekonvencionalnim sintetičkim plinovima, a glavni nusprodukti su kisik i voda.

Što se tiče samog procesa, ispušni plinovi se hvataju na izvorima emisija i prenose u sustav za kondicioniranje plina gdje mu se uklanjaju sve nečistoće kako bi se proizveo CO<sub>2</sub> prikladan za sintezu metanola. Plin se katalitičkom konverzijom transformira u sirovi metanol odnosno mješavinu metanola i vode pri visokom tlaku i temperaturi. Reakcija je jako egzotermna i moguće je toplinu iz reaktora koristiti za opskrbu pare u destilacijskim jedinicama. U destilacijskoj sekciji se sirovi metanol obrađuje do zahtijevane čistoće i kvalitete (Carbon Recycling International, n.d.).



## 8. CCUS U HRVATSKOJ

### 8.1. Hibridna termoelektrana Slavonski Brod

Hibridna termoelektrana Slavonski brod (SB) (Slika 8-1.) je projekt suvremenog termoenergetskog postrojenja (u vrijeme pisanja ovog diplomskog rada, postrojenje je u razvojnoj fazi). Radi se o postrojenju koje je apsolutno u skladu s uputama Europske Unije glede primjene najboljih raspoloživih tehnika u smislu održivog energetskog razvoja.

Radi se o primjeni komercijalnog hvatanja i izdvajanja ugljikovog dioksida iz plinova izgaranja na samim plinskim turbinama i termoelektrani. Termoelektrana SB je pogodna za vršni i prekidivi rad te može imati veliku ulogu u hrvatskom energetskom sustavu poglavito zbog povećane fleksibilnosti i manjka proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije.

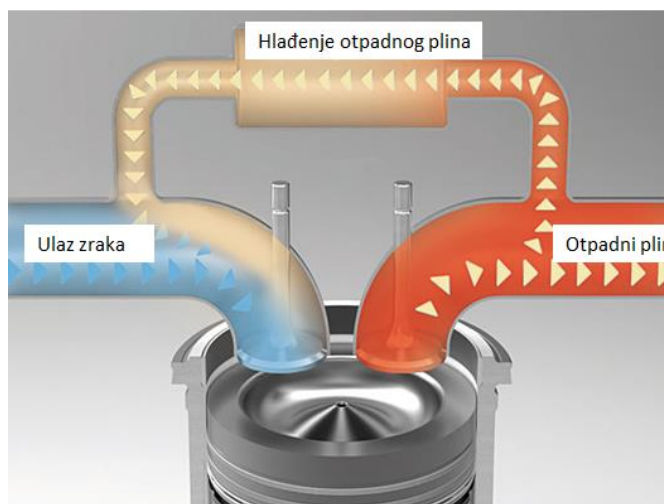
Ovaj je projekt razvijen na zemljištu površine od oko 200 000 m<sup>2</sup> pod koncesijom tvrtke Crodux. Električna energija će se prodavati u prijenosnu mrežu putem rasklopišta na lokaciji termoelektrane SB i trafostanice u neposrednoj blizini te dalje putem dalekovoda vlasništvu hrvatskog operatora prijenosnog sustava (Delta Energetika, n.d.).



Slika 8-1. Planirani izgled dovršenog postrojenja hibridne termoelektrane SB (HOLCIM, n.d.)

Projekt kombinirane plinske termoelektrane u Slavonskom Brodu je najveće privatno ulaganje u području energetike, a vrijednosti je oko 420 milijuna eura.

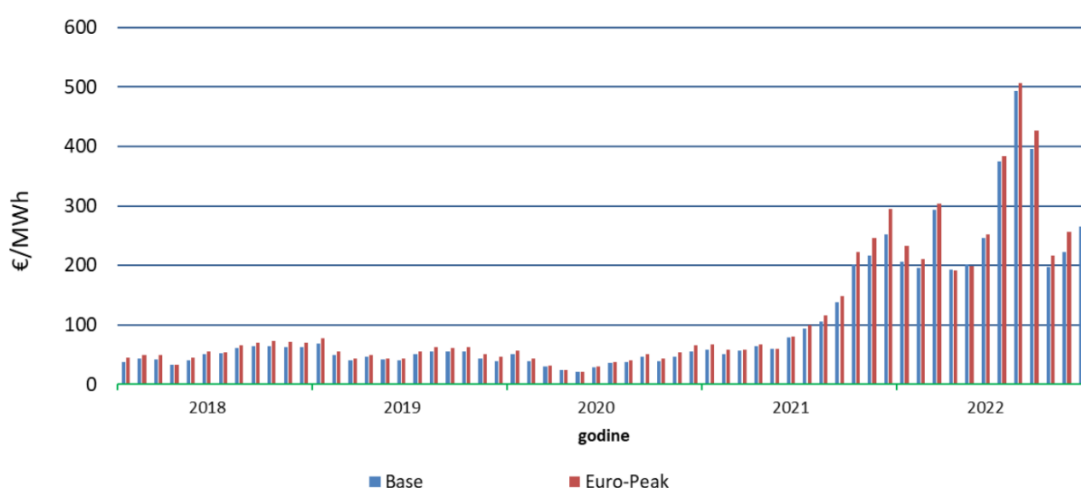
Povećanje potrošnje električne energije je neminovno, a hibridna termoelektrana predstavlja vrlo logičan izbor koji će omogućiti smanjenje emisija stakleničkih plinova pri samoj proizvodnji električne energije. Proces uključuje plinske turbine koncipirane za izgaranje plina sa zrakom s malo kisika primjenom recirkulacije plinova izgaranja (Slika 8-2).



Slika 8-2. Prikaz koncepta rada recirkulirajuće plinske turbine (Kech, n.d.)

Termoelektrana će imati kapacitet proizvodnje od 2 TWh električne energije godišnje, a raspoloživost veću od 8000 sati godišnje.

Velike fluktuacije u cijenama električne energije i porast cijena u proteklim godinama su dodatan poticaj za provođenje ovog projekta (Slika 8-3).



Slika 8-3. Mjesečna prosječna cijena električne energije na hrvatskom tržištu (CROPEX, 2022)

Kako bi se osigurala što veća ekološka prihvatljivost projekta, razvijeno je postrojenje za hvatanje i odvajanje ugljikovog dioksida na bazi amino procesa. Time se ovo postrojenje usklađuje i s najstrože nametnutnim standardima današnjice. Predviđeno je da se takvim sustavom godišnje odvaja oko 500 000 tona CO<sub>2</sub> čistoće 99%. Geološke strukture u blizini lokacije su adekvatne za skladištenje uhvaćenog CO<sub>2</sub>.

Kako bi se dodatno povećala iskoristivost termoelektrane, za drugu fazu njenog razvoja je previđena i dogradnja sustava za proizvodnju vodika. Planira se ugradnja elektrolizera snage 17,5 MW za proizvodnju vodika s kapacitetom proizvodnje 340 kg vodika po satu za uvjete smanjenje potražnje ili niske cijene električne energije u određenom trenutku (Radošević, 2022).

Dodatno planirano proširenje ovog sustava je i izgradnja informacijsko-tehnološkog (IT) centra koji bi koristio proizvedeno električnu energiju upravo na lokaciji elektrane što bi omogućilo kontinuirani rad elektrane. Predviđa se IT centar snage 30-60 MW.

Na Slici 8-4. Ilustrirano je godišnje planirano djelovanje postrojenja.



Slika 8-4. Hibridna termoelektrana u brojkama (DELTA Energetika, n.d.)

## 8.2. Cementara Koromačno – projekt KodeCO

Ovaj projekt predstavlja prvi takve vrste u Hrvatskoj i jedan od prvih u Europi i svijetu. Radi se rekonstrukciji postojećeg postrojenja s ciljem smanjenja emisija, a kroz povećanje uporabe otpada u tvornici cementa Koromačno. Naziv KodeCo dolazi od riječi Koromačno, dekarbonizacija i ekologija.

Tvrtka Holcim provodi svoje projekte diljem svijeta, a na Slici 8-5. su prikazane lokacije svih njihovih projekata s pripadajućim godišnjim kapacitetima smanjenja emisija.



Slika 8-5. Projekti tvrtke Holcim diljem svijeta (HOLCIM, n.d.)

Dogovori oko druge faze projekta KodeCO uključuju izgradnju sustava za hvatanje ugljika na dimnjaku peći. Plan za izradu je 2028. Na taj način, nakon probnog rada, očekuje se da će postrojenje već nakon godinu dana imati nultu stopu emisija CO<sub>2</sub>.

Ukupni ciljevi projekta uključuju godišnje ukidanje upotrebe 37 000 t ugljena i petrol koks te smanjenje emisija za 46 000 t. U prvom redu izbjegavanje emisija će se odvijati korištenjem alternativnih materijala i izvora energije. Kalcinirana glina, primjerice, omogućuje proizvodnju cementa s 50% manje emisija CO<sub>2</sub> u usporedbi s konvencionalnim cementom. Ostatak emisija, to jest one koje se ne mogu izbjeći, rješavat će se tehnologijama hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (Delta Energetika, n.d.).

Sama lokacija ovog postrojenja uz more ima više benefita. Ta lokacija ima logističku prednost, a izuzev toga tehnološki je olakšano zbog korištenja morske vode za rashlađivanje u ciklusu samog procesa proizvodnje. Blizina mora svakako olakšava i skladištenje uhvaćenog ugljikovog dioksida jer je plan skladištiti isti u prvo mediteransko odobalno skladište.

Projekt se sufinancira iz sredstava Inovacijskog fonda EU. Europska Unija je pokrenula taj fond kako bi se dostigli ciljevi zelenog plana i dekarbonizacije Europe do 2050., a ovaj projekt je prepoznat kao uspješan u toj realizaciji (HOLCIM, n.d.).

### **8.3. Cementara NEXE – projekt CO<sub>2</sub>NTESSA**

CO<sub>2</sub>NTESSA je projekt za klimatski neutralnu proizvodnju cementa u tvornici cementa NEXE u Našicama. Projekt će dovesti do implementacije inovativne tehnologije za hvatanje ugljika u tvornici cementa NEXE u Našicama. Izvršit će se modifikacija postojećeg pogona na bazi Polysius PureOxyfuel tehnologije koji je razvila grupacija thyssenkrupp. Na osnovu tog projekta, omogućit će se hvatanje > 700 000 t CO<sub>2</sub> godišnje te će se tako proizvodnja cementa u NEXE-u približiti nultoj stopi emisija. Tako će se osloboditi potencijal da NEXE postane prvi negativni emiter CO<sub>2</sub> u EU. Također, ovim projektom bi se osigurala dugoročna konkurentnost proizvodnje cementa u Republici Hrvatskoj i regiji.

CO<sub>2</sub>NTESSA (Slika 8-6.) zahtijeva brojne prilagodbe proizvodnog procesa kao i novu opremu i nadogradnju sustava. Za razliku od klasične proizvodnje cementa koja za izgaranje goriva i proizvodnju klinkera posredno koristi kisik iz okolišnog zraka, Polysius PureOxyfuel tehnologija se temelji na korištenju čistog kisika. Takav proces omogućava smanjenje volumena procesnih plinova, smanjenje dimenzije cjevovoda, ciklona, izmjenjivača topline i ostale opreme. Uz smanjenje volumena procesnih plinova, korištenje čistog kisika omogućava i visoku koncentraciju CO<sub>2</sub> u dimnim plinovima pri čemu je ta proizašla koncentracija adekvatna za transport i skladištenje. Time se dodatno smanjuju operativni troškovi povezani uz hvatanje ugljikovog dioksida.





Slika 8-6. CO<sub>2</sub>NTESSA (Nexe, n.d.)

NEXE razvija projekte kojima će se smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima pri čemu bi se za dobivanje energije povećala upotreba alternativnih goriva. Plan je da se od 2029. na postrojenju proizvodi ugljično neutralan cement.

Prednost ovog projekta je i lokacija Bockovci koja se nalazi na 38 km od Cementare u Našicama, a geološki je vrlo prikladna za utiskivanje u slani akvifer. Ta činjenica dodatno poboljšava energetske i troškovne učinkovitosti samog projekta. Lokacija Bockovci ima potencijal postati regionalno čvorište za pohranu ugljikovog dioksida (NEXE, n.d.).

## 9. ZAKLJUČAK

Tehnologije hvatanja, skladištenja i/ili korištenja ugljikovog dioksida čine se kao jedini mogući put k nultoj stopi emisija kojoj cijeli svijet i poglavito Europa u ovom trenutku teži. Spomenute tehnologije, koje su tema ovog diplomskog rada, doprinose tranziciji prema čistoj energiji na više načina. To su u prvom redu upravljanje emisijama na već postojećim infrastrukturama uz prikladnu prilagodbu pojedinim objektima. Nadalje, ove tehnologije pružaju izgledno rješenje za emisije koje predstavljaju najveći izazov današnjice poput primjerice teške industrije koja je odgovorna za velik dio emisija koje se globalno proizvode danas. Konkretno u cementnoj industriji, ove metode predstavljaju vrlo vjerojatno i jedino rješenje koje bi im omogućilo opstanak. Prednost ovog skupa tehnologija je i ekonomski prihvatljiv način proizvodnje niskougljičnog vodika koji će potencijalno igrati veliku ulogu u budućnosti. Emisije koje su već ispuštene u atmosferu ili ih je nemoguće reducirati izravno, CCUS metode omogućavaju uklanjanje ugljikovog dioksida direktno iz atmosfere. U samoj tranziciji prema nultoj stopi emisija, uloga CCUS tehnologija može pronaći svoju primjenu u gotovo svim energetske sustavima.

Problem široj primjeni ovih metoda još uvijek predstavlja nedovoljna istraženost i ulaganja što za posljedicu ima i malo tržište. To malo tržište odvlači potencijalne proizvođače zbog manjka ekonomskih benefita.

Razvoj CCUS čvorišta bi mogao pridonijeti ubrzanju primjene uslijed reduciranih troškova jer bi ta čvorišta predstavljala industrijske centre sa zajedničkom transportnom i skladišnom infrastrukturom.

Veliki klimatski ciljevi utječu na svijest o potrebi za ovim tehnologijama no potrebni su veći poticaji i investicijski fondovi kako bi se dosegla razina i raširenost koja će uistinu pridonijeti postizanju klimatske neutralnosti.

## 10. LITERATURA

1. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2016. *Energy, Climate Change & Environment*.
2. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2019. *World Energy Outlook*.
3. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2020. *Energy Technology Perspectives*.
4. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2021. *The world has vast capacity to store CO<sub>2</sub>: Net zero means we'll need it*.
5. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2022. *Carbon Capture, Utilization and Storage*
6. IPCC, 2018. *Special report: global warming of 1.5°C*.
7. JONES, A.C., LAWSON, A.J., 2022. *Carbon Capture and Sequestration in the United States*. Izveštaj. SAD: Congressional Research Service.
8. AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS), 2022. *Insights into Onboard Carbon Capture*.
9. PEREIRA SANTOS, S., GOMES, J.F., 2016. *Choosing amine based absorbents for CO<sub>2</sub> capture*. Environmental Technology, 36(1) str.19-25.
10. WANG, M., LAWAL, A., STEPHENSON, P., SIDDEERS, J., RAMSHAW, C., YEUNG, H., 2011. *Post Combustion CO<sub>2</sub> Capture With Chemical Absorption: A State-of-the-art Review*. Chemical Engineering Research and Design, 89(9) str.1609-1624.
11. ELHENAWY, S.E.M., KHRAISHEH, M., ALMOMANI, F., WALKER, G. 2020. *Metal Organic Framework as a Platform for CO<sub>2</sub> Capture and Chemical Processes: Adsorption, Membrane Separation, Catalytic-Conversion and Electrodynamical Reduction of CO<sub>2</sub>*. Studija. Qatar: Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Qatar University.
12. GUOZHAO, J., ZHAO, M., 2017. *Recent Advances in Carbon Capture and Storage*. Južna Koreja: Intech Open.
13. STROHLE, J., ORTH, M., EPPLE, B., 2014. *Design and operation of a 1MW<sub>th</sub> chemical looping plant*, 113 str.1490-1495.
14. ABANADES, J.C., ARJAS, B., GRASA, G.S., ALONSO, M., 2013. *Post combustion calcium looping process with a highly stable sorbent activity by reactivation*. Energy & Environmental Science.



15. DAMEN, K., FAAIJ, A., TURKENBURG, W., 2016. *Health, safety and environmental risks of underground CO<sub>2</sub> storage*. Studija. Nizozemska: Department of Science, Technology and Society, Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation.
16. FORTES, M., SCHONEBERGER, J.C., TZIMAS, E., 2014. *Methanol synthesis using captured CO<sub>2</sub> as raw material: Techno-economic and environmental assessment*. Applied Energy, 161 str.718-732,
17. MACKENZIE, B., 2022. *Experimental Investigation of a novel CO<sub>2</sub> Capture and Mineralization Concept*. Diplomski rad. Grčka: School of Science & Technology.
18. STASHWICK, S., 2011. *With carbon capture, concrete could one day become a carbon sink* (URL: <https://www.nrdc.org/bio/sasha-stashwick/carbon-capture-concrete-could-one-day-be-carbon-sink>) (08.6.2023.)
19. MIO, A., PETRESCU, L., LUCA, A.V., GALUSNYAK, S.C., FERMEGLIA, M., CORMOS, C.C., 2022. *Carbon Dioxide Capture in the Iron and Steel Industry*. Chemical and Biochemical Engineering, 36(4) str.255-271.
20. ARNAUT, M., n.d. *CO<sub>2</sub>-EOR proces i skladištenje*. (URL: <https://www.rgn.unizg.hr/hr/component/content/article/223-blog/2846-co2-eor-proces-i-skladistenje-co2>) (11.6.2023.)
21. NUNEZ LOPEZ, V., GIL-EGUI, R., HOSSEINI, S., 2019. *Environmental and Operational Performance of CO<sub>2</sub>-EOR as a CCUS Technology*. Studija. SAD: Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, University of Texas.
22. CLIMEWORKS, n.d. *Orca – Carbon dioxide removal*. (URL: <https://climeworks.com/carbon-removal-as-a-solution-to-fight-global-warming>) (11.7.2023.)
23. CARBFIX, n.d. *How it works*. (URL: <https://www.carbfix.com/how-it-works>) (11.7.2023.)
24. EXXON MOBIL, n.d. *Baytown operations*. (URL: <https://corporate.exxonmobil.com/locations/united-states/baytown-operations>)
25. SALFI, J., n.d. *Artificial photosynthesis turns CO<sub>2</sub> into sustainable fuel*. (URL: <https://www.freethink.com/series/make-it-count/decarbonization>) (17.6.2023.)
26. NOVONUTRIENTS, n.d. *Food and feed from CO<sub>2</sub>*. (URL: <https://www.novonutrients.com/>) (18.6.2023.)
27. CCM TECHNOLOGIES, n.d. (URL: <https://www.ccmtechnologies.co.uk/technology>) (14.6.2023.)

28. BLUE PLANET, n.d. *Permanent Carbon Capture*. (URL: <https://www.blueplanetsystems.com/>) (20.6.2023.)
29. CLEAN O<sub>2</sub> n.d.. *We make the world's first carbon capture soap*. (URL: <https://cleano2.ca/pages/our-story>) (20.6.2023.)
30. NEWLIGHT TECHNOLOGIES, 2014. *Plastic alternative biomaterials inspired by ocean microorganisms*. (URL: <https://asknature.org/innovation/plastic-alternative-biomaterial-inspired-by-ocean-microorganisms/>) (14.6.2023.)
31. CARBON RECYCLING INTERNATIONAL, n.d. *Recycling CO<sub>2</sub> to produce methanol*. (URL: <https://www.carbonrecycling.is/co2-methanol>) (14.6.2023.)
32. RADOŠEVIĆ, B., 2022. *Hibridna termoelektrana Slavonski Brod - energetska postrojenje za proizvodnju električne energije i topline iz prirodnog plina bez emisije stakleničkih plinova uz hvatanje i odvajanje CO<sub>2</sub> te proizvodnju i korištenja vodika*. Nafta i plin, 41 str.71-77.
33. DELTA ENERGETIKA, n.d. *Hybrid powerplant SB*. (URL: <https://www.hybridpowerplantsb.com/o-projektu/>) (13.7.2023.)
34. HOLCIM, n.d. *Razvoj nove vrste cementa s nižim ugljičnim otiskom*. (URL: <https://www.holcim.hr/projekt-razvoj-nove-vrste-cementa-s-nizim-ugljicnim-otiskom>) (14.7.2023.)
35. HOLCIM, n.d. *Carbon capture, utilization and storage*. (URL: <https://www.holcim.com/what-we-do/green-operations/ccus>) (14.7.2023.)
36. KECH, J., n.d. *How does exhaust gas recirculation work?*. (URL: <https://www.mtu-solutions.com/au/en/stories/technology/research-development/how-does-exhaust-gas-recirculation-work.html>) (15.7.2023.)
37. YADAV, S., MONDAL, S.S., 2022. *A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration technology*. Fuel.
38. BLAMEY, J., ANTHONY, E.J., WANG, J., FENNELL., P.S., 2009. *The calcium looping cycle for large scale CO<sub>2</sub> capture*. Progress in Energy and Combustion Science 36 str.260-279.
39. NAJERA, M., SOLINKE, R., GARDNER, T., VESER, G., 2011. *Carbon capture and utilization via chemical looping dry reforming*. Chemical Engineering Research and Design 89(9) str.1533-1543.
40. CROPEX, 2022. *Mjesečna prosječna cijena električne energije u RH*. (URL: <https://www.cropex.hr/hr/>) (18.7.2023.)
41. INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT), 2020. *Carbon capture and storage*. (URL: <https://theicct.org/carbon-capture-and-storage-a-lot-of-eggs-in-a-potentially-leaky-basket/>)

42. EUROPSKA KOMISIJA, 2020. *Strategija za vodik za klimatsko neutralnu Europu.*
43. NEXE, n.d. *CO<sub>2</sub>NTESSA*. (URL: <https://www.nexe.hr/co2ntessa>) (13.9.2023.)

## IZJAVA

*Izjavlujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*



---

Lucija Čatlak



KLASA: 602-01/23-01/178  
URBROJ: 251-70-03-23-2  
U Zagrebu, 12.09.2023.

Lucija Čatlak, studentica

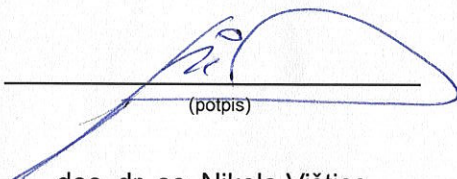
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/178, URBROJ: 251-70-03-23-1 od 30.08.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### MOGUĆA ULOGA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE I KORIŠTENJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA U SVRHU ZAŠTITE OKOLIŠA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada doc. dr. sc. Nikola Vištica nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

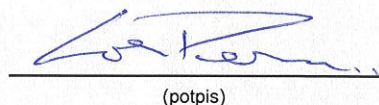
Mentor:

  
(potpis)

doc. dr. sc. Nikola Vištica

(titula, ime i prezime)

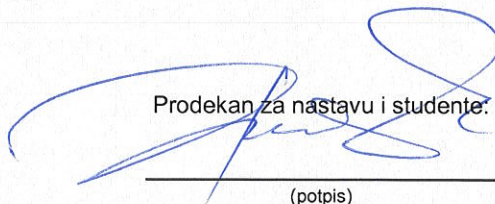
Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

  
(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

  
(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)