

# Analiza troškova hvatanja, transporta i skladištenja ugljikovog dioksida i razvitak projekata u Norveškoj

---

Ređep, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:169:741919>

*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  
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**ANALIZA TROŠKOVA HVATANJA, SKLADIŠTENJA I  
TRANSPORTA UGLJIKOVOG DIOKSIDA I RAZVOJ PROJEKATA  
U NORVEŠKOJ**

Završni rad

Ana Ređep

N4357

Zagreb, 2021.

ANALIZA TROŠKOVA HVATANJA, SKLADIŠTENJA I TRANSPORTA  
UGLJIKOVOG DIOKSIDA I RAZVOJ PROJEKATA U NORVEŠKOJ  
ANA REĐEP

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Jedan od većih problema današnjice je povećanje koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi koje uzrokuje porast prosječne globalne temperature u troposferi. S obzirom da je od velike važnosti spriječiti povećanje emisije ugljikovog dioksida razvili su se projekti i tehnologije s ciljem samog sprječavanja porasta antropogenih emisija. Troškovi projekata su visoki zbog nerazvijenosti tehnologije. U ovom radu prate se troškovi hvatanja, skladištenja i transporta ugljikovog dioksida, zajedno s troškovima norveškog projekta Longship koji uvelike doprinosi razvoju tehnologije.

Ključne riječi: CCUS, CCS, Norveška, CO<sub>2</sub>, Gassnova, Longship, troškovi

Završni rad sadrži: 36 stranica, 18 slika, 33 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf

Pomoć pri izradi: Filip Vodopić, mag.ing.petrol, RGNf

Ocjenjivači: Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf

Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf

Dr. sc. Bruno Saftić, izvanredni profesor RGNf

Datum obrane: 17.09.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	I
<b>POPIS KORIŠTENIH SKRAĆENICA</b> .....	II
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OPIS CCUS I CCS TEHNOLOGIJA</b> .....	2
<b>3. METODE HVATANJA, KORIŠTENJA I SKLADIŠTENJA UGLJIKOVOG DIOKSIDA</b> .....	5
3.1. Hvatanje ugljikovog dioksida.....	5
3.1.1. Hvatanje ugljikovog dioksida nakon izgaranja .....	6
3.1.2. Hvatanje ugljikovog dioksida prije izgaranja .....	8
3.1.3. Izgaranje goriva pomoću kisika .....	9
3.2. Korištenje ugljikovog dioksida .....	11
3.3. Transport ugljikovog dioksida .....	13
3.4. Skladištenje ugljikovog dioksida.....	14
<b>4. GASSNOVA</b> .....	18
4.1. CLIMIT program.....	19
4.2. TCM.....	22
4.3. Longship CCS .....	23
4.3.1. Northern Lights .....	24
<b>5. ANALIZA TROŠKOVA HVATANJA, SKLADIŠTENJA I TRANSPORTA U NORVEŠKOJ</b> .....	27
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	32
<b>7. LITERATURA</b> .....	33

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Proces hvatanja, upotrebe i skladištenja ugljikovog dioksida (CCUS) .....	3
<b>Slika 2-2.</b> Proces hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCS) .....	4
<b>Slika 3-1.</b> Podjela sustava hvatanja ugljikovog dioksida.....	5
<b>Slika 3-2.</b> Postupak hvatanja CO <sub>2</sub> kemijskom apsorpcijom .....	6
<b>Slika 3-3.</b> Filtriranje ugljikovog dioksida pomoću membrane .....	7
<b>Slika 3-4.</b> Postupak kriogenog odvajanja ugljikovog dioksida.....	8
<b>Slika 3-5.</b> Postupak hvatanja CO <sub>2</sub> prije izgaranja .....	9
<b>Slika 3-6.</b> Proces izgaranja goriva s pomoću kisika .....	10
<b>Slika 3-7.</b> Shematski prikaz izgaranja kemijske petlje (a) i reforme kemijske petlje (b) .....	11
<b>Slika 3-8.</b> Proces ex-situ mineralne karbonizacije .....	13
<b>Slika 3-9.</b> Opcije skladištenja ugljikovog dioksida u dubokim podzemnim geološkim formacijama .....	15
<b>Slika 3-10.</b> Strategije skladištenja u oceanima.....	17
<b>Slika 4-1.</b> Testni centar Mongstad.....	23
<b>Slika 4-2.</b> Prikaz projekta Longship i Northern Lights .....	25
<b>Slika 4-3.</b> 3D prikaz industrijske zone Naturgassparken.....	25
<b>Slika 5-1.</b> Troškovi hvatanja CO <sub>2</sub> po sektorima.....	27
<b>Slika 5-2.</b> Operativni troškovi (desno) i ulaganja (lijevo) za CCS u Norveškoj.....	30
<b>Slika 5-3.</b> Troškovi po toni CO <sub>2</sub> Norveškog projekta CCS .....	31

## POPIS KORIŠTENIH SKRAĆENICA

€- euro

CaCO<sub>3</sub>-kalcijev karbonat

CAPEX- kapitalni izdaci (engl. *Capital Expenditure*)

CCU- hvatanje i korištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Utilisation*)

CCUS- hvatanje, korištenje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture, Utilisation and Storage*)

CCS- hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Storage*)

CLC- izgaranje kemijske petlje (engl. *Chemical Looping Combustion*)

CLR- reforma kemijske petlje (engl. *Chemical Looping Reforming*)

CO<sub>2</sub>- ugljikov dioksid

ECBM- povećanje iscrpka metana iz ugljenog sloja (engl. *Enhanced Coal Bed Methane recovery*)

EGR- povećanje iscrpka prirodnog plina (engl. *Enhanced Gas Recovery*)

EOR- povećanje iscrpka nafte (engl. *Enhanced Oil Recovery*)

GtCO<sub>2</sub>- giga tona ugljikovog dioksida

IEA- Međunarodna agencija za energiju (engl. *International Energy Agency*)

km- kilometar

kt- kilotona

m<sup>3</sup>/h- metar kubni po satu

MNOK-milijun norveških kruna

Mtpa- milijun tona godišnje (engl. *Million Tonnes Per Annum*)

MTR- Membranska tehnologija i istraživanja (engl. *Membrane Technology and Research*)

NO<sub>x</sub>- dušikovi oksidi

NOK- norveška kruna

NOK/t- norveška kruna po toni

OPEX- operativni trošak (engl. *Operating Expenses*)

PI- perspektiva investitora

SCADA- sustav za nadzor mjerenje i upravljanje industrijskim sustavima (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*)

SINTEF- tvrtka za industrijska i tehnička istraživanja (nor. *Selskapet for Industriell og Teknisk Forskning*)

SO<sub>x</sub>- sumporovi oksidi

TCM- Tehnološki centar Mongstad (engl. *Technology Center Mongstad*)

TDA Research- istraživanje usmjereno na razvoj tehnologije (engl. *Technology development approach research*)

UN -Ujedinjeni narodi (engl. *United Nations*)

UNFCCC- Okvirna konvencija o klimatskim promjenama Ujedinjenih naroda (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*)

WGSR- reakcija ugljičnog monoksida i vodene pare (engl. *Water-gas shift reaction*)

## 1. UVOD

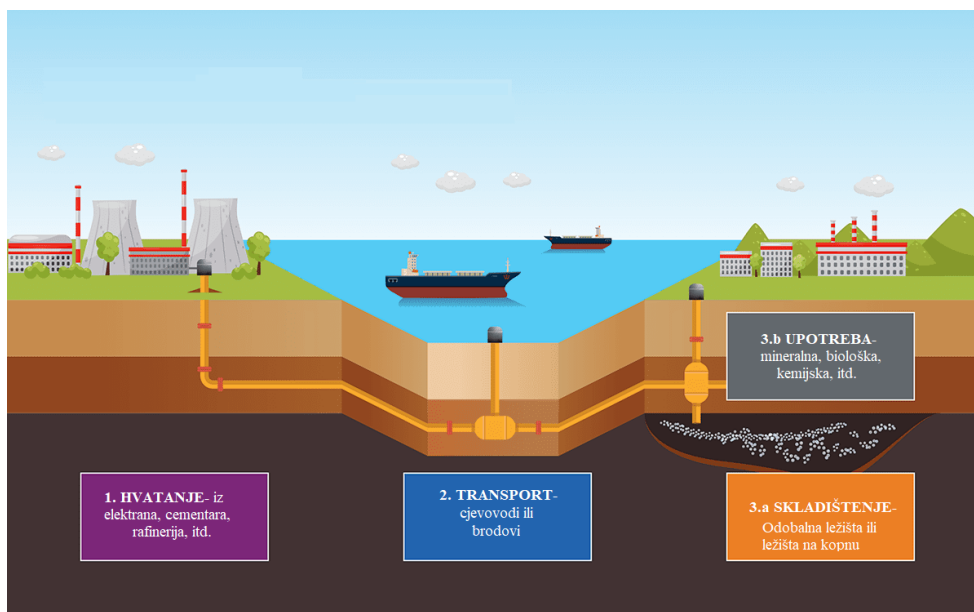
Emisije ugljikovog dioksida predstavljaju značajan problem na svjetskoj razini. Dolazi do promjena klimatskih uvjeta uzrokovanih učinkom staklenika kao što je globalno zatopljenje, odnosno postupno zagrijavanje Zemljine površine. Emisije se povećavaju proizvodnjom gnojiva koja sadrže dušik, izgaranjem ugljena, nafte i plina, krčenjem šuma, i dr. Razine emisija ugljikovog dioksida iz godine u godinu sve više rastu. Povećanje emisija nastoji se spriječiti implementacijom metoda hvatanja, upotrebe i skladištenja ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture Utilisation and Storage- CCUS*). Razvijaju se mogućnosti različitih metoda CCUS-a i CCS-a (engl. *Carbon Capture and Storage- CCS*). Norveška je među nekolicinom zemalja koja želi promicati hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida na nacionalnoj i međunarodnoj razini. Istraživanjem i razvojem novih tehnologija nastoje smanjiti troškove samih projekata. Norveška je do sada svojim projektima pomogla u razvoju tehnologije u vlastitoj državi pa i u ostalim državama izgradnjom najvećeg testnog centra.

Završni rad obuhvaća opis različitih metoda hvatanja, skladištenja, transporta i upotrebe ugljikovog dioksida. Razrađeni su norveški projekti od njihovih samih početaka pa sve do danas, te njihova vrijednost zajedno s čimbenicima koji utječu na troškove samog projekta.



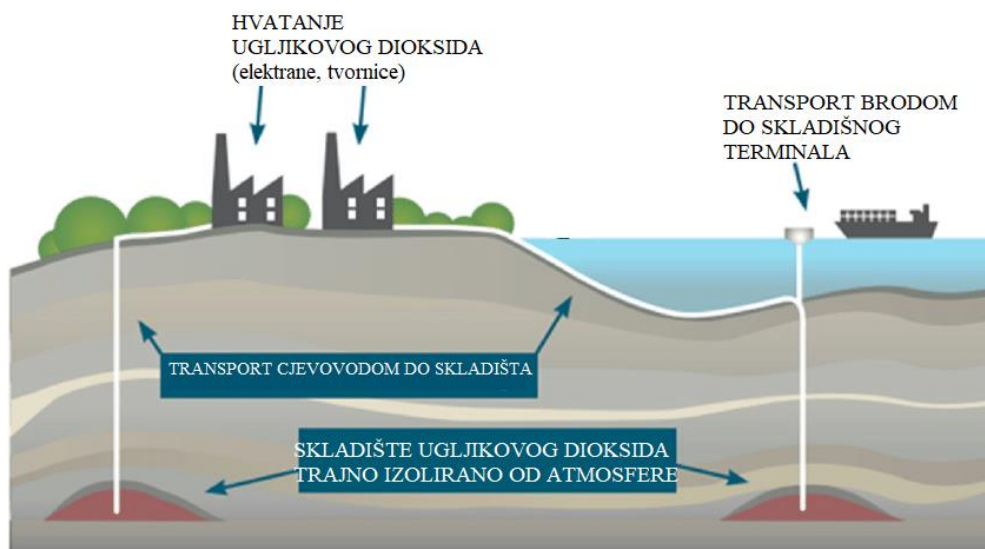
## 2. OPIS CCUS I CCS TEHNOLOGIJA

CCUS je tehnologija koja obuhvaća metode uklanjanja ugljikovog dioksida iz dimnih plinova i atmosfere nakon čega se on reciklira zbog ponovne upotrebe ili mogućeg sigurnog i trajnog skladištenja (slika 2-1.). Primjena CCUS tehnologije smatra se jednom od ključnih strategija ublažavanja klimatskih promjena (Tapia et al., 2018). Usvajanjem alternativnih izvora energije i energetske učinkovitih sustava smanjuje se mjera ugljičnog otiska, te se samim time smanjuje količina ugljikovog dioksida u atmosferi koja ima štetan utjecaj na klimu. Bez obzira na primjenu učinkovitih energetske rješenja mora se implementirati CCUS tehnologija radi postizanja ugljične neutralnosti. Proces započinje hvatanjem ugljikovog dioksida iz naftnih i plinskih rafinerija, elektrana, čeličana, cementara i drugih industrijskih postrojenja s visokim emisijama CO<sub>2</sub>. Razvija se tehnologija za hvatanje prije i nakon izgaranja, te tehnologija za izgaranje goriva s pomoću kisika. Ugljikov dioksid se pomoću cjevovoda, brodova, vlakom ili cisternama prevozi do mjesta u kojem se koristi ili trajno skladišti. Program upotrebe razvija tehnologije koje mogu pretvoriti sirovine koje sadrže ugljik u kemikalije, plastiku, goriva i građevinski materijal. U naftnoj industriji ugljikov dioksid se može utisnuti u naftna ležišta što dovodi do povećanog iscrpka nafte, a taj proces se koristi ukoliko se proizvodnja sirove nafte ne može izvesti na neki drugi način. Proces se naziva još i tercijskim pridobivanjem nafte (engl. *EOR- enhanced oil recovery*). Ugljikov dioksid može se utiskivati i u iscrpljena plinska polja s ciljem pridobivanja prirodnog plina, proces se naziva EGR (engl. *enhanced gas recovery*). Istraživanjem i razvojem tehnologije, sustava i strategije iskorištavanja ugljikovodika unaprijeđena je pretvorba ugljikovog dioksida kemijskim, mineraloškim, biološkim i fizičkim metodama koje dodaju vrijednost proizvodu i istovremeno rezultiraju neto smanjenjem CO<sub>2</sub> emisija. Pretvaranjem ugljikovog dioksida u proizvode smanjuje se količina koju treba pohraniti u skladišta, što skladištenje čini jeftinijim zahtijevajući manje bušotina i manje opreme za nadzor. Uhvaćeni ugljikov dioksid može se skladištiti na kopnu ili na obali u dubokim slanim vodonosnicima, u ugljenim i bazaltnim slojevima te slojevima šejla, ili utiskivati i skladištiti u ležišta ugljikovodika kao dio EOR/EGR procesa. Osnovni cilj uvođenja CCUS tehnologije je istražiti rizike i troškove te poboljšati učinkovitost skladištenja ugljikovog dioksida.



**Slika 2-1.** Proces hvatanja, upotrebe i skladištenja ugljikovog dioksida (CCUS)(IOGP, 2020)

CCS je tehnologija koja obuhvaća hvatanje ugljikovog dioksida iz elektrana, industrijskih postrojenja i atmosfere te ga trajno skladišti tako što se ugljikov dioksid utiskuje u geološke formacije koje sprječavaju povratak  $\text{CO}_2$  u atmosferu i prigušuju porast temperature (slika 2-2.) (Traverson, 2020). Skladištenjem ugljikovog dioksida CCS tehnologija može ublažiti globalno zatopljenje. Tehnologije hvatanja ugljikovog dioksida koje se koriste u CCS procesu su apsorpcija, adsorpcija, kemijske petlje i membransko odvajanje plina. Trenutno postoji 21 operativno CCS postrojenje, a ta se brojka može objasniti trenutnom ekonomskom neisplativosti zbog potrebnih visokih kapitalnih ulaganja, i povećanih operativnih troškova (International Energy Agency, 2021). U nekim zemljama geološki skladišni kapacitet je ograničen, ili je u nekim slučajevima dostupan samo na odobalnim lokacijama što povećava troškove transporta i utiskivanja (npr. Velika Britanija, Norveška, Brazil, Indija i Singapur).



**Slika 2-2.** Proces hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCS)(Choudhary, 2016)

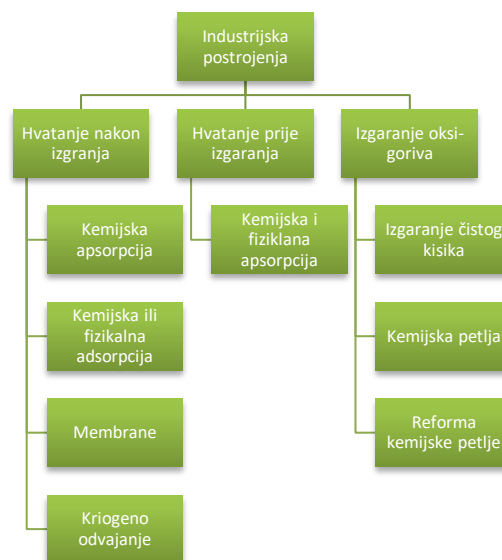
S obzirom na trenutnu neprofitabilnost CCS sustava, umjesto skladištenja ugljikovog dioksida može se razmotriti njegovo korištenje u vidu proizvodnje kemikalija, plastike, betona i goriva. Ovom metodom ugljikov dioksid može postati vrijedna sirovina koja opskrbljuje potražnju na manje zagađujući način za okoliš.

### 3. METODE HVATANJA, KORIŠTENJA I SKLADIŠTENJA UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Cilj CCUS tehnologije je hvatanje ugljikovog dioksida iz izvora kao što su elektrane i industrijska postrojenja s ciljem sprječavanja ispuštanja emisija u atmosferu. Zatim se uhvaćeni ugljikov dioksid skladišti ili koristi za proizvodnju komercijalnih proizvoda.

#### 3.1. Hvatanje ugljikovog dioksida

Elektrane, rafinerije, cementare, čeličane i druga postrojenja glavni su industrijski izvori ugljikovog dioksida. Preko 40% emisija ugljikovog dioksida uzrokovano je proizvodnjom električne energije u elektranama na fosilna goriva (Cuéllar-Franca i Azapagic, 2015). Zbog toga se primjena CCUS tehnologije najviše razmatra u tim sektorima. Uslijed raznolikosti industrijskih procesa tehnologija koja bi se primjenjivala ne bi bila jednaka za sva postrojenja. Na primjer ugljikov dioksid se neće hvatati na isti način iz elektrane i cementare. Tako postoje različite metode hvatanja koje su podijeljene u tri skupine: hvatanje nakon izgaranja, hvatanje prije izgaranja i hvatanje izgaranjem oksid-goriva (Slika 3-1.). Elektrane i naftne rafinerije su grana industrije koje su najbliže implementaciji sustava hvatanja ugljikovog dioksida zbog nižih troškova tehnologije koja se primjenjuje (Cuéllar-Franca i Azapagic, 2015).

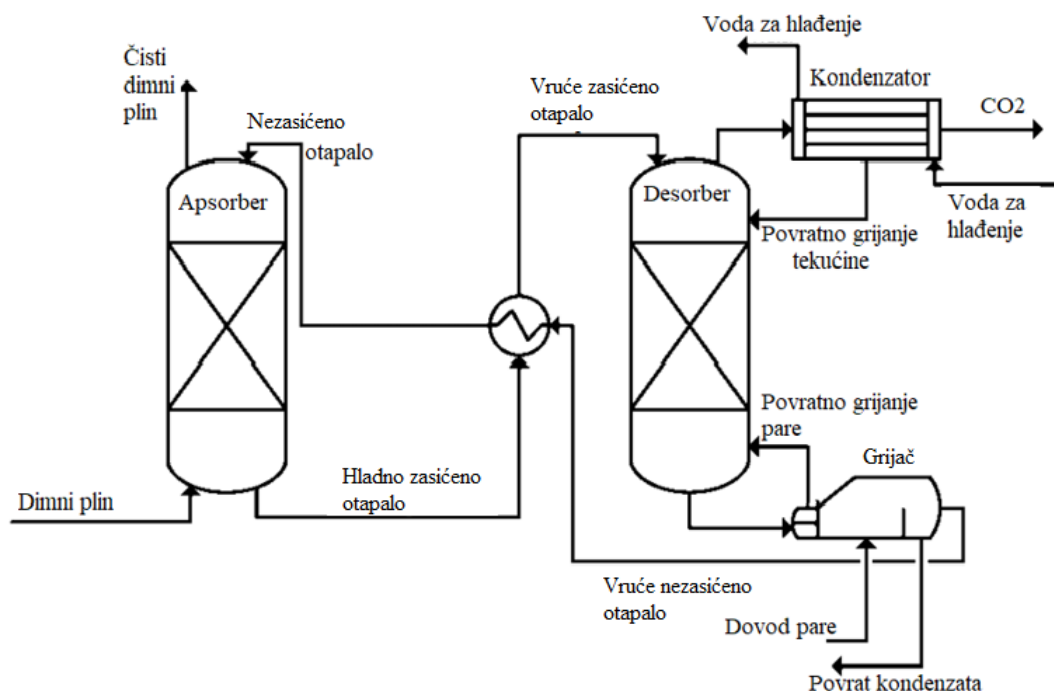


Slika 3-1. Podjela sustava hvatanja ugljikovog dioksida (Cuéllar-Franca i Azapagic, 2015)

### 3.1.1. Hvatanje ugljikovog dioksida nakon izgaranja

Ugljikov dioksid hvata se iz dimnih plinova koji su nastali sagorijevanjem goriva na bazi ugljika poput ugljena, nafte ili prirodnog plina. Hvatanje se može obavljati različitim metodama kao što su: apsorpcija kemijskim otapalima, fizikalna i kemijska adsorpcija, odvajanje membranama i kriogeno odvajanje. Jedan od najvećih izazova kod hvatanja nakon izgaranja je odvajanje relativno niske koncentracije ugljikovog dioksida od velike količine dušika u dimnim plinovima.

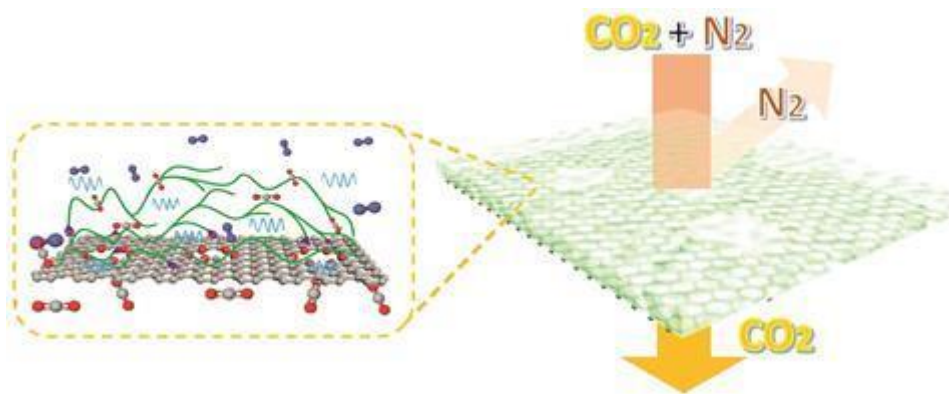
Tipičan postupak hvatanja nakon izgaranja je kemijskom apsorpcijom iz dimnih plinova. Apсорpcijska tekućina tj. otapalo se regenerira povećanjem temperature ili smanjenjem tlaka što dovodi do pucanja veze između otapala i ugljikovog dioksida. Na vrh apsorbera ulazi nezasićeno otapalo, otapalo kod kojeg je udio ugljikovog dioksida izrazito mali, i teče vertikalno niz stupac apsorberajući CO<sub>2</sub> iz dimnog plina koji je uveden na dnu apsorbera. Kada otapalo dosegne dno apsorbera naziva se zasićenim otapalom, udio ugljikovog dioksida je izrazito velik, i zagrijava se na putu do procesa regeneracije. Postrojenje za regeneraciju se sastoji od desorbera, kondenzatora na vrhu i grijača na dnu. Funkcija grijača je zagrijavanje pare do prikladne temperature da dovede do pucanja kemijske veze stvorene u apsorberu. Kondenzator osigurava dovod grijane tekućine i što čišći konačni proizvod (ugljikov dioksid)(Slika 3-2.)(MacDowell et al.,2010)



Slika 3-2. Postupak hvatanja CO<sub>2</sub> kemijskom apsorpcijom (MacDowell et al., 2010)

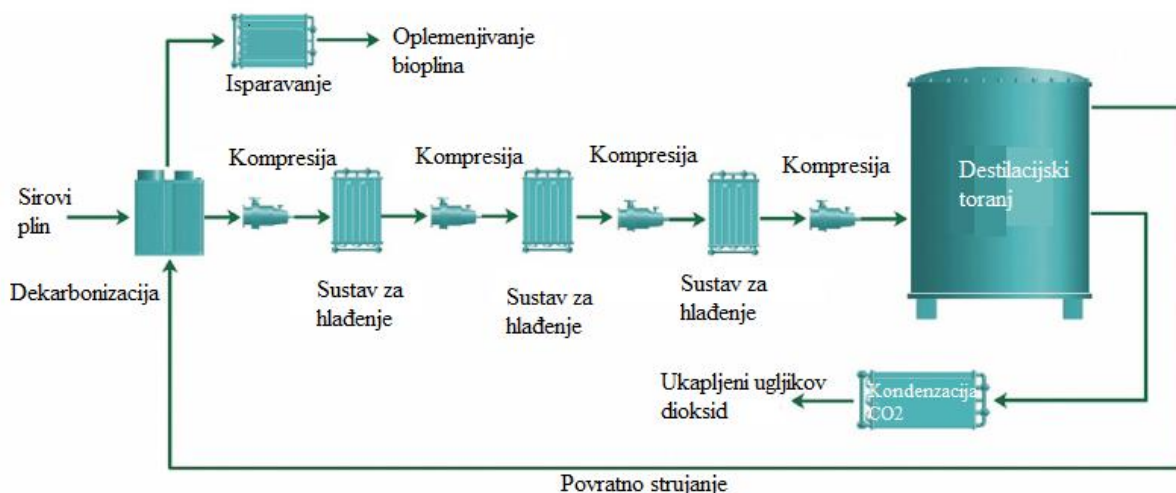
Osim hvatanja kemijskom apsorpcijom ugljikov dioksid se može hvatati kemijskom ili fizičkom adsorpcijom pomoću čvrstog sorbenta (npr. aktivni ugljen). Kao i kod otapala sorbenti se regeneriraju povećanjem temperature ili smanjenjem tlaka što dovodi do oslobađanja ugljikovog dioksida. Zbog nižeg toplinskog kapaciteta mogu imati nižu energiju regeneracije uspoređujući ih s otapalima. Tehnologija sorbenata je slabije razvijena i trenutno je u istraživanju ([www.netl.doe.gov](http://www.netl.doe.gov), 2021). Ciljevi istraživanja uključuju jeftine izdržljive sorbente koji imaju visoku selektivnost za ugljikov dioksid, visoku sposobnost adsorpcije ugljikovog dioksida, otpornost na oksidaciju i da mogu podnositi višestruke regeneracijske cikluse uz minimalno trošenje.

Postupak hvatanja pomoću membrana koristi propusne ili polupropusne materijale koji omogućavaju selektivni transport i odvajanje ugljikovog dioksida iz dimnih plinova (Slika 3-3.). Postupak ne uključuje skladištenje i rukovanje opasnim kemikalijama, već jednostavan rad, toleranciju na visoki sadržaj  $\text{SO}_x$  i  $\text{NO}_x$ , učinkovito hvatanje ugljikovog dioksida i smanjena upotreba postojećeg ciklusa pare u elektranama. Problem kod membrana je relativno nizak tlak ugljikovog dioksida u smjesi dimnih plinova. Daljnji razvoj membrana uključuje jeftine i izdržljive membrane koje imaju poboljšanu propusnost i toleranciju na onečišćenja iz dimnih plinova.



**Slika 3-3.** Filtriranje ugljikovog dioksida pomoću membrane (Royal Society of Chemistry, 2019)

Kriogeno odvajanje je proces koji se odvija pri vrlo niskim temperaturama, gdje se komponenta ulaznog plina počinje ukapljivati. Proces uključuje hlađenje plina na temperaturi nižoj od  $-73,3\text{ }^\circ\text{C}$  tako da se ugljikov dioksid može ukapljivati i odvojiti (Slika 3-4.)(Ghasem, 2020). Ukapljeni ugljikov dioksid spreman je za transport. Potreba za velikom količinom energije za sustav hlađenja nedostatak je kriogenog odvajanja.

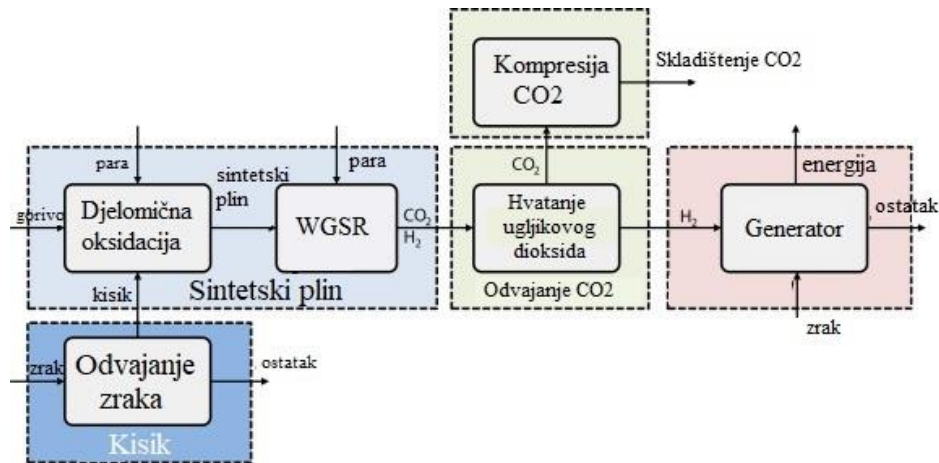


**Slika 3-4.** Postupak kriogenog odvajanja ugljikovog dioksida (Xie et al., 2020)

### 3.1.2. Hvatanje ugljikovog dioksida prije izgaranja

Postupak hvatanja prije izgaranja uključuje reakciju goriva s kisikom ili zrakom i/ili pare formirajući tako sintetski plin čije su komponente vodik i ugljikov monoksid. Ugljikov monoksid reagira s parom u katalitičkom reaktoru kako bi se dobila veća količina ugljikovog dioksida i vodika (engl. *water-gas shift reaction*). Zatim dolazi do odvajanja ugljikovog dioksida od vodika kemijskom ili fizikalnom apsorpcijom, a vodik se kasnije upotrebljava u kotlovima, pećima, plinskim turbinama i dr. (Slika 3-5.)

Hvatanje ugljikovog dioksida na bazi otapala uključuje kemijsku ili fizičku apsorpciju ugljikovog dioksida, povećanjem temperature i/ili smanjenjem tlaka prekida se veza apsorbenta i ugljikovog dioksida. Komercijalna otapala uspješno uklanjaju kisele plinove poput sumporovodika i ugljikovog dioksida iz visokotlačnih sintetskih plinova. Njihov nedostatak je visok tlak pare, velika viskoznost i niska selektivnost, a time imaju potrebu za rad na niskim temperaturama i velikom energijom. Cilj je razviti otapala veće selektivnosti kako bi se smanjio gubitak vodika, smanjenom viskožnošću i povećanom apsorpcijom ugljikovog dioksida pri visokim temperaturama kako bi se smanjio gubitak energije (www.netl.doe.gov, 2021).

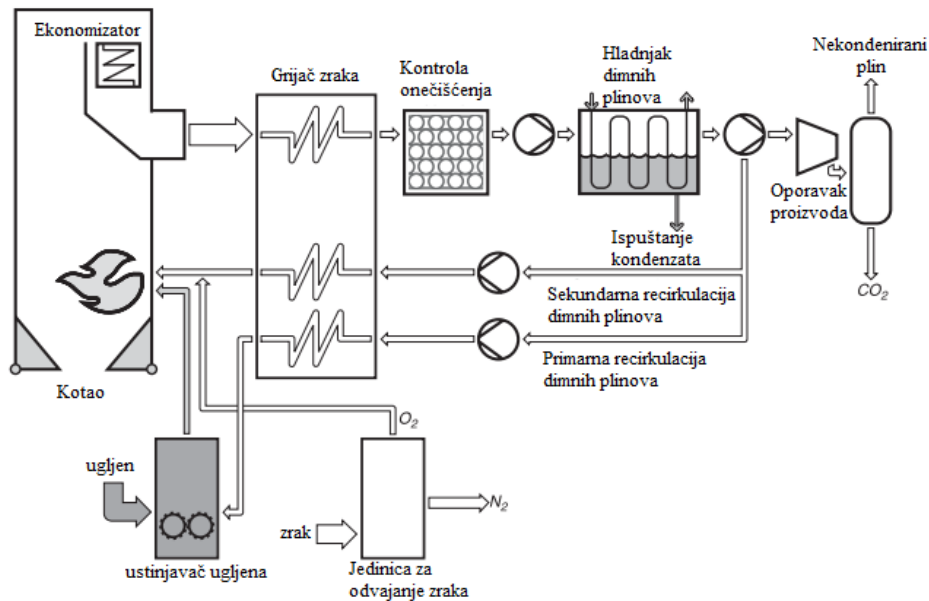


**Slika 3-5.** Postupak hvatanja CO<sub>2</sub> prije izgaranja (Jansen et al., 2015)

### 3.1.3. Izgaranje goriva pomoću kisika

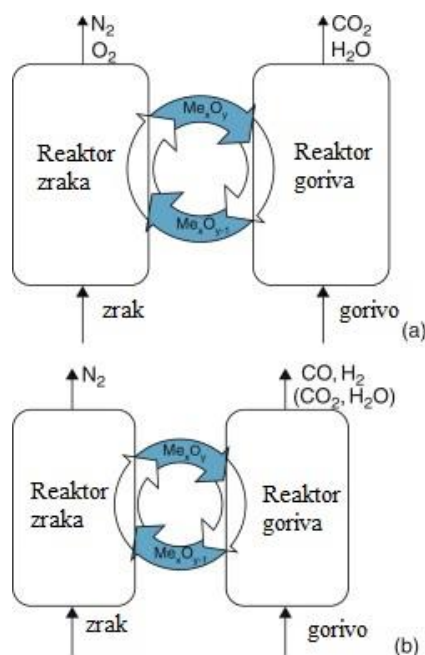
Proces izgaranja goriva pomoću kisika uklanja dušik iz dimnih plinova izgaranjem ugljikovodika, koristeći gotovo čisti kisik kao oksidans (Mathieu, 2010). Postoje tri glavne komponente za hvatanje ugljikovog dioksida izgaranjem goriva: jedinica za odvajanje zraka koja osigurava kisik za izgaranje, peć i izmjenjivač topline u kojima se odvija izgaranje i izmjena topline, te jedinica za hvatanje i kompresiju ugljikovog dioksida. Kotao je uređaj koji služi za pripremu i sagorijevanje goriva te prijenos topline izgaranja iz dimnih plinova na radne fluide kako bi se proizvela električna energija. Dimni plin se uglavnom sastoji od ugljikovog dioksida i vode, jer je dušik eliminiran. Zbog velike koncentracije ugljikovog dioksida nema potrebe upotrebljavati fizikalne sorbente ili kemijska otapala za odvajanje ugljikovog dioksida iz dimnih plinova. Jedinica za hvatanje ugljikovog dioksida obuhvaća višestupanjske procese kompresije i hlađenja u kojem se dimni plin suši i iz njega se odvajaju nečistoće kao što su kisik, dušik i argon (Slika 3-6.) (Zheng, 2011).





**Slika 3-6.** Proces izgaranja goriva s pomoću kisika (Zheng, 2011)

Druge metode hvatanja ugljikovog dioksida su izgaranje u kemijskoj petlji, CLC (engl. *Chemical looping combustion*) i reforma kemijske petlje, CLR (engl. *Chemical looping reforming*). Izgaranje kemijske petlje alternativa je izravnom izgaranju goriva za koju se smatra da će smanjiti troškove uhvaćenog ugljikovog dioksida po kilogramu, uglavnom zbog činjenice da struja dimnog plina koja napušta reaktor je gotovo čisti ugljikov dioksid (Slika 3-7(a)). Glavna razlika između CLC i CLR metoda je da kod CLR kao konačni proizvod dobijemo sintetički plin ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ), zbog nedostatka zraka u reaktoru zraka (Slika 3-7(b))(Reay et al., 2013). Obje metode koriste metalni oksid za prijenos kisika selektivno od reaktora zraka do komore za izgaranje.



**Slika 3-7.** Shematski prikaz izgaranja kemijske petlje (a) i reforme kemijske petlje (b) (Reay et al., 2013)

Ne očekuje se da će ijedna od ovih metoda biti u potpunosti primjenjiva sve do 2030. godine.

### 3.2. Korištenje ugljikovog dioksida

Korištenje ugljikovog dioksida podrazumijeva tehnologije koje mogu pretvoriti sirovine koje sadrže ugljik kao što je ugljikov dioksid u proizvode veće vrijednosti uključujući kemikalije, plastiku, goriva i građevinski materijal (npr. beton). Jedna od najčešće primijenjenih tehnologija korištenja ugljikovog dioksida je EOR i EGR, a može se primjenjivati i u proizvodima svakodnevne primjene kao što su: oprema za suzbijanje vatre, karbonizacija pića, proizvodnja uree za gnojiva i sredstva za precizno čišćenje elektronike. Kao što je već navedeno u drugom poglavlju, razvijaju se tehnologije korištenja ugljikovog dioksida mineralnim, kemijskim, fizičkim i biološkim putem. Istraživanje je usredotočeno na smanjenje troškova i energetske prepreke kako bi ti procesi postali ekonomičniji. Cilj je smanjiti količinu ugljikovog dioksida koja se treba skladištiti što čini skladištenje jeftinijim jer se smanjuje broj bušotina i opreme za nadzor.

Primjer direktnog korištenja ugljikovog dioksida je EOR/EGR, gdje se ugljikov dioksid koristi za proizvodnju nafte/prirodnog plina iz ležišta ugljikovodika. Općenito, EOR tehnologija uključuje utiskivanje različitih sredstava u ležište kao što su ugljikov dioksid, prirodni plin, dušik, polimeri i površinski aktivne tvari kako bi se povećao iscrpak nafte.

EOR-om se može izdvojiti 30-60% više sirove nafte u odnosu na primarne i sekundarne metode (Cuéllar-Franca i Azapagic, 2015). Većina utisnutog ugljikovog dioksida se zajedno sa sirovom naftom vraća na površinu te se zbog toga razmatra opcija ponovnog utiskivanja proizvedenog ugljikovog dioksida u ležište.

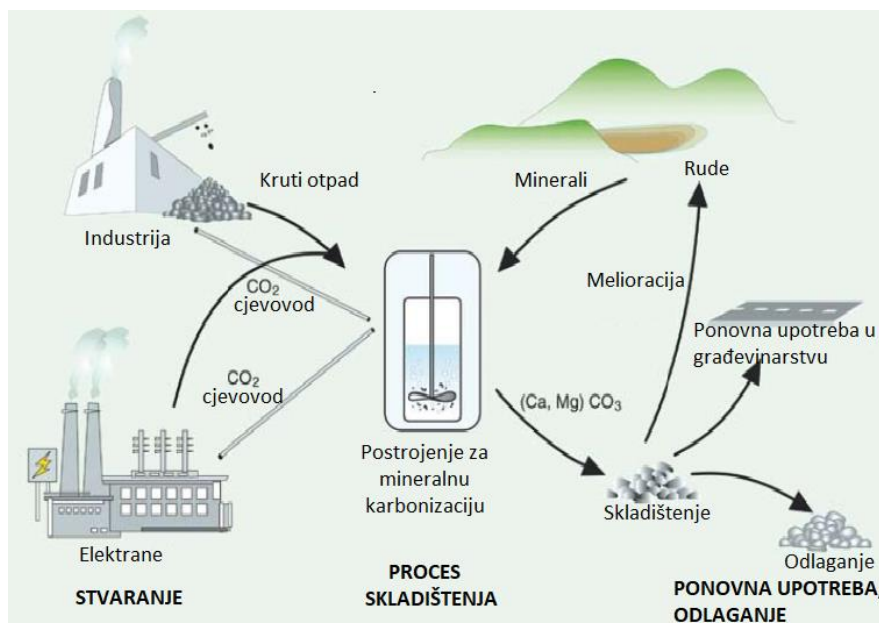
Ugljikov dioksid se također može koristiti u proizvodnji kemikalija (metan, metanol, sintetski plin, urea i mravlja kiselina). Iako ugljikov dioksid može zamijeniti petrokemijsku sirovinu za proizvodnju kemikalija i goriva njegova pretvorba zahtjeva puno energije i veliku selektivnost katalizatora jer je ugljikov dioksid termodinamički vrlo stabilan. Istraživanja se usredotočuju na sintezu materijala s duljim vijekom trajanja kao što su minerali karbonata koji se koriste u građevinarstvu.

Mineralna karbonizacija je kemijski proces u kojem ugljikov dioksid reagira s metalnim oksidima u raznim mineralima, a produkt toga su drugi karbonatni minerali. Prikladni materijali za proces karbonizacije mogu biti prirodni kao što su silikatne stijene, minerali serpentina i olivina ili ostatci šljaka iz proizvodnje čelika i pepela s industrijskih postrojenja. Proces karbonacije se može odvijati in-situ utiskivanjem ugljikovog dioksida u geološke formacije bogate silikatima, te je taj proces sličan geološkom skladištenju ili ex-situ na pogonima za kemijsku preradu nakon vađenja i prethodne obrade silikata. Industrijski ostatci se mogu karbonirati na postrojenju gdje su i proizvedeni. Ex-situ karbonacija uključuje obradu minerala što zahtjeva dodatan unos energije koji je teško kompenzirati s energijom koja se oslobađa reakcijom karbonacije (Slika 3-8.). Tehnologija je energetski intenzivna zbog:

1. pripreme krutih reaktanata uključujući rudarenje, transport i drobljenje,
2. obrade, uključujući ekvivalentnu energiju za upotrebu, recikliranje i moguće gubitke aditiva i katalizatora,
3. odlaganja karbonata i nusproizvoda.

Značaj ovih triju parametara ovisi o izvoru metalnih oksida (prirodni silikati ili industrijski otpad).

Proces karbonizacije još uvijek je nerazvijen i u fazi je istraživanja. Osnovni problem predstavlja brzina reakcije koja bi bila potrebna s obzirom na velike količine CO<sub>2</sub> koji se treba vezati u nove minerale.



**Slika 3-8.** Proces ex-situ mineralne karbonizacije (Lempart-Drozd i Labus, 2015)

### 3.3. Transport ugljikovog dioksida

Transport ugljikovog dioksida odvija se u četiri stanja: tekuće, plinovito, kruto i superkritično. Za komercijalni prijevoz koriste se cisterne, cjevovodi te brodovi za tekući i plinoviti ugljikov dioksid.

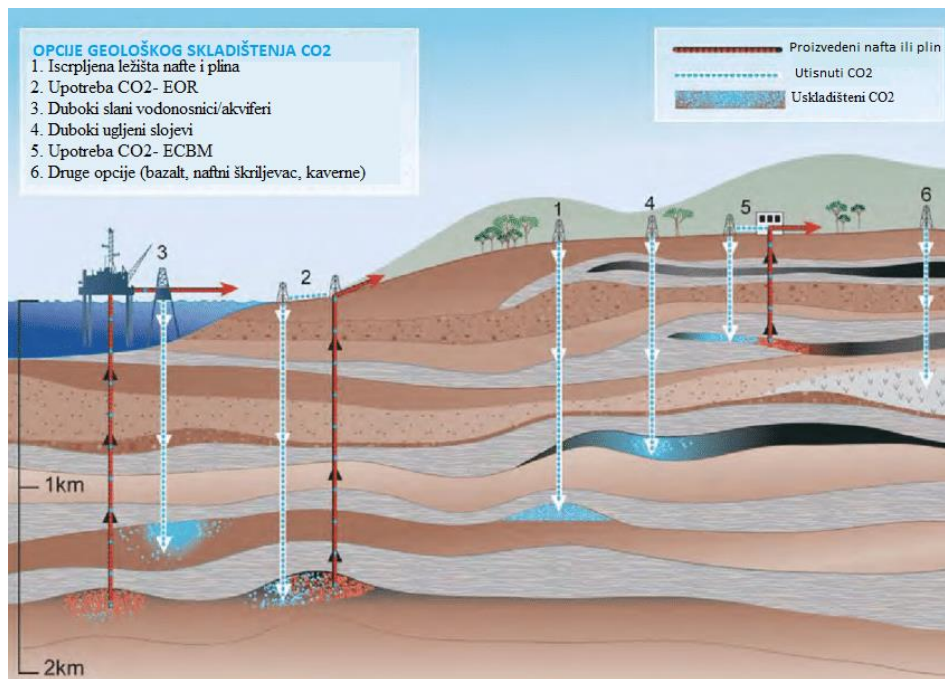
Kada je potrebno transportirati velike količine ugljikovog dioksida na dalekim trasama koriste se cjevovodi. Cjevovodi obično prenose velike količine prirodnog plina, nafte, kondenzata i vode na udaljenosti od tisuću kilometara na kopnu ali i u moru. Polazu se u pustinjama, planinskim lancima, gusto naseljenim područjima, obradivim površinama, a što se tiče mora i oceana, polazu se do dubine od 2200 metara (Metz et al., 2005). Prilikom transporta poželjno je da je ugljikov dioksid suh i bez sumporovodika kako bi se smanjila mogućnost pojave korozije. Cjevovod koji prolazi kroz naseljeno područje zahtjeva posebnu pozornost na zaštitu od pretlaka i na pravovremenu detekciju curenja. Jednom kada je ugljikov dioksid dehidriran i zadovoljava kriterijima transporta, mjeri se njegova količina i transportira se do određenog mjesta. Svaki cjevovod opremljen je najsuvremenijom tehnologijom koja mjeri količine ugljikovog dioksida, te sustavom za nadzor mjerenje i upravljanje industrijskim sustavima, SCADA (engl. *Supervisory Control and Dana Acquisition*), koji služi za mjerenje padova tlaka i praćenje opreme ugrađene zbog hitnih slučajeva.

Ukapljeni prirodni plin i naftni plin kao što su propan i butan rutinski se prevoze marinskim tankerima. Ugljični dioksid se prevozi na isti način, ali u manjim količinama zbog niske potražnje. U svijetu postoje tek četiri mala tankera koja služe za prijenos ugljikovog dioksida (Metz et al., 2005). Brodovi služe za prijevoz ukapljenog ugljikovog dioksida iz velikih točkastih izvora ugljikovog dioksida poput postrojenja amonijaka u priobalju sjeverne Europe. Norveška i Japan trenutno osmišljavaju dizajn za veće brodove. Ugljični dioksid se hvata na kopnu zbog čega morski transportni sustav uključuje privremeno skladištenje na kopnu i objekte za utovar. Ako je mjesto isporuke na kopnu, ugljikov dioksid se iskrcava u spremnike za privremeno skladištenje, a ako je mjesto isporuke na moru (opcija odobalnog skladištenja), iskrcaj se može obaviti na platformi, plutajućim skladištima ili direktno u sustav za skladištenje.

### 3.4. Skladištenje ugljikovog dioksida

Hvatanjem i skladištenjem ugljikovog dioksida nastoje se smanjiti emisije ugljikovog dioksida u atmosferu. Postoje dvije vrste skladištenja: podzemno geološko skladištenje na kopnu i odobalno.

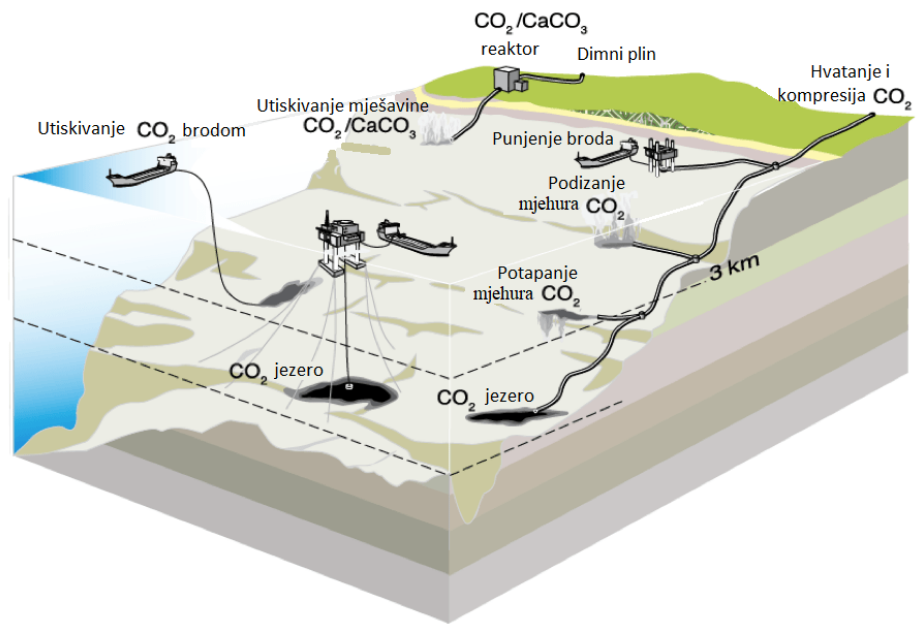
Ugljik je jedan od glavnih elemenata na Zemlji, a u litosferi se većina ugljika nalazi u ležištima ugljena, nafte, plina ili organskih šejlova, a daleko najviše u slojevima karbonatnih stijena. Unazad 10 godina, geološko skladištenje je preraslo iz koncepta ograničenog interesa u važnu opciju skladištenja s velikim potencijalom smanjenja emisija ugljikovog dioksida. Istraživanja su napredovala i demonstracijski i komercijalno, te se razina sigurnosti tehnologije povećala. Ako se želi iskoristiti potencijal geološkog skladištenja, tehnika geološkog skladištenja mora biti sigurna, ekonomski isplativa, ekološki održiva i sposobna za široku primjenu. Da bi se ugljikov dioksid geološki skladištio prvo se mora komprimirati, obično se komprimira u superkrično stanje. Povećanjem tlaka s dubinom dolazi do povećanja gustoće fluida, na oko 800 metara ili više utisnuti ugljikov dioksid će biti u gustom superkričnom stanju. Ugljikov dioksid se može geološki skladištiti u nekoliko različitih opcija kao što su: iscrpljena ležišta ugljikovodika, ležišta ugljena, naftna ležišta (EOR), nezasićena plinska ležišta, duboki slojevi ugljena i duboki slani vodonosnici (slika 3-9.).



**Slika 3-9.** Opcije skladištenja ugljikovog dioksida u dubokim podzemnim geološkim formacijama (Bland, 2009)

Podzemno geološko skladištenje je moguće i na kopnu i odobalno, a odobalnim područjima se pristupa pomoću cjevovoda s obale ili odobalnih platformi. Kontinentalni šelf i neki okolni dubokomorski sedimentni bazeni su potencijalna odobalna skladišta, ali je većina sedimenata na dnima oceana daleko od obale pretanka i nepropusna te nisu pogodna za skladištenje (Metz et al., 2005). Guste nakupine sedimenata, propusne stijenske formacije zasićene vodom, regionalne formacije izolatorskih stijena niske poroznosti i propusnosti i strukturalna jednostavnost su karakteristike bazena pogodnih za skladištenje ugljikovog dioksida. Osim skladištenja u sedimentnim stijenama razmatrano je i skladištenje u kavernama, bazaltu i organski bogatim škriljcima. Dugi niz godina u podzemlje se odlažu neželjene kemikalije, onečišćujuće tvari ili nusproizvodi iz proizvodnje nafte s ciljem poboljšanja proizvodnje nafte i plina ili za podzemno odlaganje otpada u iscrpljene formacije. Utiskivanje ugljikovog dioksida je u iznimno niskoj mjeri što se pokušava promijeniti primjenom CCUS tehnologije. Kako bi se osigurala sigurnost skladištenja, mjesta skladišta moraju biti dobro dizajnirana i upravljiva kako bi se smanjila opasnost od ispuštanja. Slijedom toga moraju se odrediti potencijalna mjesta ispuštanja te se moraju uspostaviti postupci i operativni standardi kao što su nadzor, mjerenje i uvjeti provjere.

Uhvaćeni ugljikov dioksid mogao bi se utiskivati na velike dubine u hladne stagnantne vode oceana gdje bi stoljećima ostao izoliran od atmosfere. Transport ugljikovog dioksida odvija se putem cjevovoda ili tankera do skladišta oceana (slika 3-10.). Predviđanja su da će oceani preuzeti većinu oslobođenog ugljikovog dioksida te će se on otapati u oceanu i miješati s dubokim oceanskim vodama. 70% Zemlje zauzimaju oceani, zbog toga ne postoji ograničenje kapaciteta, odnosno količine ugljikovog dioksida koji bi se mogao smjestiti u ocean. Utiskivanje do nekoliko GtCO<sub>2</sub> uzrokovalo bi promjenu kemijskih svojstava oceana na području utiskivanja, dok bi utiskivanje stotina GtCO<sub>2</sub> uzrokovala promjenu duž cijelog oceana. Eksperimenti su pokazali da ugljikov dioksid može naštetiti organizmima u oceanu. Na dubinama većim od 3 km, ugljikov dioksid se komprimira i postaje gušći od morske vode i polako tone prema morskom dnu (Metz et al., 2005). Nakon što potone na morsko dno stvara podvodni bazen na dnu oceana i ostaje zarobljen. Procjena troškova tehnologije za skladištenje ugljikovog dioksida u oceanima bi trebala biti manja u odnosu na troškove hvatanja i transporta do oceana. Povećanjem alkalnosti oceana moguće je povećati količine utiskivanja ugljikovog dioksida koje bi imale manji utjecaj na morske organizme, to se može postići otapanjem karbonatnih minerala u ocean. Posljedice na okoliš, prihvaćanje javnosti, implikacija postojećih zakona, zaštitne mjere i praksa samo su neki od elemenata koje je potrebno sagledati kako bi se moglo sigurno skladištiti ugljikov dioksid u ocean. Najveća prepreka realizacije oceanskog skladištenja ugljikovog dioksida je velika opasnost od podmorskih klizišta u tektonskim jarcima. Ona bi mogla gotovo u trenutku uništiti podvodna skladišta ugljika, pa bi se CO<sub>2</sub> gotovo u trenutku vratio u atmosferu.



**Slika 3-10.** Strategije skladištenja u oceanima (Hume, 2018)



#### 4. GASSNOVA

Gassnova je norveško državno poduzeće koje vodi norveško Ministarstvo nafte i energije. Norveške vlasti osnovale su Gassnovu 2005. godine s ciljem razvoja tehnologije i znanja povezanih s hvatanjem i skladištenjem ugljikovog dioksida (CCS)(Gassnova, 2020a). Gassnova je zadužena za upravljanje programom za istraživanje i financiranje (CLIMIT), te za osiguravanje ispitivanja i razvoja CCS tehnologije u zato predviđenom centru, Tehnološki centar Mongstad (engl. *Technology Centre Mongstad- TCM*). CLIMIT i TCM su glavni elementi realizacije prvog europskog projekta za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida nazvanog Longship CCS.

Politička platforma „Soria Moria declaration“ je 2005. godine izjavila da će: „Vlada Norveške osigurati uspostavljanje postrojenja za uklanjanje ugljikovog dioksida u Kårstøu i da će pružiti financijsku potporu kako bi se ostvario cilj“ (Gassnova, 2020b). Sljedeći vladin korak je bilo uspostavljanje transporta i postrojenja za utiskivanje ugljikovog dioksida u geološka skladišta. Krajem 2005. godine pokrenuta su tri projekta, a uloga Gassnove je bila suradnja s Gasscom i Norveškom naftnom upravom. 2007. godine započinje planiranje testnog centra između Gassnove i pet industrijskih tvrtki od kojih je Statoil bio izvršni voditelj projekta. Partneri TCM-a donijeli su investicijsku rezoluciju 2009. godine nakon što su dobili odobrenje vlade i Stortinga (Norveška skupština). Daljnjom suradnjom Gassnove i Statoila uslijedila je investicijska odluka u planiranju izgradnje TCM-a. U razdoblju 2009-2012. godine izgrađen je najfleksibilniji testni centar tehnologije za hvatanje ugljikovog dioksida. Smatralo se da je izgradnja TCM-a prekretnica za postizanje napretka u razvoju klimatske tehnologije za cijeli svijet. 2014. godine vlada postavlja novi cilj razvoja tehnologije i smanjenje troškova koje bi se postiglo cjelovitim postrojenjem za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida do 2020. godine, a 2015. godine Gassnova dostavlja studiju mogućih CCS projekata u Norveškoj. Svrha studija je bila pokazati izvedivost barem jednog CCS lanca s pripadajućim troškovima izvedbe, a lanac je uključivao hvatanje, transport i skladištenje ugljikovog dioksida. Statoil (današnji Equinor) proveo je studiju izvedivosti skladištenja ugljikovog dioksida na tri različite lokacije na Norveškom kontinentalnom pojasu. Područje Smeaheie (istaknuti tektonski blok smješten na platformi Horda, identificirano kao potencijalno podzemno skladište Sjeverno more) smatrano je najboljim rješenjem za skladištenje ugljikovog dioksida. 2017. godine dogovoreno je da se ugljikov dioksid iz jednog ili više postrojenja

transportira brodovima do skladišta u Kollsnesu, a dalje cjevovodima do geološke formacije na području Smeaheie u Sjevernom moru.

Norveški projekt može pridonijeti realizaciji nekoliko novih projekata hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida u Europi. Krajem 2020. godine Ministarstvo nafte i energetike, Gassnova i Europska komisija sazvali su konferenciju na kojoj su sudjelovali norveški ministar nafte i energije, ministar klime i okoliša i glavni tajnik UN-ove klimatske konvencije, UNFCCC (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*). Potpisano je nekoliko dokumenata između tvrtke Equinor, u ime partnera projekta Longship CCS, i raznih europskih industrijskih tvrtki. Prepoznato je da je hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida jedan od važnih projekata za postizanje klimatske neutralnosti u Europi do 2050. godine.

Razvoj i demonstracija CCS programa postiže sve veću međunarodnu suradnju. Također, fokus CCS programa više nije samo na hvatanju ugljikovog dioksida iz plinskih elektrana već do izražaja dolaze i drugi izvori emisija iz industrijskih postrojenja. 2019. godine započinju novi pregovori koji produžuju rad TCM-a za još tri godine. Postoje veliki interesi za ispitivanja na TCM-u, a na jesen 2019. godine potpisani su ugovori s dvije američke kompanije: Membrane Technology and Research (MTR) i Technology development approach (TDA) Research. Ovo je prvi puta da TCM testira membransku tehnologiju, te je dio TCM-a trebao biti prenamijenjen kako bi se mogli povezati ispitni moduli navedenih kompanija. U proljeće 2020. godine, norveška vlada i industrijski partneri, Total, Shell i Equinor, potpisali su sporazum koji osigurava rad TCM-a do 2023. godine.

#### 4.1. CLIMIT program

CLIMIT program je norveški nacionalni program za istraživanje, razvoj i demonstraciju tehnologije hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida, odnosno to je projekt čiji je primarni cilj razvoj tehnologije i rješenja za CCS pružanjem financijske potpore projektima. Projekti bi trebali razviti znanje, stručnost, tehnologiju i rješenja koja mogu pridonijeti smanjenju troškova i međunarodnoj primjeni CCS-a, te iskoristiti nacionalne prednosti i razvijati novi koncept tehnologije i usluga s komercijalnim i međunarodnim potencijalom.

Istraživačke institucije i tvrtke iz Norveške zajedno s međunarodnim partnerima mogu sudjelovati u financiranju programa. Program financira norveška vlada godišnjim proračunom od 24 milijuna €. Do sada je osigurano oko 120 milijuna € za oko 200 projekata koja pokrivaju osnovna istraživanja, tehnološki razvoj i demonstracijske projekte (Bekken et al., 2013)

Strategijski proces CLIMIT-a bazira se na dvije različite perspektive: komercijalnu, identificiranje pokretača i prepreka CCS-a, i tehnološku, utvrđivanje trenutnog tehnološkog statusa i potencijala. Ovaj proces uključuje suradnju s vanjskim stručnjacima i članovima odbora CLIMIT programa. Postavljeno je sedam točaka koje predstavljaju osnovu za novu strategiju CLIMIT-a:

1. Kratki tehnološki status i potencijal
2. Analiza tržišta
3. Trošak CCS-a
4. Politika i propisi
5. Međunarodni planovi za energiju i CCS
6. Trenutna infrastruktura i područja za testiranje
7. Inovativni procesi

1. Apsorpcija je najrazvijenija tehnologija za hvatanje ugljikovog dioksida nakon izgaranja, dok se ostale tehnologije temelje na aminokiselinskoj soli i karbonatnim otapalima (Bekken et al., 2013). Membranski procesi su u procesu razvoja odnosno istraživanja. Ugljikov dioksid se svakodnevno transportira cjevovodima i brodovima stoga je potrebno analizirati čimbenike koji mogu smanjiti troškove ulaganja i rada te poboljšati sigurnost i operativnu pouzdanost. Potrebno je prikupiti što više informacija i iskustva vezanih za sigurno skladištenje kako bi se postiglo javno prihvaćanje istog. Razvoj tehnologije za skladištenje ugljikovog dioksida trebao bi maksimizirati korištenje raspoloživog skladišnog kapaciteta s istodobnom kontrolom tlaka. Važno je proučiti lokalne i male utjecaje na okoliš ukoliko dođe do curenja iz skladišta. Kombinacija EOR-a i skladištenja ugljikovog dioksida se istražuje kako bi se ubrzala realizacija CCS projekta.
2. Analiza tržišta podijelila je sudionike na tri glavne kategorije: vlasnici točkastih izvora i potencijalni korisnici CCS tehnologije (naftne kompanije, elektroprivrede i ostale kopnene industrije), dobavljači tehnologije i pružatelji usluga, i istraživačke institucije. Većina naftnih kompanija CCS projekt smatra tehnologijom koja

omogućava proizvodnju nafte i plina. Najčešći primjer CCS tehnologije je odvajanje ugljikovog dioksida iz proizvedenog prirodnog plina i EOR. Statoil i Shell su tvrtke koje najviše sudjeluju u CLIMIT projektima, a osim toga i suvlasnice su TCM-a. Dobavljači tehnologije su obično male start-up kompanije (tvrtka stvorena s namjerom da istraži repetitivne i skalabilne poslovne modele), a kompanija Aker vodi jedan od najvećih CLIMIT projekata (TCM). Norveška sveučilišta i istraživačke institucije su najčešća skupina sudionika CLIMIT projekta, prednjače u istraživanjima CCS-a. Njihov najveći izazov je pronaći partnere koji bi sufinancirali njihove projekte.

3. Cjelovito postrojenje za CCS projekt tek bi trebalo biti izgrađeno, a procjena troškova je neizvjesna. Sedamdesetih godina trošak desulfurizacije dimnih plinova iz elektrana bio je podcijenjen, a nakon desetak godina troškovi su pali čak 50%. Nedavne međunarodne procjene troškova pokazuju trend porasta istih, a procjene norveških troškova bile su još i veće. Glavna prepreka je CCS-a je cijena. Smanjenje troškova postiže se ranom demonstracijom. Prioritet treba dati istraživanju i razvoju novih tehnologija.
4. Norveška vlada usvojila je određene propise koje bi mogle potaknuti na ulaganje u CCS. Sve nove kopnene plinske elektrane bi trebale primijeniti CCS tehnologiju. Što se tiče naftne industrije, 1991. godine utvrđena je štetnost emisije ugljikovog dioksida ispuštenog iz obalnih postrojenja nafte i plina te je uveden porez na ugljik (engl. *carbon tax*). To je pridonijelo provedbi skladištenja ugljikovog dioksida. Osnovni istraživački projekti CLIMIT-a mogu u potpunosti biti financirani državnim proračunom, dok projekti klasificirani kao industrijski razvoj i pilot projekti dobiju 50%, odnosno 25% financijske potpore države. Preostalih 50-75% izazovno je financirati, pogotovo ako se radi o projektima poput CCS-a koji su sve bliže komercijalizaciji. Biti će potrebno uravnotežiti financiranje kako bi se povećala privlačnost CLIMIT projekata koji su u demonstracijskoj fazi. (Bekken et al., 2013)
5. Važnost CCS projekta ublažavanju klimatskih promjena dala je IEA (engl. *International Energy Agency*). IEA-ini planovi uključuju uvođenje 100 međunarodnih CCS lanaca do 2020. godine, koji su trenutno u procesu razrade. Planovi za EU ukazuju da se CCS-om može pridonijeti s čak 32% ciljanog smanjenja ugljikovog dioksida do 2050. godine. (Bekken et al., 2013)

6. Postoji nekoliko objekata za hvatanje ugljikovog dioksida nakon izgaranja s kapacitetom od 0,088 do 87,6 kt ugljikovog dioksida godišnje (Bekken et al., 2013). Postrojenja su prvenstveno primjenjivana za ispitivanje otapalima, a razvijena su i postrojenja za kemijsku petlju i oksid goriva. Za transport koriste se platforme i cijevovodi u kojima je omogućeno dvofazno protjecanje. Postoje dva pokusna skladišta u kojima se nadziru metode migracije utisnutog ugljikovog dioksida i različite metode nadzora curenja. Laboratorijska infrastruktura i mjesta za testiranje izgrađena su posebno za primjenu CCS projekta. Norveško sveučilište za znanost i tehnologiju u suradnji s tvrtkom za industrijska i tehnička istraživanja, SINTEF (nor. *Selskapet for INdustriell og TEknisk Forskning*), odgovorna je za koordinaciju sustava Europske laboratorijske infrastrukture za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida.
7. Visoki investicijski i operativni troškovi najveći su izazov CCS-a. Daljnji razvoj CCS-a zahtjeva razvoj novih tehnologija i konstantnih istraživanja u laboratorijima. Međunarodna suradnja bi također trebala biti ojačana. CCU (engl. *Carbon Capture Utilisation*) se uvodi kao moguće rješenje „nadogradnje“ CCS projekta, a s time se potiče i razvoj novih tehnologija. Trenutno ne postoji preferirana metoda hvatanja ugljikovog dioksida, a CLIMIT može istražiti moguća rješenja za budući razvoj CCU-a.

Ciljevi CLIMIT programa su smanjenje troškova i međunarodna primjena CCS-a, primjena CCS-a u Norveškoj i iskorištavanje potencijalnih lokacija za skladištenje ugljikovog dioksida u Sjevernom moru, te razvoj novih tehnologija. Norveška ima veliki potencijal skladištenja ugljikovog dioksida u kojem mogu skladištiti i druge europske zemlje. Norveška industrija i istraživački timovi mogu pružiti usluge nacionalnoj i međunarodnoj industriji. Projekti podržani CLIMIT-om trebali bi pridonijeti daljnjem razvoju istraživačke infrastrukture. Razvoj tehnologije za hvatanje ugljikovog dioksida iz plinskih elektrana jedan je od glavnih prioriteta CLIMIT-a.

#### 4.2. TCM

Tehnološki centar Mongstad, smješten pored rafinerije Statoil u Mongstadu, Norveška, najveći je i najfleksibilniji svjetski ispitni centar za razvoj tehnologije hvatanja ugljikovog dioksida. TCM-ovi partneri su Gassnova (75,12%-predstavlja norvešku vladu), Statoil (20%), Norske Shell (2,44%) i Sasol (2,44%). Godine 2012. TCM ulazi u operativnu fazu

(De Koeijer et al., 2011). Cilj je uspostaviti pokazatelje uspješnosti i promovirati tehnološku standardizaciju, istovremeno smanjujući tehničke, ekološke i financijske rizike i potaknuti razvoj tržišta.

TCM ima dobru reputaciju koja je stečena na javnim istraživanjima i visokokvalificiranom radnom snagom. Pružene su mnoge konzultantske usluge za brojne projekte hvatanja ugljikovog dioksida, kao što je Longship CCS.

Jedno od glavnih ispitnih postrojenja je vrlo fleksibilno i dobro instrumentiran pogon amina. Pogon je dizajnirala i izgradila tvrtka Aker te ga je prilagodila raznim tehnologijama s mogućnošću obrade do 60000 m<sup>3</sup>/h dimnog plina. (Flø et al., 2013). Dizajn je vrlo fleksibilan i sadrži asposrber s više odjeljaka i dva desorbera različitog promjera. Postrojenje testira tehnologiju za hvatanje ugljikovog dioksida na bazi otapala, te se mogu testirati različita otapala kao što su: monoetanolamin i poboljšano otapalo koje sadrži smjese primarnih, sekundarnih i tercijarnih amina. Testiraju se performanse tehnologije i otapala, te tehnologija koja smanjuje emisije ugljikovog dioksida i utjecaj amina i otapala na okoliš. Cilj je testirati, provjeriti i primijeniti tehnologije za hvatanje ugljikovog dioksida koje su ekonomski isplative.



**Slika 4-1.** Testni centar Mongstad (<https://gassnova.no/en/technology>, 2021)

#### 4.3. Longship CCS

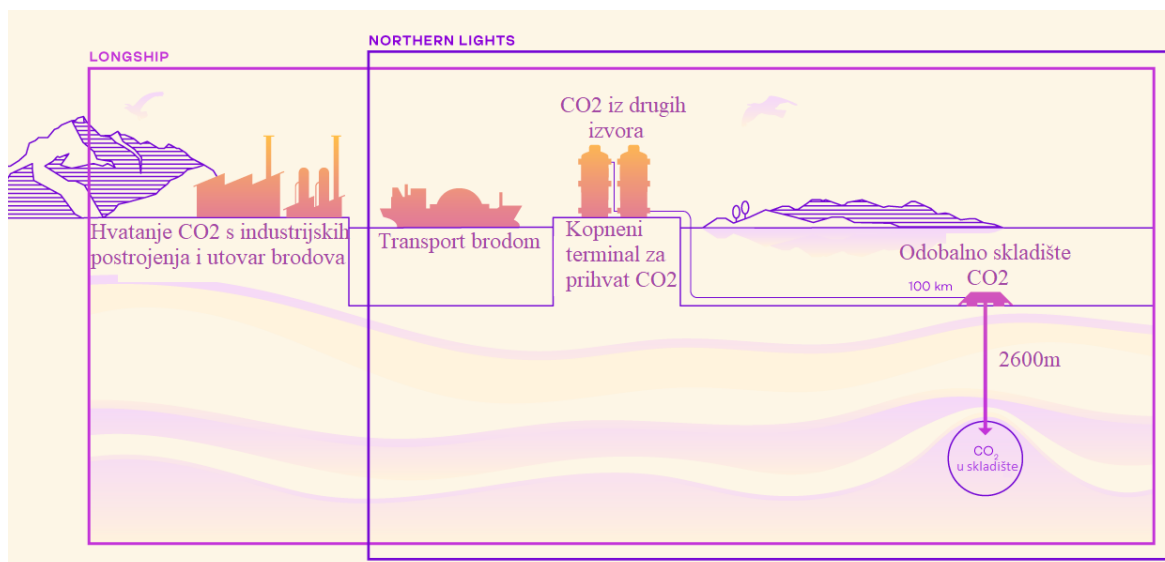
Longship (nor. *Langskip*) je naziv za norveški projekt hvatanja, transporta i skladištenja ugljikovog dioksida, odluku o imenu je donijela norveška vlada. Projekt treba biti isplativo rješenje hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida, te isplativ razvoj tehnologije koju svi mogu koristiti. Dugoročni cilj projekta je pridonijeti potrebnom razvoju CCS-a, kako bi se udovoljilo dugoročnim klimatskim ciljevima u Norveškoj ali i u cijeloj Europi na

ekonomičan način. Ciljevi projekta su: pokazati da je CCS izvediv i siguran, smanjiti troškove budućih CCS projekata, stvarati nova znanja povezana s regulacijom i poticati aktivnost CCS-a, te doprinijeti novim industrijskim mogućnostima. Vrijednost projekta procjenjuje se na oko 25 milijardi NOK (norveška kruna)( oko 2395 milijuna €), a vlada je odlučila pokriti 2/3 troškova s iznosom od 16,8 milijuna NOK (1,61 milijuna €) (Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, 2020). Rješenja za provedbu CCS projekta su do sada već sazrijele što olakšava daljnji razvoj u Norveškoj i Europi. Projekt je obuhvatio hvatanje ugljikovog dioksida iz Norcem tvornice cementa (prva cementara opremljena s tehnologijom za hvatanje ugljikovog dioksida) i Fortuma, spalionice otpada u Oslu. Northern Lights je projekt koji je odgovoran za transportni i skladišni dio projekta, a suradnici tog projekta su Equinor, Shell i Total. Northern Lights ima snažan poticaj za daljnji razvoj transporta i skladištenja ugljikovog dioksida.

Primjenom Longshipa Norveška preuzima vodeću ulogu u primjeni vrijednosti cijelog CCS lanca, ulaganjem u infrastrukturu skladišta koje mogu koristiti i tvrtke drugih država. Norveška vlada smatra kako bi Europa trebala slijediti njihov primjer kako bi se iskoristio preostali kapacitet skladišta. Sva buduća postrojenja za hvatanje ugljikovog dioksida morati će se natjecati za bespovratna sredstva koje im nudi država.

#### *4.3.1. Northern Lights*

Northern Lights je projekt koji razvija prvu svjetsku infrastrukturu za transport i skladištenje ugljikovog dioksida, a projekt je u razradi od 2017. godine. Ugljikov dioksid se brodovima transportira do kopnenog terminala na zapadnoj obali Norveške, a dalje se cjevovodom transportira ukapljeni ugljikov dioksid do podmorskog skladišta u Sjevernom moru (Slika 4-2.)(CCS Norway, 2020). Projekt bi trebao biti kompletiran do sredine 2024. godine (Northern Lights, 2021).



**Slika 4-2.** Prikaz projekta Longship i Northern Lights (<https://northernlightscs.com/what-we-do/>, 2021)

Terminal za prihvrat ugljikovog dioksida nalazit će se u industrijskoj zoni Naturgassparken u općini Øygarden u zapadnoj Norveškoj. Postrojenje je dizajnirano za skladištenje 1,5 milijuna tona ugljikovog dioksida godišnje, a sastoji se od spremnika za skladištenje, opreme za istovar, pumpi za injektiranje, te administrativne zgrade (Northern Lights, 2021). Izgradnja terminala je procijenjena na oko 380 milijuna NOK (36,19 milijuna €), a uključuje uspostavu lokacije, ceste i infrastrukturu terminala, izgradnju upravne zgrade, uz zgrade skladišta i radionice, izgradnja mola, i uspostavu izlazne ceste (Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, 2020). Priprema gradilišta započela je u siječnju 2021. godine (slika 4-3.).



**Slika 4-3.** 3D prikaz industrijske zone Naturgassparken (<https://northernlightscs.com/what-we-do/>, 2021)

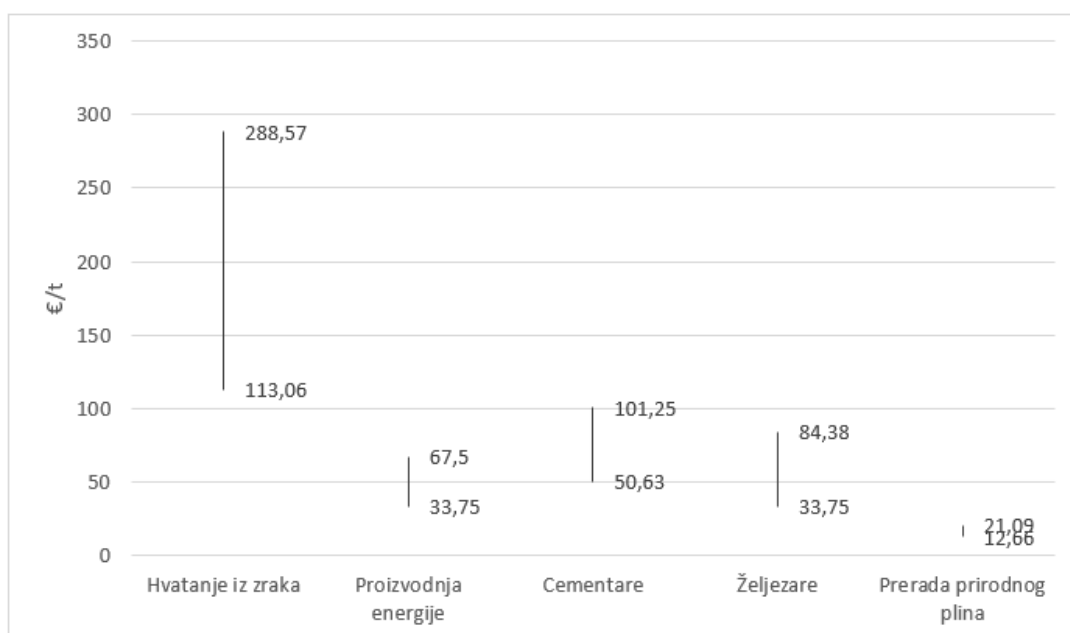


Norveška ima najbolje geološke uvjete u Europi za iskorištavanje podmorskog skladišnog kapaciteta, s ukupnim skladišnim kapacitetom od oko 80 milijardi tona što je dovoljno za skladištenje ugljikovog dioksida iz Norveške i ostalih europskih zemalja u više od 1000 godina (Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, 2020).

## 5. ANALIZA TROŠKOVA HVATANJA, SKLADIŠTENJA I TRANSPORTA U NORVEŠKOJ

Ključni cilj norveškog demonstracijskog projekta CCS je poticaj razvoja novih tehnologija na nacionalnoj i globalnoj razini (Roettenegen, 2014). Industrija ima dugogodišnja iskustva transporta cjevovodima i brodskim prijevozom. Također, industrija testira nove i modificirane načine hvatanja, transporta, skladištenja s novim sastavima ugljikovog dioksida kako bi se postigao paritet troškova s troškovima emisije. Demonstracijski projekti omogućuju razvoj industrije CCS.

Hvatanje ugljikovog dioksida iz Norcem cementare iznosi 1085 NOK/t (105,78 € po toni) ugljikovog dioksida i jeftinije je nego iz Fortuma, 1810 NOK/t (176,46 € po toni) ugljikovog dioksida, zbog jeftine otpadne topline dostupne iz procesa cementa (Killigland et al., 2020). Troškovi hvatanja ugljikovog dioksida variraju ovisno o izvoru ugljikovog dioksida. Cijena u industrijskim procesima koji proizvode „čisti“ ugljikov dioksid (proizvodnja etanola ili prerada prirodnog plina) varira između 130,24-217,07 NOK/t (12,66-21,09 € po toni) ugljikovog dioksida, dok kod proizvodnje cementa ili proizvodnje energije iznosi 347,32-1041,96 NOK/t (33,75-101,25 € po toni) ugljikovog dioksida. Trenutno najskuplji pristup hvatanja ugljikovog dioksida je iz zraka, 1163,52-2969,58 NOK/t (113,06-288,57 € po toni) ugljikovog dioksida (International Energy Agency, 2019)(Slika 5-1).



Slika 5-1. Troškovi hvatanja CO<sub>2</sub> po sektorima (International Energy Agency, 2019)

Smanjenje troškova tehnologije hvatanja ugljikovog dioksida je vrlo teško predvidjeti zbog tehnološkog razvoja. Dobavljači tehnologije tvrde da se troškovi potencijalno mogu smanjiti za 30%.

Kada su u pitanju male količine ugljikovog dioksida i velika udaljenost između početne i krajnje točke brodski transport je poželjniji od cjevovodnog. Transport brodovima pokazat će se ključnim za mjesta za hvatanje ugljikovog dioksida gdje namjenski cjevovodi nisu ekonomski isplativi zbog predaleke trase. Troškovi cjevovoda uglavnom se sastoje od CAPEX-a (više od 90%), dok su godišnji troškovi prijevoza brodovima manji od 50% CAPEX-a. Glavni elementi troškova transporta su:

- Vrsta transporta, cjevovod ili brodovi
- Količine; troškovi cjevovoda uglavnom su određeni CAPEX-om i približno su proporcionalni udaljenosti
- Brodovi imaju niži CAPEX od cjevovoda što smanjuje financijski rizik ukoliko dođe do ranijeg završetka projekta
- Kombinacija cjevovoda i brodova mogla bi osigurati manji rizik i isplativo rješenje
- Za veliku prometnu infrastrukturu, dugoročno i centralno planiranje može dovesti do smanjenja dugoročnih troškova
- Standardizacija brodova; u Norveškom projektu (CCS) odlučili su koristiti male brodove s već poznatom tehnologijom kako bi se smanjio rizik
- Smanjenje privremenog skladišta i veličine brodova; uključuje smanjenje dužine i dubine mola
- Kompresija i ukapljivanje; kako bi se povećala učinkovitost
- Projektni kriteriji za prijevoz ugljikovog dioksida pod tlakom; povećava se debljina stijenki cjevovoda ili se koristi kvalitetniji materijal

Cijena transporta brodovima u Norveškoj se razlikuje iz perspektive investitora, 218 NOK/t (21,20 € po toni) ugljikovog dioksida, i Norveške agencije za okoliš, 92 NOK/t (8,95 € po toni) ugljikovog dioksida (Killigland et al., 2020). Transport brodovima trenutno je u razmatranju kao jedna od opcija transporta, te se cijene transporta temelje na podacima projekta Northern Lights (Smith et al., 2021).

Skladištenje ugljikovog dioksida može se razlikovati prema tri čimbenika koje se odnose na troškove: kopneni koji je općenito jeftiniji od odobalnog, skladištenje na iscrpljenim naftnim i plinskim poljima je jeftinije od skladištenja u slanim vodonosnicima, i ušteda troškova koja se postiže upotrebom postojećih bušotina i infrastrukture. Glavni nositelji troškova skladištenja su obično terenski kapaciteti, utiskivanje, skladište na kopnu ili moru, putanja bušotine (vertikalna ili zakrivljena), seizmička ispitivanja, trošak kapitala i broj novih istražnih bušotina. Glavni čimbenici koji pridonose razlici troškova skladištenja su:

- Položaj skladišta; troškovi na moru su veći; troškovi u Europi i Norveškoj su veći od ostatka svijeta
- Razina znanja; veća je razina znanja za iscrpljena naftna i plinska polja nego za slane vodonosnike
- Postojanje infrastrukture za višekratnu upotrebu (bušotine)
- Kapacitet ležišta; veći je trošak za manje ležište
- Kvaliteta ležišta; veći je trošak za ležišta manje kvalitete
- Nadzor, mjerenje i provjera; prate se migracije ugljikovog dioksida i provjerava njegovo zadržavanje

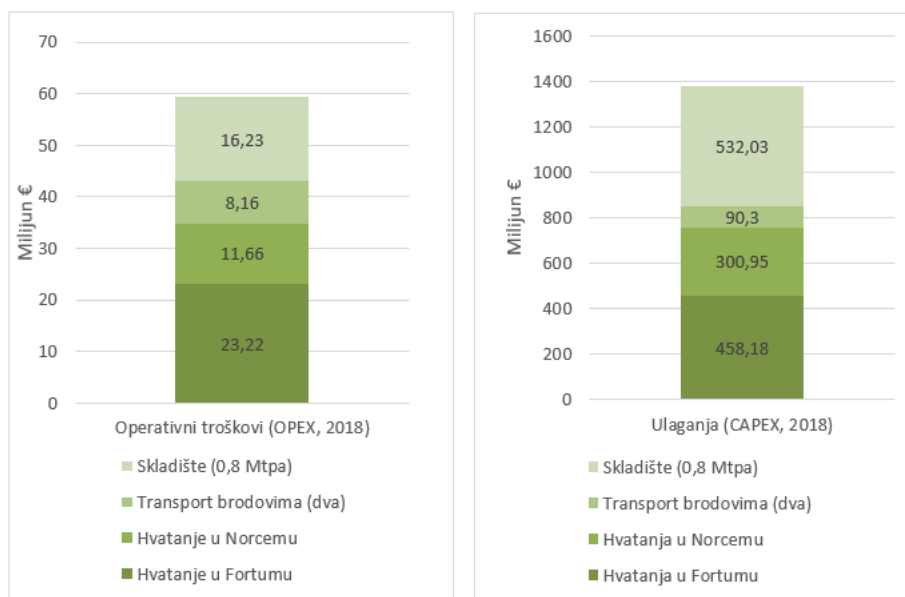
Najveći elementi troškova za skladištenje ugljikovog dioksida u slanim vodonosnicima su karakterizacije mjesta, izgradnja platformi, bušenje utisnutih bušotina, rad i održavanje (Killigland et al., 2020).

Zbog različitih vrsta skladišta, cijena skladištenja ugljikovog dioksida varira od 434,22-523,06 NOK/t (42,23-50,87 € po toni ), ovisno i o lokaciji i državi u kojoj se skladišti (Schmelz et al., 2020), dok je cijena prema proračunu projekta Northern Lights 344-920 NOK/t (33,46-89,47 € po toni) ugljikovog dioksida (Killigland et al., 2020).

Norveška vlada želi pridonijeti razvoju isplativih tehnologija za hvatanje, transport i trajno skladištenje ugljikovog dioksida, razlog tomu je što brže ostvarenje dugoročnih klimatskih ciljeva u Norveškoj, ali i u ostatku Europe. Podrazumijeva se da ciljevi uključuju sigurnost i izvedivost CCS-a, smanjenje troškova i rizika budućih projekata i razvoj novih industrijskih mogućnosti.

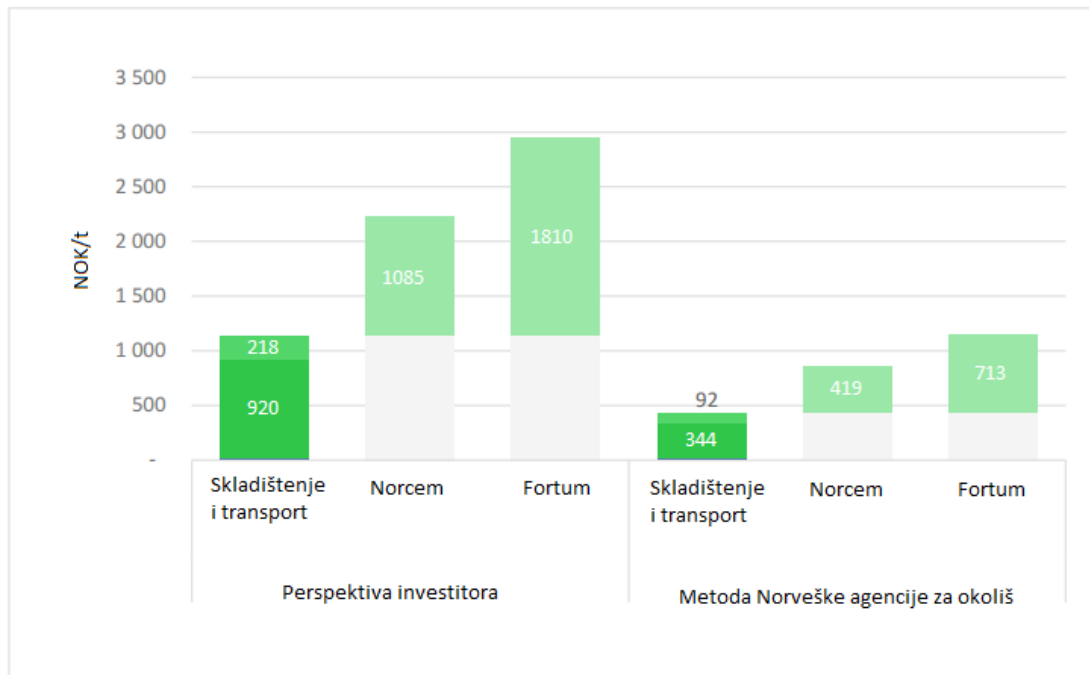
Smatra se da norveški projekt Longship ima relativno visoke troškove po toni ugljikovog dioksida, što je normalno za pilot projekte. Na veličinu troškova utječu i velike

udaljenosti od mjesta hvatanja do skladišta, brodski prijevoz i kopneni terminali. Troškovi bi bili još i veći kada bi postojalo samo jedno mjesto za hvatanje (npr. samo Fortum ili samo Norcem). Procjena troškova ulaganja za oba postrojenja hvatanja ugljikovog dioksida, s brodskim i cijevnim transportom kroz privremeno skladište, odnosno troškovi cjelokupnog projekta Longship procijenjeni su na oko 14 000 MNOK (1347,89 milijuna €). Operativni troškovi procjenjuju se na oko 600 MNOK godišnje (57,7 milijuna €). Neto sadašnja vrijednost s rokom od 25 godina iznosi 1000 NOK/t (96,28 € po toni) na temelju metode Norveške agencije za zaštitu okoliša i 2600 NOK/t (253,47 € po toni) s gledišta investitora (Killigland et al., 2020). Najveći dio troškova ovog projekta su troškovi hvatanja i operativni troškovi koji iznose više od 50% troškova, s toga je presudno istraživati moguća jeftinija rješenja hvatanja ugljikovog dioksida kako bi se smanjili troškovi. Ukupni kapitalni i operativni troškovi tijekom prvih 10 godina rada projekta procjenjuju se na 25 MNOK (2,395 milijuna €)(Bellona, 2020). Slika 5-1. prikazuje detaljne procjene troškova za 0,8 Mtpa. Povoljnije količine ugljikovog dioksida mogu povećati kapacitet za 1,5-5 Mtpa.



**Slika 5-2.** Operativni troškovi (desno) i ulaganja (lijevo) za CCS u Norveškoj (Killigland et al., 2019)

Slika 5-3. prikazuje specifičnu neto sadašnju vrijednost perspektive investitora (PI) i izračun vrijednosti prema metodi koju je odredila Norveška agencija za okoliš. Razlika je u diskontnoj stopi, PI koristi diskontnu stopu od 8% i diskontira izbjegnute emisije dok druga perspektiva koristi diskontnu stopu od 4% i ne diskontira izbjegnute emisije.



**Slika 5-3.** Troškovi po toni CO<sub>2</sub> Norveškog projekta CCS (Killingland et al., 2019.)

Projektom Northern Lights želi se pružiti rješenje za trajno skladištenje ugljikovog dioksida, s kapacitetom dovoljnim ne samo za uhvaćeni ugljikov dioksid u Norveškoj već i u ostalim zemljama. Cjevovod od kopnenih instalacija do skladišta na moru dug je 110 km.

Uz Norvešku, Kanada je jedna od vodećih zemalja u primjeni CCS tehnologije. Ove dvije zemlje su u samom vrhu razvitka projekata vezanih uz CCS tehnologiju. Troškovi norveškog projekta Longship veći su za oko 15% od kanadskog projekta Quest. Transport ugljikovog dioksida se odvija cjevovodom do mjesta ubrizgavanja a kasnije se skladišti u ležište slane vode na dubini od 2000 do 2500 metara. Troškovi samog projekta procijenjeni su na oko 11722,04 MNOK (1142,78 milijuna €). Kanadska vlada i Albertsko izvršno vijeće odlučili su investirati projekt s 5950,51 MNOK (580,11 milijuna €). Procjena kapitalnih troškova iznosi 7041,9 MNOK (686,51 milijuna €), a operativnih troškova 356 MNOK (34,71 milijuna €) godišnje (Carbon Capture and Sequestration Technologies, 2015). Norveškim projektom ugljikov dioksid se hvata iz cementare i spalionice otpada, dok se kanadskim projektom ugljikov dioksid hvata iz postrojenja koje prerađuje sirovi bitumen te se cjevovodom transportira do obližnjeg skladišta u dubokom slanom vodonosniku. Troškovi hvatanja ugljikovog dioksida norveškog projekta dosežu do 1810 NOK/t (176,46 € po toni), dok hvatanje ugljikovog dioksida kanadskog projekta iznosi 547,47 NOK/t (53,20 € po toni)(Shell, 2017).

## 6. ZAKLJUČAK

Problematika klimatskih promjena aktualna je već dugi niz godina. Ispuštanje plinova u atmosferu trebalo bi se spriječiti kako ne bi došlo do povećanja temperature (globalnog zatopljenja). CCUS i CCS su projekti koji pokušavaju smanjiti emisije ugljikovog oksida njegovim skladištenjem i/ili korištenjem. Norveška ima dobre predispozicije za primjenu takvih projekata te je jedna od vodećih zemalja u provedbi istih. Programom Longship CCS Norveška je jedna od vodećih zemalja u primjeni CCS tehnologija. Program obuhvaća razvoj novih tehnologija hvatanja, transporta i skladištenja ugljikovog dioksida. Ugljikov dioksid norveškim projektom Longship hvata se iz cementare i spalionice otpada i zbog toga cijena hvatanja nije ista već se kreće u rasponu od 105,78-174,46 € po toni ugljikovog dioksida. Realiziran je projekt, Northern Lights, koji se isključivo bavi transportom i skladištenjem ugljikovog dioksida s ciljem da se smanje troškovi istih. Trenutni trošak transporta ugljikovog dioksida po toni se kreće između 8,95-21,2 €. Terminal za transport ugljikovog dioksida trenutno je u izgradnji. Ugljikov dioksid transportira se pomoću cjevovoda i brodova do zato predviđenih skladišta s troškovima od 33,46-89,47 € po toni ugljikovog dioksida. Razvojem i provedbom projekata Norveška pokušava sugerirati ostalim zemljama da se pridruže kako bi se emisije smanjile na globalnoj razini. Također financijska stabilnost Norveške pridonosi takvom razvoju projekta. S obzirom na visoku procjenu vrijednosti Longship projekta, 25 milijardi NOK (norveška kruna)(oko 2395 milijuna €), Norveška vlada spremna je uložiti dosta sredstava, 2/3 troškova projekta, kako bi svi projekti bili realizirani. Najveći dio troškova usmjeren je na hvatanje ugljikovog dioksida u iznosu od 794,01 milijuna € što je 55% od ukupnih troškova, troškovi skladištenja su oko 548,26 milijuna €, 38% od ukupnog troška, a troškovi transporta ugljikovog dioksida iznose 98,46 milijuna € što je 7% od ukupnog troška Longship projekta. Norveška je pokazala vještinu u realiziranju projekata jednim od najvećih ispitnih centara u svijetu, TCM. Mnoge kompanije različitih država svijeta testiraju tehnologiju hvatanja ugljikovog dioksida u Norveškom TCM-u. Smatra se da će do kraja 2050. godine norveški Longship projekt biti u punoj komercijalnoj primjeni. Istraživanjem i razvojem novih tehnologija pokušavaju se smanjiti troškovi hvatanja, transporta i skladištenja ugljikovog dioksida kako bi zemlje s lošijom financijskom situacijom mogle pridonositi smanjenju emisija. Troškovi su još uvijek visoki jer nije pronađena financijski isplativa i sigurna tehnika hvatanja ugljikovog dioksida.

## 7. LITERATURA

1. BEKKEN, S. G., SCHÖFFEL, K., AAKENES, S., HATLEN, T., SLAGTERN, Å. i ØI, L. E., 2013, The CLIMIT Program and its Strategy for Norwegian Research, Development and Demonstration of CCS Technology, *Energy Procedia*, 37, str. 6508-6519
2. BLAND, K.J., 2009, Opportunities for underground geological storage of CO<sub>2</sub> in New Zealand, *GNS Science Report*, 58
3. CHOUDHARY, P., 2016, Carbon capture and storage programme (CCSP), *ResearchGate*, 2016
4. CUÉLLAR-FRANCA, R. M. i AZAPAGIC, A., 2015, Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 9, str. 82-102
5. DE KOEIJER, G., ENGE, Y., SANDEN, K., GRAFF, O. F., FALK-PEDERSEN, O., AMUNDSEN, T. i OVERÅ, S., 2011, CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad—Design, functionality and emissions of the amine plant, *Energy Procedia*, 4, str. 1207-1213
6. FLØ, N. E., FARAMARZI, L., DE CAZENOVE, T., HVIDSTEN, O. A., MORKEN, A. K., HAMBORG, E. S., GJERNES, E., 2017, Results from MEA Degradation and Reclaiming Processes at the CO<sub>2</sub> Technology Centre Mongstad, *Energy Procedia*, 114, str. 1307-1324
7. GHASEM, N., 2020, CO<sub>2</sub> removal from natural gas, *Advances in Carbon Capture*, 2020, str. 479-501
8. JANSEN, D., GAZZANI, M., MANZOLINI, G., DIJK, E. VAN, i CARBO, M., 2015, Pre-combustion CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, str. 167-187
9. KILLIGLAND, M., KROGH BOGE, M., MAGNESCHI, G., 2020, Potential costs for carbon capture, transport and storage value chains (CCS), *Energy markets and technologies*, 2020, str. 1-61
10. LEMPART-DROZD, M. i LABUS, M., 2015, Differential scanning calorimetry (DSC) in researching the mineral carbonation processes of cement materials, in terms of CO<sub>2</sub> sequestration, *Nafta-Gaz*, 71



11. MACDOWELL, N., FLORIN, N., BUCHARD, A., HALLETT, J., GALINDO, A., JACKSON, G., S. ADJIMAN, C., K. WILLIAMS, C., SHAH, N., FENNELL, P., 2010, An overview of CO<sub>2</sub> capture technologies, *Energy & Environmental Science*, 3, str. 1645-1669
12. MATHIEU, P., 2010, Oxyfuel combustion systems and technology for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture in power plants, *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Capture and Storage Technology*, 1, str. 283-319
13. METZ, B., DAVIDSON, O., DE CONINCK, H., LOOS, M., MEYER, L., 2005, *Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge: Cambridge University Press
14. REAY, D., RAMSHAW, C. i HARVEY, A., 2013, Application Areas – Petrochemicals and Fine Chemicals, *Process Intesification*, 2013, str. 259-321
15. ROETTENEKEN, J.-K. S., 2014, The foreign policy of carbon sinks: Carbon capture and storage as foreign policy in Norway, *Energy procedia*, 63, str. 6927-6944
16. SCHMELZ, W.J., HOCHMAN, G., MILLER, K.G., 2020., Total cost of carbon capture and storage implemented at a regioanl scale: northeastern and midwestern United States, *Interface focus*, 10
17. SMITH, E., MORRIS, J., KHESGHI, H., TELETZKE G., HERZOG, H., PALTSEY, S., 2021, The cost of CO<sub>2</sub> transport and storage in global integrated assessment modeling, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109
18. TAPIA, J. F. D., LEE, J.-Y., OOI, R. E. H., FOO, D. C. Y. i TAN, R. R., 2018, A review of optimization and decision-making models for the planning of CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage (CCUS) systems, *Sustainable Production and Consumption*, 13, str. 1-15
19. TRAVERSON, V., 2020, Carbon Capture Storage vs Carbon Capture Utilisation, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilisation*, 9, str. 82-102
20. ZHENG, L., 2011, Overview of oxy-fuel combustion technology of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture, *Oxy-Fuel Combustion for Power Generation and Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Capture*, 2011, str. 1-13

Web izvori:

21. BELLONA, 2020, Norway's Longship CCS Project  
URL:<https://bellona.org/publication/briefing-norways-longship-ccs-project>  
(28.08.2021.)

22. CARBON CAPTURE AND SEQUESTARTION TECHNOLOGIES, 2015, Carbon Dioxide Capture and Storage project  
URL: <https://sequestration.mit.edu/tools/projects/quest.html> (29.08.2021.)
23. CCS NORWAY, 2020, CO<sub>2</sub> transport and storage; Northern Lights project  
URL: <https://ccsnorway.com/transport-storage-northern-lights/> (27.07.2021.)
24. GASSNOVA, 2020a  
URL: <https://gassnova.no/en/gassnova-2> (21.07.2021.)
25. GASSNOVA, 2020b, Gassnova Established  
URL: [https://gassnova.no/en/the-gassnova-story#Gassnova\\_established\\_2005](https://gassnova.no/en/the-gassnova-story#Gassnova_established_2005) (22.07.2021.)
26. HUME, D., 2018, Ocean Storage of CO<sub>2</sub>  
URL: <https://ccus.nwu.edu.cn/info/1011/1216.htm> (21.07.2021.)
27. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021, Carbon capture, utilisation and storage  
URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage> (12.08.2021.)
28. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019, Is carbon capture too expensive?,  
URL: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive> (28.8.2021.)
29. IOGP, 2020, Developing low-carbon technologies  
URL: <https://www.iogp.org/blog/news/developing-low-carbon-technologies/> (06.05.2021.)
30. NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture  
URL: <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-capture/post-combustion> (01.06.2021.)
31. NORTHERN LIGHTS, 2021  
URL: <https://northernlightsccs.com/what-we-do/> (21.07.2021.)
32. NORWEGIAN MINISTRY OF PETROLEUM AND ENERGY, 2020, Longship- Carbon Capture and Storage  
URL: <https://ccsnorway.com/the-longship-white-paper-available-in-english/> (21.07.2021.)

33. SHELL, 2017, Quest CCS Project Costs

URL:

[https://ukccsrc.ac.uk/sites/default/files/documents/content\\_page/Quest%20CCS%20Project%20Costs%20-%20IEAGHG.pdf](https://ukccsrc.ac.uk/sites/default/files/documents/content_page/Quest%20CCS%20Project%20Costs%20-%20IEAGHG.pdf) (04.09.2021.)

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Ana Ređep

---

Ana Ređep



KLASA: 602-04/21-01/70  
URBROJ: 251-70-12-21-2  
U Zagrebu, 15.9.2021.

Ana Ređep, studentica

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/70, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 15.4.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### ANALIZA TROŠKOVA HVATANJA, SKLADIŠTENJA I TRANSPORTA UGLJIKOVOG DIOKSIDA I RAZVITAK PROJEKATA U NORVEŠKOJ

Za voditeljicu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditeljica:

(potpis)

Prof.dr.sc. Daria Karasalihović  
Sedlar

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)