

UREĐAJI ZA SAKUPLJANJE CO2 IZ ATMOSFERE

Vukoja, Jakov

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:601730>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

UREĐAJI ZA SAKUPLJANJE CO2 IZ ATMOSFERE

Vukoja, Jakov

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:601730>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-14**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

JAKOV VUKOJA

UREĐAJI ZA SAKUPLJANJE CO₂ IZ ATMOSFERE

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2021. godina

KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
PROFESSIONAL UNDERGRADUATE STUDY OF MECHANICAL
ENGINEERING

JAKOV VUKOJA

**DEVICES FOR CAPTURING CO₂ FROM THE
ATMOSPHERE**

FINAL PAPER

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

JAKOV VUKOJA

UREĐAJI ZA SAKUPLJANJE CO₂ IZ ATMOSFERE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tihomir Mihalić, prof V.Š.

KARLOVAC, 2021. godina

SAŽETAK

Tijekom prošlog stoljeća zbog povećane upotrebe fosilnih goriva i industrijske proizvodnje, te povećane Zemljine aktivnosti (aktivniji vulkani, intenzivnije ispuštanje metana iz oceana, itd.) došlo je do znatnog povećanja koncentracije ugljikovog dioksida (CO₂) u atmosferi, što je dovelo do globalnog zatopljenja i posljedično do klimatskih promjena. Kako bi se spriječilo globalno zatopljenje potrebno je smanjiti emisije CO₂, jedan od načina kako to napraviti je korištenjem tehnologija negativnih emisija. U ovom radu dan je pregled dva tipa uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji pripadaju tehnologijama negativnih emisija.

U teoretskom dijelu rada navedene su atmosferske razine koncentracije CO₂ tijekom povijesti, kako one utječu na prosječnu globalnu temperaturu, te moguće projekcije globalnog zatopljenja u narednom periodu. Također se u radu opisuju dva tipa uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere, troškovi sakupljanja, analiza efikasnosti pojedinih uređaja i usporedba troškova različitih tipova tehnologije, sa ciljem pronalaženja najoptimalnijih metoda sa što manjim troškovima.

Ključne riječi:

Ugljikov dioksid, sakupljanje, globalno zatopljenje,

SUMMURY

Over the past century, the increased use of fossil fuels, industrial production and increased Earth activity (more active volcanoes, more intense methane emissions from the ocean, etc.) has led to a significant increase in the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, leading to global warming and consequently to climate change. To prevent global warming it is necessary to reduce CO₂ emissions, one way to do this is by using negative emission technologies. This paper provides an overview for two types of devices for collecting CO₂ from the atmosphere that belong to negative emission technologies.

The theoretical part of the paper presents atmospheric levels of CO₂ concentration throughout history, how they affected the average global temperature, and possible projections of global warming in the coming period. The paper also describes two types of devices for collecting CO₂ from the atmosphere, collection costs, analysis of the efficiency of individual devices and comparison of costs of different types of technology, with the aim of finding the most optimal methods with the lowest possible costs.

Key words:

Carbon dioxide, capture, global warming.

SADRŽAJ

SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
SADRŽAJ	VII
POPIS SLIKA	VIII
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS DIJAGRAMA.....	X
POPIS KARTA.....	X
POPIS OZNAKA.....	XI
1. UVOD	1
1.1. Predmet i cilj rada	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja	1
2. GLOBALNO ZATOPLJENJE	2
2.1. CO ₂ u atmosferi.....	2
2.2. Staklenički efekt	4
2.3. Utjecaj emisija CO ₂ na temperaturu	4
2.3.1. Povezanost razine CO ₂ i Zemljine klime u dalekoj prošlosti	4
2.3.2. Povezanost razine CO ₂ i Zemljine klima danas	6
2.4. Uzroci globalnog zatopljenja	8
2.4.1. Ljudske aktivnosti	8
2.4.1.1. <i>Generiranje električne i toplinske energije</i>	8
2.4.1.2. <i>Industrija proizvodnje</i>	8
2.4.1.3. <i>Agrokultura</i>	8
2.4.1.4. <i>Transportacija</i>	9
2.4.2. Prirodni izvori.....	9
2.4.2.1. <i>Vulkanske erupcije</i>	9
2.4.2.2. <i>Šumski požari</i>	10
2.4.2.3. <i>Ispuštanje metana i CO₂ iz oceanskih nakupina</i>	10
2.4.2.4. <i>Varijacija solarnog zračenja</i>	11
2.5. Projekcije globalnog zatopljenja	11
3. UREĐAJI KOJI SAKUPLJAJU CO ₂ IZ ATMOSFERE	13
3.1. Uređaji za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere koji koriste sustave tekućih otapala	13

3.1.1.	Opis procesa	13
3.1.2.	Operacije uređaja za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere.....	14
3.1.2.1.	<i>Dobavljač zraka</i>	14
3.1.2.2.	<i>Pumpa za otapalo</i>	17
3.1.2.3.	<i>Slaker</i>	18
3.1.2.4.	<i>Kaustifikator</i>	18
3.1.2.5.	<i>Grijač</i>	19
3.1.2.6.	<i>Kalcinator</i>	20
3.1.2.7.	<i>Jedinica za odvajanje kisika</i>	21
3.1.3.	Masena i energetska bilanca	21
3.1.4.	Analiza troškova	23
3.2.	Uređaji za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere koji koriste sustave čvrstih sorbenata	28
3.2.1.	Opis procesa	28
3.2.2.	Operacije procesa.....	29
3.2.2.1.	<i>Adsorbpcija</i>	29
3.2.2.2.	<i>Desorbpcija</i>	29
3.2.3.	Masena i energetska bilanca	30
3.2.4.	Analiza troškova	32
4.	ZAKLJUČAK.....	36
	LITERATURA	38

POPIS SLIKA

Slika 1.	Pojednostavljena shema procesnog dijagrama uređaja za skaupljanje CO ₂ iz atmosfere [1]	10
Slika 2.	Primjer ambalažnog materijala koji se koristi kod dobavljača zraka [23].....	11
Slika 3.	Konstrukcija dobavljača zraka uređaja za sakupljanje zraka koji koristi tekuća otapala [24]	11
Slika 4.	Shematska ilustracija pojednostavljenog prikaza kako funkcionira sustav za sakupljanje zraka koji koristi čvrste sorbente [34]	24
Slika 5.	Prvo svjetsko komercijalno postrojenje za izravno sakupljanje CO ₂ iz atmosfere koje je smješteno u Hinwilu u Švicarskoj [34]	25

POPIS TABLICA

Tablica 1. Procjene emisije CO ₂ prilikom generiranja električne energije [25].....	12
Tablica 2. Emisija CO ₂ nastala sagorijevanjem jednog milijuna britanskih termalnih jedinica goriva [27].....	15
Tablica 3. Energetska potrošnja i emisija CO ₂ za operacije sustava koje koriste električnu energiju [izvor vlastiti proračuni i 1].....	18
Tablica 4. Energetska potrošnja i emisija CO ₂ za operacije sustava koje koriste toplinsku energiju [izvor vlastiti proračuni i 1].....	18
Tablica 5. Kapitalni troškovi uređaja za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere koji koristi tekuće otapalo [izvor vlastiti proračuni i 1].....	21
Tablica 6. Operativni troškovi uređaja za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere koji koristi tekuće otapalo i godišnje sakuplja 1Mt CO ₂ [izvor vlastiti proračuni i 1, 5].....	22
Tablica 7. Sažetak procijenjenih energetske potreba, CO ₂ emisija i troškovi sakupljanja CO ₂ uređaja koji sakupljaju CO ₂ iz atmosfere koristeći tekuća otapala [izvor vlastiti proračuni i 1].....	23
Tablica 8. Procijenjeni intenzitet energetske potreba pojedinih procesa sustava za sakupljanje zraka pomoću čvrstih sorbenata [19].....	26
Tablica 9. Procijene emisije CO ₂ za svaki proces u sustavu izravnog sakupljanja zraka na bazi čvrstog sorbenta za svaki od tri scenarija [izvor vlastiti proračun i aam]	27
Tablica 10. Kapitalni troškovi uređaja za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere na bazi čvrstih sorbenata i da godišnje sakuplja 1Mt CO ₂ [1].....	29
Tablica 11. Operativni troškovi uređaja za sakupljanje CO ₂ iz atmosfere na bazi čvrstih sorbenata i da godišnje sakuplja 1Mt CO ₂ [izvor vlastiti proračun, 1 i 5].....	30
Tablica 12. Sažetak procijenjenih energetske potreba CO ₂ emisija i troškovi sakupljanja CO ₂ uređaja koji sakupljaju CO ₂ iz atmosfere koristeći čvrste sorbente [izvor 1 i vlastiti proračun].....	31

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Prikaz atmosferske koncentracije CO ₂ kroz povijest [3]	2
Dijagram 2. Porast globalih emisija CO ₂ od 19. stoljeća do 2019.god.....	3
Dijagram 3. Koncentracija CO ₂ tijekom povijesti Zemlje [8].....	5
Dijagram 4. Temperatura Zemlje u odnosu na prosječnu temperaturu razdoblja od 1960. do 1990. [8].....	5
Dijagram 5. Promatrana prosječna globalna temperaturna anomalija kombinirana za kopno i ocean u periodu od 1850. do 2020. god. [9]	6
Dijagram 6. Prikaz budućih emisija i očekivanih zagrijavanja na temelju obećanih i trenutnih politika [20]	12

POPIS KARTA

Karta 1. Globalna raspodjela temperaturnih promjena u 2020.god. u odnosu na prosječnu temperaturu za razdoblje od 1951. do 1980. godine [9].....	6
--	---

POPIS OZNAKA

OZNAKA	VELIČINA	MJERNA JEDINICA
N	Broj čestica na milijun čestica	/
m_A	Masa atmosfere	G
M_u	Molarna masa zraka	g/mol
M_{CO_2}	Molarna masa CO ₂	g/mol
m_{CO_2}	Ukupna masa CO ₂ u atmosferi	G
P	snaga	W
E_p	Energetska potrošnja	J
T	vrijeme	s
PE	Energija potrošena jednogodišnjim radom	kWh
E_{CO_2}	CO ₂ emitiran generiranjem 1kWh	g
UE_{CO_2}	CO ₂ emitiran jednogodišnjim radom	Mt
B	Britanska termalna jedinica	BTU
GE_{CO_2}	CO ₂ emitiran generiranjem 1MBTU	g
KE_{CO_2}	CO ₂ emitiran sagorijevanjem 1kWh goriva	g
GE_{CO_2}	količina emisije CO ₂ nastala sagorijevanjem 1 MBTU goriva	lbs

1. UVOD

Zbog povećane koncentracije ugljikovog dioksida (CO₂) u atmosferi došlo je do globalnog zatopljenja i klimatskih promjena koje su jedan od najozbiljnijih izazova sa kojima se svijet danas suočava.

Kako bi se spriječilo povećanje globalne temperature za više od 2°C do 2100. god. potrebno je uvesti tehnologije negativnih emisija CO₂ (engl. „negative emissions technologies“, NET). Jedna od tih tehnologija negativnih emisija su uređaji za sakupljanje CO₂ iz atmosfere, ili skraćeno „uređaji za sakupljanje zraka“ (engl. „direct air capture“, DAC). Izravno sakupljanje zraka spada u tehnologije negativnih emisija, jer sakupljaju ugljikov dioksid iz atmosfere i vraćaju ga u geološke rezervoare i kopnene ekosustave, što pozitivno utječe na klimatske promjene. [1]

1.1. Predmet i cilj rada

Ovaj rad fokusira se na dva tipa uređaja za sakupljanje zraka iz atmosfere: jedan koji koristi tekuća otapala i drugi koji koristi čvrste sorbente. Provode se i uspoređuju masene i energetske bilance ovisno o pretpostavljenim izvorima energije (npr. obnovljivi izvori, zemni plin ili ugljen). Rad također daje procjene potencijalnog godišnjeg sakupljenog CO₂, kao i omjer troškova i kapaciteta svakog od navedenih postupka sakupljanja.

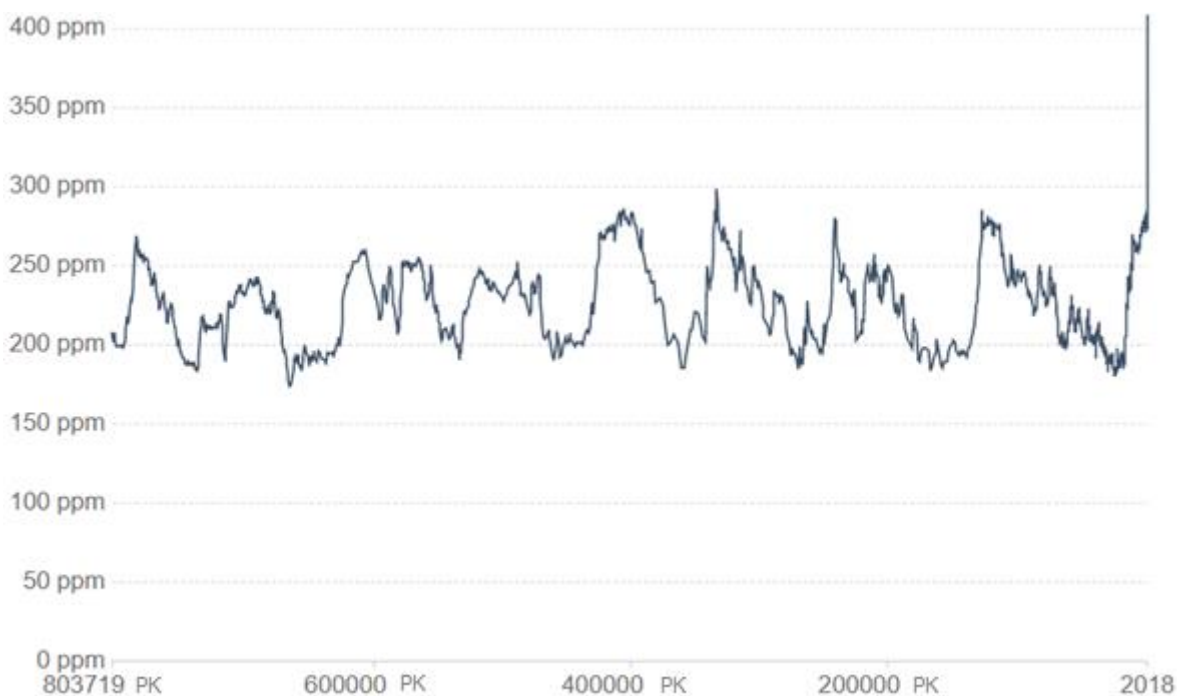
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja

Prilikom izrade ovog završnog rada prikupljene su dostupne informacije putem internetskih stranica i stručne literature dostupne na internetu.

2. GLOBALNO ZATOPLJENJE

2.1. CO₂ u atmosferi

Današnja atmosferska koncentracija ugljičnog dioksida iznosi oko 415 ppm [2], najviša ikad u zadnjih 800 000 tisuća godina. To znači da broj čestica CO₂ na milijun čestica iznosi 415.



Dijagram 1. Prikaz atmosferske koncentracije CO₂ kroz povijest [3]

Na Dijagramu 1 prikazana je atmosferska koncentracija CO₂ kroz proteklih 800 000 godina i na njemu je vidljivo da je koncentracija CO₂ veća danas nego bilo kada u proteklih 800 000 godina. Predindustrijsko razdoblje imalo je 280 ppm CO₂ ili 2200 Gt CO₂. Pod „predindustrijsko“ smatra se razdoblje prije prve industrijske revolucije, odnosno prije 1800. godine. Kako bi znanstvenici otkrili razine CO₂ iz prošlosti, morali su bušiti duboko u zemljinu ledenu jezgru i tako su otkrili da je razina CO₂ u atmosferi iznosila 180 ppm (1400 Gt CO₂) [3].

Prema tome, može se zaključiti da su ljudske aktivnosti pridonijele značajnom porastu koncentracije CO₂ u zadnjih 200 godina za otprilike 130 ppm. Ako je poznat porast broja čestica ugljikovog dioksida u odnosu na one prije predindustrijskog razdoblja, može se izračunati koliko Gt CO₂ je emitirano u atmosferu. Poznavajući broj porasta čestica CO₂ na milijun čestica ($N=135$), masu atmosfere ($m_A=5,1 \cdot 10^{21}$ g), molarnu masu zraka ($M_u= 44$ g/mol), te molarnu masu CO₂ ($M_{CO_2}= 44$ g/mol), možemo izračunati ukupnu masu CO₂ (m_{CO_2}) u atmosferi prema formulama:

$$n(CO_2) = \frac{N \cdot m_A}{M_u \cdot 10^6} \quad (1)$$

$$m_{CO_2} = n(CO_2) M_{CO_2} \quad (2)$$

Sagorijevanjem fosilnih goriva, krutog otpada, drveća i drugih bioloških materijala, a također i kao rezultat određenih kemijskih reakcija (npr. proizvodnja cementa) u atmosferu se emitira oko 1050 Gt CO₂, što znači da se raznim emisijama uzrokovalo povećanje CO₂ u vrijednosti od 150 % u odnosu na predindustrijsko razdoblje.



Dijagram 2. Porast globalnih emisija CO₂ od 19. stoljeća do 2019. god.[3]

Na Dijagramu 2 vidi se rast globalnih emisija CO₂ od 19. stoljeća do danas, odnosno da su emisije CO₂ prije industrijske revolucije bile vrlo niske. Sve do sredine 20. stoljeća rast emisija bio je usporen i tada se u svijetu emitiralo oko 5 milijardi tona CO₂. Do početka 21. stoljeća taj iznos se učetverostručio na oko 23 milijarde tona CO₂. Razine emisija sve do danas nastavile su rasti i u 2018. god. Iznosile su rekordnih 33,5 Gt CO₂. U 2020. god. zabilježen je blagi pad emisija za oko 2 Gt CO₂, odnosno na 31,5 Gt CO₂, a za 2021. god. predviđa se da će razina emisija opet porasti i približiti se onoj rekordnoj iz 2018.god. [3] [4]

2.2. Staklenički efekt

Plinovi koji zadržavaju toplinu u atmosferi nazivaju se staklenički plinovi. CO₂ je najvažniji od nekoliko plinova koji doprinose stakleničkom efektu, apsorbiranjem odlazećeg zračenja na infracrvenim valnim duljinama i emitirajući dio dolje, podižući time prosječnu temperaturu na površini zemlje. Brzo rastuće koncentracije ovih plinova su zabrinjavajuće jer uzrokuju nepredvidive promjene klime. [5]

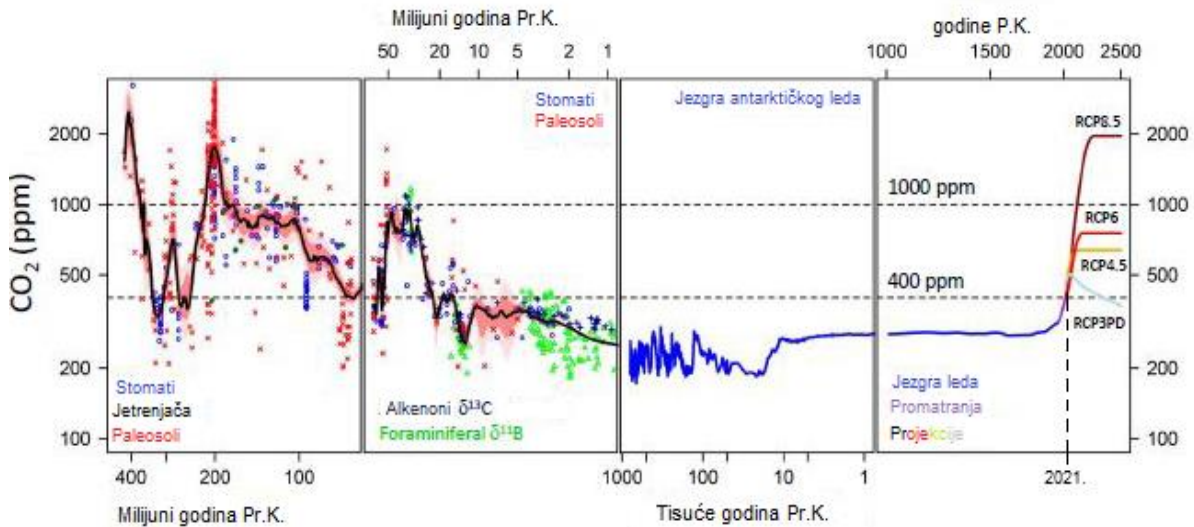
2.3. Utjecaj emisija CO₂ na temperaturu

Jedan od najvažnijih svjetskih problema trenutačno su klimatske promjene, a emisije CO₂ i ostalih stakleničkih plinova velikim dijelom su odgovorni za to. Veza između razine CO₂ i globalnih temperatura prisutna je tijekom cijele povijesti planete Zemlje. [6] [7]

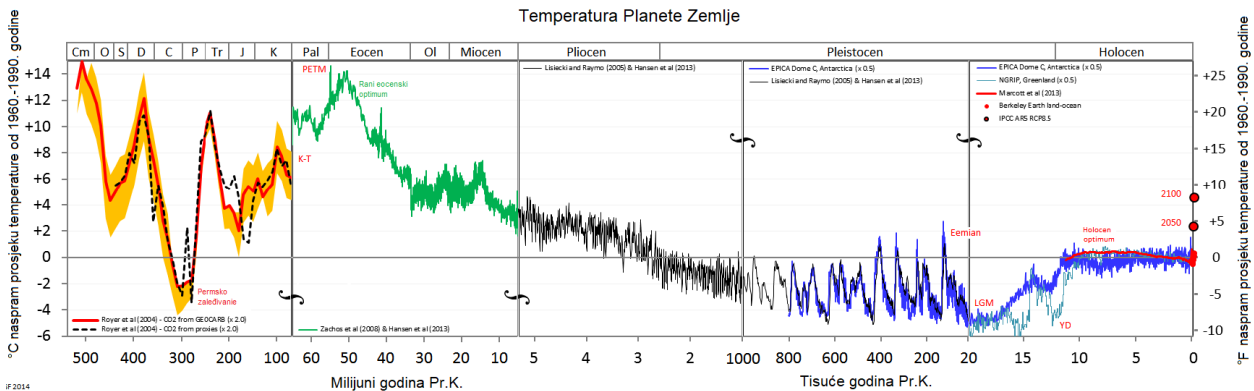
2.3.1. Povezanost razine CO₂ i Zemljine klime u dalekoj prošlosti

Ordovicjsko razdoblje, ono koje je bilo prije otprilike 500 milijuna godina, najdalje je vremensko razdoblje za koje je moguća procjena razine CO₂. Za to vrijeme predviđa se da je razina CO₂ u atmosferi iznosila između 3000 do 9000 ppm. To je ogromna razlika u usporedbi sa današnjim razinama koje iznose 415 ppm. Prosječna temperatura nije se toliko razlikovala od današnje jer je bila viša samo za 10 °C. Glavni razlozi zašto je ta razlika takova je što je Sunce bilo hladnije, a orbitalni ciklusi planeta bili su različiti. [8]

Razine CO₂ ovise o ravnoteži između emisija CO₂ (dekompozicija organskih tvari, vulkanske erupcije) i količini CO₂ koju prirodni ponori (biljke, oceani) sakupe. Kako je vidljivo na Dijagramu 3, prije oko 300 milijuna godina zabilježen je trend smanjenja razine CO₂, a na Dijagramu 4 može se uočiti kako je to uzrokovalo i pad temperature. Nakon tog razdoblja dolazi period intenzivnih vulkanskih erupcija koje su uzrokovale ogromne emisije CO₂, te je i zbog toga došlo do porasta temperature. Trend zajedničkog rasta i pada temperature zabilježen je i na ostatku dijagrama. [8]



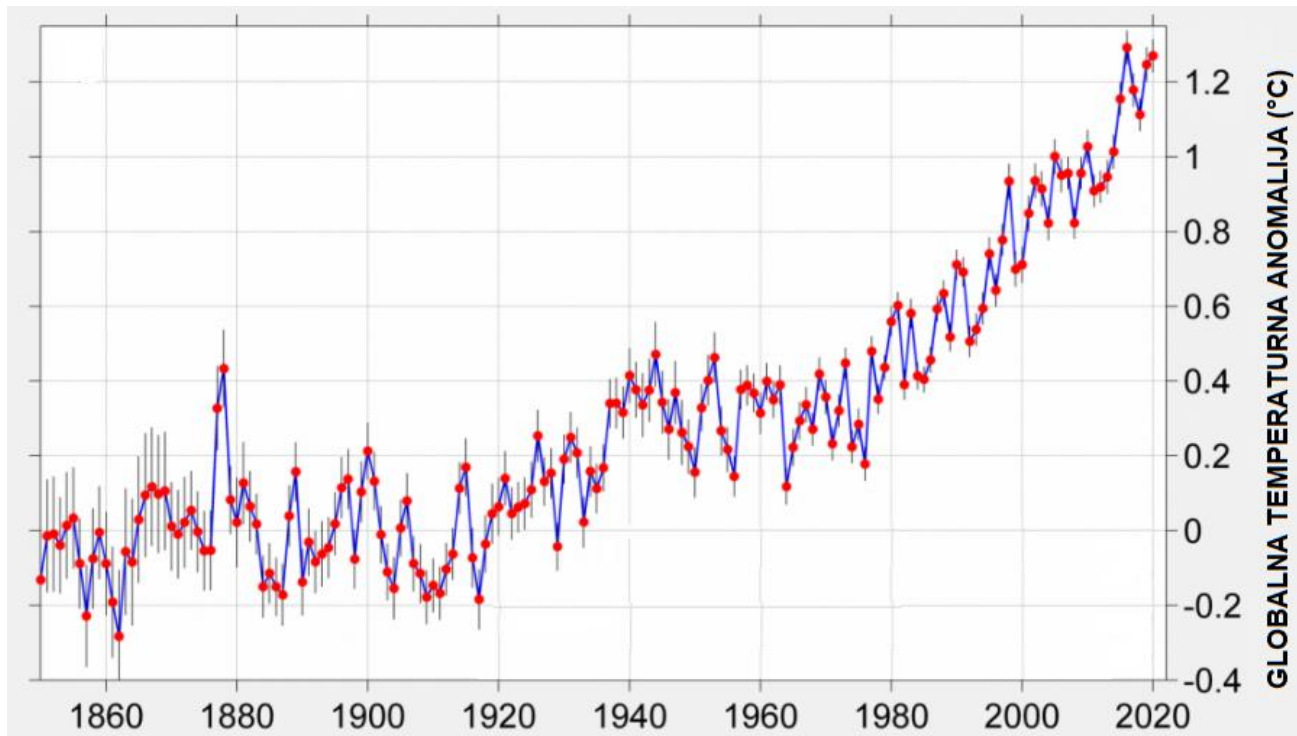
Dijagram 3. Koncentracija CO₂ tijekom povjesti Zemlje [8]



Dijagram 4. Temperatura zemlje u odnosu na globalni prosjek razdoblja od 1960. do 1990. godine [8]

2.3.2. Povezanost razine CO₂ i Zemljine klima danas

Na Dijagramu 5 prikazan je odnos prosječne temperature u odnosu na prosjek temperature za razdoblje od 1951. do 1980. godine. Na Dijagramu se može uočiti da su temperature iznenadno porasle za otprilike 0,94 °C u uspoređi s prosječnom temperaturom za razdoblje od 1951. do 1980. god. Promatrajući 1850. godinu može se vidjeti da su tadašnje temperature bile hladnije za 0,2 °C u usporedbi s osnovicom. [3]

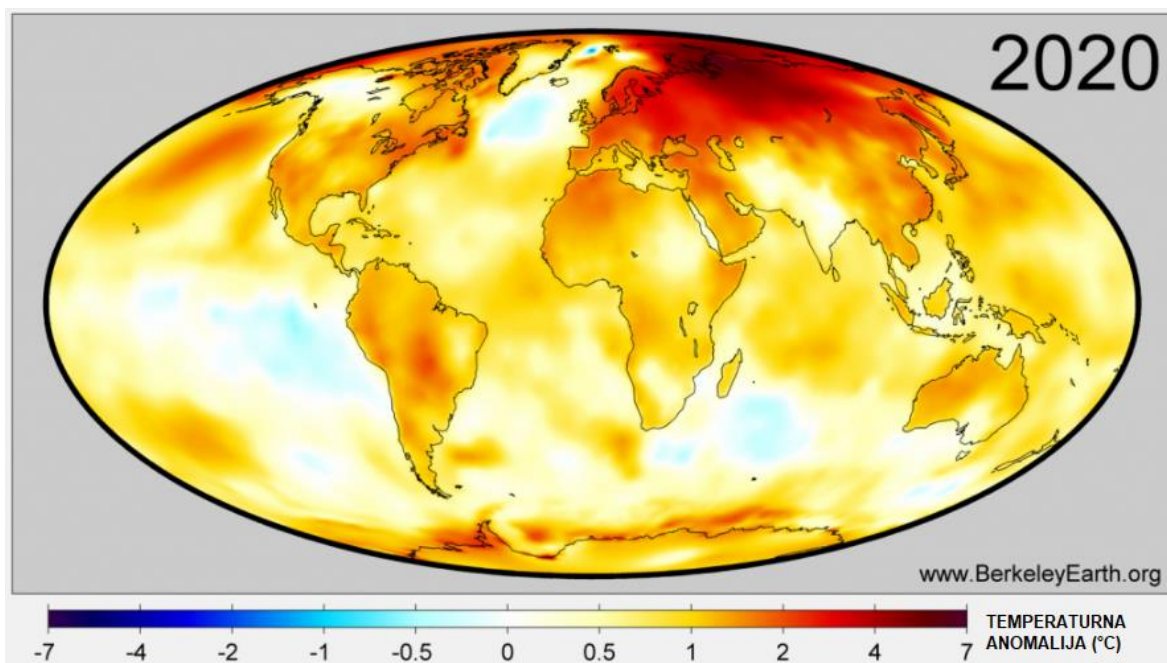


Dijagram 5. Promatrana prosječna globalna temperaturna anomalija kombinirana za kopno i ocean u periodu od 1850. do 2020.god.[9]

Na Dijagramu je vidljivo da se dogodio prosječni porast temperature za 1,4 °C u odnosu na predindustrijsko razdoblje, odnosno na period od kada se djelovanjem ljudi značajnije povećava emisija CO₂ u atmosferu. [3] [9]

Iako se porast temperature za $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ može smatrati malen ili beznačajan, kada se razmišlja o problemu globalnog zatopljenja taj porast ima veliki utjecaj na klimu i prirodne sustave jer dolazi do ubrzanog zagrijavanja atmosfere. [3]

Na Karti 1 vidljiva je globalna raspodjela temperaturnih promjena u 2020. god. u odnosu na prosječnu temperaturu za razdoblje od 1951. do 1980. godine. Može se uočiti da se globalni porast prosječne temperature najčešće iskazuje kao kombinirana promjena temperature na kopnu i na površini mora. Ocean ima veći toplinski kapacitet od zemlje, stoga se temperature na kopnu mijenjaju češće. To se može i dokazati usporedivši porast temperatura posebno na kopnu i posebno na moru s prosječnom temperaturom za razdoblje od 1951. do 1980. godine. Na kopnu se dogodio prosječni porast temperature za $1,96 \pm 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok se prosječna temperatura površine oceana (isključujući područja morskog leda) povećala za samo $0,82 \pm 0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$. Budući da sjeverna hemisfera ima veću kopnenu masu, to također znači da je promjena prosječne temperature sjeverno od ekvatora bila veća nego južno. Također je iz prikazane karte vidljivo da je u nekim područjima promjena temperature bila znatno ekstremnija. Na vrlo visokim geografskim širinama (osobito u blizini polova) zagrijavanje je bilo za $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, a u nekim slučajevima i više od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. [9]



Karta 1. Globalna raspodjela temperaturnih promjena u 2020. godini u odnosu na prosječnu temperaturu za razdoblje od 1951. do 1980. god. [9]

2.4. Uzroci globalnog zatopljenja

Uzorci globalnog zatopljenja mogu se podijeliti u dvije glavne skupine:

- ljudske aktivnosti
- prirodni izvori

2.4.1. Ljudske aktivnosti

Pod ljudske aktivnosti ubrajaju se one kojima su se stvorile dodatne emisije stakleničkih plinova, poput CO₂, ili aktivnosti kao što su krčenja šuma čime uništavamo jedan od prirodnih ponora CO₂.

2.4.1.1. *Generiranje električne i toplinske energije*

Generiranje električne i toplinske energije fosilnim gorivima, poput ugljena, zemnog plina i nafte, uzrokovalo je najveći udio emisija stakleničkih plinova, čak 25% od ukupne globalne emisije stakleničkih plinova uzrokovane ljudskim aktivnostima. [10]

2.4.1.2. *Industrija proizvodnje*

U emisije uzrokovane industrijom ubrajaju se one gdje sagorijevaju fosilna goriva kako bi proizvela energija. U taj sektor ubrajaju se industrije poput metalurške, kemijske i proizvodnja cementa. Emisije stakleničkih plinova industrijske proizvodnje iznose 21% ukupne globalne emisije stakleničkih plinova uzrokovane ljudskim aktivnostima. [10]

2.4.1.3. *Agrokultura*

Emisije stakleničkih plinova ovog sektora dolaze iz od uzgoja usjeva i stoke, te krčenja šuma. Emisije stakleničkih plinova iznose 24% ukupne globalne emisije stakleničkih plinova uzrokovane ljudskim aktivnostima. Samo krčenje šuma doprinosi emisijama CO₂ od 15%, ali a krčenjem šuma gubi se i jedan od prirodnih ponora CO₂, te se time još više ubrzava proces globalnog zatopljenja. [10] [11]

2.4.1.4. *Transportacija*

U emisije stakleničkih plinova ovog sektora ubrajamo izgaranje fosilnih goriva na cesti, pruži, zraku i vodi, te emisije stakleničkih plinova uzrokovane transportacijom iznose 14% ukupne globalne emisije stakleničkih plinova uzrokovane ljudskim aktivnostima. Zanimljivo je napomenuti kako samo 5% transportacijskih vozila u cijelosti koristi električnu energiju za transportaciju. [10]

2.4.2. Prirodni izvori

Prirodni izvori globalnog zatopljenja su oni koje stvaraju emisije stakleničkih plinova, kao što su erupcije vulkana, šumski požari, te intenzivnije ispuštanje metana i CO₂ iz podoceanskih ponora. Razmotrit će se utjecaj varijacija u snazi solarnog zračenja kao uzrok globalnog zatopljenja.

2.4.2.1. *Vulkanske erupcije*

Vulkani svojim erupcijama mogu uzrokovati klimatske promjene. Tijekom erupcija u stratosferu se izbacuju ogromne količine pepela, vulkanskog plina i kapljica aerosola. Većina pepela brzo pada na površinu tla i ima mali utjecaj na klimatske promjene. Sitne čestice aerosola i vulkanski plinovi, poput sumporovog dioksida, mogu uzrokovati kratkotrajno hlađenje stratosfere. Reflektiranjem solarnog zračenja dolazi do efekta hlađenja, a ono prestaje kad se čestice spuste na tlo. Jedan od najzastupljenijih vulkanskih plinova je CO₂, koji uzrokuje globalno zatopljenje. [13] [12]

Neki znanstvenici smatraju da globalno zatopljenje uzrokuje sve češće pojave vulkanskih erupcija. Do erupcija dolazi zbog topljenja i nestajanja glečera, jer time pada površinski tlak, a magma se tako lakše širi i izbija prema površini tla. Ukoliko se ne spriječi globalno zagrijavanje doći će do još više erupcija, što će dovesti do većeg globalnog zatopljenja. [14]

2.4.2.2. Šumski požari

Povećanje koncentracije CO₂ u atmosferi uzrokuje povećanje prosječne globalne temperature, a time duža sušna razdoblja. Dugotrajne suše izazivaju isušivanje i odumiranje vegetacije, što pogoduje širenju požara. [15]

Kao uzrok globalnog zatopljenja javljaju se šumski požari koji emitiraju velike količine CO₂. Najveća zabilježena količina emisija CO₂ uzrokovana šumskim požarima bila je 1997. godine i iznosila je 3 Gt CO₂. Šumski požari su uzrokovani globalnim zatopljenjem, ali su i uzrok globalnog zatopljenja jer stvaraju velike emisije CO₂. Obzirom da je navedeni proces zatvoreni krug, predviđa se pojava ekstremnih požara, što će izazvati potrebu za sve većom ljudskom intervencijom u cilju prekidanja ciklusa. [15] [16]

2.4.2.3. Ispuštanje metana i CO₂ iz oceanskih nakupina

Povećanje emisija metana uvelike doprinose rastućoj koncentraciji stakleničkih plinova u Zemljinoj atmosferi i odgovorne su za globalno zatopljenje. U 2019.god. oko 230 milijuna tona metana oslobodilo se prirodnim izvorima, što je oko 40% ukupne godišnje emisije metana, no te brojke bi u budućnosti mogle biti puno više. [17] [18]

Nakupine smrznutog CO₂ i metana koji se nalaze na morskom dnu zovu se hidrati. Nekoliko tih hidrata koji su pronađeni nalaze se uz hidrotermalna odzračna polja u dubokom oceanu, no, globalni opseg takvih rezervoara ostaje nepoznat. Prosječna globalna temperatura oceana je u porastu, te znanstvenici vjeruju kako je temperatura oceana blizu one potrebne da se ti hidrati otope i staklenički plinovi oslobode u atmosferu. Također postoji opasnost od nakupina metana koje nastaju na plićem morskom dnu na rubovima kontinenata. U periodu od kasnih 1980-ih do 2015. godine znanstvenici su ih otkrili samo 100, dok su pomoću nove sonarne tehnologije u periodu od 2015. do 2018. godine otkrili preko 1000 izvora metana na zapadnoj obali Sjedinjenih Američkih Država. Te nakupine predstavljaju još veći problem jer se nalaze u relativno plitkoj vodi, u usporedbi s hidratima koji su duboku na oceanskom dnu, jer će efekti globalnog zatopljenja prije utjecati na njih. Ako bi se te nakupine metana oslobodile u atmosferu to bi potaknulo još veće globalno

zatopljenje, zato je vrlo bitna ljudska intervencija da se uspori i u konačnici zaustavi globalno zatopljenje dok je još moguće. [17] [18]

2.4.2.4. Varijacija solarnog zračenja

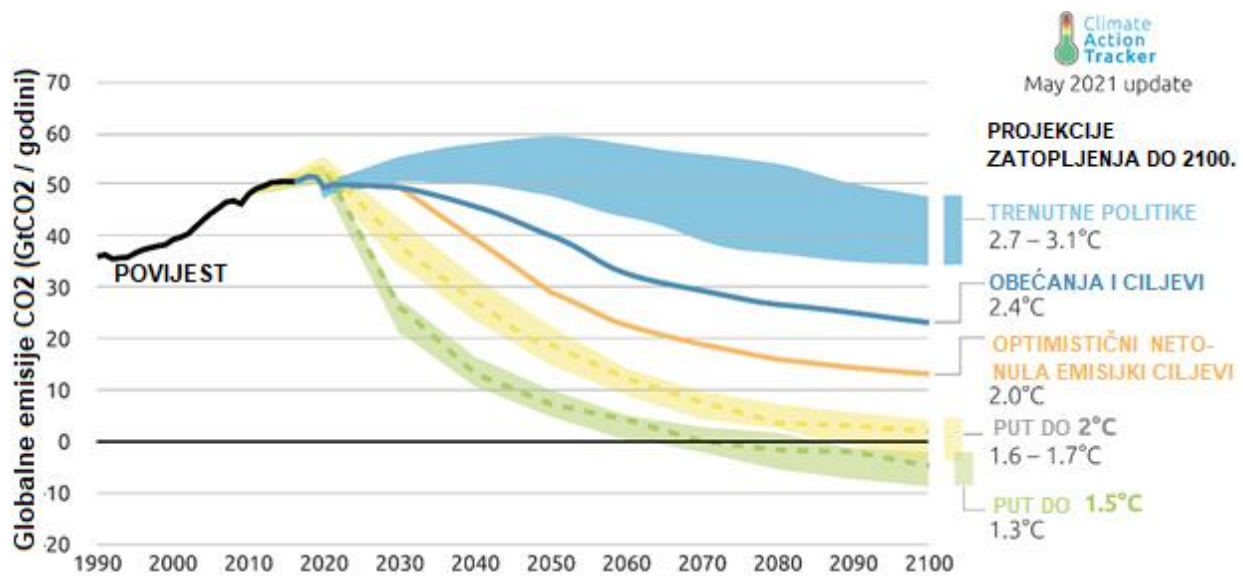
Naša planeta prima toplinu od Sunca, pa je razumno posumnjati da je razlika u varijaciji snage solarnog zračenja jedan od razloga zbog čega dolazi do globalnog zatopljenja. Međutim, intenzitet sunčevog zračenja povećao se samo za 0.05% u odnosu na 18. st., pa je Međuvladino Povjerenstvo za Klimatske Promjene (engl Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) varijaciju solarnog zračenja isključilo kao jedan od uzroka trenutnog globalnog zatopljenja. [12]

2.5. Projekcije globalnog zatopljenja

Trenutne politike smanjenja ili barem usporavanja rasta emisije CO₂ i drugih stakleničkih plinova imat će određeni utjecaj na smanjenje zagrijavanja u budućnosti. Jedna od tih politika je Pariški sporazum kojeg su 2015. god. predstavili Ujedinjeni narodi, te ga je prihvatilo 196 zemalja svijeta. U njemu je postavljen cilj postizanja klimatske neutralnosti do 2050. god., isto tako da se smanje emisije CO₂ za 55 % do 2030. god. i ograničavanje globalnog zatopljenja na 2°C, s težnjom od 1,5°C u odnosu na temperature iz predindustrijskog razdoblja. [19]

Na Dijagramu 6 prikazani su mogući budući scenariji emisije stakleničkih plinova pod pretpostavkama: [20]

- da se postojeće politike nastave;
- da sve zemlje ostvare svoja obećanja o smanjenju emisija;
- da se uvedu tehnologije negativnih emisija koje su kompatibilne s ograničavanjem zagrijavanja na 1,5°C ili 2°C.



Dijagram 6. Prikaz budućih emisija i očekivanih zagrijavanja na temelju obećanih i trenutnih politika [20]

Predviđa se da će se atmosfera zagrijati za oko $2,9^{\circ}\text{C}$ iznad temperature predindustrijskog razdoblja ako se nastavi sa trenutnim politikama koje se provode u svijetu. Sljedeći scenarij je onaj u kojemu se pojedine zemlje pridržavaju svojih obećanja i ciljeva, uključujući i nacionalno utvrđene doprinose (engl. Nationally Determined Contributions of government, NDC), kao i neke dugoročne ili neto-nula emisijske ciljeve koji bi ograničili zagrijavanje na oko $2,4^{\circ}\text{C}$. [20] [21]

Sve navedeno i dalje nije dovoljno da se ograniči globalno zatopljenje ispod 2°C kako je dogovoreno Pariškim sporazumom.

Robbie Andrew je viši istraživač u Centru za Međunarodna Klimatska Istraživanja (engl. Center for International Climate Research, CICERO). Izradio je globalne scenarije koji bi ograničili globalno zatopljenje na $1,5^{\circ}\text{C}$ i 2°C u usporedbi s temperaturom iz predindustrijskog razdoblja. Tvrdi da su ti ciljevi mogući, ali neće ih biti lako ostvariti. Napominje kako su za postizanje zacrtanih ciljeva neophodna ogromna smanjenja razine emisija CO_2 i ostalih stakleničkih plinova kao i razvoj tehnologija negativnih emisija. [3] [22]

3. UREĐAJI KOJI SAKUPLJAJU CO₂ IZ ATMOSFERE

Uređaji za sakupljanje CO₂ iz atmosfere spadaju u tehnologije negativnih emisija (engl. „negative emissions technologies“, NET) jer sakupljaju ugljikov dioksid iz atmosfere i vraćaju ga u geološke rezervoare i kopnene ekosustave, što pozitivno utječe na klimatske promjene. [1]

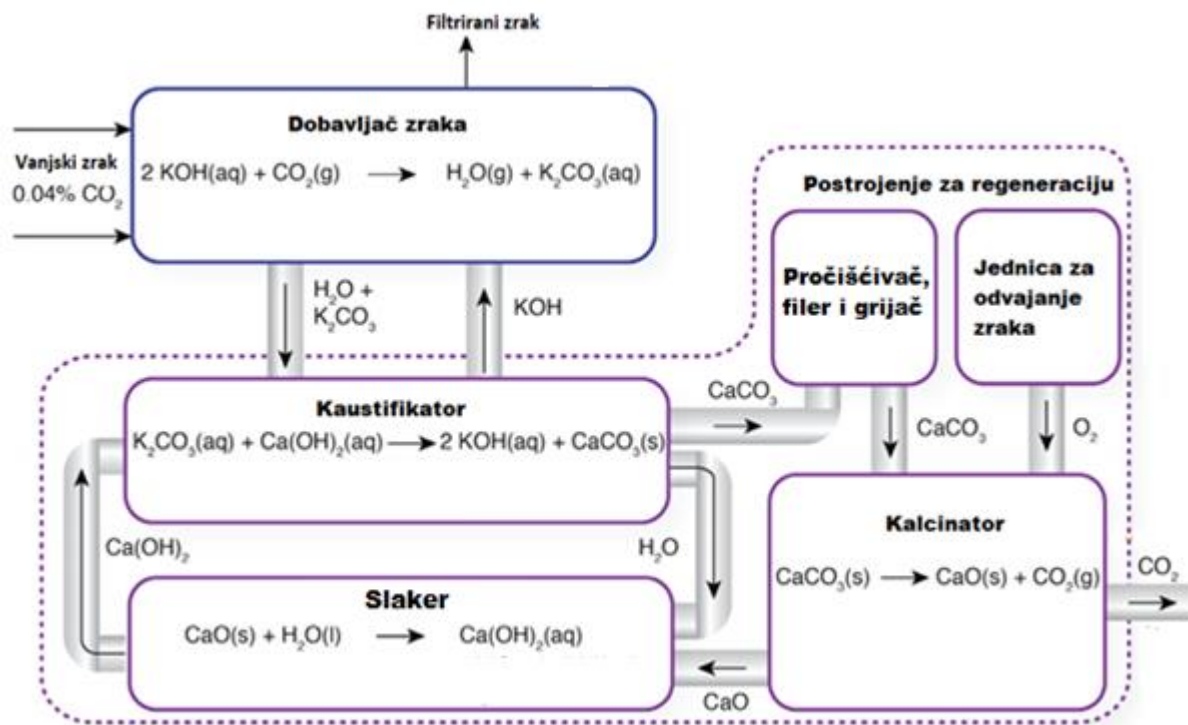
3.1. Uređaji za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koriste sustave tekućih otapala

3.1.1. Opis procesa

Na Slici 1 vidljiv je shematski prikaz procesnog dijagrama uređaja za sakupljanje CO₂ koji koristi tekuća otapala. Na shemi može se uočiti dvije glavne komponente, a to su dobavljači zraka (engl. air contactor) i postrojenje za regeneraciju (engl. regeneration facility). Proces započinje tako da u dobavljaču zraka vodena otopina kalijevog hidroksida (KOH) reagira sa CO₂ iz zraka stvarajući vodu (H₂O) i kalijev karbonat (K₂CO₃). [1]

Nakon toga se vodena otopina kalijevog karbonata dovodi u kaustifikator (engl. causticizer), gdje reagira sa kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)₂), te se stvara talog kalcijevog karbonata (CaCO₃). [1]

Prije procesa kalcinacije kalcijev karbonat prvo prolazi kroz pročišćivač (engl. clarificator) i filter za uklanjanje vode, zatim ulazi u kalcinator (engl. calciner) gdje se u oksidnoj peći zagrijava na 900°C. Zagrijavanjem kalcijevog karbonata dobiva se kalcijev oksid (CaO) i ugljikov dioksid (CO₂) visoke čistoće koji se nakon toga komprimira za dugotrajnu pohranu. [1]

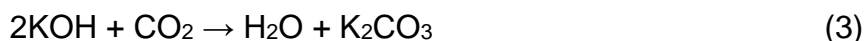


Slika 1. Pojednostavljena shema procesnog dijagrama uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere [1]

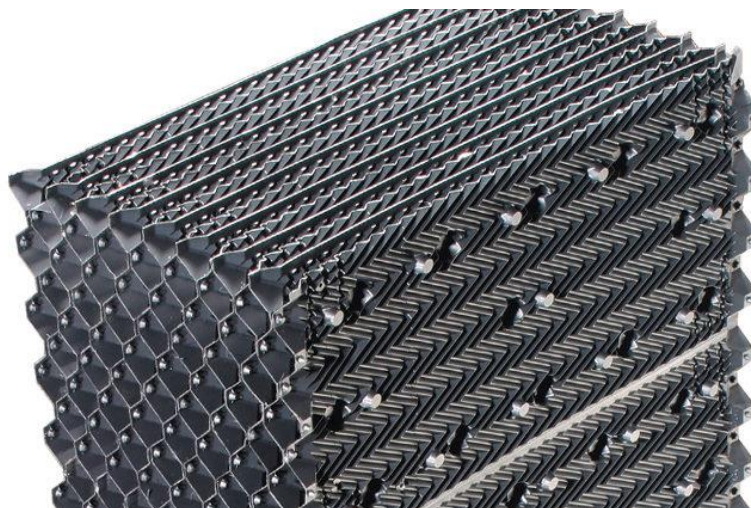
3.1.2. Operacije uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere

3.1.2.1. Dobavljač zraka

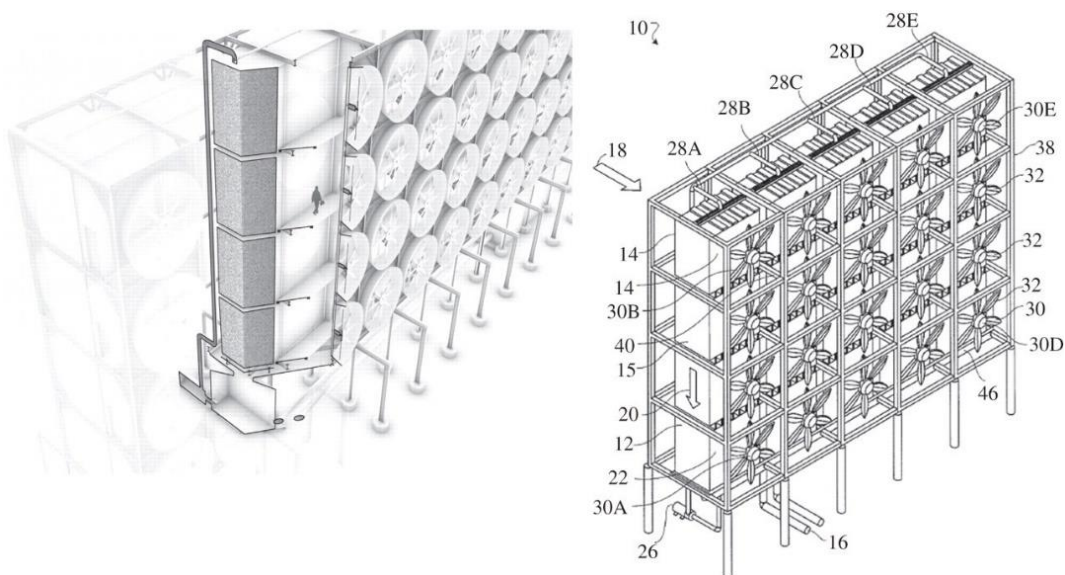
Funkcija dobavljača zraka je dovođenje zraka do ambalažnog materijala u kojem zrak reagira s vodenom otopinom kalijevog hidroksida (KOH) i proizvodi se kalijev karbonat (K₂CO₃) kako je prikazano u formuli (3). [1]



U dobavljaču zraka, zrak se puše pomoću ventilatora preko ambalažnog materijala (engl. packing material) na bazi PVC-a (Slika 2), kao što je prikazano na Slici 3.



Slika 2. Primjer ambalažnog materijala koji se koristi kod dobavljača zraka [23]



Slika 3. Konstrukcija dobavljača zraka uređaja za sakupljanje zraka koji koristi tekuća otapala [24]

Za daljnje proračunavanje količine emisija i ukupnih troškova sakupljanja ugljikovog dioksida potrebno je znati snagu ventilatora dobavljača zraka, kao i ukupnu energetska potrošnju E_p (J) koja je potrebna za jednogodišnji rad ventilatora dobavljača zraka. Snaga P se procjenjuje da iznosi od 10 do 37 MW. [24]

U proračunu se koristi jednogodišnji rad postrojenja, u kojem postrojenje sakupi 1Mt CO₂, kako bi se kasnije lakše moglo usporediti rezultate s ostalim znanstvenim radovima.

Energetska potrošnja E_p izračuna se tako da se snaga P (W) pomnoži sa brojem sekundi u godini t (s):

$$E_p = Pt \quad (4)$$

Ukupna električna energija za rad ventilatora dobavljača zraka iznosi od $3,15 \cdot 10^{14}$ J/god do $11,7 \cdot 10^{14}$ J/god ili $3,15 \cdot 10^{14}$ J/Mt do $11,7 \cdot 10^{14}$ J/Mt, odnosno od 0,315 GJ/t do 1,17 GJ/t. Radi jednostavnijeg proračuna te vrijednosti mogu se prikazati u kWh koristeći formulu:

$$PE = \frac{E_p}{3\,600\,000} \quad (5)$$

PE predstavlja potrebnu električnu energiju za jednogodišnji rad ventilatora dobavljača zraka prikazanu u kWh, te iznosi od 87 600 000 kWh/god do 324 120 000 kWh/god.

Za izračun emisije CO_2 potrebno je znati kolika je emisija CO_2 prilikom generiranja električne energije iz različitih izvora, a te vrijednosti prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Procjene emisije CO_2 prilikom generiranja električne energije [25]

IZVOR ENERGIJE	EMISIJA CO_2 (g/kWh)
Ugljen	909
Zemni plin	465
Solarna energija	105
Vjetar	13

Poznavajući emisije CO_2 prilikom generiranja električne energije može se izračunati ukupna emisija CO_2 koju uzrokuje rad ventilatora dobavljača zraka, koristeći sljedeću formulu:

$$UE_{CO_2} = \frac{E_{CO_2} PE}{1 \cdot 10^{12}} \quad (6)$$

gdje je UE_{CO_2} ukupna emisija CO_2 uzrokovana jednogodišnjim radom ventilatora dobavljača zraka (Mt/god), E_{CO_2} predstavlja emisiju CO_2 uzrokovanu generiranjem 1kWh električne energije (g/kWh), PE predstavlja potrebnu električnu energiju za jednogodišnji rad ventilatora dobavljača (kWh/god), a sve se dijeli sa 1×10^{12} kako bi rezultat bio prikazan u Mt/god.

U koliko se električna energija generira ugljenom godišnja emisija CO_2 iznosi 0,079-0,294 Mt/god, ako se električna energija generira zemnim plinom tada emisija CO_2 iznosi 0,041–0,151 Mt/god, ako se električna energija generira solarnom energijom emisija CO_2 iznosi 0,09-0,034 Mt/god i ako se električna energija generira vjetrom tada emisija CO_2 iznosi 0,001-0,004 Mt/god.

3.1.2.2. *Pumpa za otapalo*

Za izračunavanje rada potrebnog za ravnomjerno pumpanje kalijevog hidroksida kroz ambalažni materijal potreban je pad tlaka, zapreminski protok i gustoća tekućine. Obzirom da navedene informacije nisu bile dostupne za sustav koji su Holmesa i Keitha [24] analizirali u svom radu, u izračunu su koristili podatak da energija potrebna za pumpanje tekućina iznosi približno 15% potrebne energije ventilatora, što dovodi do energetske potrošnje od 0,047 do 0,17 GJ/t CO_2 , odnosno od 13 140 000 kWh/god do 48 618 000 kWh/god

Uvrštavanjem tih podataka u formulu (6) dobije se da emisija CO_2 stvorena proizvodnjom električne energije za pumpanje otapala iznosi 0,012-0,044 Mt/god emisije CO_2 ako električnu energiju generiramo ugljenom, 0,006–0,023 Mt/god emisije CO_2 ako električnu energiju generiramo zemnim plinom, 0,001-0,005 Mt/god emisije CO_2 ako električnu energiju generiramo solarnom energijom i 0,00-0,0006 Mt/god emisije CO_2 ako električnu energiju generiramo vjetrom.

3.1.2.3. Slaker

U slakeru (engl. slaker) kalcijev oksid (CaO) reagira egzotermno s vodom (H₂O) te se stvara kalcijev hidroksid (Ca(OH)₂) koji se upotrebljava u kaustifikatoru: [1]



Rad slakera se procjenjuje na 0,11 GJ/t CO₂ [5], odnosno 30 555 555 kWh/god. Uvrštavanjem tih podataka u formulu (6) dobije se podatak da emisija CO₂ stvorena proizvodnjom električne energije za slaker iznosi 0,027 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo ugljenom, 0,014 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo zemnim plinom, 0,003 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo solarnom energijom i 0,0003 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo vjetrom.

3.1.2.4. Kaustifikator

U kaustifikatoru se vodena otopina kalijevog karbonata (K₂CO₃) miješa sa kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)₂) te nastaje kalcijev karbonat (CaCO₃) u obliku taloga i vodena otopina kalijevog hidroksida (KOH): [1]



Korak kaustifikacije ima zanemarivu energetska potrošnju u odnosu na druge korake u ciklusu regeneracije, prema tome, rad kaustifikacije pribrojiti će se radu narednih procesa (pročišćavanje i filtriranje). Nakon kaustifikacije otopina kalijevog hidroksida se pumpa natrag u absorber (ambalažni materijal). Potrebni rad u koraku kaustifikacije (kojem se pribroji i rad pročišćavanja i filtriranja otopine kalcijeva karbonata) procjenjuje se da je 0,109 GJ/t CO₂ [19], odnosno 30 277 777 kWh/god.

Uvrstivši te podatke u formulu (6) dobije se podatak da emisija CO₂ stvorena proizvodnjom električne energije za procese kaustifikatora, te pročišćavanja i filtriranja,

iznosi 0,027 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo ugljenom, 0,014 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo zemnim plinom, 0,003 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo solarnom energijom i 0,0003 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo vjetrom.

3.1.2.5. Grijač

Prije nego što se istaloženi kalcijev karbonat pošalje u peć za kalcinaciju potrebno ga je zagrijati i osušiti kako bi se uklonio višak vode. Ovaj proces je poprilično energetski intenzivan te zahtijeva procijenjenih 3,1 GJ/t CO₂ [1], odnosno uvrštavanjem u formulu (5) dobije se da je to ekvivalentno vrijednosti od 861 111 111 kWh/god.

Kako bi se mogla izračunati ukupna količina emisije CO₂ nastale u grijaču potrebno je znati razinu emisija CO₂ kod različitih tipova goriva. U Tablici 2 prikazano je koliko se funti CO₂ emitira sagorijevanjem jednog milijuna britanskih toplinskih jedinica (BTU) ugljena i zemnog plina.

Tablica 2. Emisija CO₂ nastala sagorijevanjem jednog milijuna britanskih termalnih jedinica goriva [27]

IZVOR ENERGIJE	EMISIJA CO ₂ (lbs/ MBTU)
Ugljen	215
Zemni plin	117

Za izračunavanje emisije CO₂ treba znati da je jedan kWh ekvivalentan 3412,97 BTU [28], a jedna funta jednaka 453,59 grama [29].

Sljedećom formulom izračuna se koliko grama CO₂ se oslobodi sagorijevanjem 1kWh goriva:

$$KE_{CO_2} = \frac{GE_{CO_2}B}{1\ 000\ 000} M \quad (9)$$

gdje je KE_{CO_2} (g/kWh) količina emisije CO_2 nastala sagorijevanjem 1kWh goriva, GE_{CO_2} (lbs/MBTU) količina emisije CO_2 nastala sagorijevanjem 1 MBTU goriva, B je ekvivalentna vrijednost 1kWh prikazanog u britanskim termalnim jedinicama, M je ekvivalentna vrijednost 1 funte prikazana u gramima. Izračuna se da se sagorijevanjem 1kWh ugljena emitira 332,4 g CO_2 , a sagorijevanjem 1kWh zemnog plina 180,9 g CO_2 .

Koristeći sljedeću formulu (10) može se izračunati ukupna emisija CO_2 nastala jednogodišnjim radom grijača:

$$UE_{CO_2} = \frac{KE_{CO_2}PE}{1 \cdot 10^{12}} \quad (10)$$

gdje je UE_{CO_2} (Mt/god) ukupna razina emisije nastala jednogodišnjim radom grijača, KE_{CO_2} (g/kWh) količina emisije CO_2 nastala sagorijevanjem 1kWh goriva, a PE (kWh/god) predstavlja količinu energije koji grijač potroši u jednoj godini. Rad grijača jednak je dodatnim emisijama CO_2 od 0,287 Mt/god CO_2 odnosno 0,115 Mt/god CO_2 korištenjem topline dobivene iz ugljena, odnosno zemnog plina.

3.1.2.6. *Kalculator*

Nakon filtracije, pročišćavanja i sušenja, kalcijev karbonat mora se zagrijati na visokim temperaturama (~ 900 °C) u kalcinatoru da nastane kalcijev oksid (živo vapno) i visoko koncentrirani CO_2 : [1]



Nakon kalcinacije, vapno se vraća u slaker gdje reagira sa vodom te tvori kalcijev hidroksid. Postupak kalcinacije je energetski najintenzivniji proces i iznosi od 6 do 9 GJ/t CO_2 [1].

Uvrštavanjem navedenog iznosa u formulu (5) dobije se ekvivalent iznosu od 1 666 666 667 kWh/god do 2 500 000 000 kWh/god. Uvrštavanjem u formulu (10) dobije se da to odgovara emisiji CO_2 u iznosu od 0,3 do 0,45 Mt/god CO_2 ako se kao izvor toplinske energije

koristi zemni plin, odnosno 0,554-0,831 Mt/god CO₂ ako kao izvor toplinske energije koristi ugljen.

Kako bi se uštedio dio energije koristi se izmjenjivač topline, gdje se ulazni plinovi zagrijevaju izlaznim, te time temperatura izlaznih plinova padne sa 900 °C na 200 °C, a nakon što se propuste kroz kondenzator temperatura im padne na 30 °C. Toplinska energija koju smo uštedili na taj način iznosi 1,5 GJ/t CO₂. [1]

Izračunom se može utvrditi da navedeni postupak dovodi do smanjenja emisije CO₂ za 0,075 Mt/god za zagrijavanje zemnim plinom i za 0,134 Mt/god za zagrijavanje ugljenom.

3.1.2.7. Jedinica za odvajanje kisika

Čisti kisik koji se koristi u peći za kalcinaciju dobije se iz jedinice za odvajanje kisika, a njezina energetska potrošnja iznosi 0,55 GJ/t CO₂. [5]

Uvrštavanjem u formule (5) i (6) izračuna se da rad jedinice za odvajanje kisika dovodi do emisije 0,14 Mt/god CO₂ ako električnu energiju generiramo ugljenom, 0,071 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo zemnim plinom, 0,016 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo solarnom energijom i 0,002 Mt/god emisije CO₂ ako električnu energiju generiramo vjetrom.

3.1.3. Masena i energetska bilanca

U Tablicama 3 i 4 prikazane su procijenjene energetske potrošnje, te ukupne emisije CO₂ za sustave izravnog sakupljanja zraka pomoću tekućeg otapala. Ukupna energetska potrošnja za potrebe generiranja električne energije iznosi od 1,14 do 2,65 GJ/t CO₂, a ventilatori, pumpe, kaustifikator/pročišćivač i jedinica za odvajanje kisika predstavljaju uređaje koji koriste električnu energiju. Ukupna energetska potrošnja za potrebe generiranja toplinske energije znatno je veća i iznosi 7,6-10,6 GJ/t CO₂. Grijač, kalcinator i izmjenjivač topline predstavljaju uređaje koji koriste toplinsku energiju. Kao što je prikazano na Dijagramu 5, energetska potrošnja električnih uređaja je puno manja od energetske

potrošnje toplinskih uređaja i iznosi od 13 do 20 % ukupne energetske potrošnje. Energetski najintenzivniji proces je kalcinacija, odnosno toplinska regeneracija CaO i proizvodnja CO₂ visoke čistoće, nakon čega slijedi korak zagrijavanja i sušenja CaCO₃. [1]

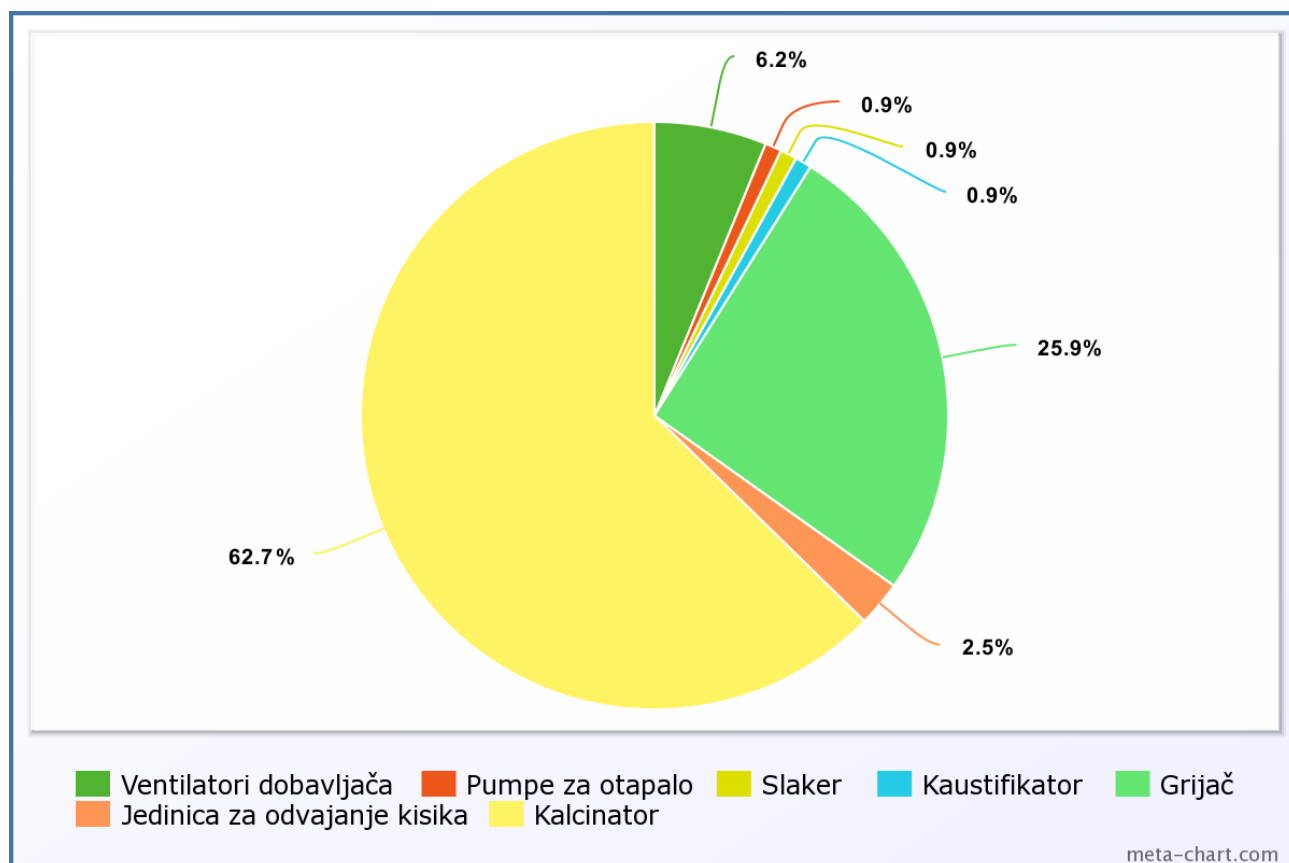
Tablica 3. Energetska potrošnja i emisija CO₂ za operacije sustava koje koriste električnu energiju [izvor vlastiti proračuni i 1]

Operacije sustava	Energetska potrošnja (GJ/t CO ₂)	Emisija CO ₂ generirana: (Mt/god):			
		Zemnim plinom	Ugljenom	Solarnom energijom	Vjetrom
Ventilatori dobavljača zraka	0,32-1,17	0,041-0,151	0,08-0,296	0,009-0,034	0,001-0,004
Pumpe za otapalo	0,047-0,18	0,006-0,022	0,012-0,044	0,0014-0,005	0-0,0006
Slaker	0,11	0,014	0,027	0,003	0,0004
Kaustifikator	0,109	0,014	0,028	0,003	0,0004
Jedinica za odvajanje kisika	0,55	0,071	0,139	0,016	0,0019
Ukupno	1,14-2,65	0,20-0,47	0,29-0,53	0,03-0,06	0,001-0,02

Tablica 4. Energetska potrošnja i emisija CO₂ za operacije sustava koji koriste toplinsku energiju [izvor vlastiti proračuni i 1]

Operacije sustava	Energetska potrošnja (GJ/t CO ₂)	Emisija CO ₂ generirana: (Mt/god):	
		Zemnim plinom	Ugljenom
Kalcinator	6,0-9,0	0,30-0,45	0,55-0,83
Grijač	3,1	0,155	0,287
Izmjenjivač topline	-1,5	-0,075	-0,139
Ukupno	7,6-10,6	0,38-0,53	0,68-0,97

Na kraju procesa neto uhvaćeni CO₂ iznosi između 0,19-0,48 Mt/god ako se kao izvor energije koristi zemni plin, a upotreba ugljena kao izvora energije rezultira većom emisijom CO₂ od one koja je sakupljena. Korištenje obnovljivih izvora energije kao izvor električne energije dovodi do vrlo niskih emisija CO₂, 0,03-0,06 Mt/god CO₂ u slučaju kad se kao izvor električne energije koristi solarna energija i 0,001-0,02 Mt/god CO₂ kada se kao izvor električne energije koristi vjetar.



Dijagram 3. Procjene energetske potrošnje sustava izravnog sakupljanja zraka koji koristi tekuća otapala

3.1.4. Analiza troškova

U analizi troškova prikazan je ukupni godišnji trošak uklanjanja 1 Mt CO₂ iz zraka pomoću uređaja koji koristi tekuća otapala. U analizi je također predstavljen i neto trošak sakupljanja, a njega je važno uzeti u obzir jer se prilikom rada postrojenja stvaraju dodatne emisije CO₂. Sažetak tih procjena nalazi se u Tablici 7.

Procijenjeni kapitalni i operativni troškovi sakupljanja 1 Mt/god CO₂ pomoću uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koristi tekuća otapala navedeni su u Tablici 5 i Tablici 6.

Prema procjenama troškovi izravnog sakupljanja zraka iznose oko 133-264 USD/t CO₂. Ako se električna energija i/ili toplinska energija dobivaju sagorijevanjem fosilnih goriva, tada će doći do značajnih emisija CO₂, čime će se smanjiti učinak postrojenja za izravno sakupljanje zraka. Ako želimo postići veću efikasnost sakupljanja CO₂, potrebno je kao izvor električne energije koristiti obnovljive izvore, kao što su vjetar i solarna energija, koji prilikom generiranja električne energije imaju relativno niske emisije CO₂.

U Tablici 7. procijenjeni su i neto troškovi po toni uklonjenog CO₂. Potrebno je izračunati neto troškove kako bi se dobile prave vrijednosti troškova sakupljanja 1Mt CO₂. Da bi se izračunali neto troškovi potrebno je znati koji postojeći podaci iz tablice se koriste. Naprimjer, ako se želi izračunati **minimalni** neto trošak sakupljanja 1t CO₂ sa uređajem koji koristi tekuća otapala, koji električnu energiju generira vjetrom a toplinsku energiju sagorijevanjem zemnog plina, potrebno je prvo uzeti **gornju** granicu neto sakupljene količine CO₂ i izračunati udio sakupljanja (u ovom slučaju podijeli se 1 sa 0,62) i taj broj pomnoži se sa **donjom** granicom cijene sakupljanja (133 USD/t CO₂). Isto tako, ako želimo izračunati **maksimalni** neto trošak sakupljanja, potrebno je uzeti **donju** granicu neto sakupljene količine CO₂ i izračunati udio sakupljanja (u ovom slučaju podijelimo 1 sa 0,45) i pomnoži se sa **gornjom** granicom sakupljanja (237 USD/t CO₂). Na taj način dobiva se prava vrijednost sakupljanja 1Mt CO₂, koja će u stvarnosti uvijek biti veća od troškova sakupljanja.

Analiza sustava za sakupljanje CO₂ koji koristi tekuća otapala otkriva da ako se koriste obnovljivi izvori energije kao izvor električne energije i zemni plin kao izvor toplinske energije, postići će se puno bolja efikasnost sakupljanja, te će to dovesti do nižih troškova. Korištenjem navedenih izvora energije troškovi sakupljanja kreću se u rasponu od 214 do 636 USD/t CO₂.

Tablica 5. Kapitalni troškovi uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koristi tekuća otapala [1]

Kapitalni troškovi	Iznos (u milijunima USD)
Dobavljač zraka	210-420
Kaustifikator, slaker i pročišćivač	130-195
Jedinica za odvajanje zraka	65-100
Kalcinator	270-540
Kapitalna ulaganja u totalu	675-1255
Kapitalna ulaganja-godišnje (milijuni USD/god) ^a	81-151

^a ako se pretpostavi da će postrojenje imati vijek trajanja od 30 godina

Tablica 6. Operativni troškovi uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koristi tekuće otapalo i godišnje sakuplja 1Mt CO₂ [izvor vlastiti proračuni, 1 i 5]

Operativni troškovi		Iznos (u milijunima USD/god)	Komentar
Održavanje		21-38	3% od ukupnih kapitalnih ulaganja
Radnici		5-9	30% od troškova održavanja
Potrošni materijal (kemikalije, voda)		4	
Ako električnu energiju generiramo:	Ugljenom	10-19	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije ugljenom za 0,032 USD/kWh [30]
	Zemnim plinom	21-39	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije zemnim plinom za 0,065 USD/kWh [30]
	Vjetrom	7-12	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije vjetrom za 0,02 USD/kWh [31]
	Solarnom energijom	19-36	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije solarnom energijom za 0,06 USD/kWh [32]
Zemni plin		19-27	Proračunato preko Tablice 1 i cijene zemnog plina 2,39 USD/MBTU [33]
Ugljen		17-24	Proračunato preko Tablice 1 i cijene ugljena 1,92 USD/MBTU [33]

Tablica 7. Sažetak procijenjenih energetske potrebe, CO₂ emisija i troškovi sakupljanja CO₂ uređaja koji sakupljaju CO₂ iz atmosfere koristeći tekuća otapala [izvor vlastiti proračuni i 1]

Izvor energije	Energetska potrošnja (GJ/t CO ₂)		Emisija CO ₂ generirana: (Mt/god)		Neto sakupljeni CO ₂ Mt/god CO ₂	Trošak sakupljanja (USD/t CO ₂)	
	Električni	Toplinski	Električni izvori	Toplinski izvori		Sakupljeni	Neto sakupljeni
zemni plin	zemni plin	zemni plin	0,20-0,47	0,38-0,53	0-0,42	147-264	350-∞
ugljen	ugljen	zemni plin	0,29-0,53	0,38-0,53	0-0,33	136-244	412-∞
solarni	solarni	zemni plin	0,03-0,06	0,38-0,53	0,41-0,59	145-261	245-636
vjetar	vjetar	zemni plin	0,001-0,02	0,38-0,53	0,45-0,62	133-237	214-526
zemni plin	zemni plin	ugljen	0,20-0,47	0,68-0,97	0-0,12	145-261	1208-∞
ugljen	ugljen	ugljen	0,29-0,53	0,68-0,97	0-0,03	134-241	4500-∞
solarni	solarni	ugljen	0,03-0,06	0,68-0,97	0-0,29	143-258	495-∞
vjetar	vjetar	ugljen	0,001-0,02	0,68-0,97	0-0,42	131-234	312-∞

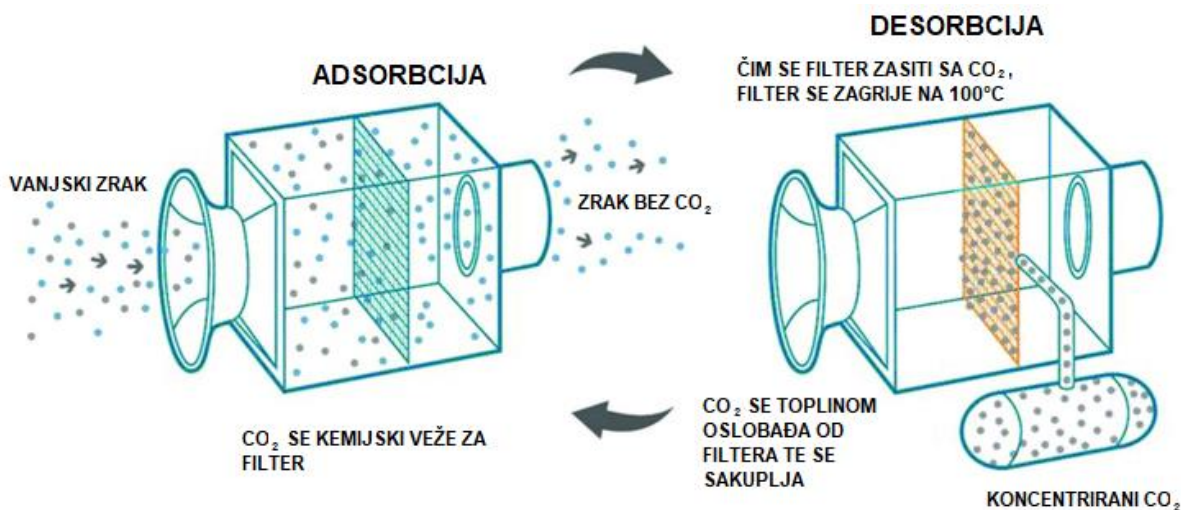
3.2. Uređaji za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koriste sustave čvrstih sorbenata

3.2.1. Opis procesa

Uređaji za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koriste sustave čvrstih sorbenata imaju dva glavna procesa: [1]

- adsorpcija
- desorpcija

Ova dva procesa djeluju cikično. Zrak se upuhuje kroz čvrsti sorbent koji se nalazi u zračnom kontaktoru i tamo se CO₂ adsorbira na čvrsti adsorbent. Nakon toga se taj čvrsti adsorbent sa CO₂ izlaže toplini i/ili vakuumu kako bi se (koncentrirani CO₂) oslobodio iz čvrstog sorbenta. Čvrsti sorbent je potrebno ohladiti prije nego što se proces ponovo pokrene. [1]



Slika 4. Shematska ilustracija pojednostavljenog prikaza funkcioniranja sustava za sakupljanje zraka koji koristi čvrste sorbente [34]

3.2.2. Operacije procesa

3.2.2.1. Adsorbpcija

Zrak se upuhuje kroz čvrstu strukturu (kontaktor) koja sadrži prikladan materijal koji adsorbira CO₂ i iz procesa ispušta zrak bez CO₂. Kod adsorbpcije najveća potrošnja energije odnosi se na ventilatore koji usmjeravaju zrak kroz čvrsti sorbent. [1]

3.2.2.2. Desorbpcija

Nakon što se čvrsti sorbent zasiti s CO₂, premješta se u desorber (ili se adsorber prebaci na desorbpcijski način rada) gdje se CO₂ samo zagrijavanjem ili zagrijavanjem i vakuumom desorbira te se stvara koncentrirani CO₂. Desorbpcija je energetska najintenzivniji dio procesa, jer uključuje toplinsku energiju potrebnu za pokretanje desorbpcije CO₂ i zagrijavanje sorbenta. Zbog energetske intenzivnosti inovacije u konstruiranju procesa za ovaj korak desorbpcije mogu imati veliki utjecaj na ukupnu učinkovitost sakupljanja CO₂. Konstrukcije koje omogućuju brzi prijenos topline, kao i minimiziranje parcijalnog tlaka CO₂ nad adsorbpcijskim medijem, povoljne su jer pružaju bolju koncentraciju i toplinu za desorbpciju CO₂. [1]



Slika 5. Prvo svjetsko komercijalno postrojenje za izravno sakupljanje CO₂ iz atmosfere koje je smješteno u Hinwilu u Švicarskoj [34]

3.2.3. Masena i energetska bilanca

Sustavi sakupljanja zraka pomoću čvrstih sorbenata imaju za cilj: [1]

- 1) smanjiti pad tlaka kroz kontaktor zračnog sorbenta za bolji protok,
- 2) minimizirati masu kontaktora istodobno povećavajući masu sorbenta (čime se minimaliziraju gubici toplinske energije),
- 3) maksimizirati unos CO₂.

Zbog široke varijacije parametara u literaturi [1] navedena su tri scenarija energetske potrošnje koji predstavljaju različite stupnjeve optimizacije procesa i izvođenja, a prikazani su u Tablici 8. Kombinacijom svih najboljih mogućih parametara postiže se niska energetska potrošnja. Međutim, taj scenarij je poprilično nedostižan jer optimiziranje jednog od parametara može drugog odmaknuti od optimalnog. Slično tome, promatra se scenarij gdje su korištene sve najpesimističnije vrijednosti, koje predstavljaju slučaj visoke energetske potrošnje, a koristan je jer prikazuje gornju granicu troškova sakupljanja CO₂. Može se primijeniti i treći scenarij koji koristi realne parametre (srednje vrijednosti). [1]

Tablica 8. Procijenjeni intenzitet energetskih potreba pojedinih procesa sustava za sakupljanje zraka pomoću čvrstih sorbenata [1]

Proces	Vrsta energije	Energetska potrošnja (GJ/t CO ₂)		
		Niska	Srednja	Visoka
Desorpcija	Toplinska	1,85	4,1	19,3
Ventilatori zračnih konaktora	Električna	0,08	0,835	3,79
Desorpcijska vakuumska pumpa	Električna	0,0004	0,0125	0,091
Ukupno		1,93	4,95	23,18

Kako bi se minimizirala emisija CO₂ prilikom rada postrojenja, odnosno kako bi se maksimizirao neto sakupljeni CO₂ potrebno je da se električna energija generira pomoću

obnovljivih izvora energije, a toplinska zemnim plinom. Za proračun se koristi i generiranje električne i toplinske energije ugljenom jer daje najgori scenarij emisija CO₂, prikazujući gornju granicu troškova sakupljanja.

U Tablici 9. prikazana je količina emisije generirana radom svakog od procesa za svaku od tri razine energetske potrošnje.

Tablica 9. Procijene emisije CO₂ za svaki proces u sustavu izravnog sakupljanja zraka na bazi čvrstog sorbenta za svaki od tri scenarija [izvor vlastiti proračun i 1]

Procesi	Izvor energije		Emisija CO ₂ : (Mt/god):		
			Razina energetske potrošnje:		
	Električna	Toplinska	Niska	Srednja	Visoka
Desorpcija		Zemni plin	0,09	0,21	0,97
		Ugljen	0,17	0,37	1,78
Ventilatori zračnih konektora	Zemni plin		0,01	0,11	0,49
	Ugljen		0,02	0,21	0,96
	Vjetar		0,0003	0,003	0,013
	Solarna en.		0,002	0,024	0,11
Desorpcijska vakuumska pumpa	Zemni plin		0,00005	0,0016	0,012
	Ugljen		0,0001	0,0031	0,023
	Vjetar		0,00001	0,00004	0,0003
	Solarna en.		0,00001	0,0004	0,0027
Ukupno	Zemni plin	Zemni plin	0,102	0,314	1,466
	Ugljen	Zemni plin	0,113	0,419	1,994
	Vjetar	Zemni plin	0,093	0,208	0,979
	Solarna en.	Zemni plin	0,094	0,229	1,078
	Vjetar	Ugljen	0,171	0,381	1,796
	Ugljen	Ugljen	0,191	0,592	2,76

U proračunu je vidljivo da je u scenariju visoke energetske potrošnje gotovo nemoguće postići negativne emisije CO₂, osim u slučaju gdje se kao izvor električne energije koristi

vjetar, a kao izvor toplinske energije zemni plin. Također se može uočiti da srednji scenarij, onaj sa realističnim parametrima, ima znatno niže emisije CO₂, a njega također smatramo najkorisnijim prilikom analize troškova jer predstavlja realniji scenarija u usporedbi s druga dva. Koristeći zemni plin kao izvor električne i toplinske energije dobiju se prihvatljive razine emisije i iznose 0,314 Mt/god CO₂. Negativne emisije CO₂ dodatno se smanjuju kada se koriste obnovljivi izvori energije kao izvor električne energije i iznose od 0,208 do 0,229 Mt/god CO₂. Generiranjem električne i toplinske energije pomoću ugljena emitira se 0,592 Mt/god CO₂ i taj scenarij predstavlja najgori realni scenarij emisija CO₂ kod uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere pomoću čvrstih sorbenta. Kod uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere pomoću tekućih otapala u najboljem mogućem scenariju (onom koji koristi vjetar kao izvor električne energije, te zemni plin kao izvor toplinske energije) emitira se od 0,38 do 0,55 Mt/god CO₂. Usporedivši navedene podatke može se zaključiti da su uređaji koji za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koriste čvrste sorbente puno efikasniji od onih koji koriste tekuća otapala, te se može pretpostaviti da će zato imati i niže troškove sakupljanja.

3.2.4. Analiza troškova

U analizi troškova prikazan je ukupni godišnji trošak sakupljanja 1 Mt CO₂ iz zraka pomoću uređaja koji koristi čvrste sorbente. U analizi je također predstavljen i neto trošak sakupljanja, a njega je važno uzeti u obzir jer se prilikom rada postrojenja stvaraju dodatne emisije CO₂. Sažetak tih procjena nalazi se u Tablici 12.

Procijenjeni kapitalni i operativni troškovi uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere koji koristi čvrste sorbente za sakupljanje 1Mt/god CO₂ navedeni su u Tablici 10 i Tablici 11.

U proračunu troškova vidljivo je da su troškovi sakupljanja CO₂ pomoću čvrstih sorbenata relativno jeftiniji u odnosu na procese koji CO₂ sakupljaju pomoću tekućih otapala. Proračunati troškovi neto sakupljenog CO₂ u rasponu su od 61 USD/t CO₂ do praktički beskonačnosti, za one procese koji emitiraju više CO₂ nego što ga sakupe. Niži troškovi postižu se kombinacijom svih najboljih parametara, ali taj scenarij vrlo vjerojatno je neostvariv zbog korelacija među različitim parametrima. Najveći troškovi dobiju se najgorom kombinacijom parametara. Kao što je prethodno navedeno, procjene troškova obuhvaćaju

širok raspon. Zanimajući donju granicu troškova kao realno neostvarivu, a gornju kao pretjerano skupu, preporuča se srednji scenarij kao najpovoljniji.

Analiza sustava za sakupljanje zraka koji koriste čvrste sorbente otkriva sljedeće:

- ako se koriste obnovljivi izvori energije kao izvor električne energije i zemni plin kao izvor toplinske energije, postići će se puno bolja efikasnost sakupljanja, te će to dovesti do nižih troškova,
- postupci koji nisu posebno optimizirani za izravno sakupljanje zraka generirat će puno veće troškove,
- procesi velikih razmjera, oni koji sakupljaju preko 1 Mt CO₂ godišnje, a koriste čvrste sorbente, mogli bi u najperspektivnijim scenarijima generirati troškove u rasponu od 100 do 160 USD/t CO₂.

Tablica 10. Kapitalni troškovi uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere na bazi čvrstih sorbenata koji godišnje sakuplja 1Mt CO₂ [1]

Kapitalni troškovi	Iznos (u milijunima USD)
Zračni kontaktori sa ventilatorima	450
Izmjenjivač topline	8
Vakumska pumpa	16
Ukupna kapitalna ulaganja	474
Ukupna kapitalna ulaganja godišnje (milijuni USD/ god) ^a	16

^a ako se pretpostavi da će postrojenje imati vijek trajanja od 30 godina

Tablica 11. Operativni troškovi uređaja za sakupljanje CO₂ iz atmosfere na bazi čvrstih sorbenata koji godišnje sakuplja 1Mt CO₂ [izvor vlastiti proračun, 1 i 5]

Operativni troškovi			Iznos (u milijunima USD/ god)	Komentar
Održavanje			15	3% od ukupnih kapitalnih ulaganja
Radnici			5	30% od troškova održavanja
Potrošni materijal (kemikalije, voda)			12	Iz literature [5]
Ako se električna energija generira:	Ugljenom	Niska	1	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije ugljenom za 0,032 USD/kWh [30]
		Srednja	8	
		Visoka	34	
	Zemnim plinom	Niska	2	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije zemnim plinom za 0,065 USD/kWh [30]
		Srednja	15	
		Visoka	70	
	Vjetrom	Niska	0,5	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije vjetrom za 0,02 USD/kWh [31]
		Srednja	5	
		Visoka	22	
	Solarnom energijom	Niska	2	Proračunato preko Tablice 1 i troška generiranja el. energije solarnom energijom za 0,06 USD/kWh [32]
		Srednja	14	
		Visoka	65	
Ako se toplinska energija generira:	Zemnim plin	Niska	5	Proračunato preko Tablice 1. i cijene zemnog plina 2,39 USD/MBTU [33]
		Srednja	11	
		Visoka	49	
	Ugljenom	Niska	4	Proračunato preko Tablice 1 i cijene ugljena 1,92 USD/MBTU [33]
		Srednja	9	
		Visoka	39	

Tablica 12. Sažetak procijenjenih energetske potrebe, CO₂ emisija i troškova sakupljanja CO₂ uređaja koji sakupljaju CO₂ iz atmosfere koristeći čvrste sorbente [izvor 1 i vlastiti proračun]

Izvor energije	Razina energetske potrošnje	Energetska potrošnja (GJ/t CO ₂)		Emisija CO ₂ generirana: (Mt/god)		Neto sakupljeni CO ₂	Trošak sakupljanja (USD/t CO ₂)	
		Električna	Toplinska	Električnom energijom	Toplinskom energijom		Sakupljeni	Neto sakupljeni
zemni plin	Niska	0,08	1,85	0,010	0,092	0,897	55	61
		0,848	4,1	0,109	0,205		74	108
		3,881	19,3	0,501	0,965		167	∞
ugljen	Niska	0,08	1,85	0,020	0,092	0,887	54	61
		0,848	4,1	0,214	0,205		67	116
		3,881	19,3	0,979	0,965		131	∞
vjetar	Srednja	0,08	1,85	0,0003	0,092	0,907	54,5	60
		0,848	4,1	0,003	0,205		64	81
		3,881	19,3	0,014	0,965		119	5700
solarni	Niska	0,08	1,85	0,002	0,092	0,905	55	61
		0,848	4,1	0,025	0,205		73	94
		3,881	19,3	0,113	0,965		162	∞
vjetar	Niska	0,08	1,85	0,0003	0,171	0,828	52,5	63
		0,848	4,1	0,003	0,375		62	101
		3,881	19,3	0,014	1,782		109	∞
ugljen	Niska	0,08	1,85	0,020	0,171	0,809	53	66
		0,848	4,1	0,214	0,375		65	160
		3,881	19,3	0,979	1,782		121	∞

4. ZAKLJUČAK

Kako bi se spriječilo globalno zatopljenje potrebno je dovesti emisije CO₂ do neto nule, odnosno potrebno je težiti da se emisije CO₂ uzrokovane ljudskim aktivnostima dovedu do nule, na način da se smanje emisije CO₂, te da se CO₂ sakupi iz atmosfere pomoću tehnologija negativnih emisija.

Jedan od načina kako se to može postići je pomoću uređaja koji sakupljaju CO₂ iz atmosfere a cilj ovoga rada je prezentirati ove tehnologije. Glavna zadaća je izračunati troškove sakupljanja CO₂ iz atmosfere, preispitati na koje se sve načine može povećati efikasnost i time smanjiti trošak sakupljanja, te usporediti troškove sakupljanja kod različitih tipova tehnologije. Analizom se dolazi do zaključka da se najveća efikasnost sakupljanja postiže ako se koriste obnovljivi izvori energije za generiranje električne energije, a zemni plin kao izvor toplinske energije. Također u proračunu je vidljivo kako uređaji koji sakupljaju CO₂ iz atmosfere pomoću tekućih otapala imaju veću energetska potrošnju od onih koji CO₂ sakupljaju pomoću čvrstih sorbenata, te zbog toga imaju manju efikasnost i veći trošak sakupljanja.

Najveća prednost ovog tipa tehnologije je da se može postaviti bilo gdje u svijetu, odnosno na ona mjesta koja nisu prikladna za agrokulturu, naseljavanje ili pošumljavanje, a najveći nedostatak su relativno visoki troškovi sakupljanja. Proračunom je utvrđeno da troškovi u najperspektivnijim slučajevima mogu iznositi oko 100 USD/t CO₂, a u koliko se želi postići neto nula emisijske ciljeve na godišnjoj razini potrebno je sakupljati oko 20 Gt CO₂, što bi dovelo do ukupnih troškova od 2 bilijuna USD (2×10^{12} USD) na godinu. Taj iznos je oko 2,5 % sveukupnog svjetskog GDP za 2020. godinu, koji iznosi 84 bilijuna USD [35].

Zbog visokih troškova koje iziskuju ove tehnologije, nije se preporučljivo u potpunosti oslanjati samo na njih kako bi se spriječilo globalno zatopljenje, nego je potrebno smanjiti same emisije CO₂. U budućnosti je potrebno težiti da se što više smanji korištenje fosilnih goriva kao izvor energije, jer ona emitiraju najveće količine CO₂ u atmosferu. Rješenje je da se u što većoj mjeri koriste obnovljivi izvori energije kao i nuklearna energija. Također je bitno elektrificirati što više zagađivača, od automobila do raznih peći, jer se električna

energija može generirati tehnologijama niskih emisija. Elektrificiranjem u kombinaciji sa uređajima za sakupljanje CO₂ iz atmosfere mogu se postići ciljevi postavljeni Pariškim sporazumom, te time spriječiti (smanjiti) globalno zatopljenje, a to će biti ostvarivo samo ako se u provedbi ujedine sve razvijene zemlje svijeta.

LITERATURA

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration (A Research Agenda)*, 2019., (internet) <https://www.nap.edu/read/25259/chapter/1>
- [2] Global Monitoring Laboratory, dostupno na: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html, pristupljeno 3.8.2021.
- [3] Our World in Data, dostupno na: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>, pristupljeno 27.7.2021.
- [4] International Energy Agency, dostupno na <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions>, pristupljeno 3.8.2021.
- [5] R. Socolow, *Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals: A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs*, 2011 (internet) https://www.researchgate.net/publication/237008861_Direct_Air_Capture_of_CO2_with_Chemicals_A_Technology_Assessment_for_the_APS_Panel_on_Public_Affairs
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, 2013, (internet) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf
- [7] Lacis, A. A., Schmidt, G. A., Rind, D., & Ruedy, R. A, *Atmospheric CO₂: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature*, 2010, (internet) <https://science.sciencemag.org/content/330/6002/356>
- [8] Mulhern O.: A Graphical History of Atmospheric CO₂ Levels Over Time, (internet) https://earth.org/data_visualization/a-brief-history-of-co2/
- [9] Berkeley Earth, dostupno na <http://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2020/>, pristupljeno 4.8.2021.
- [10] United States Environmental Protection Agency, dostupno na: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>, pristupljeno: 5.9.2021.
- [11] Scientific American, dostupno na: <https://www.scientificamerican.com/article/deforestation-and-global-warming/>, pristupljeno 5.9.2021.
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*, 2007, (internet) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf

- [13] U. S. Geological Survey, dostupno na: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards/volcanoes-can-affect-climate>, pristupljeno: 4.9.2021.
- [14] Insider, dostupno na: <https://www.businessinsider.com/volcano-eruptions-increase-japan-philippines-warming-climate-glacial-retreat-2018-1>, pristupljeno: 4.9.2021.
- [15] The Conversation, dostupno na: <https://theconversation.com/how-wildfires-affect-climate-change-and-vice-versa-158688>, pristupljeno: 4.9.2021.
- [16] *Earth System Science Data, Global fire emissions estimates during 1997–2016*, 2017, (internet) [https://e\[34\].copernicus.org/articles/9/697/2017/](https://e[34].copernicus.org/articles/9/697/2017/)
- [17] American Association for the Advancement of Science, dostupno na: <https://www.eurekalert.org/news-releases/706238>, pristupljeno: 5.9.2021.
- [18] National Geographic, dostupno na: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/greenhouse-gases-lurk-in-oceans-could-make-warming-far-worse>, pristupljeno: 5.9.2021.
- [19] Europsko vijeće, dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/>, pristupljeno 4.8.2021.
- [20] Climate Action Tracker, dostupno na <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>, pristupljeno 4.8.2021.
- [21] Europski parlament, dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20191115STO66603/eu-i-pariski-sporazum-put-prema-klimatskoj-neutralnosti>, pristupljeno 4.8.2021.
- [22] Andrew, R.: *Global Mitigation Curves*, Center for International Climate Research, 2016, dostupno na: https://folk.universitetetioslo.no/roberan/t/global_mitigation_curves.shtml,
- [23] <https://www.brentwoodindustries.com/cooling-tower/herringbone-film-media/> (17.4.2021.)
- [24] G. Holmes i D. W. Keith, An air–liquid contactor for large-scale capture of CO₂ from air, 2012 (internet) [https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2012.0137?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:cro\[21\]ef.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed](https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2012.0137?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:cro[21]ef.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed)
- [25] BlueSkyModel, dostupno na: <https://blueskymodel.org/kilowatt-hour>, pristupljeno 18.4.2021.
- [26] R. Baciocchi, *Process Design and Energy Requirements for the Capture of Carbon Dioxide from Air*, 2006 (internet) https://www.researchgate.net/publication/222536472_Process_Design_and_Energy_Requirements_for_the_Capture_of_Carbon_Dioxide_from_Air

- [27] American Geosciences Institute, dostupno na: <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/how-much-carbon-dioxide-produced-when-different-fuels-are-burned>, pristupljeno 22.4.2021.
- [28] U.S. Energy Information Administration, dostupno na: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3>, pristupljeno 22.4.2021.
- [29] Metric Conversions, dostupno na: <https://www.metric-conversions.org/hr/tezina/funte-u-kilogrami.htm>, pristupljeno 22.4.2021.
- [30] Brookings, dostupno na: <https://www.brookings.edu/opinions/the-real-costs-of-u-s-energy/>, pristupljeno 26.4.2021.
- [31] Berkeley Lab, dostupno na: <https://newscenter.lbl.gov/2019/08/26/report-confirms-wind-technology-advancements-continue-to-drive-down-the-cost-of-wind-energy/>, pristupljeno 26.4.2021.
- [32] U.S. Department of Energy, dostupno na: <https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-2030>, pristupljeno 26.2.2021.
- [33] Statista, dostupno na: <https://www.statista.com/statistics/189180/natural-gas-vis-a-vis-coal-prices/>, pristupljeno 26.4.2021.
- [34] Beuttler C., Charles L., Wurzbacher J., *The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions*, 2019, dostupno na <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00010/full>
- [35] Statista, dostupno na: <https://www.statista.com/statistics/268750/global-gross-domestic-product-gdp/>, pristupljeno 29.8.2021.