

Sekvestracija ugljikovog dioksida iz atmosfere - umjetna drveća

Krišković, Antonina

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:184:545500>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Medicine - FMRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
SANITARNOG INŽENJERSTVA

Antonina Krišković
SEKVESTRACIJA UGLJIKOVOG DIOKSIDA IZ ATMOSFERE –
UMJETNA DRVEĆA

Završni rad

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
SANITARNOG INŽENJERSTVA

Antonina Krišković
SEKVESTRACIJA UGLJIKOVOG DIOKSIDA IZ ATMOSFERE –
UMJETNA DRVEĆA

Završni rad

Rijeka, 2022.

Mentor: doc. dr. sc. Mirna Petković Didović, dipl. ing. kemije

Završni rad obranjen je dana 19.09.2022. u/na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci ,

pred povjerenstvom u sastavu:

1. izv.prof.dr.sc. Dalibor Broznić, dipl.sanit.ing. (*predsjednik Povjerenstva*)

2. doc.dr.sc. Sunčica Buljević, dipl.sanit.ing.

3. doc.dr. sc. Mirna Petković Didović, dipl. ing. kemije

Rad sadrži 34 stranice, 11 slika, / tablica, 42 literaturna navoda.

Zahvala

Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Mirni Petković Didović na uloženom trudu, izdvojenom vremenu i stručnim savjetima koji su mi uvelike pomogli pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na razumijevanju i potpori koju mi svakodnevno pružaju.

Naposljetku, zahvaljujem se prijateljima i kolegama na moralnoj podršci koju su mi pružali, ne samo prilikom izrade rada, već i tijekom studiranja.

Sadržaj završnog rada

1. Uvod.....	3
2. Svrha rada	4
3. Pregled literature	5
3.1. Problem globalnog zagrijavanja	5
3.2. Sekvestracija.....	6
3.2.1. Sekvestracija ugljika	6
3.2.1.1. Biotička sekvestracija	7
3.2.1.1.1. Oceanska sekvestracija.....	7
3.2.1.1.2. Zemaljska sekvestracija.....	8
3.2.1.2. Abiotička sekvestracija	8
3.2.1.2.1. Geološka sekvestracija	8
3.2.1.2.2. Oceanska sekvestracija.....	9
3.2.1.2.3. Karbonizacija minerala	10
3.2.1.3. Geoinženjerstvo	10
3.3. Metoda izravnog hvatanja zraka (DAC).....	11
3.4. Umjetna drveća.....	12
3.4.1. Mehanizam umjetnog drveća	13
3.4.1.1. Karbonatni (CO_3^{2-}) i hidrogenkarbonatni ion (HCO_3^-).....	15
3.4.1.2. Kvarterni amonijski kationi (NR_4^+)	16
3.4.1.3. Kemijski procesi u mehanizmu djelovanja umjetnog drveća	17
3.4.1.4. Značaj vlage u mehanizmu djelovanja.....	20
3.4.2. Ionsko izmjenjivačka smola	21
3.4.3. Prototip umjetnog drveta.....	22
3.4.4. Dizajn umjetnih drveća	23
3.4.5. Usporedba prirodnog i umjetnog drveća	25
4. Zaključci.....	27
5. Literatura	29
6. Životopis.....	34

Sažetak

Ugljikov dioksid, CO₂, navodi se kao najznačajniji uzročnik učinka staklenika. Učinak staklenika povećava se proporcionalno s koncentracijom ugljikovog dioksida. Kako je koncentracija CO₂ u atmosferi već odavno vrlo visoka, naš planet prolazi kroz globalno zagrijavanje koje se vrlo negativno odražava na klimu i uzrokuje katastrofalne štete. Neka od mogućih rješenja ovog gorućeg globalnog problema su smanjenje potrošnje energije, poticanje proizvodnje/potrošnje ekološki prihvatljivijih oblika energije, te ono jednako upečatljivo, a medijski podzastupljeno – sekvestracija CO₂ iz atmosfere.

Sekvestracija podrazumijeva dugoročno pohranjivanje CO₂ u podzemlju, a može biti biotička i abiotička. Skladištenju CO₂ prethodi hvatanje i pročišćavanje ili obrađivanje ukoliko je potrebno. Pojam sekvestracije sve se više spominje i u geoinženjerstvu. U geoinženjerstvo spada i tzv. DAC (engl. *direct air capture*) metoda. DAC metoda odnosi se na izravno prikupljanje CO₂ iz zraka pomoću sorbensa. Prikupljeni CO₂ može se skladištiti ili ponovno upotrijebiti.

Na metodi izravnog hvatanja iz zraka temelji se i način djelovanja umjetnih drveća. Umjetna drveća su pasivni uređaji koji predstavljaju alternativu prirodnom drveću. Uz pomoć specifičnog sorbensa koji – kada je suh – ima visok afinitet za CO₂, prikupljaju CO₂, a otpuštaju ga kada se sorbent smoči. Umjetno drveće ima svoje prednosti i nedostatke. Nedostaci su visoki troškovi, nepredvidivost i potreba za velikim prostorom. Prednosti su brzina prikupljanja CO₂, mali utrošak energije i regenerirajući sorbent.

U proteklih nekoliko godina, došlo je do razvoja tehnologija skladištenja CO₂ te ovakvi projekti naoko imaju svijetlu budućnost, ali potrebna je veća potpora i educiranje šire zajednice.

Ključne riječi: umjetno drveće, CO₂, sekvestracija CO₂, sorbens

Abstract

Carbon dioxide, CO₂, is well known as the most significant contributor to the greenhouse effect. The greenhouse effect increases proportionally with the carbon dioxide concentration. As the concentration of CO₂ in the atmosphere became very high, humanity is threatened by global warming, causing catastrophic damage due to more and more frequent extreme weather phenomena. Some of the possible solutions to this leading global concern are reducing energy consumption, encouraging the production/consumption of ecologically more acceptable energy sources, and just as important, but less media-prominent one: carbon sequestration.

Carbon sequestration refers to the long-term storage of CO₂ underground, either biotic or abiotic. CO₂ storage is preceded by the capture and purification or processing if necessary. The concept of sequestration is being mentioned more and more in the realm of geoengineering. Geoengineering also includes the DAC (*Direct Air Capture*) method. The DAC method refers to the direct capture of carbon dioxide from the air using a sorbent. The captured CO₂ can be stored or reused.

The method of direct air capture is also the basis of artificial trees' mechanism of action. Artificial trees are passive devices that represent an alternative to natural trees. With the help of a specific sorbent, which – when dry – demonstrates a high affinity for CO₂, artificial trees collect CO₂ and release it when the sorbent gets wet. Artificial trees have their advantages and disadvantages. Disadvantages are high costs, unpredictability, and a need for a large space area. The advantages are the speed of carbon collection, low energy consumption, and the possibility of sorbent regeneration.

In the past few years, carbon dioxide storage technologies have been developed, and projects like this seem to have a bright future, but more support and education of a wider population are needed.

Key words: artificial trees, CO₂, CO₂ sequestration, sorbent

1. Uvod

Ugljikov dioksid (CO_2), vodena para (H_2O) i ozon (O_3) sastavni su dio atmosfere (1). Atmosfera može propustiti većinu vidljive sunčeve svjetlosti, prilikom čega se Zemljina površina zagrijava i emitira toplinsko infracrveno (IR) zračenje. Kako su navedeni plinovi tzv. IR-aktivni plinovi, oni apsorbiraju IR zračenje i reemitiraju ga u svim smjerovima, što dodatno zagrijava litosferu i niže slojeve atmosfere. (1) Ovaj fenomen naziva se učinkom ili efektom staklenika. Učinak staklenika nema isključivo loš utjecaj. On štiti planet od hladnoće, međutim činjenica je da su koncentracije stakleničkih plinova u porastu pa se i sam učinak staklenika povećava te pridonosi ukupnom zagrijavanju planete. Kad su u pitanju klimatske nepogode, CO_2 je najznačajniji atmosferski plin. Dakako, postoje i drugi staklenički plinovi [npr. klorofluorouglijci (freoni), metan (CH_4), dušikov oksid (N_2O)] koji imaju sličan utjecaj na klimatske promjene (2), ali upravo je porast koncentracije CO_2 postao istaknut politički i znanstveni problem. Trenutna koncentracija CO_2 u atmosferi iznosi 406 ppm (3), a prognozira se da će temperatura površine Zemlje na globalnoj razini posljedično tome tijekom sljedećeg desetljeća porasti za 2 °C do 6 °C (4). U skladu s prognozama, bilo je nužno osmisliti plan prevencije klimatskih nepogoda uzimajući u obzir da je koncentracija CO_2 već vrlo visoka te da biljke jednostavno nisu u mogućnosti apsorbirati toliku količinu CO_2 i tako riješiti problem.

Kao potencijalno rješenje nameće se sekvestracija CO_2 iz atmosfere, što podrazumijeva hvatanje CO_2 te njegovo dugoročno skladištenje na za to predviđena mjesta (5). Sekvestracija je već poznata tema mnogih publikacija te postoje razne podjele i tipovi. Podjele su napravljene s obzirom na vrstu prostora gdje se CO_2 pohranjuje, s obzirom na stupanj tehnološkog razvoja, kao i o uključenosti/neuključenosti živih organizama u sam proces (6). Tehnološka ili umjetna sekvestracija kao jedna od stavki geoinženjeringa, odnosi se na korištenje inovativnih metoda te je usmjerena na razvoj novih te usavršavanje već postojećih tehnologija koje bi pridonijele smanjenju emisije CO_2 u atmosferu. Jedan od primjera noviteta je umjetno drveće, tehnologija koja je u fokusu ovoga rada. Umjetno se drveće temelji na metodi izravnog hvatanja CO_2 iz zraka (DAC metoda) te predstavlja alternativu prirodnom drveću (7). To je tehnologija koja mnogo obećava, ali iziskuje veliku financijsku potporu, značajnu potrošnju energije te, naravno, daljnja istraživanja.

2. Svrha rada

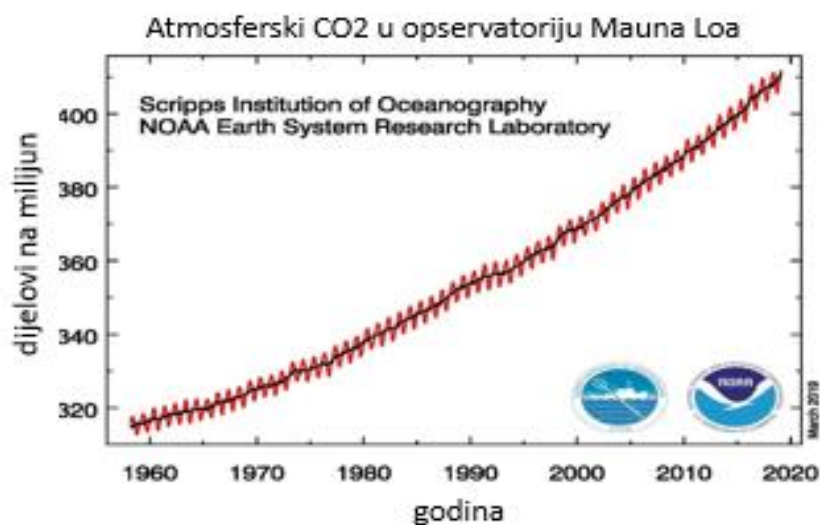
Svrha ovog završnog rada, koji je pregledni rad, jest opisati metode sekvestracije CO₂ iz atmosfere, s posebnim naglaskom na tehnologiju i razvoj umjetnog drveća, te istražiti i objasniti kemijske procese na kojima se temelji mehanizam njihovog djelovanja. Cilj je ukazati na sekvestraciju CO₂ kao važnog, a podcijenjenog, doprinosa u sprječavanju klimatskih promjena, predstaviti umjetno drveće kao jedno od potencijalnih rješenja ovog globalnog problema, te demonstrirati kako inovativni pogled na temeljne kemijske procese može dovesti do velikih otkrića.

3. Pregled literature

3.1. Problem globalnog zagrijavanja

CO₂ je staklenički plin te je kao takav jedan od glavnih uzroka globalnog zagrijavanja (8). Globalno zagrijavanje ozbiljan je problem današnjice, a samim time i aktualna tema mnogih publikacija. Trenutna svjetska godišnja emisija CO₂ prelazi 35 milijardi tona (9), a prosječni životni vijek CO₂ varira između 300 i 1000 godina (10). Iz tog su razloga pokrenute mnoge inicijative glede korištenja obnovljivih izvora energije, ali i razvoja novih tehnologija. Naglašava se važnost ekoloških aspekata energije te njene regeneracije, kao i sama potražnja za istom. Međuvladin panel o klimatskim promjenama (3) izvijestio je da bi emisija CO₂ mogla varirati između 48 i 55 Gt/god do 2050. godine. Također, očekuje se da će potražnja za energijom na globalnoj razini porasti od 40 % do 150 %. U izvješću se navodi da „ukoliko se ne poduzmu adekvatne mjere, koncentracija CO₂ doseći će od 535 ppm do 983 ppm do 2100. godine, što je znatno više od trenutne koncentracije koja iznosi 406 ppm“ (3) (Slika 1).

U skladu s prognoziranim vrijednostima poduzeti su određeni koraci. Pritom je važno spomenuti međunarodni klimatski sporazum čiji je dugoročni cilj ojačati reakciju na opasnost od klimatskih promjena. Riječ je o Pariškom sporazumu koji se temelji na ograničavanju porasta globalne prosječne temperature na manje od 2°C, odnosno do 1,5°C u odnosu na predindustrijsko razdoblje. Prosječna globalna temperatura danas je za 0,95°C do 1,2°C viša nego na kraju 19. stoljeća. Osim spomenutog sporazuma, za regulaciju posljedica klimatskih promjena, važan je i Kyoto protokol. Protokol iz Kyota smatra se dodatkom Pariškog sporazuma, a potpisan je s namjerom smanjivanja emisije CO₂ te ostalih stakleničkih plinova. Nadalje, jedan od načina koji bi pomogao u smanjenju emisija spomenutog plina te prevenciji globalnog zagrijavanja je hvatanje i sekvestracija CO₂ te njegovo skladištenje. Sekvestracija bi mogla omogućiti uklanjanje CO₂ na siguran i ekološki prihvatljiv način (5). Cilj sekvestracije je ograničiti antropogene i neantropogene emisije te oslobađanje stakleničkih plinova u atmosferu (11).



Slika 1. Razina zastupljenosti CO₂ u atmosferi od 1960-tih do danas. Preuzeto i preuređeno iz ref. (11)

3.2. Sekvestracija

Sekvestracija se prvi put spominje dvadesetih godina 20. stoljeća kada je CO₂ izdvojen iz prirodnog plina, a podrazumijeva dugoročnu izolaciju CO₂ iz atmosfere putem fizičkih, kemijskih, bioloških ili inženjerskih procesa (12). Sekvestracija također obuhvaća sigurno skladištenje CO₂ koji bi inače bio emitiran ili koji bi dugoročno ostao u atmosferi (6). U prirodi, biljke sekvestracijom dolaze do CO₂ potrebnog za rast, i zbog toga imaju veliku ulogu u održavanju koncentracije CO₂ u atmosferi na prihvatljivoj razini nužnoj za kvalitetan život. Sekvestracija se zato smatra potencijalnim rješenjem za pretjeranu emisiju CO₂ nastalu izgaranjem fosilnih goriva.

3.2.1. Sekvestracija ugljika

Postoje razni izvori ugljika: dimni plinovi, fosilna goriva (prije izgaranja) te industrijski izvori. Stoga, ugljik nalazimo u raznim oblicima koji se mogu sekvestrirati: elementarni ugljik, minerali koji u svom sastavu imaju ugljik te CO₂ kao najvažniji predstavnik (13). Ipak je, kao što je prethodno navedeno, CO₂ najvažniji antropogeni staklenički plin (14). Pojam

sekvestracija ugljika podrazumijeva: sekvestraciju putem pošumljavanja, sekvestraciju u tlu, izravno ubrizgavanje CO₂ u oceanske dubine, prevođenje CO₂ u karbonatne minerale te geološku sekvestraciju koja je ujedno i najznačajnija (9). Cilj je prikupiti CO₂, ukloniti ga iz atmosfere te ga transportirati u sigurno skladište (15). Najveći potencijalni rezervoari za pohranu CO₂ su morsko dno te geološki rezervoari u zemljinoj kori (12). Transport CO₂ najpraktičniji je i najisplativiji pomoću cjevovoda. Sekvestracija može biti i prirodni i antropogeni proces (5), te ju možemo podijeliti na biotičku i abiotičku.

3.2.1.1. Biotička sekvestracija

Biotička sekvestracija podrazumijeva uklanjanje CO₂ iz atmosfere uz pomoć viših biljaka i mikroorganizama (5). Dakle, ugljik se izdvaja posredstvom biotičkih medija. Sam proces pokazuje veliku učinkovitost jer živa bića sudjeluju u procesu skladištenja i zahtjevi za energijom su manji. Najvažniji proces za biotičku sekvestraciju je fotosinteza. Tim procesom biljke hvataju ugljik, a taj se proces naziva fitoremedijacija (6). Postoje dva tipa biotičke sekvestracije: oceanska i zemaljska sekvestracija.

3.2.1.1.1. Oceanska sekvestracija

Najvažnija metoda sekvestracije u oceanu je fotosinteza fitoplanktona. Fitoplankton stvara čestice organskog materijala koje tonu te se talože na dnu i na taj način sekvestriraju (5). Na fotosintezu fitoplanktona utječe prisutnost željeza (Fe). Fe potiče rast fitoplanktona, samim time i stopu fotosinteze, ali i ukupnu biomasu (6). Iz tog se razloga potencira „gnojidba oceana“. Dakako, to nije najbolje rješenje jer može dovesti do značajnih promjena u morskom ekosustavu (5). Kada govorimo o promjenama u oceanu, moramo spomenuti i promjenu pH, odnosno zakiseljavanje vode. Do sniženja pH dolazi upravo zbog otapanja CO₂ iz atmosfere. Oceani su dosad uklonili više od 25% antropogenog CO₂ (6). To je naravno poželjno, međutim posljedice tog postupka se itekako primjećuju.

3.2.1.1.2. Zemaljska sekvestracija

Zemaljska je sekvestracija najučestalija. Zanimljivo je da uvelike ovisi o geografskoj širini. Intenzitet zemaljske sekvestracije najizraženiji je u predjelu tropa, no udaljavanjem od ekvatora njen se intenzitet smanjuje. Također, sekvestracija je izravno proporcionalna dostupnosti biomase koja i sama ovisi o geografskoj širini (6). Kao i kod oceanske sekvestracije, ključan je proces fotosinteze. U ovom slučaju kopnene biljke hvataju atmosferski CO₂. Poznato je da kopneni ekosustavi čine glavni bazen ugljika (engl. *carbon pool*) zahvaljujući fotosintezi i skladištenju CO₂ u živoj i mrtvoj organskoj tvari (5). U sekvestraciju su uključene šume, močvare i tlo. Također, zanimljiva – a uvelike zanemarena – jest činjenica da tlo sadrži dvostruko više ugljika od atmosfere i tri puta više od drveća (6).

3.2.1.2. Abiotička sekvestracija

Abiotička sekvestracija temelji se na fizičkim i kemijskim reakcijama i inženjerskim tehnikama bez intervencije živih organizama (npr. biljaka, mikroorganizama) (5). Ona predstavlja održiviju opciju jer ima mogućnost konstantnog razvoja i usavršavanja. Razlikujemo tri podskupine abiotičke sekvestracije: oceansko injektiranje, geološku sekvestraciju i stvaranje mineralnih karbonata (15).

3.2.1.2.1. Geološka sekvestracija

Geološka sekvestracija odnosi se na koncentriranu sekvestraciju CO₂ u geološkim formacijama (15). Obuhvaća hvatanje, ukapljivanje, transport te ubrizgavanje industrijskog CO₂ u slojeve Zemljine kore (5). Odvija se u ležištima ugljikovodika, starim naftnim bušotinama, slojevima stijena i ugljena te dubokim slanim vodonosnicima. Prilikom geološke sekvestracije mora se uzeti u obzir učinak istrošenih stijena jer trošenje stijena smanjuje njihovu propusnost. Također, ne smiju se zanemariti organske i biološke tvari u izoliranom plinu. Najveći potencijal za geološku sekvestraciju imaju upravo osiromašena ležišta nafte i zemnog plina jer već imaju potrebnu infrastrukturu za proces sekvestracije (6).

Kada govorimo o geološkoj sekvestraciji, CO₂ može se odvojiti pomoću tri metode. Prvo je hidrodinamičko hvatanje koje je najvažnije glede sekvestracije. Hidrodinamičko

hvatanje odvija se u vodonosnicima (5). Dakle, CO₂ može se u obliku plina ili superkritične tekućine pohraniti ispod niskopropusne podloge. Zatim druga metoda podrazumijeva hvatanje topljivosti pri čemu se CO₂ otapa u tekućoj fazi. Kao tekuća faza može poslužiti nafta. CO₂ snižava viskoznost nafte te time omogućuje bolju fluidnost nafte što uvelike pridonosi metodi povećanja iscrpka nafte. Posljednja metoda odnosi se na izravno ili neizravno reagiranje CO₂ s mineralima i organskom tvari pri čemu postaje sastavni dio geoloških formacija (15). CO₂ skladišti se na dubini većoj od 800 metara (6), a trenutačno najveći problemi ovog tipa sekvestracije su visoki troškovi te pouzdanost skladišta (5). Ove metode geološke sekvestracije osiguravaju da se CO₂ ne vrati u atmosferu, već da se, što je duže moguće, zadrži u geološkim formacijama (15).

3.2.1.2.2. Oceanska sekvestracija

Oceansko injektiranje podrazumijeva injekciju ukapljenog CO₂ na dubinu veću od 1000 metara (5). Ocean se nameće kao potencijalno rješenje za sekvestraciju antropogenih emisija CO₂. U prosjeku, ocean je dubok oko 4000 metara i sadrži oko 40 000 Gt ugljika (15). Zanimljivo je da bi količina CO₂ koja bi dovela do dvostruko veće atmosferske koncentracije, koncentraciju u oceanu povećala za samo 2 %. Jednom pohranjen CO₂ na dnu oceana, može se zadržati tamo stotinama godina (15).

Ubrizgavanje struje čistog CO₂ duboko u ocean mogućnost je koju inženjeri razmatraju već oko tri desetljeća (5). Razlog sekvestriranja na velikim dubinama je opasnost od istjecanja CO₂. Međutim, iako je ovaj tip sekvestracije poprilično riskantan i nepouzdan, to nužno ne umanjuje njegovu učinkovitost. CO₂ može se pohraniti i na dubini od 3000 metara. Pri toj dubini ukapljeni CO₂ pronalazimo u obliku jezera u depresiji zbog velikog pritiska na dnu oceana (6). Procjenjuje se da bi se u moru moglo pohraniti više od tisuću milijardi tona ugljika (16).

Ukapljeni plin izoliran iz industrijskih izvora može se transportirati u oceanske dubine na četiri načina. Prvi način je ubrizgavanje CO₂ na dubini 1000 metara ispod razvodnika koji se nalazi na morskom dnu. CO₂ lakši je od vode pa se podiže i čini oblak kapljica. Druga tehnika odnosi se ubrizgavanje smjese CO₂ i morske vode na dubini od 500 do 1000 metara. Pošto je smjesa gušća, a samim time i teža, ona tone u dubinu. Treći način je ispuštanje CO₂ iz velike cijevi koja se nalazi na brodu, a posljednja tehnika odnosi se na ubrizgavanje CO₂ u bušotinu

na morskom dnu prilikom čega se formira jezero. Što je veća dubina skladištenja CO₂ to je veća vjerojatnost da neće doći do istjecanja (5).

3.2.1.2.3. Karbonizacija minerala

Karbonizacija minerala postiže se oponašanjem prirodne anorganske kemijske transformacije CO₂ (5). Iz CO₂ nastaju kalcit (CaCO₃), magnezit (MgCO₃), siderit (FeCO₃) te drugi minerali koji su geološki i termodinamički stabilni (6). Karbonizacija se sastoji od dva koraka: pročišćavanje, odnosno ispiranje, te mineralna karbonizacija. U prvom se koraku CO₂ pomoćuaminskog ili karbonatnog otapala pročišćava prolaskom kroz apsorpcijsku kolonu. Otapala koja se koriste su kalijev karbonat, litij silikat, keramika te spojevi na bazi nikla. Potom se pročišćeni CO₂ taloži mineralnom karbonizacijom. Karbonati koji nastaju su izuzetno stabilni, a CO₂ zauvijek je sekvstriran u geološkoj formaciji (5).

Zasada se mineralna karbonizacija smatra vjerojatno sigurnijom alternativom drugim geološkim tehnikama sekvstracije jer je ugljik imobiliziran u stabilne karbonate u obliku stijena (6). Jedan od nedostataka mineralne karbonizacije je taj što je proces taloženja minerala izuzetno spor i tek djelomično objašnjen. Ukoliko se unaprijedi brzina i kapacitet za hvatanje minerala, ova bi metoda mogla postati boljom i od hidrodinamičkog hvatanja te osigurati stabilna spremišta ugljika (15).

3.2.1.3. Geoinženjerstvo

S vremenom su se razvile i novije metode sekvstracije iz područja geoinženjeringa, koji je unazad petnaestak godina postao aktualna tema. Geoinženjering podrazumijeva korištenje visoke tehnologije s namjerom usporavanja ili sprječavanja učinaka antropogenih klimatskih promjena (17). Okvirno, tehnologije geoinženjerstva svrstavamo u dvije kategorije: prva skupina ima zadaću ukloniti CO₂ iz atmosfere, dok se djelovanje druge skupine temelji na reflektiranju dijela sunčeve svjetlosti od Zemlje. Obje skupine uspješno smanjuju vrijednost globalne površinske temperature (17). U prvu skupinu spada metoda izravnog hvatanja zraka (DAC, engl. *direct air capture*). Umjetna drveća koja rade na principu prethodno navedene metode također su dio visoke tehnologije i spadaju u prvu skupinu. Važno je naglasiti da nove

tehnologije mogu uhvatiti i izdvojiti CO₂ značajno brže u usporedbi s prirodnim biljkama i drvećem (18).

Ovakvi projekti zapravo su potencijalna kratkoročna rješenja za povećane koncentracije CO₂ u atmosferi u slučaju da emisija potiče iz točkastog izvora. Kada bi se hvatanje ugljika na točkastim izvorima primijenilo na sve moguće izvore, obustavila bi se emisija CO₂. Međutim, već sada je koncentracija CO₂ u atmosferi previsoka te stoga treba pronaći dugoročno rješenje kojim bi se umanjila već prisutna količina ugljika. Potrebna je dobra podloga iz znanstvenog područja te mnogo razumijevanja kemijskih procesa kako bi se princip sekvenciranja ugljika shvatio. Također, važno je da se implementiraju samo ona rješenja koja su prvenstveno ekološki, ali i ekonomski prihvatljiva kako bi se umanjile antropogene emisije CO₂. Krajnji je cilj osigurati izdvajanje 1 Gt ugljika godišnje. Ta bi se vrijednost postupno povećala te bi do 2050. godine bilo izdvojeno i do 4 Gt ugljika na godišnjoj razini (15). O geoinženjeringu i njegovim granicama neprestano se diskutira. Mnogo toga je i dalje neistraženo, ali možemo reći da su geoinženjering i njegov koncept u usponu. Zahvaljujući geoinženjeringu čovječanstvu je omogućena djelomična manipulacija okolišem.

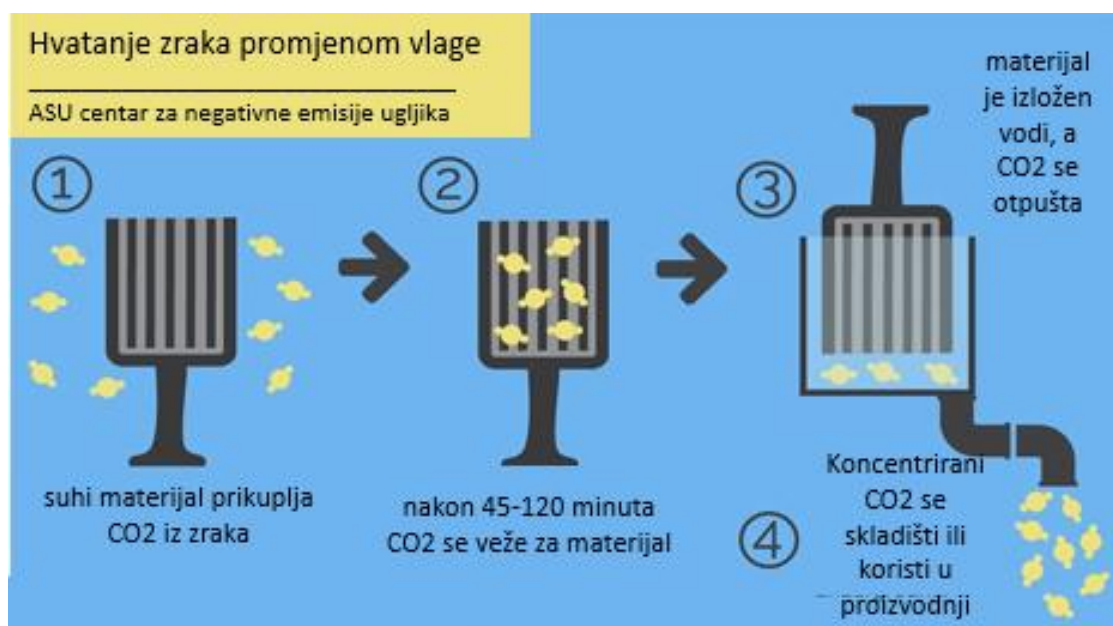
3.3. Metoda izravnog hvatanja zraka (DAC)

Znanstvenici i inženjeri već desetljećima pokušavaju pronaći najbolje rješenje za ublažavanje klimatskih promjena. Jedna od tih metoda koja nastoji smanjiti emisije CO₂ u atmosferi je proces izravnog hvatanja zraka, odnosno izravno hvatanje CO₂ iz atmosfere na pristupačan i održiv način (19). Izravno hvatanje plina provodi se pomoću mehaničkog sustava. Atmosferski zrak ulazi u sustav gdje se odvijaju karakteristične kemijske reakcije čiji je produkt čisti CO₂. Kao takav, može se dugoročno pohraniti u Zemljinoj kori. Postupak se može usporediti s prirodnim drvećem koje apsorbira CO₂ u procesu fotosinteze. Međutim, količina apsorbiranog CO₂ u procesu fotosinteze i postupkom izravnog hvatanja iz atmosfere u istom vremenskom periodu znatno se razlikuje. DAC metodom uhvaćeno je značajno više ugljika (20).

Umjetna drveća rade na principu izravnog hvatanja zraka. Uređaji koji selektivno hvataju CO₂ iz zraka pokreću se poglavito na obnovljivu energiju. Općenito, ventilator uvlači zrak u kolektor te se CO₂ hvata na površini sorbensa (Slika 2). Sorbens je selektivan filterski materijal dizajniran za CO₂. Poželjni su sorbensi koji podržavaju reverzibilne reakcije, odnosno

sorbensi koji se mogu regenerirati. U trenu kad se sorbens zasiti plinom, kolektor se zatvara. U ovom je postupku nužno povećanje temperature. Ona varira između 80 – 100 °C, pri čemu se plin visoke čistoće i koncentracije oslobađa i prikuplja (21). S druge strane, u kemijskim reakcijama koje se odvijaju u umjetnom drveću dodatak vode, a ne povećanje temperature, nužan je korak za desorpciju CO₂ (poglavlje 3.4.1.3.). Dakle, princip je sličan, u oba se slučaja oslobađa čisti CO₂, ali su čimbenici koji utječu na oslobađanje plina različiti.

Važno je naglasiti da metode izravnog hvatanja zraka, kao i sekvencijalno hvatanje ugljika, u usporedbi s drugim metodama uklanjanja ugljika imaju manji utjecaj na ekosustav te imaju manju potrošnju vode i iskorištavaju manje prostora (7). Prednosti DAC-a jesu te da se može izvoditi bilo gdje na zemlji te da se za pogon može koristiti obnovljiva energija. Veliki nedostatak je cijena - DAC je izuzetno skupa metoda.



Slika 2. Prikaz koraka metode izravnog hvatanja CO₂ iz zraka. Preuzeto i preuređeno iz ref. (22).

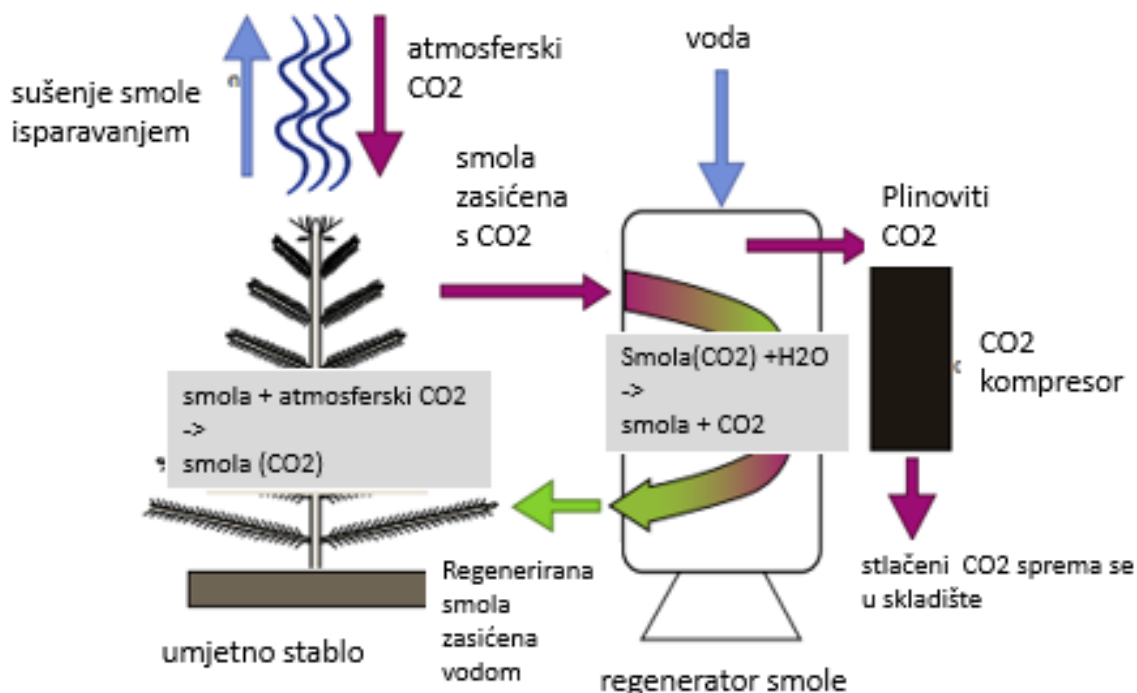
3.4. Umjetna drveća

Ideja umjetnog drveća pojavila se na kampusu Državnog sveučilišta Arizona u Tempeu. (23) Znanstvenik Klaus Lackner osmislio je model umjetnog drveća s namjerom da promijeni tijek klimatskih promjena (2). Kao što je prethodno spomenuto, glavni uzrok klimatskih

nepogoda je CO₂, staklenički plin koji zadržava toplinu u atmosferi. Sam model umjetnog drveća naizgled je prilično jednostavan. Ona nisu nalik prirodnom drveću, ali funkcioniraju na gotovo identičan način – sorbirajući plin izravno iz atmosfere pomoću specifičnog sorbensa. Nakon sorpcije, nizom procesa CO₂ se desorbira, transportira, obrađuje i trajno skladišti ili se koristi u proizvodnji, primjerice, goriva (23). Izgaranjem goriva ponovno se oslobađa CO₂ kojeg umjetno drveće hvata, pa je na taj način formiran ciklus koji omogućuje kruženje CO₂. Prema Klausu Lackneru, umjetno drveće može sekvstrirati CO₂ 1000 puta brže od prirodnog drveća (23). Činjenica je da prirodno drveće nema kapaciteta ni vremena sekvstrirati CO₂ u količini koja bi usporila globalno zagrijavanje, dok s druge strane umjetno drveće ruši barijere i nameće se kao hvalevrijedan projekt (11).

3.4.1. Mehanizam umjetnog drveća

Iako, estetski gledano, umjetna stabla imaju nedostataka, njihova potencijalna funkcionalnost i učinkovitost nadvladavaju te nedostatke. Ključni materijal za njihovo djelovanje je sorbens (upijač), ciljano osmišljen za izravno prikupljanje CO₂ iz zraka. Po kemijskom sastavu, sorbens je smola koja apsorbira CO₂ iz atmosfere u kemijskoj reakciji za koju je potrebna voda. Smola sorbira CO₂ kada je suha, a otpušta ga prilikom vlaženja (23,24). Smola korištena kod modela umjetnog stabla jeftin je materijal za čije djelovanje – za razliku od uobičajenih sorbensa – nije potrebna dodatna energija, već samo solarna energija i obična voda, te radi prema jednostavnom principu. Dodatna prednost je što se mehanizam odvija automatski, a nadzor gotovo da i nije potreban (23).

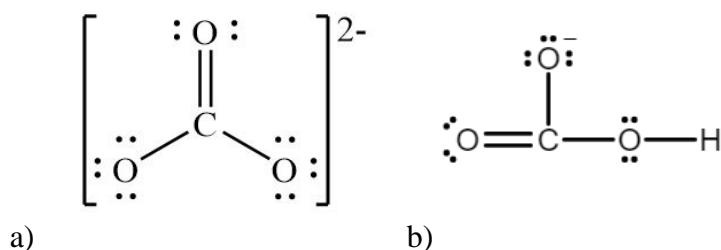


Slika 3. Prijedlog modela umjetnog drveća. Preuzeto i preuređeno iz ref. (8).

Mehanizam se ukratko može opisati na slijedeći način (Slika 3): uz pomoć vjetrova, zrak struji iznad umjetnih stabala, odnosno iznad čitave njihove površine. Ionska smola kojom su prekriveni spontano i vrlo učinkovito veže CO_2 iz zraka, u obliku bikarbonatnog iona (HCO_3^-), kada je suha. Smola prikuplja CO_2 sve dok se ne zasići, odnosno dok CO_2 ne prekrije cijelu površinu sorbensa (8). Tada slijedi vlaženje, pri čemu nastaje karbonatni ion (CO_3^{2-}), uz oslobađanje plinovitog CO_2 (23). Oslobođeni CO_2 sada se može sakupiti te pohraniti i iskoristiti na razne načine.

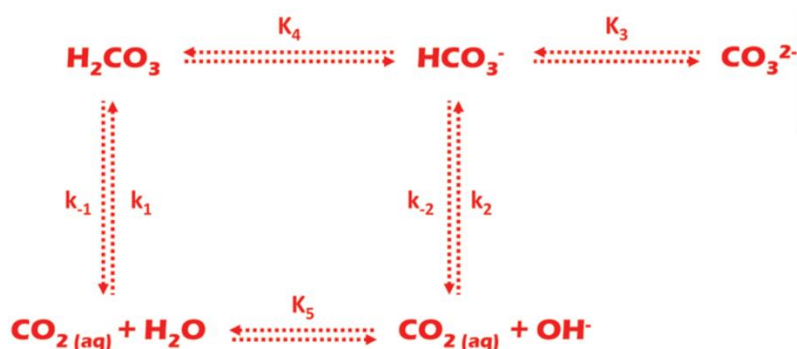
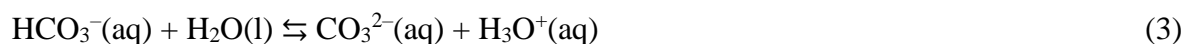
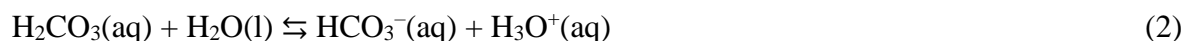
Kemijski procesi koji omogućuju odvijanje ovog naizgled jednostavnog mehanizma vrlo su zanimljivi, ponajviše zato što su uvelike kontraintuitivni i zapravo protivni uobičajenom kemijskom ponašanju (hidrogen)karbonatnog iona, kao središnjeg iona u ovom mehanizmu. Prethodno tom „neuobičajenom“ ponašanju (poglavlje 3.4.1.3.), na kojemu se temelji čitavo djelovanje umjetnog drveća, u idućem je poglavlju opisano „uobičajeno“ kemijsko ponašanje ključnih iona.

3.4.1.1. Karbonatni (CO_3^{2-}) i hidrogenkarbonatni ion (HCO_3^-)



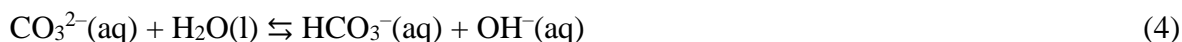
Slika 4. Lewisova struktura a) karbonatnog i b) hidrogenkarbonatnog iona. Preuzeto iz ref (25) i (26).

Karbonatni ion CO_3^{2-} sastoji se od centralnog ugljikovog atoma koji je povezan s tri atoma kisika, dakle ima trigonsku planarnu geometriju (Slika 4) (27). To je anion ugljične kiseline koji nastaje otapanjem CO_2 u vodi. Izuzetno mali dio CO_2 reagira s vodom, dakle u otopini se CO_2 nalazi najvećim dijelom u molekulskom obliku. Manji dio reagira s vodom, pri čemu nastaju karbonatni i hidrogenkarbonatni ion te ugljična kiselina. Ugljična kiselina slaba je dvoprotonska kiselina pa stoga disocira u dva stupnja, pri čemu opet nastaju prethodno spomenuti ključni ioni u mehanizmu djelovanja umjetnog drveća: CO_3^{2-} i HCO_3^- . Koncentracija HCO_3^- iona koji pritom nastaju ovisi o parcijalnom tlaku CO_2 (28). Opisane ravnoteže shematski su prikazane na Slici 5 i slijedećim reakcijama:



Slika 5. Ravnoteže prisutna u vodenoj otopini $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3$

HCO_3^- ima slabo izražena bazična svojstva, za razliku od CO_3^{2-} koji se ponaša kao jaka baza; poznato je da otopina karbonatnih iona reagira lužnato, što se prikazuje slijedećom reakcijom hidrolize:

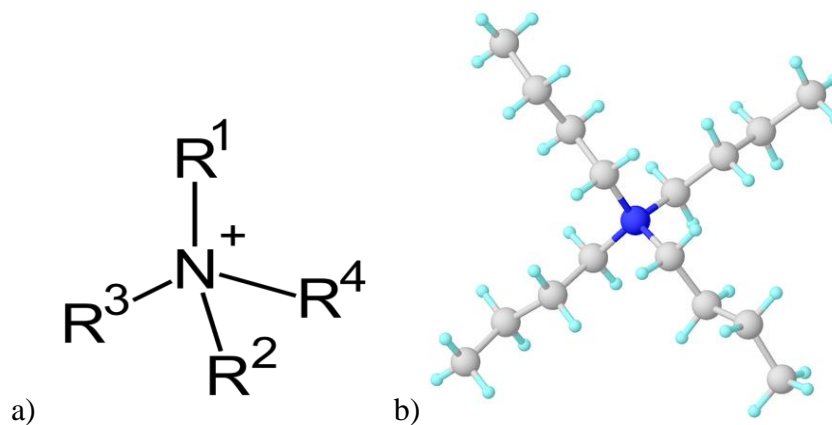


Valja napomenuti kako je jako važno razlikovati proces hidrolize od procesa hidratacije: dok hidroliza podrazumijeva pucanje molekule vode na H^+ i OH^- , hidratacija označava proces u kojem cjelovite molekule vode okružuju neku česticu.

HCO_3^- je polikation iste geometrije kao CO_3^{2-} . Međutim, HCO_3^- je amfoteran što znači da će se u kontaktu s kiselijim spojem ponašati kao baza, dok će se u kontaktu s bazičnijim spojem ponašati kao kiselina. Kako su ioni CO_3^{2-} i HCO_3^- uključeni su u kiselinsko-bazne reakcije, poznato je da su tokovi CO_3^{2-} i HCO_3^- koji prolaze kroz membranu ionske izmjene, povezani procesom izmjene protona.“ (29)

3.4.1.2. Kvarterni amonijevi kationi (NR_4^+)

Kvarterni amonijevi spojevi (QAC, od engl. *quaternary ammonium compounds*), kvarterni amonijevi kationi ili kvarterni amonijevi surfaktanti obuhvaćaju spojeve u kojima je dušik pozitivno nabijen i ima četiri supstituenta (30). Nastaju zamjenom sva četiri vodika amonijevog kationa s nekom većom organskom skupinom, najčešće duljim lancem ugljikovodika (označeni R, Slika 6). Ključno obilježje je konstantan ionski naboj, koji ne ovisi o pH. QAC čine funkcionalnu skupinu ionske smole koja predstavlja sorbens u procesu sekvestracije umjetnim drvećem (31). Također, unutar jedne molekule može se naći i više QAC-a koji potom tvore polimerne oblike nazivane polikvati (32). QACs su vrlo stabilni i ne podliježu reakcijama tako lako; međutim, kada dođu u doticaj s jakom bazom postoji mogućnost degradacije kationa. QAC-i se mogu koristiti kao boje, sredstva za dezinfekciju ili pak antibiotici jer imaju sposobnost lize bakterijske stanice (30).

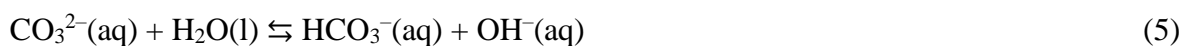


Slika 6. Kvarterni amonijev kation: a) općenita struktura i b) „ball & stick“ prikaz tetrabutil amonijevog kationa. Preuzeto iz ref (33).

3.4.1.3. Kemijski procesi u mehanizmu djelovanja umjetnog drveća

Kao što je i spomenuto u poglavlju 3.4.1., mehanizam djelovanja umjetnog drveća samo naizgled je jednostavan. Kemijski procesi na kojima se mehanizam temelji obuhvaćaju međudjelovanje mnogih čimbenika, što u konačnici rezultira kontraintuitivnim reakcijama koje su protivne uobičajenom kemijskom ponašanju i zakonitostima. Već i površnim razmatranjem nameću se pitanja, npr., ako se CO_2 na sorbens veže kao HCO_3^- , za što je očito potrebna voda, zašto se to događa na suhoj smoli, a ne mokroj? Štoviše, na mokroj se CO_2 desorbira? I ne bi li vlažni uvjeti trebali pogodovati otapanju ionako slabo topljivog CO_2 ?

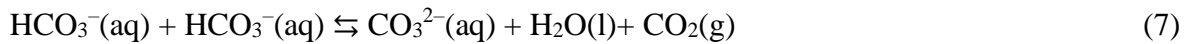
Detaljniji pogled na mehanizam pruža objašnjenje. QAC (poglavlje 3.4.1.2.) se nalaze na površini smole koja služi kao sorbens. Na početku ciklusa (Slika 7, gornji lijevi kut), smola je nezasićena (s CO_2) i suha, s tek malobrojnim molekulama vode, a na katione su vezani CO_3^{2-} ioni. U suhim uvjetima, tj. u prisustvu malog broja molekula vode, karbonatni će ion prijeći u hidrogenkarbonatni, tj. hidrolizirati:



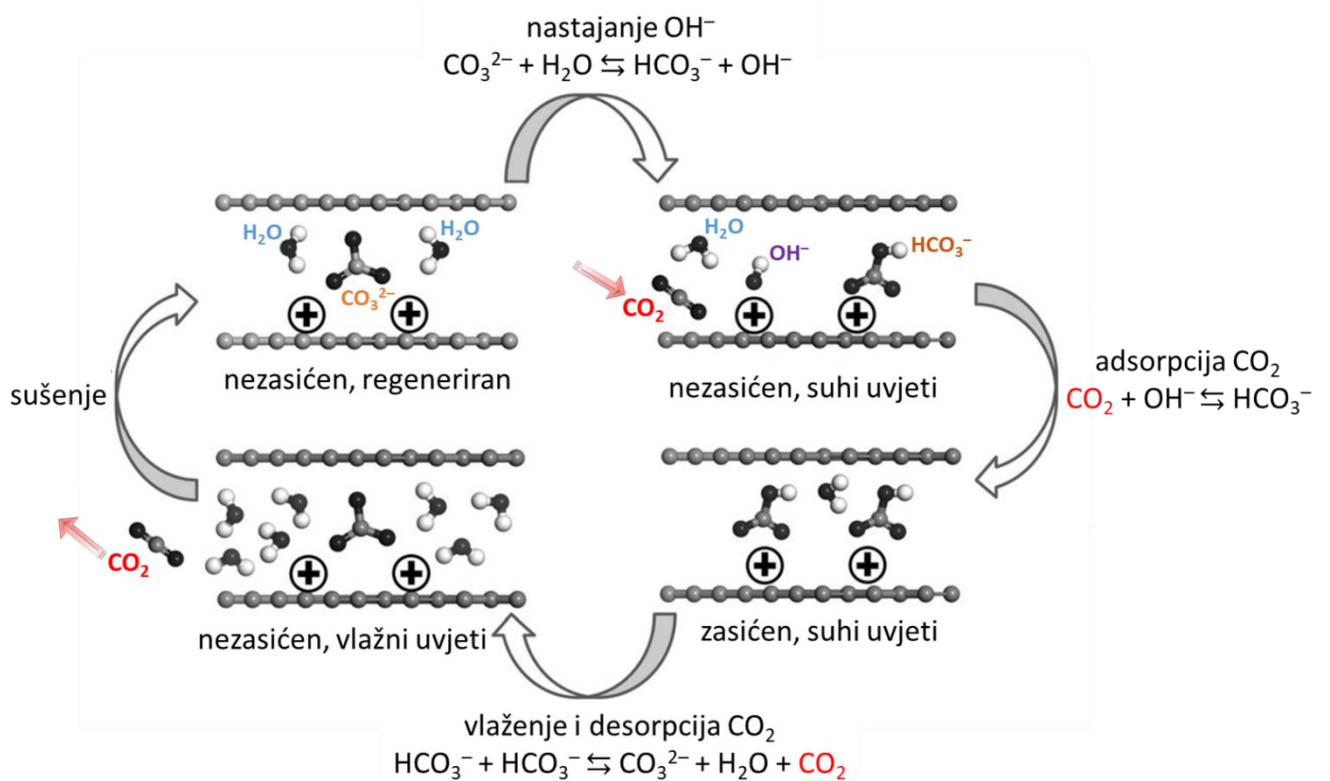
Nastali anioni vezat će se na QAC-e na površini smole. CO_2 iz zraka tada će se vezati za OH^- , pri čemu nastaje hidrogenkarbonatni ion:



Kod potpunog zasićenja, na površinskim kationima vezani su dakle samo HCO_3^- ioni. Dodatkom vode, dva HCO_3^- iona reagiraju po sljedećoj jednačbi:



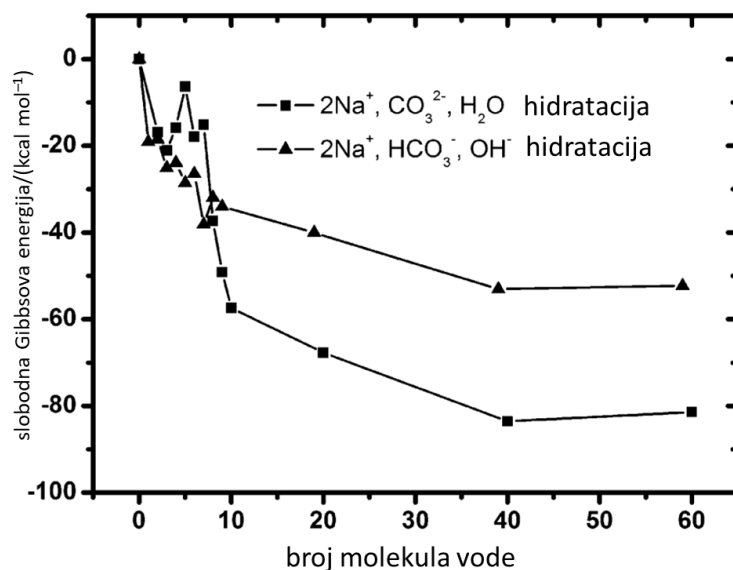
Jedan od produkata ove reakcije je CO_2 , koji se tako desorbira iz sustava te hvata i pohranjuje za skladištenje i upotrebu. Drugi produkt, CO_3^{2-} , ostaje u sustavu i ponovno se veže na površinske katione nakon što voda ispari (tj. smola se osuši) i tako sustav vraća u početno stanje, spreman za novi ciklus.



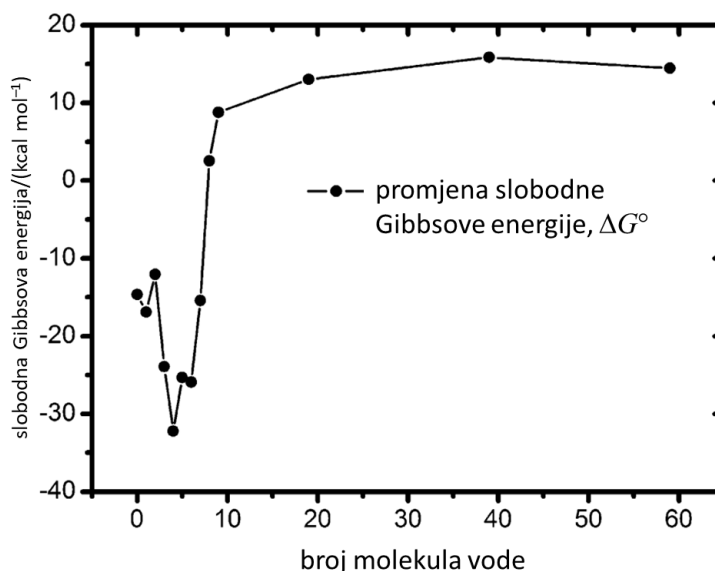
Slika 7. Shematski prikaz procesa na kojima se temelji djelovanje umjetnog drveća.

Inspirirano ref. (24).

Ključna, a neobična, jest činjenica da će se ovdje hidroliza karbонатnog iona odvijati *isključivo u prisustvu malog broja molekula vode*. U okruženju bogatom vodom, molekule vode će tek hidratizirati karbонатni ion, okružiti ga, i neće doći do hidrolize. Pogledom na jednadžbu (5), vidimo da takvo ponašanje proturječi Le Chatelierovom načelu: povećanje koncentracije vode trebalo bi ravnotežu pomaknuti udesno i potaknuti hidrolizu. Takvo neobično ponašanje karbонатnog i drugih dvovalentnih aniona uočili su Shi et al. (24) kod hidrolize koja se odvija u ionskim izmjenjivačkim smolama (poglavlje 3.4.2.). Objašnjenje leži u načinu kako se mijenjaju slobodne Gibbsove energije hidratacije i hidrolize iona (Slika 8).



a)

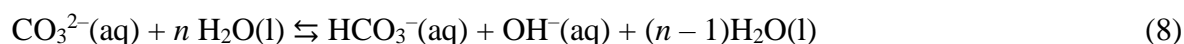


b)

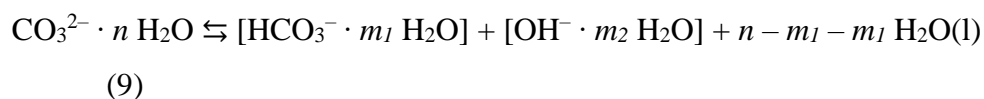
Slika 8. Ovisnost promjene slobodne Gibbsove energije za a) hidrataciju i b) hidrolizu karbonatnog iona. Preuzeto i preuređeno iz ref. (24)

Slika 8a pokazuje da, u skladu s očekivanjima, proces hidratacije postaje energetski sve povoljniji (tj. ΔG° sve manja) kako se broj molekula vode povećava. Značajniji pad može se uočiti kada broj molekula vode premaši 10. S druge strane, proces hidrolize energetski je najpovoljniji (ΔG° je na minimumu, Slika 8b) pri oko 4 molekule vode, nakon čega ΔG° raste i poprima pozitivnu vrijednost pri oko 7 molekula vode. Dakle, između ova dva kompetitivna procesa, hidroliza će biti energetski povoljnija pri malom broju molekula vode, dok će povećanje koncentracije vode dovesti do prevage u korist hidratacije. Ovo razmatranje smisleno

je samo u sustavima gdje se može kontrolirati broj molekula vode u neposrednom okruženju karbonatnog iona, npr. kada je karbonatni ion sorbiran na površinu nekog nosača ili u nekom nanoporoznom sustavu, a ne u otopini gdje je u potpunosti okružen vodom (tzv. *bulk* voda). Međudjelovanja svih sudionika procesa (ioni ↔ voda ↔ površinske skupine ↔ ioni) utječu na konačnu promjenu Gibbsove energije koja određuje kemijsko ponašanje sustava. Ipak, kako je moguće da Le Chatelierovo načelo odjednom ima iznimke? Za razumjeti zašto tomu ipak nije tako, možemo jednadžbu jedan napisati u alternativnom obliku:



i vodu u produktu ne promatrati kao pasivnog sudionika reakcije, već kao molekule koje hidratiraju sve ostale sudionike reakcije. Zato bi točnije bilo jednadžbu napisati na sljedeći način (24):



Vlaženjem se povećava koncentracija produkta, što ravnotežu pomiče ulijevo, tj. potiskuje hidrolizu. Sušenjem, koncentracija produkta se smanjuje, što ravnotežu pomiče udesno, tj. potiče hidrolizu. Dakle, hidroliza CO_3^{2-} – u ionsko izmjenjivačkoj smoli – bit će potaknuta sušenjem, a potisnuta u vlažnom. Upravo su ovu spoznaju izumitelji umjetnog drveća spoznali kao ključnu i na tome izgradili svoj izum.

3.4.1.4. Značaj vlage u mehanizmu djelovanja

Pri izravnom hvatanju zraka vlažnost garantira veću učinkovitost jer omogućava brže upijanje i difuziju CO_2 u vlaknima sorbensa. Također, vlaga je zaslužna za stvaranje difuzijskih međuprodukata koji povećavaju dostupnost svim amin-aktivnim tvarima (34). Broj i priroda molekula vode koje su u kontaktu s ionima su od iznimne važnosti jer utječu na selektivnost među ionima (35). Osim promjene koncentracije CO_2 koja se mjeri svake sekunde uz pomoć infracrvenog analizatora plina (IRGA), mjeri se i relativna vlažnost zraka kako bi se utvrdilo je li sorbens dovoljno suh. Koristi se i regulator vlažnosti s ciljem osiguranja konstantne vlažnosti u komori. Ono što je ključno je to da zastupljenost vode u komori i na početku i na kraju hvatanja CO_2 mora biti ista. U pravilu, relativna vlažnost iznosi 2 % (3).

3.4.2. Ionsko izmjenjivačka smola

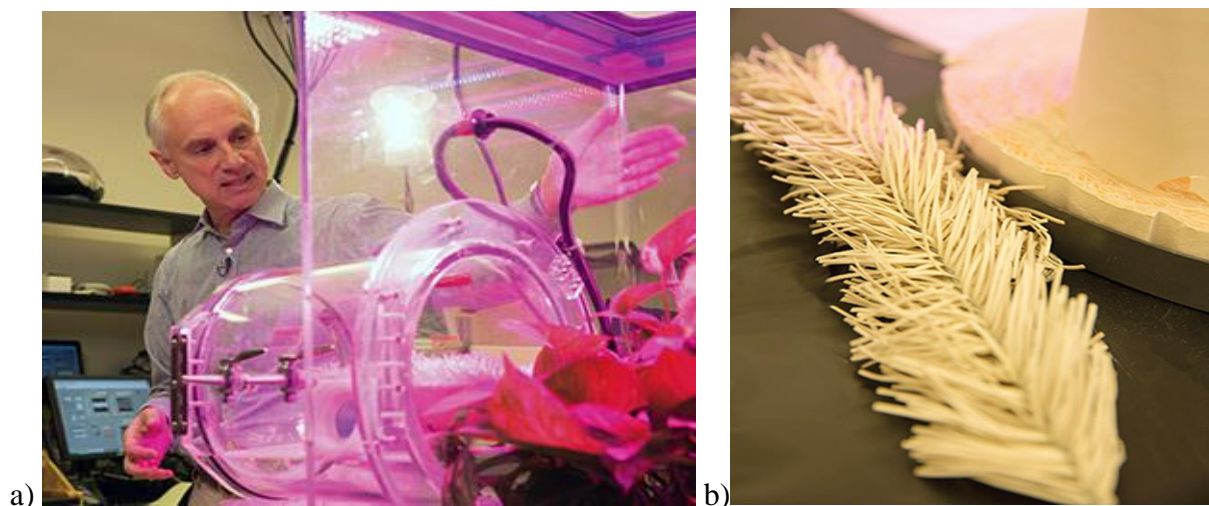
Ionski izmjenjivači po kemijskom su sastavu ionsko izmjenjivačke smole (engl. *ionic exchange resin*, IER), tj. netopivi makromolekularni polielektroliti koji imaju sposobnost ionske razmjene. To su krute tvari, a mogu biti baze, kiseline ili soli. Osnovna struktura ionskog izmjenjivača sastoji se od nepokretnih iona koji su kompenzirani pokretnim ionima suprotnog naboja, kako bi se sačuvala elektroneutralnost strukture (36). Nadalje, sam proces zamjene iona, odnosno brzina zamjene, ovisi o primijenjenom tipu izmjenjivača. Smola se u pravilu koristi za uklanjanje svih aniona, uključujući i one slabo disocirane (31). Može biti izgrađena od različitih monomera: stiren, divinil benzen, metaakrilna kiselina, i dr. (Slika 9). Polimerizacija tih monomera ključan je proces u postupku izrade. Da bi sama smola bila funkcionalna, potrebno je zadovoljiti određene kriterije: unutarnja struktura mora omogućiti laku difuziju iona, prisutne skupine s točno određenim ionskim nabojem (u ovom slučaju kvarterni amonijev kation), elektroneutralnost. (36)

Sorbens umjetnog drveća specifičan je po tome što omogućuje sorpciju CO₂ u razrijeđenim strujama. Uključuje IER koja se sastoji od polistirenske okosnice s kvartarnimaminskim ligandima (Slika 9). Potom polivinil klorid (PVC), sintetski plastični polimer koji se koristi kao vezivo te tetrahidrofur (THF) koji služi kao otapalo za miješanje smole i PVC-a (3).

Za potrebe hvatanja ugljika korišteni su i materijali na bazi čađe. Jedna od metoda dobivanja takvih materijala je funkcionalizacija površine ugljika s inicijatorima radikalne polimerizacije prijenosa atoma (ATRP). ATRP inicijatori mogu se kovalentno vezati kiselinskom oksidacijom, Pschorr reakcijom, ali i nitrenskom kemijom. Upravo je nitrenska kemija omogućila polimerizaciju p-klormetilstirena (PCMS), dajući hiperrazgranati polimer čije su kloridne skupine zatim transformirane u QAC-e (34). Upravo su te skupine ključne za sorpciju CO₂ u procesu ovisnom o vlazi.

plin CO₂. Zatim koncentracija plina ponovno opada jer ga u procesu fotosinteze koristi biljka koja se također nalazi u ovom zatvorenom sustavu. Cilj je pokazati kako biljka iskorištava prikupljeni CO₂ kao hranu, ali i pratiti koncentraciju CO₂ te sposobnost biljke da ga apsorbira. Biljke u terarijima vremenom su postajale bujnije i zelenije. Zeljasta biljka koja je poslužila kao sastavni dio ovog prototipa je *Geranium* iz porodice iglica. (23). Kada se smola u potpunosti osuši, ciklus može započeti ispočetka.

Kada se jedna litra zraka sa 400 ppm CO₂ u vremenskom intervalu od jedne minute propusti kroz komoru, on struji čitavom površinom sorbensa. Taj zrak sadržava 30 % relativne vlažnosti, a sama sorpcija traje dok koncentracija plina ne bude ista i na ulazu i na izlazu iz komore. Uzimajući u obzir da se priznaje greška do 1 %. Također, važno je naglasiti da je koncentracija CO₂ unutar komore konstantna. Ukoliko izmjerimo količinu sorbiranog ili desorbiranog plina, možemo pratiti koncentraciju CO₂ u atmosferi (3).



Slika 10. a) Klaus Lackner i njegov prototip umjetnog stabla; b) vlakna ionsko izmjenjivačke smole. Preuzeto iz ref. (23).

3.4.4. Dizajn umjetnih drveća

Što se tiče samog dizajna umjetnih drveća, bilo je raznovrsnih prijedloga. Prva opcija bilo je stablo u obliku vilice, a potom i ploče u stilu harmonike koje bi na dnu imale spremnik za vodu. Naposljetku, najprihvatljivijim se pokazao dizajn sa sorbensom u obliku diskova (23). Ti su diskovi vertikalno izduženi poput harmonike. Kada se sorbensi zasite, diskovi se spuštaju

u komoru na dnu uređaja te se moče. Na taj se način CO₂ ekstrahira pa se potom prikuplja, pročišćava i obrađuje ukoliko je potrebno (37). Za prikupljanje plina potreban nam je vakuum (23). Postoji i opcija da se CO₂ pomiješa s vodom te se ubrizga duboko u zemlju gdje prolazi kroz proces brze podzemne mineralizacije (21). Ovaj je dizajn dobar jer omogućuje kontinuirano i nesmetano strujanje zraka čitavom površinom sorbensa. Također, zamišljeno je da u točno određenim vremenskim razmacima (otprilike svakih 1000 sekundi) određena količina ulazi u spremnik gdje se odvija sorpcija plina (23).

Pretpostavlja se da bi „šuma“ umjetnog drveća mogla uhvatiti čak 3,8 milijuna metričkih tona CO₂ godišnje, međutim manjak prostora u velikim gradovima je potencijalni problem ovog projekta. Umjetno drveće zahtjeva velike i prostrane površine (37). Dakle, kako bi rezultati bili zadovoljavajući, a zamisao uspješna, potreban je točno određen broj jedinica umjetnih stabala. Svake godine 36 gigatona CO₂ emitira se iz antropogenih izvora. Sukladno tome, potrebno je najmanje 100 milijuna umjetnih stabala veličine broskog kontejnera. Svako od tih stabala te veličine moglo bi sorbirati tonu CO₂ dnevno. Sa 100 milijuna umjetnih stabala diljem svijeta, koja konstantno rade, bilo bi moguće smanjiti svjetsku koncentraciju CO₂ za 100 ppm. S obzirom na veliku količinu koje ovo stablo može sorbirati u relativno kratkom vremenu, potencijalno je moguće smanjiti trenutnu stopu emisije ugljika te je na taj način svesti na nulu (23).

Ovaj dizajn dakako nije u potpunosti usavršen, ali je procijenjeno da je jednostavan i jeftiniji od drugih, a samim time i lakši za proizvodnju i transport. Osim što se radi na usavršavanju cjelokupnog modela, radi se i na usavršavanju sorbensa; postoje pokušaji povećanja brzine prikupljanja/otpuštanja plina. Kada spominjemo transport, važno je spomenuti i lokalizaciju. Potrebno je pronaći odgovarajuću lokaciju za postavljanje šume umjetnog drveća. Potrebna je poprilično velik prostor jer je svaka jedinica veličine broskog kontejnera, a naravno, važni su i okolišni uvjeti (23). Prvenstveno, riječ je o vlažnosti i temperaturi. Stoga, kao jedna od mogućih lokacija nameće se pustinja. Razlog tome je prostranost i minimalan antropološki utjecaj zbog nenaseljenosti, ali i sušenje sorbensa koje je neophodno nakon prskanja vodom kako bi ciklus krenuo ispočetka. Međutim, i pustinjski predio ima svoje nedostatke. Temperature su visoke, zrak je suh, stoga treba pripaziti da su umjetna stabla konstantno opskrbljena vodom jer bez vode ne funkcioniraju.

Zbog procesa dehidracije koji utječe na ukupnu energetska ravnotežu sustava prijeko je potrebna opskrba vodom. To može biti nedostatak, međutim mnogo je lakše i jeftinije osigurati umjetnom drveću vodu nego sušne uvjete. Naravno, uzimajući u obzir da je cilj utrošiti što

manje energije (38). Prednost umjetnog drveća je višestruko korištenje sorbensa bez njegove degradacije. Laboratorijska ispitivanja pokazala su da jedan sorbent može ponoviti reakciju sorpcije i desorpcije više tisuća puta. Još jedna prednost je minimalan utrošak energije. Potrebna je mala količina električne energije za plinske regulatore i kompresore. Prilikom regeneriranja toplina potrebna za sušenje sorbensa ujedno je toplina nastala kompresijom CO₂ (38).

3.4.5. Usporedba prirodnog i umjetnog drveća

CO₂ može se smatrati „biljnom hranom“ jer prirodno drveće pretvara CO₂ u organske spojeve koji potom pospešuju njihov rast i razvoj, dok kod umjetnog drveća to nije slučaj (23). Dokazano je da su mlada stabla koja su bila izložena dvostruko većoj koncentraciji plina CO₂ rasla mnogo brže te su omogućila lakše kruženje ugljika (11). Mnogi upravo ovu činjenicu koriste kao argument protiv projekta umjetnog drveća, smatrajući da povećana koncentracija CO₂ osigurava bolje životne uvjete našoj flori (22). Umjetno stablo osmišljeno je kako bi repliciralo procese karakteristične za biljni svijet, konkretno sorpciju CO₂ iz atmosfere. Kad je riječ o prirodnom drveću, procjenjuje se da 2000 stabala ima sposobnost sorbirati 160 tona CO₂ godišnje. Sposobnost sorpcije umjetnog drveća mnogo je veća, tako da bi 2000 jedinica umjetnih stabala sorbiralno 160 000 tona CO₂ u istom vremenskom intervalu. Daljnji statistički podaci pokazuju da površina koja je potrebna da prirodna drveća prikupe 1 Gt CO₂ iznosi 2 041 000 km², dok je kod umjetnog drveća ta vrijednost 28 600 km².

Još jedan od razloga zašto se potencira proizvodnja umjetnih stabala je taj što je vremenski zahtjevnije uzgojiti prirodno drveće. Procijenjeno je da se mora zasaditi čak više od pola trilijuna stabala kako bi prikupili nešto više od 200 Gt CO₂. Kako bi čovječanstvo držalo korak s trenutnom koncentracijom CO₂ potrebno je zasaditi milijarde hektara, za što je potrebno izuzetno puno vremena. Također, nakon što se stabla zasade, potrebno je i da dozriju kako bi u potpunosti iskoristili svoju sposobnost prikupljanja. Pojednim sorta potrebno je 100 godina. Nadalje, nakon sorpcije plina u biljci, u stromi kloroplasta veže se CO₂ pomoću enzima ribuloza-1,5-difosfat-karboksilaze u spoj sa 6 ugljikovih atoma koji se naknadno raspada na dvije molekule 3-fosfoglicerinske kiseline. Te se molekule reduciraju i potom ulaze u Calvinov ciklus. S druge strane, iz umjetnih stabala otpušta se čisti i visoko koncentriran CO₂ koji je spreman za pohranu ili daljnju preradu (8). Kemijski procesi koji se odvijaju u umjetnom drveću detaljnije su opisani u poglavlju 3.4.1.3..

Još jedna stavka koju ne smijemo zaboraviti kada spominjemo umjetna drveća je nepredvidivost. Umjetna su drveća relativno nov projekt pa u skladu s tim posljedice njihovog djelovanja ne možemo procijeniti. S druge strane, prirodna drveća postoje već milijardama godina, stoga su njihovi ciklusi i zadaće dobro poznati čak i široj publici. Drveće i ostale biljke obavljaju sekvestraciju već dugi niz godina i to vrlo uspješno pa možemo zaključiti da daljnja istraživanja treba usmjeriti ka prirodnim sustavima uzimajući ih kao primjer. Cilj istraživanja je pronaći metodu umjetne sekvestracije koja će biti učinkovitija od prirodne, ali koja će biti i ekonomski i ekološki prihvatljiva.



Slika 11. Umjetno stablo Klause Lacknera. Preuzeto iz ref. (37).

4. Zaključci

CO₂ bezbojan je plin, i bez mirisa, pa je lako podcijeniti njegovu (39). U pravilu nije toksičan za zdravlje, međutim pri visokim koncentracijama značajno utječe na kvalitetu zraka. Zatupljenost CO₂ u atmosferi ovisi o okolini. Izmjerene koncentracija u nekom urbanističkom značajno su veće u usporedbi s onima u ruralnom području (37). Za razliku od samog plina, posljedice njegova nakupljanja u atmosferi itekako su vidljive.

Od 1900. godine udio CO₂ u atmosferi narastao je s 280 ppm na 412 ppm. Ova količina CO₂ izražena u tonama iznosi 280 milijardi tona. Dakle, nemoguće je da toliku količinu ugljika biljke zarobe u svom korijenju ili deblu u razumnom vremenskom periodu. Stoga, treba djelovati brzo pa je čovječanstvu potrebno nešto učinkovitije od biljaka kako bi spriječili razvoj negativnih klimatskih promjena. Potencijalno rješenje je povlačenje CO₂ iz atmosfere. Također, bitno je da je pronalazak rješenja usmjeren na izravno hvatanje CO₂ pri izvoru. Sigurnije je i jeftinije uhvatiti emisije CO₂ neposredno iz izvora ili ih je najbolje uopće ne emitirati (40).

Dakle, namjera je staviti pod kontrolu povećanje koncentracije CO₂, kao i povećanje koncentracije ostalih stakleničkih plinova, a to se može primjenjujući tri strategije. Potrebno je smanjiti potrošnju energije na globalnoj razini, uložiti u razvoj i proizvodnju goriva s niskim udjelom ugljika ili bez ugljika te naposljetku ukloniti CO₂ iz atmosfere koristeći prirodne i inženjerske tehnike (5). Posljednja stavka odnosi se na sekvencijalnu CO₂, a samim time i na umjetna drveća. Pri odabiru savršene metode važno je da se zadovolje brojni uvjeti: efikasnost, cijena po toni, kapacitet i učinak na okoliš te koliko dugo CO₂ može ostati zarobljen. Cilj je minimalno 100 godina.

Mehanizam djelovanja umjetnog drveća izuzetno je zanimljiv jer se temelji na kontraintuitivnim kemijskim reakcijama. Naglasak je na karbonatnim i hidrogenkarbonatnim ionima kao središnjim ionima reakcije. Da bi mehanizam djelovanja na molekularnoj razini bio razumljiv, potrebno je razlikovati hidrolizu od hidratacije. Zahvaljujući usporedbi slobodnih Gibbsovih energija hidratacije i hidrolize karbonatnog iona, zaključeno je da je proces hidratacije energetski povoljniji što je broj molekula vode veći, dok procesu hidrolize pogoduje manji broj molekula vode. Dakle, karbonatni ion u suhim uvjetima hidrolizira i nastaje hidrogenkarbonatni ion koji se veže na QAC-e. Također, hidrogenkarbonatni ion nastaje i kad se CO₂ iz zraka veže za hidroksidni ion. Dodatkom vode, hidrogenkarbonatni ioni reagiraju, a kao jedan od produkata nastaje čisti CO₂. Oslobođeni plin potom se treba uskladištiti.

U proteklih 5 godina učinjen je velik napredak u području skladištenja CO₂ (41). Međutim, kontrola i praćenje skladištenja CO₂ i dalje predstavlja veliki izazov. Nužno je daljnje istraživanje radi lakšeg i boljeg razumijevanja kapaciteta za skladištenje plina. Pitanje kapaciteta i dalje je prilično nejasno, ali pretpostavlja se da se kapacitet ovisno o vremenu, ali i o upotrebi, mijenja.

Iako je princip rada umjetnog drveća vrlo sličan prirodnom drveću, postoje i mnoge razlike. Umjetno drveće, kao i prirodno, sekvestrira CO₂ iz atmosfere, međutim, umjetno drveće to čini znatno brže. Nadalje, sposobnost sorpcije umjetnog drveća mnogo je veća. Prirodnom drveću potrebna je i veća površina, u usporedbi s umjetnim drvećem, kako bi uhvatili istu količinu CO₂. Kao produkt sekvestracije umjetnim drvećem dobiva se visoko koncentrirani i čisti CO₂, dok kod prirodnog drveća to nije slučaj. Biljke u procesu fotosinteze prikupljeni CO₂ iskorištavaju kao hranu.

Količina emisija CO₂ u budućnosti ovisit će poglavito o najvećim emiterima. Najveći su emiteri pretežito razvijene zemlje poput Kine. Bilo bi poželjno kada bi takve države iskoristile svoju razvijenost i moć da sponzoriraju ili po mogućnosti u potpunosti financiraju razvoj tehnologija za sekvestraciju ugljika. Kina će vrlo vjerojatno ponuditi pomoć jer se već sad ističe kao država koja se trudi ublažiti posljedice klimatskih nepogoda (42).

Problem je što su radnje kojima se mogu smanjiti negativne posljedice klimatskih promjena efektivne poglavito na nacionalnoj razini. Međutim, ukoliko je svjetska težnja smanjenje stope proizvodnje antropogenog CO₂, međunarodna suradnja prijeko je potrebna. Kako bi se izbjegle posljedice ekonomske, ali i političke prirode koje bi utjecale na čitav svijet, nužno je osmisliti strategiju kojom bi čovječanstvo krenulo u borbu protiv globalnog zagrijavanja (13).

Projekti poput umjetnog drveća te ostale inovativne tehnologije postoje i imaju potencijala, međutim nisu razvijene u cijelosti jer nisu prioritetne te zahtijevaju velika ulaganja. Mnogi misle da nema ni smisla potencirati ovakve ideje jer postoje i druga rješenja koja su dakako dobra, ali činjenica je da ne mogu držati korak s današnjim čovječanstvom (39). Primjerice, Lacknerovo umjetno drveće za hvatanje i sekvestraciju ugljika može proces koji bi inače trajao 100 000 godina odraditi u 30 minuta (37). Riječi treba što prije provesti u djela jer je masa ugljikovog dioksida daleko premašila granicu. Dakle, ukoliko čovječanstvo želi poduzeti nešto po pitanju klimatskih promjena, mora reagirati što prije kako bi se izbjegle teške posljedice (23).

5. Literatura

1. Ledley TS, Sundquist ET, Schwartz SE, Hall DK, Fellows JD, Killeen TL. Climate change and greenhouse gases. *Eos Trans Am Geophys Union*. 28. rujan 1999.;80(39):453–8.
2. Trabalka JR. Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle [Internet]. USDOE Office of Energy Research, Washington, DC. Carbon Dioxide Research Div.; 1985 pros [citirano 23. kolovoz 2022.]. Report No.: DOE/ER-0239. Dostupno na: <https://www.osti.gov/biblio/6048470>
3. Shi X, Li Q, Wang T, Lackner KS. Kinetic analysis of an anion exchange absorbent for CO₂ capture from ambient air. Xu J, urednik. *PLOS ONE*. 22. lipanj 2017.;12(6):e0179828.
4. Schneider SH. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*. 10. veljača 1989.;243(4892):771–81.
5. Lal R. Carbon sequestration. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 27. veljača 2008.;363(1492):815–30.
6. Shaw R, Mukherjee S. The development of carbon capture and storage (CCS) in India: A critical review. *Carbon Capture Sci Technol*. ožujak 2022.;2:100036.
7. Gambhir A, Tavoni M. Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth*. prosinac 2019.;1(4):405–9.
8. Quader MA, Ahmed S. Bioenergy With Carbon Capture and Storage (BECCS). U: *Clean Energy for Sustainable Development* [Internet]. Elsevier; 2017 [citirano 15. lipanj 2022.]. str. 91–140. Dostupno na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128054239000041>
9. Tang Y, Yang R, Bian X. A review of CO₂ sequestration projects and application in China. *ScientificWorldJournal*. 2014.;2014:381854.
10. Ozkan M, Nayak SP, Ruiz AD, Jiang W. Current status and pillars of direct air capture technologies. *iScience*. 15. travanj 2022.;25(4):103990.
11. Carbon capture and sequestration: The roles of agriculture and soils | Stout | *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* [Internet]. [citirano 15. lipanj 2022.]. Dostupno na: <http://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/2280/pdf>
12. The Future of Coal. :192.
13. Baes J, Goeller HE, Olson JS, Rotty RM. The Global Carbon Dioxide Problem [Internet]. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States); 1976 kol [citirano 23. kolovoz 2022.]. Report No.: ORNL-5194. Dostupno na: <https://www.osti.gov/biblio/7145150>

14. Yu KMK, Curcic I, Gabriel J, Tsang SCE. Recent Advances in CO₂ Capture and Utilization. *ChemSusChem*. 24. studeni 2008.;1(11):893–9.
15. Reichle D, Houghton J, Kane B, Ekmann J, Others A. Carbon sequestration research and development [Internet]. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States); National Energy Technology Lab., Pittsburgh, PA (US); National Energy Technology Lab., Morgantown, WV (US); 1999 pros [citirano 20. kolovoz 2022.]. Report No.: DOE/SC/FE-1. Dostupno na: <https://www.osti.gov/biblio/810722>
16. Mangaraj S, Pradhan P, Pradhan S, Guru A. Carbon Sequestration: An Antidote for Climate Change. U 2018.
17. Corner A, Pidgeon N. Like artificial trees? The effect of framing by natural analogy on public perceptions of geoengineering. *Clim Change*. lipanj 2015.;130(3):425–38.
18. Comparison of carbon sequestration efficacy between artificial photosynthetic carbon dioxide conversion and timberland reforestation | MRS Energy & Sustainability | Cambridge Core [Internet]. [citirano 26. kolovoz 2022.]. Dostupno na: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-energy-and-sustainability/article/abs/comparison-of-carbon-sequestration-efficacy-between-artificial-photosynthetic-carbon-dioxide-conversion-and-timberland-reforestation/C0FA52EDC0691A5AFBC41B01A2BB3EC9>
19. Okesola AA, Oyedeji AA, Abdulhamid AF, Olowo J, Ayodele BE, Alabi TW. Direct Air Capture: A Review of Carbon Dioxide Capture from the Air. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 10. rujan 2018.;413:012077.
20. DAC Technology | 1PointFive [Internet]. [citirano 26. kolovoz 2022.]. Dostupno na: <https://www.1pointfive.com/dac-technology>
21. Direct air capture & negative emissions. *Filtr Sep*. lipanj 2021.;58(3):22–4.
22. Lindh N. Artificial trees: How ASU scientists are hoping to reverse global warming [Internet]. *Cronkite News - Arizona PBS*. 2015 [citirano 26. kolovoz 2022.]. Dostupno na: <https://cronkitenews.azpbs.org/2015/11/10/artificial-trees-how-asu-scientists-are-hoping-to-reverse-global-warming/>
23. Siegel RP. The Artificial Tree. *Mech Eng*. 01. studeni 2018.;140(11):34–9.
24. Shi X, Xiao H, Lackner KS, Chen X. Capture CO₂ from Ambient Air Using Nanoconfined Ion Hydration. *Angew Chem Int Ed*. 14. ožujak 2016.;55(12):4026–9.
25. Draw an octet-rule Lewis structure for CO₃²⁻. State which orbitals or hybrids on C and O overlap to make each valence bond, state each bond type (sigma or pi bond), and state the total bond order between each pair of bonded atoms. [Internet]. *homework.study.com*. [citirano 31. kolovoz 2022.]. Dostupno na: <https://homework.study.com/explanation/draw-an-octet-rule-lewis-structure-for-co32-state-which-orbitals-or-hybrids-on-c-and-o-overlap-to-make-each-valence-bond-state-each-bond-type-sigma-or-pi-bond-and-state-the-total-bond-order-between-each-pair-of-bonded-atoms.html>
26. Draw the Lewis structure of bicarbonate (HCO₃⁻), showing all possible resonance structures if there are any. [Internet]. *homework.study.com*. [citirano 31. kolovoz 2022.].

- Dostupno na: <https://homework.study.com/explanation/draw-the-lewis-structure-of-bicarbonate-hco3-showing-all-possible-resonance-structures-if-there-are-any.html>
27. Posavec L. Kemija karbonata [Internet] [info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. University of Zagreb. Faculty of Science. Department of Chemistry; 2017 [citirano 31. kolovoz 2022.]. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:831954>
 28. Höll W, Kiehling B. Regeneration of anion exchange resins by calcium carbonate and carbon dioxide. *Water Res.* siječanj 1981.;15(8):1027–34.
 29. Lounis A, Gavach C. Electrotransport of carbonate and hydrogen carbonate ions in anion exchange membranes. *J Membr Sci.* studeni 1990.;54(1–2):63–74.
 30. Bazina L. Kvaterni amonijevi spojevi–antimikrobni potencijal i bakterijska rezistencija. U: *Kemijski seminar I*, Zagreb. 2017.
 31. Els ER, Lorenzen L, Aldrich C. The adsorption of precious metals and base metals on a quaternary ammonium group ion exchange resin. *Miner Eng.* travanj 2000.;13(4):401–14.
 32. Renner A, Michaelis KP. Thermoplastic resins, polyquats, and membranes based on epoxies. *J Polym Sci Polym Chem Ed.* siječanj 1984.;22(1):249–62.
 33. Quaternary ammonium cation. U: *Wikipedia* [Internet]. 2022 [citirano 31. kolovoz 2022.]. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quaternary_ammonium_cation&oldid=1105688458
 34. Sanz-Pérez ES, Murdock CR, Didas SA, Jones CW. Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chem Rev.* 12. listopada 2016.;116(19):11840–76.
 35. Watanabe Y, Ohnaka K, Fujita S, Kishi M, Yuchi A. Effects of the Spaces Available for Cations in Strongly Acidic Cation-Exchange Resins on the Exchange Equilibria by Quaternary Ammonium Ions and on the Hydration States of Metal Ions. *Anal Chem.* 01. listopada 2011.;83(19):7480–5.
 36. Ljoljo D. Usporedba različitih postupaka za uklanjanje karbonatne tvrdoće vode. 2013. [citirano 31. kolovoz 2022.]; Dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/620515>
 37. Burna B, Calgaro R, Hergenreder R. *Carbon Sequestration Methods: Mechanical Trees and BioUrban.* :22.
 38. McGlashan N, Shah N, Caldecott B, Workman M. High-level techno-economic assessment of negative emissions technologies. *Process Saf Environ Prot.* studeni 2012.;90(6):501–10.
 39. ARTIFICIAL TREES COULD OFFSET CARBON DIOXIDE EMISSIONS – Climate Change [Internet]. [citirano 10. lipanj 2022.]. Dostupno na: <https://climatechange.medill.northwestern.edu/2016/11/29/artificial-trees-might-be-needed-to-offset-carbon-dioxide-emissions/>
 40. Building the Ultimate Carbon Capture Tree [Internet]. [citirano 10. lipanj 2022.]. Dostupno na: <https://www.asme.org/topics-resources/content/building-ultimate-carbon-capture-tree>

41. Bui M, S. Adjiman C, Bardow A, J. Anthony E, Boston A, Brown S, i ostali. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy Environ Sci.* 2018.;11(5):1062–176.
42. Wennersten R, Sun Q, Li H. The future potential for Carbon Capture and Storage in climate change mitigation – an overview from perspectives of technology, economy and risk. *J Clean Prod.* rujan 2015.;103:724–36.

Popis slika

- **Slika 1.** Razina zastupljenosti CO₂ u atmosferi od 1960-tih do danas.
- **Slika 2.** Prikaz koraka metode izravnog hvatanja CO₂ iz zraka. Preuzeto i preuređeno iz ref. (22).
- **Slika 3.** Prijedlog modela umjetnog drveća. Preuzeto i preuređeno iz ref. (8).
- **Slika 4.** Lewisova struktura a) karbonatnog i b) hidrogenkarbonatnog iona. Preuzeto iz ref (25) i (26).
- **Slika 5.** Ravnoteže prisutna u vodenoj otopini CO₂/H₂CO₃.
- **Slika 6.** Kvarterni amonijev kation: a) općenita struktura i b) „ball & stick“ prikaz tetrabutil amonijevog kationa. Preuzeto iz ref (33).
- **Slika 7.** Shematski prikaz procesa na kojima se temelji djelovanje umjetnog drveća. Inspirirano/preuređeno iz ref. (24).
- **Slika 8.** Ovisnost promjene slobodne Gibbsove energije za a) hidrataciju i b) hidrolizu karbonatnog iona. Preuzeto i preuređeno iz ref. (24)
- **Slika 9.** Kemijska struktura ionske smole s dva bočna lanca
- **Slika 10.** a) Klaus Lackner i njegov prototip umjetnog stabla; b) vlakna ionsko izmjenjivačke smole. Preuzeto iz ref. (23).
- **Slika 11.** Umjetno stablo Klause Lacknera

6. Životopis

Antonina Krišković rođena je 22.09.2000. godine u Rijeci. Dolazi sa Raba gdje je u razdoblju 2007.-2015. godine pohađala Osnovnu školu Ivana Rabljanina. Nakon završene osnovne škole upisuje Srednju školu Markantuna de Dominisa Rab, smjer opća gimnazija, koju je završila 2019. godine. Preddiplomski sveučilišni studij sanitarnog inženjerstva u Rijeci na Medicinskom fakultetu upisuje u akademskoj godini 2019./2020.. Uspješno barata programima MS paketa. Služi se engleskim, talijanskim i njemačkim jezikom. Posjeduje vozačku dozvolu B kategorije te dozvolu za voditelja brodice B kategorije.