

CO₂-aren erabilera, berotegi-efektua murrizteko estrategia

(CO₂ utilization, a strategy for limiting greenhouse effect)

Ainara Ateka^{1*}, Ander Portillo¹, Irene Sierra², Javier Ereña¹

¹ Ingeniaritza Kimikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

² Ingeniaritza Kimikoa Saila, Farmazia Fakultatea (UPV/EHU)

LABURPENA: Gero eta arreta handiagoa eskaintzen ari zaio erregai fosilen errekontzatzik sortutako klima-aldaketari. Karbono dioxidoa (CO₂) berotegi-efektuaren eragile diren gasen artean ugariena da, eta klima-aldaketa arintzeko ezinbestekoa da haren isurketak murriztea. Helburu hori betetzeko, CCU teknologia (karbono dioxidoaren bahiketa eta erabilera) lagungarria izan daiteke. Horretan, lehenengo urratsa energia-planetetan edo industrietan sortzen den CO₂-a bahitzea da, atmosferara isuri aurretik. Ondoren, industrialki erabiliko duten instalazioetaraino garraiatzen da, eta horietan produktu komertzial bilakatzen da. CO₂-a zuzenean erabil daiteke, eraldatu gabe, zenbait aplikaziotarako: uren gatzgabetzea, gainazalen garbiketa, elikagaien eta edarien ekoizpena eta petrolio- eta gas-hobien ustiatze-etekina hobetzeko. Bigarren aukera CO₂-a lehengai modura erabiltzea da, produktu kimikoak zein erregaiak lortzeko. CCU teknologien abantaila nagusia CO₂-aren erabilera jarduera errentagarria bihurtzea da, hondakinetatik abiatuz lortutako produktuak sal daitezkeelako. Hala ere, zenbait arazo daude CCU teknologiari lotuta: (i) produktu kimikoen eskaria ez da nahikoa CO₂-aren kantidadea esanguratsua bahitzeko, (ii) CO₂-a erregaiak ekoizteko erabiltzen bada, isurketak atzeratu egiten dira, saihestu beharrean, (iii) zenbait produktu kimikotan egindako CO₂-aren «biltegitratzeak» bizitza laburra izan dezake.

HITZ GAKOAK: CO₂, bahiketa, balorizazioa, klima-aldaketa, CCS, CCU.

ABSTRACT: *Climate change –caused mainly by the utilization of fossil fuels– has aroused great interest in the last decades. Among the greenhouse gases, carbon dioxide (CO₂) is the most abundant, and thus, limiting its emissions is a key issue to mitigate climate change. In light of this perspective, carbon dioxide capture and utilization (CCU) technology could be used. For this purpose, the CO₂ produced in power plants and industries needs to be captured, before dumping it to the atmosphere. Then, CO₂ is transported to the facilities for its industrial utilization, to be converted into commercial products. CO₂ can be used directly, without conversion, for different purposes: desalination of water, surface cleaning, food or drink production, and injection for enhanced recovery of oil or natural gas. CO₂ can also be regarded as a feedstock by processing and converting it into chemicals and fuels. The main advantage of CCU technology is that it can turn the utilization of waste CO₂ emissions into a profitable activity, as products can be sold. However, this technology has several drawbacks, such as: (i) the current demand for chemicals does not have the capacity to sequester enough CO₂ emissions to contribute significantly to meeting the carbon reduction targets, (ii) using CO₂ for fuel production only delays its emissions, (iii) the «storage» in some chemicals is also short-lived, depending on their use.*

KEYWORDS: CO₂, sequestration, utilization, climate change, CCS, CCU.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Ainara Ateka, Ingeniaritza Kimikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, UPV/EHU Sarriena Auzoa, 48940 Leioa, Euskal Herria. – ainara.ateka@ehu.eus – https://orcid.org/0000-0002-3863-5808.

Nola aipatu / How to cite: Ateka, Ainara; Portillo, Ander; Sierra, Irene; Ereña, Javier (2020). «CO₂-aren erabilera, berotegi-efektua murrizteko estrategia»; *Ekaia*, 37, 2020, 257-270. (https://doi.org/10.1387/ekaia.20905).

Jasoa: 31 maiatza, 2019; Onartua: 24 urria, 2019.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2020 UPV/EHU



Obra hau Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

1. SARRERA

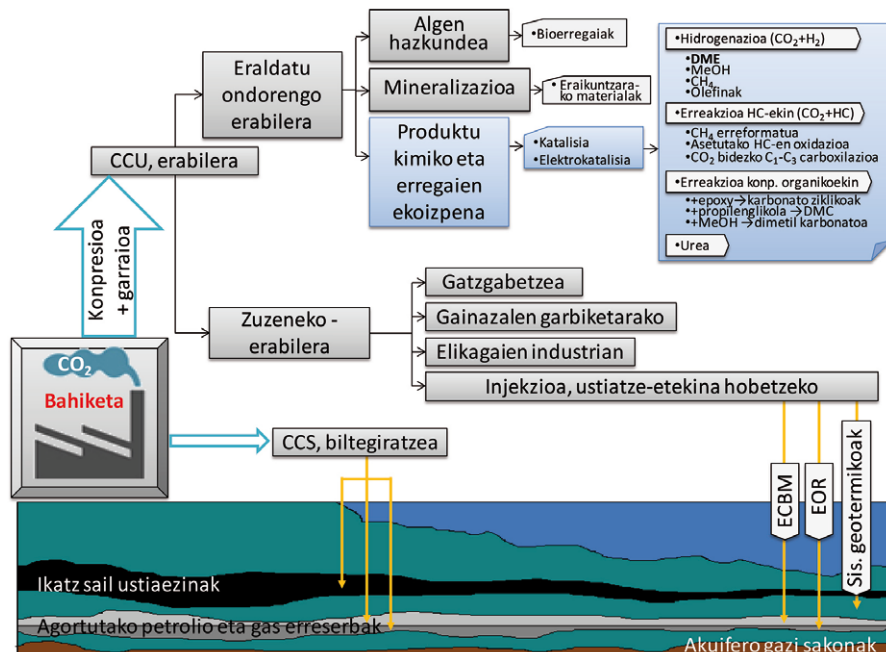
Asko izan dira azken hamarkadetan munduan egin diren aurrerapenak, eta horiei esker bizi-kalitatea hobetzeaz gain, bizi-itxaropena ere luzatu egin da. Hala ere, demografiaren eta industriaren hazkundearen ondorioz, kontsumoa ere areagotu da, eta horrek, ingurumenaren kaltetan, hondakinen eta kutsatzaileen gorakada ekarri du. Gero eta nabariagoak dira Lurrak pairatzen dituen kalteak; horrenbestez, gizartea konponbideen bila hasi da. Erregai fosilen inguruan garatu den industriak eta gizarteak aurre egin behar die erregai horiek erabiltzeak dakartzan arazoei; ez bakarrik ingurumen-arazoei, baita politika edo ekonomia arazoei ere [1]. Aipaturiko arazo horiek bi oinarri dituzte: erregai fosilen iraunkortasun mugatua eta gas kutsatzaileen isurketa.

Berotegi-efektuaren eragile diren gasen artean ugariena da CO_2 -a. Konposatu egonkorra da, eta, beraz, ez-erreaktiboa: denbora luzez irauten du eta atmosferan metatzen da, eta, ondorioz, Lurraren tenperatura igotzen da. Karbono dioxidoak jatorri naturala izan dezakeen arren (jarduera bolkanikoa, adibidez), karbonodun materialen erabilera antropogenikoak (erregai fosilen errektuntzak, alegia) bilakatu du klima-aldaketaren eragile nagusia. Halatan, errektuntzan eratutako CO_2 -aren isurketak murrizteko zenbait estrategia proposatu dira. Horietan, eman beharreko lehen pausoa CO_2 -a bahitzea da isurketen iturri diren energia-plantetan edo industrietan [2, 3], atmosferara isuri baino lehen. CO_2 -a bahitu ondoren bi aukera daude (1. irudia): i) CO_2 -a epe luzerako biltegitratzea (CCS, *Carbon Capture and Storage*) [2, 4, 5]; eta ii) CO_2 -a hondakin moduan hartu beharrean, lehen-gai bezala erabili eta produktu komertzial bihurtzea (CCU, *Carbon Capture and Utilization*) [6-8].

Bi irtenbideen artean egokiena aukeratzeko, teknologia bien kostu-errentagarritasuna eta ingurumenean duten eraginak aztertu behar dira. Gainera, kontuan izan behar da CCU teknologia erabiliz kudea daitekeen CO_2 kantitatea askoz txikiagoa dela, CCS teknologiarekin alderatuz. Adibide gisa, kalkulatu da produktu kimikoak eta erregai sintetikoak ekoizteko prozesuek CO_2 -aren isurketen %10 inguru kudea dezaketela [9].

Teorikoki, CCS teknologiak erregai fosilen erabilera jarraitua ahalbidetzen du, eta ekonomikoki eraginkortzat hartzen da. Hala ere, badaude haren erabilerekin lotutako zenbait arazo [9]: i) inbertsio ekonomiko eta energia-kontsumo altua, ii) epe luzerako biltegitratzea iraunkorra dela egiaztatu beharra, iii) biztanleriaren aurkako jarrera eta iv) zenbait herrialderen biltegitratzeko edukiera urria edo eskuragarri dauden tokiak itsasoan kokatzen direla (eta hala, garraioaren eta biltegitratzearen kostuak handitzen dira). Hala, CCU teknologia proposatu da hautabide partzial moduan, ekoiztiriko karbono dioxidoaren frakzio bat kudeatzeko, CCS teknikaren osagarri gisa.

Teknologia horren funtsa honako hau da: iturri industrialetan ekoizten den CO₂-a bahitzea, industrialki erabiliko duten instalazioetaraino garraiatzea eta produktu komertzial gisa erabiltzea.



1. irudia. Carbon Capture and Storage (CCS) eta Carbon Capture and Utilization (CCU) teknologien adierazpen eskematikoa.

Hainbat dira CO₂ produktu gisa erabiltzen dituzten sektoreak, hala nola edari karbonatuak, izotz lehorra, su-itxalgailuak, disolbatzaileak, hozgariak, prozesuko jariagai gisa erabiltzen dutenak edo alga-haztegiak, fotosintesia burutzeko.

CO₂-a eskala handian erabil daiteke petrolioaren erauzte-etekina handitzeko (EOR, *Enhanced Oil Recovery*), gas-erauzte prozesua errazteko (EGR, *Enhanced Gas Recovery*) eta sistema geotermikoen eraginkortasuna hobetzeko (EGS, *Enhanced Geothermal Sytems*) adibidez; hala ere, globalki isuritako CO₂ maila kontuan izanda (urteko 32.000 milioi tona baino altuagoa [10]), oraindik arbuiagarria da (% 1 baino txikiagoa) balio erantsiko produktuak lortzeko lehengai gisa erabiltzen den CO₂ kantitatea (urteko 200 milioi tona da [11]). Dena den, CO₂-a erabil lezaketen industria asko egon litezke, gas hau eskuratzearen prezio altua dela medio erabiltzen ez dutenak. CO₂-a erabilgarria izango litzateke prezioak baxuagoak balira (CCS alternatiba gisa). Karbono zerga-politikak ezartzen ari direnez eta

karbonoa harrapatzea ezinbestekoa denez, egungo joera (CO₂-a balio gabeko produktu gisa hartzea) alda daiteke, eta industrian kontsumitzen den eskala handitu eta CO₂-aren kontsumitzaile industrial berriak azaleratu.

Testuinguru hori dela medio, arrazoi onak daude CCU teknologietan inbertsioa egiteko, CCS teknologiekin batera: i) CCU teknologia CCSrekin paraleloan ezarri daiteke, helburu gehigarriekin; ii) CCUrekin onura potentzial ugari lor daitezke. CCSrekin alderatuz, CCU teknologien abantaila nagusia CO₂-aren erabilera jarduera errentagarria bihurtzea da, CO₂-hondakinetatik abiatuz lortutako produktuak sal daitezkeelako [9]. Gainera, ohiko lehengai petrokimikoekin alderatuta (erregaiak eta produktu kimikoak ekoizteko erabiltzen direnak), baliabide «berriztagarri» (jarduera industrialaren ondorioz isurketak jarraitzen badira) ez-toxiko eta merkea izatea da CO₂-aren abantaila [12].

Hala ere, zenbait arazo daude CCU teknologiari lotuta. Alde batetik, produktu kimikoen eskaria ez da nahikoa CO₂-aren kantitate esanguratsua bahitzeko eta, hala, klima-aldaketan eragin nabarmena izateko [13]. Horretaz gain, CO₂-a erregaiak ekoizteko erabiltzen bada, isurketak atzeratu egiten dira, saihestu beharrean. Era berean, zenbait produktu kimikotan egingdako CO₂-aren «biltegitratzeak» bizitza laburra izan dezake, ematen zaien erabileraren arabera.

2. KARBONO DIOXIDOAREN BAHIKETA ETA ERABILERA (CCU)

Adierazi bezala, karbono dioxidoaren bahiketa eta erabilera (CCU) teknologiaren funtsak honetan datza: iturri industrialetan ekoizten den CO₂-a bahitzea, erabiliko duten instalazio industrialetaraino garraiatzea eta produktu komertzial bilakatzea.

CCU teknologiak bi taldetan sailka daitezke karbono dioxidoari dagokionez: i) inolako aldaketarik jasan gabe zuzenean erabiltzen dutenak (zuzeneko erabilera); edo ii) zenbait produktu ekoizteko lehengai modura erabiltzen dutenak (eraldatu ondorengo erabilera). Karbono dioxidoa baldintza estandarretan molekula egonkortzat hartzen den arren, baldintza zehatzetan beste lehengai batzuekin erreakziona dezake produktu kimikoak, erregaiak, etab. ekoizteko [11, 13-15].

2.1. Zuzeneko erabilera

2.1.1. Injekzioa, ustiatze-etekina hobetzeko

Karbono dioxidoa zuzenean erabil daiteke, EOR (*Enhanced Oil Recovery*) eta ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane*) izeneko prozesuetan.

Lehenengoa, esan bezala, petrolioa erauzteko etekina handitzeko erabiltzen da, petrolio-hobietan. ECBM izeneko prozesuan, aldiz, ikatz-hobi ustiaezinetako gas naturala erauzten da.

Dena den, ECBM ez da oraindik komertzialki erabiltzen, lortutako metanoak ez dituelako ustiatze- eta ponpaketa-kostuak konpentsatzen [16]. EOR, aldiz, gutxienez azken 40 urteetan erabili izan da petrolioa ekoizten duten zenbait herrialdetan, hala nola Norvegian, Kanadan eta Estatu Batuetan [16, 17].

Beste modu batean berreskuratu ezin diren petrolio-erreserbak erauzteko ere erabiltzen da EOR: horregatik, hirugarren mailako berreskuratzea ere deitzen zaio. Prozesu horretan, agente ezberdinak injektatzen dira hobian: CO₂-a, gas naturala, nitrogenoa, polimeroak, etab., arroketa harapatutako petrolioa ateratzeko [18]. EOR teknikak petrolioaren ustiatze-etekina % 30-60 bitarte handitu dezake, lehen mailako eta bigarren mailako erauzketekin alderatuz. Agente ezberdinen artean, CO₂-a da gehien erabiltzen dena, haren kostu txikiarengatik eta eskuragarritasun handiagatik [17]. Baldintza superkritikoetan injektatzen bada, CO₂-a ondo nahasten da petrolioarekin; haren biskositatea gutxitzen da, eta erauzketa errazten [19]. Injektatutako CO₂ gehiena gainazalera itzultzen da ponpatutako petrolioarekin. CO₂ hori berrerabili egiten da, arrazoi ekonomikoengatik; hala ere, horren zati bat atmosferara isurtzen da.

2.1.2. Sistema geotermikoak

Energia geotermikoa berreskuratzeko sistemen etekina hobetzeko ere erabiltzen da CO₂-a, uraren ordeztan, *EGS (Enhanced Geothermal Systems)* izeneko sistemetan. Horietan, CO₂ superkritikoa erabiltzen da uraren ordeztan, 3-10 km-ko sakoneran dagoen lurraren bero-energia (50-300°C arteko tenperaturak, adibidez, AEBn [20]) CO₂-ari transferitzeko edo zuzenean energia sortzeko CO₂ superkritikoa erabiltzen duten turbinen bitartez. Teknologia horrek CO₂-aren behin betiko biltegitratzea ahalbidetzen du eta energia baliabide garbi baten eraginkortasuna hobetzen du. Hala ere, baditu zenbait oztopo: i) merkaturatzea ez da epe laburrean espero, ii) CO₂ superkritikoa garraiatzearen kostu handiak, edo iii) sarera konexioak egiteko beharra [21].

2.1.3. Gatzgabetzea

CO₂-a erabiltzeko beste aukera bat uren gatzgabetzea da. Uretako solido disolbatuak kentzeko erabil daiteke, edateko ura ekoizteko edo hondakin-urak arazteko. Gatzgabetze planta gehienek ez dute CO₂-a erabiltzen, arrazoi ekonomikoak direla medio. Hala ere, teknologia berriak garatzen ari dira, CO₂-a era merkean eta eraginkorrean erabili ahal izateko.

Amoniakoarekin nahastu ondoren ura CO₂-arekin kontaktuan jartzen bada, uretako ioiak ur-fasetik kentzen dira [22]. Eratzen diren produktuak, Na₂CO₃-a eta NH₄Cl-a, andelaren hondoan hauspeatzen dira. Urak gatzgabetzeko beste metodo batean, CO₂-a gatzunarekin nahasten da, presio eta temperatura altuetan, eta eratzen diren hidratoak kentzen dira, ur garbia lortzeko [23, 24]. Urak gatzgabetzeko CO₂-a erabiltzen duen beste teknika bat amoniako-karbono dioxido osmosi zuzena da [25-27].

CO₂-a erabiltzeko prozesu horren desabantaila nagusia haren kostu ekonomikoa da. Izan ere, CO₂-a erabiltzen duten teknologiak baliatuz ekoiztitzako edateko uraren kostua ez da lehiakorra, beste ur gordinak (gatz kantitate txikiagoak dutenak, hala nola gainazal urak eta lurpeko urak) erabiltzen dituzten teknologiekin alderatuz [26]. Dena den, CO₂-a erabiltzen duten gatzgabetze-teknologiaren kostu ekonomikoa ura arazteko erabiltzen diren beste aukeren antzekoa balitz, irtenbide egokia litzateke.

2.1.4. *Bestelakoak*

Zenbait industriak zuzenean erabiltzen dute karbono dioxidoa. Aipatze-koak dira, esaterako, gainazalak garbitzeko edota elikagaien eta edariaren industrian CO₂-ak dituen aplikazio ugariak: karbonatazio-agentea, kontserbagarria, disolbatzailea, usainak eta kafeina kentzeko, ontziratze gasa [28]. Industria farmazeutikoan ere erabil daiteke, botikak ekoizteko bitarteko gisa [12,28]. Hala ere, aplikazio hauetan erabili ahal izateko, CO₂ hondar-korrontearen purutasunak handia izan behar du, eta hala, iturri batzuetara (hala nola, amoniakoaren ekoizpena) mugatuta dago [12, 3, 16].

2.2. **Eraldatu ondorengo erabilera**

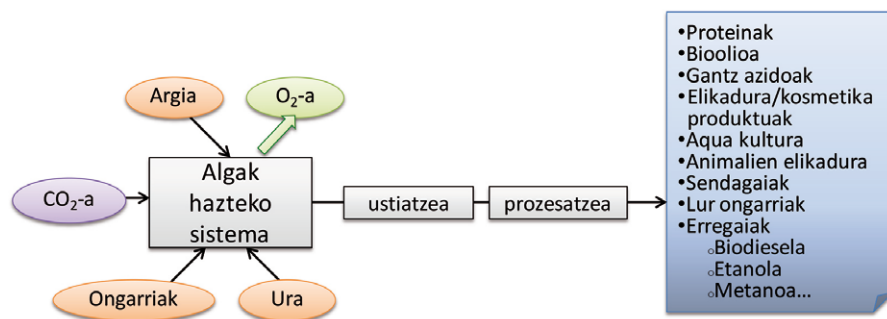
CO₂-a, hondakin moduan hartu beharrean, lehengai modura erabil daiteke, erregaiak eta zenbait produktu kimiko ekoizteko. Hala ere, CO₂-ak iturri petrokimikoak ordezkatzeko ditzakeen arren erregaiak eta produktu kimikoak ekoizteko, muga garrantzitsuak daude. Horien artean, nagusia CO₂ molekularen egonkortasun handiarekin lotuta dago. Izan ere, eraldaketa-prozesuak energia asko kontsumitzen du, eta hautakortasun handiko katalizatzaileak behar dira. Gainera, produktu kimikoen eta erregaien biltegitratze-denbora mugatua da, haien bizitza laburra dela eta (gehienetan sei hilabete baino gutxiago), eta hala, CO₂-a atmosferara isurtzen da epe laburrean.

2.2.1. *Algen hazkundera (eraldaketa biologikoa)*

Biomasa energia-iturri berriztagarritzat hartzen da, denbora-tarte labur samarrean ekoizti daitekeelako, iturri fosilekin alderatuta. CO₂-aren eliminazio biologikoa landare berdeek edo algek egindako fotosintesian oinarri-

tzen da. Prozesu horretan, klorofilak eguzkitiko argia hartzen du, eta CO₂-a eta ura eraldatu, eta karbohidratoak ekoizten ditu. Mikroalgek biomasa produktibitate handia dute, landare lehortarrek alderatuta [9]. Gainera, ez dira laborantza-lurretan landatu behar, eta espezie asko ur gazietan haz daitezke.

Mikroalgak produktu anitz ekoizteko erabili daitezke: erregaiak, proteinak, balio altuko produktu kimikoak, elikagaiak, ongarriak (2. irudia). Errekuntza-gasak CO₂-iturri gisa erabiltzen badira, urmael irekietan edo fotobioerreaktoreetan egindako mikroalgen laborantzak CO₂-aren bahiketa eta erabilera ahalbidetuko lituzke. Alga tona bakoitzeko, gutxi gorabehera 1,8 tona CO₂ finka daitezke [9].



2. irudia. Algen hazkundera eta prozesu horretan lor daitezkeen produktuak. Iturria [9].

Algetatik eratorritako biomasaren erabilerak zenbait desabantaila ditu: ekoizpen-kostu handia, prozesuaren konplexutasuna (algek sentikortasuna dute pH-arekiko eta ezpurutasunekiko), CO₂-aren ekoizpenaren eta algen hazkunderaren arteko eskala-orekarik eza, lur-beharrizan handiak algak landatzeko [9, 29].

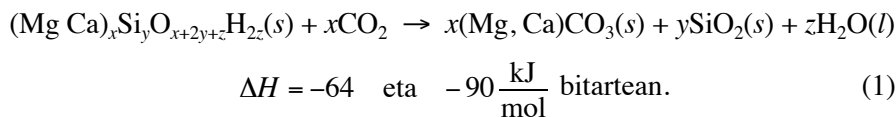
Zenbait ikerketa egin dira algen hazkunderaren bideragarritasuna aztertzeko. Brune eta kol.-ek [30] algak hazteko sistema bat proposatu zuten, energia-planta baten errekkuntza-gasetako CO₂-a berreskuratuz. Instalazioak 30,3 milioi kg CO₂ ekoizten zituen urteko. Prozesuaren bidez, errekkuntza-gasetako CO₂-aren %70 bahitzea lortu zen. Sharifzadeh eta kol.-en lanean, biomasaren pirolisian bahitutako CO₂-a mikroalgak hazteko erabili zen [31]. Honela, prozesu integratuaren bidez (biomasaren pirolisia + algen hazkundera aurreko etapan bahitutako CO₂-a erabiliz) erregaiak biomasaren pirolisitik lortzeaz gain, hazitako algetatik ere bioerregaiak (diesela + nafta) lortzen dira. Prozesu integratu horren bidez, karbonoaren bihurtze-maila %55etik (pirolisi hutsean lorturiko balioa) %73ra handitzea

lortu zen. Horretaz gain, atmosferara isuritako CO₂ kantitatea hasierako karbonoaren %45etik %6ra murriztu zen.

2.2.2. Mineralizazioa

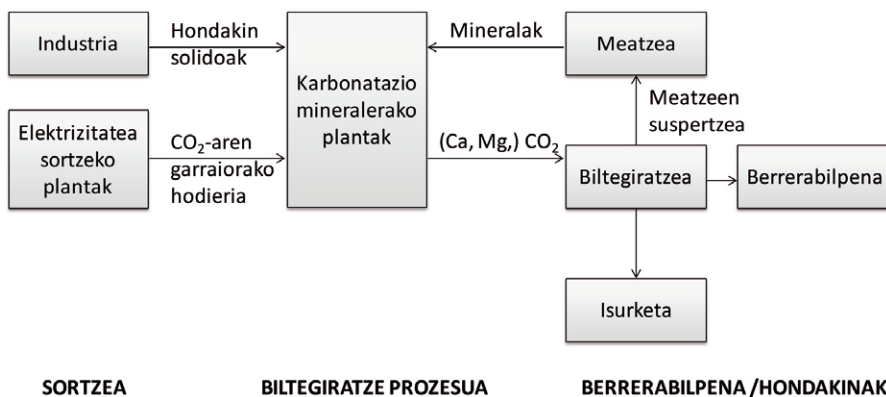
CO₂ kantitate handiak finka daitezke karbonatazio minerala izeneko prozesua erabiliz. Karbonatazioan, CO₂-a era naturalean edo artifizialean eraldatzen da karbonatoak ekoizteko. Karbonatazio mineralean (3. irudia), bahitutako CO₂-ak mineralekin (kaltzio edo magnesio silikatoekin, nagusiki) erreakzionatzen du, eta CaCO₃-a edo MgCO₃-a ekoizten [32]. Hala, CO₂-rako epe luzerako biltegitratze segurua lortzeaz aparte, ekoiztako produktuak zenbait aplikazio izan ditzake, hala nola meategiak berreskuratzea eta eraikuntzarako materialak ekoiztea.

Lehengai moduan, silikato lurralkalinotan aberatsak diren arrokkak erabil daitezke, hala nola olivina (MgSiO₄) eta wollastonita (CaSiO₃). Silikatoek CO₂-arekin erreakzionatzen dute, eta dagozkion karbonatoak eta SiO₂-a eratzen dira [9]:



Karbonatazio mineralaren bidez karbono dioxidoa biltegitratzea era naturalean gertatzen den arroken higadura-prozesuaren antzekoa da. Ezaguna da Lurra eratu ondoren higadurak atmosferako CO₂ kontzentrazioa murrizteko izan zuen eragin garrantzitsua. Karbonatazio-erreakzioak exotermikoak dira eta, ondorioz, energia askatzen da. Xie eta kol.-ek [33] CO₂-aren mineralizazioa aztertu dute, elektrizitatea sortzeko asmoz. Prozesu honetan, CO₂-a eta industria-hondakin alkalinoak erabili dira; ondoren industrian erabilgarria den NaHCO₃-a lortu da, energiarekin batera. Teknologia honi bitarteko, gehienez 5,5 W/m² lortu izan dira.

Era naturalean gertatzen den karbonatazio-erreakzioa oso motela da eta, hortaz, CO₂-aren mineralizazioa eskala handian egin ahal izateko, ezinbestekoa da karbonatazio-prozesua azkartzea, honakoak erabiliz: beroa, presioa, eta mineralen aurretratamendu mekanikoa eta kimikoa. Karbonatazio azkartua hondakin solidoen tratamenduan erabil daiteke, konposatu toxikoak karbonodun materialetan egonkortzeko helburuarekin. Trataturiko hondakin solidoak eraikuntzan erabil daitezke. Ebrahimi eta kol.-ek [34] zentral termiko batean eratutako errauts hegalarien karbonatazioa proposatu dute, zementuaren ekoizpenean erabiltzeko, eraikuntzarako material «berdeak» ekoizteko. Bestelako industria-hondakin solidoak ere erabili izan dira kostu txikiko lehengai gisa CO₂-aren mineralizazioa egiteko, hala nola zementu-hondakinak, zementu-labearen hautsa eta lokatz gorria [35-38].



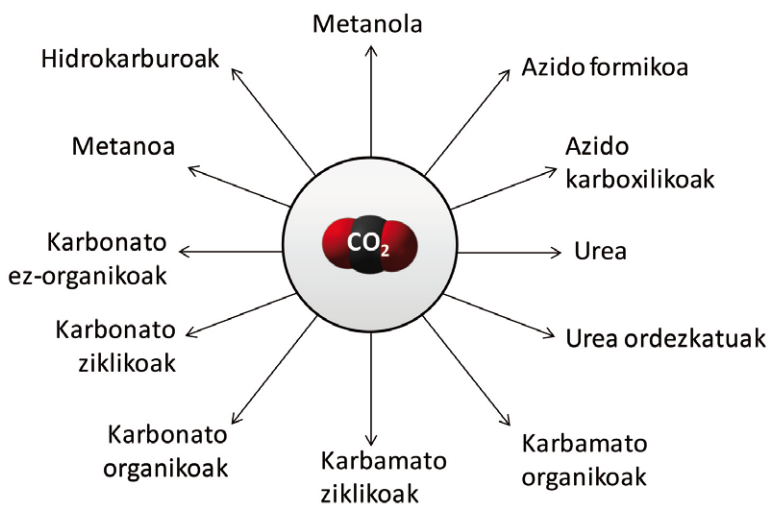
3. irudia. Karbonatazio mineralaren prozesuaren fluxu-diagrama [9, 39].

Karbono dioxidoa hormigoiaren ontzeko prozesuan ere erabil daiteke. Kashef-Haghighi eta kol.-ek [40] % 18ko karbonatazio-eraginkortasunak lortu dituzte CO₂-arekin egindako hormigoiaren ontze azkartuan, karbono dioxidoaren % 20ko kontzentrazioa erabiliz.

Karbonatazio mineralak abantaila argiak dituen arren (hala nola oso segurua eta behin betikoa dela), baditu zenbait desabantaila ere [32]: (i) azkar erreakzionatzen duten partikulen tamaina lortzeko behar den ehotze-energia handia; (ii) solidoen karbonatazioa ahalbidetzeko behar den egoitzadendora handiak errektore oso handiak erabiltzera behartzen du; (iii) kostua biltegitratze geologikoarena baino altuagoa da.

2.2.3. Produktu kimikoen eta erregaien ekoizpena (eraldaketa kimikoa)

Aipatu bezala, CO₂-a lehengai modura erabil daiteke balio erantsiko produktuak ekoizteko, bai produktu kimikoak zein erregaiak [8, 11, 41]. Prozesu horiek katalizatzaileen beharra dute, eta, egoera idealean, CO₂ atmosferara isurtzea ekiditen da energia-iturri berriztagarrietatik lorturiko energia erabiliz. Teknologia horiek egungo errekontza osteko CCS teknologien jarraian erants daitezke; horien inbertsio kostuak konpentsatzeko edo, are gehiago, prozesuari errentagarritasuna ateratzeko, balio erantsiko produktuak lortzen dira CCS+CCU teknologien konbinaketaren bitartez. Gaur egun, laborategi edo eskala pilotuan asko ikertzen ari da arlo honetan (ohantze finkoko errektoreak, hautakortasun handiko katalizatzaile espezifikokoak, etab.); izan ere, CCS teknologiak kudeatzen dituen kantitateak kudea ezin ditzakeen arren, eskala handitu eta industrialki erabiltzeko bidegarritasun ekonomiko eta potentzial handia duten teknologiak dira. 1. irudian, CO₂-a balioztatze bide kimiko ohikoenak biltzen dira, eta 4. irudian, prozesu horietan lorturiko produktu esanguratsuenak.



4. irudia. Karbono dioxidotik lor daitezkeen konposatu kimiko esanguratsuenen adierazpena.

CO₂-a balioztatzeko honako sailkapena egin daiteke, erreakzioaren arabera:

- *Hidrogenazioa* (CO₂+H₂) [42-44]. CO₂-aren hidrogenazio zuzenean lortzen diren produktu aipagarrienak honako hauek dira: metanola (MeOH), dimetileterra (DME), metanoa (CH₄), olefinak eta azido formikoa. Konposatu horiek aplikazio ugari dituzte, bai lehengai modura hainbat konposatu kimiko ekoizteko, bai erregai garbi gisa.
- *CO₂-aren eta hidrokarburoen arteko erreakzioa* [42, 45]. Erreakzio horien artean hauek dira aipatzekoak: metanoaren erreformatua, hidrokarburo asean oxidazioa (alkanoen oxidazioa) eta C₁-C₃ hidrokarburoen karboxilazioa. CH₄-aren erreformatua da garrantzitsua: berotegi-efektuko gas bi kontsumitzeaz gain, sintesi-gasa lortzen da produktu gisa.
- *CO₂-aren eta konposatu organikoen arteko erreakzioa* [32, 46, 47]. CO₂-a kimikoki finkatzeko beste bide bat konposatu organikoekin erreakzionaraztea da; epoxidoak, propilen glikola eta metanola dira erabilienak. Erreakzio horietan lortzen diren produktuen artean honako hauek ditugu: disolbatzaileak eta monomeroak, epoxidoekin; karbonato linealak, propilen glikolarekin, eta, dimetil karbonatoa, metanolarekin.
- *Urearen eta haren deribatuen sintesia* [48]. Gaur egun, CO₂ kantidad handiak kontsumitzen dira Haber-Bosch prozesuaren bitartez, amoniakoarekin erreakzionaraziz urea ekoizteko, ongarrien osagai

garrantzitsua dena. Teknologia hau ekonomikoki bideragarria da, eta industrialki ezarrita dago; urearen eskakizunik handiena prozesu honen bitartez lortzen da.

3. ESKER ONAK

Artikulu honek UPV/EHUren, Eusko Jaurlaritzaren (Project IT1218-19) eta Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioaren (CTQ2016-77812-R) dirulaguntza jaso du. Ander Portillok eskerrak ematen ditu Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioaren aldetik jasotako laguntzategatik (BES-2017-081135).

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] SARAVANAN, K., HAM, H., TSUBAKI, N., BAE, J. W. 2017. «Recent progress for direct synthesis of dimethyl ether from syngas on the heterogeneous bifunctional hybrid catalysts». *Applied Catalysis B: Environmental*, **217**, 494-522.
- [2] ATEKA, A., SIERRA, I., EREÑA, J. 2016. «CO₂-ren bahiketa, klima-aldaketa arintzeko estrategia». *EKAIA*, **30**, 81-92.
- [3] MARKEWITZ, P., KUCKSHINRICHS, W., LEITNER, W., LINSSEN, J., ZAPP, P., BONGARTZ, R., SCHREIBER, A., MÜLLER, T. E. 2012. «Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂». *Energy and Environmental Science*, **5**, 7281-7305.
- [4] IEA 2013 «*Technology Roadmap Carbon Capture and Storage, organisation for Economic Development & International Energy Agency*». Eskuragarri: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapCarbonCaptureandStorage.pdf> [2019, 11/05].
- [5] DECC. 2012. «*CCS Roadmap Storage Strategy, Department of Energy and Climate Change*». Eskuragarri: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48320/4904-ccs-roadmap-storage-strategy.pdf [2019, 11/05].
- [6] NORHASYIMA, R. S., MAHLIA, T. M. I. 2018. «Advances in CO₂ utilization technology: A patent landscape review». *Journal of CO₂ Utilization*, **26**, 323-335.
- [7] DINDI, A., QUANG, D. V., VEGA, L. F., NASHEF, E., ABU-ZAHRA, M. R. M. 2019. «Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage». *Journal of CO₂ Utilization*, **29**, 82-102.
- [8] RAFIEE, A., RAJAB KHALILPOUR, K., MILANI, D., PANAH, M. 2018. «Trends in CO₂ conversion and utilization: A review from process systems perspective». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**, 5771-5794.

- [9] STYRING, P., JANSEN, D., DE CONINCK, H., ARMSTRONG, K. 2011. *Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy Using CO₂ to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials*. The Centre for Low Carbon Futures, Birmingham.
- [10] IEA 2015. «CO₂ Emissions from fuel combustion». OECD Publishing, Paris.
- [11] ARESTA, M., DIBENEDETTO, A., ANGELINI, A. 2013. «The changing paradigm in CO₂ utilization». *Journal of CO₂ Utilization*, **3-4**, 65-73.
- [12] YU, K. M. K., CURCIC, I., GABRIEL, J., TSANG, S. C. E. 2008. «Recent Advances in CO₂ Capture and Utilization». *ChemSusChem*, **1**, 893-899.
- [13] CUÉLLAR-FRANCA, R. M., AZAPAGIC, A. 2015. «Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts». *Journal of CO₂ Utilization*, **9**, 82-102.
- [14] ARESTA, M. 2010. *Carbon Dioxide as Chemical Feedstock*. Wiley-VCH, Weinheim.
- [15] JIANG, Z., XIAO, T., KUZNETSOV, V. L., EDWARDS, P. P. 2010. «Turning carbon dioxide into fuel». *Trans. R. Soc. A*, **368**, 3343-3364.
- [16] METZ, B., DAVIDSON, O., DE CONINCK, H., LOOS, M., MEYER, L. 2005. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Intergovernmental Panel on Climate Change, New York.
- [17]. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery Untapped Domestic Energy Supply and Long Term Carbon Storage Solution*. Eskuragarri: https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO2_EOR_Primer.pdf [2019, 11/05].
- [18] KOKAL, S., AL-KAABI, A. 2010. *Enhanced Oil Recovery: Challenges & Opportunities*. Eskuragarri: https://www.world-petroleum.org/docs/docs/publications/2010yearbook/P64-69_Kokal-Al_Kaabi.pdf [2019, 11/06].
- [19] DECC.2010.«*Optimization Of CO₂ Storage In CO₂ Enhanced Oil Recovery Projects*» Eskuragarri: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/47992/1006-optimization-of-co2-storage-in-co2-enhanced-oil-re.pdf [2019, 11/05].
- [20] JEFFERSON, W. T., ANDERSON, B. J., BATCHELOR, A. S., BLACKWELL, D. D., DIPIPO, R., DRAKE, E. M., GARNISH, J., LIVESAY, B., MOORE, M. C., NICHOLS, K., PETTY, S., TOKSÖZ, M. N., RALPH W. VEATCH, J. 2006. *The Future of Geothermal Energy in the 21 Century Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States St.* MIT, Massachusetts.
- [21] BONALUMI, D. 2018. «Enhanced Geothermal System with captured CO₂». *Energy Procedia*, **148**, 744-750.
- [22] RONGVED, P. I. *Sea Water Desalination Using CO₂ Gas from Combustion Exhaust*, US6180012B1.
- [23] WILLIAMS, V. C. *Hydrate Forming Saline Water Conversion Process*, US3155610A.

- [24] MAX, M. D. *Desalination and Concomitant Carbon Dioxide Capture Yielding Liquid Carbon Dioxide*, US6475460B1
- [25] MCCUTCHEON, J. L., MCGINNIS, R. L., ELIMELECH, M. 2006. *The Ammonia-Carbon Dioxide Forward Osmosis Desalination Process: A high recovery alternative to reverse osmosis*. Eskuragarri: <https://pdfs.semanticscholar.org/2f12/50f4b1fa4d68016803aff864cb3ec8f1d147.pdf> [2019, 06/11].
- [26] AL-MAMOORI, A., KRISHNAMURTHY, A., ROWNAGHI, A. A., REZAEI, F. 2017. «Carbon Capture and Utilization Update». *Energy Technology*, **5**, 834-849.
- [27] NETL 2013, *Carbon Storage CO₂ Utilization Focus Area*, 2013 Eskuragarri: <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage#cement> [2019, 06/11].
- [28] RP SIEGEL. 2012. *Algae-based Biofuel: Pros And Cons*. Eskuragarri: <https://www.triplepundit.com/story/2012/algae-based-biofuel-pros-and-cons/81881> [2019, 06/11].
- [29] FUTURE OR WORKING. 2016. *Advantages and Disadvantages of Algae Biofuel*. Eskuragarri: <https://futureofworking.com/7-advantages-and-disadvantages-of-algae-biofuel/> [2019, 06/11].
- [30] BRUNE, D. E., LUNDQUIST, T. J., BENEMANN, J. R. 2009. «Microalgal Biomass for Greenhouse Gas Reductions: Potential for Replacement of Fossil Fuels and Animal Feeds». *Journal of Environmental Engineering*, **135**, 1136-1144.
- [31] SHARIFZADEH, M., WANG, L., SHAH, N. 2015. «Integrated biorefineries: CO₂ utilization for maximum biomass conversion». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **47**, 151-161.
- [32] LI, L., ZHAO, N., WEI, W., SUN, Y. 2013. «A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences». *Fuel*, **108**, 112-130.
- [33] XIE, H., WANG, Y., HE, Y., GOU, M., LIU, T., WANG, J., TANG, L., JIANG, W., ZHANG, R., XIE, L., LIANG, B. 2014. «Generation of electricity from CO₂ mineralization: Principle and realization». *Science China Technological Sciences*, **57**, 2335-2343.
- [34] EBRAHIMI, A., SAFFARI, M., MILANI, D., MONTOYA, A., VALIX, M., ABBAS, A. 2017. «Sustainable transformation of fly ash industrial waste into a construction cement blend via CO₂ carbonation». *Journal of Cleaner Production*, **156**, 660-669.
- [35] KATSUYAMA, Y., YAMASAKI, A., IIZUKA, A., FUJII, M., KUMAGAI, K., YANAGISAWA, Y. 2005. «Development of a process for producing high-purity calcium carbonate (CaCO₃) from waste cement using pressurized CO₂». *Environmental Progress*, **24**, 162-170.
- [36] HUNTZINGER, D. N., EATMON, T. D. 2009. «A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies». *Journal of Cleaner Production*, **17**, 668-675.
- [37] BONENFANT, D., KHAROUNE, L., SAUVÉ, S., HAUSLER, R., NIQUETTE, P., MIMEAULT, M., KHAROUNE, M. 2008. «CO₂ Sequestra-

- tion by Aqueous Red Mud Carbonation at Ambient Pressure and Temperature». *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**, 7617-7622.
- [38] BONENFANT, D., KHAROUNE, L., SAUVE', S., HAUSLER, R., NIQUETTE, P., MIMEAULT, M., KHAROUNE, M. 2008. «CO₂ Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature». *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**, 7610-7616.
- [39] PARSONS BRINCKERHOF, GLOBAL CCS INSTITUTE. 2011. *Accelerating the uptake of CCS: Industrial use of captured carbon dioxide*. Eskuragarri: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/14026/accelerating-uptake-ccs-industrial-use-captured-carbon-dioxide.pdf> [2019, 11/06].
- [40] KASHEF-HAGHIGHI, S., GHOSHAL, S. 2010. «CO₂ Sequestration in Concrete through Accelerated Carbonation Curing in a Flow-through Reactor». *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **49**, 1143-1149.
- [41] RAFIEE, A., PANAH, M., KHALILPOUR, K. R. 2017. «CO₂ utilization through integration of post-combustion carbon capture process with Fischer-Tropsch gas-to-liquid (GTL) processes». *Journal of CO₂ Utilization*, **18**, 98-106.
- [42] YANG, N., WANG, R. 2015. «Sustainable technologies for the reclamation of greenhouse gas CO₂». *Journal of Cleaner Production*, **103**, 784-792.
- [43] AHMAD, K., UPADHYAYULA, S. 2019. «Greenhouse gas CO₂ hydrogenation to fuels: A thermodynamic analysis». *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **38**, 98-111.
- [44] BANSODE, A., URAKAWA, A. 2014. «Towards full one-pass conversion of carbon dioxide to methanol and methanol-derived products». *Journal of Catalysis*, **309**, 66-70.
- [45] MA, J., SUN, N., ZHANG, X., ZHAO, N., XIAO, F., WEI, W., SUN, Y. 2009. «A short review of catalysis for CO₂ conversion». *Catalysis Today*, **148**, 221-231.
- [46] TOMISHIGE, K., YASUDA, H., YOSHIDA, Y., NURUNNABI, M., LI, B., KUNIMORI, K. 2004. «Novel Route to Propylene Carbonate: Selective Synthesis from Propylene Glycol and Carbon Dioxide». *Catalysis Letters*, **95**, 45-49.
- [47] GANESH, I. 2013. «Conversion of carbon dioxide into several potential chemical commodities following different pathways – A review». *Materials Science Forum*, **764**, 1-82.
- [48] ARTZ, J., MÜLLER, T. E., THENERT, K., KLEINEKORTE, J., MEYS, R., ANDRÉSTERNBERG, A., ANDRÉBARDOW, A., LEITNER, W. 2017. «Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment», *Chem. Rev.* **118**, 434-504.