

CO₂-aren bahiketa, klima-aldaketa arintzeko estrategia

CO₂ sequestration, a strategy for reducing climate change

Ainara Ateka, Javier Ereña*

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

Irene Sierra

Ingeniaritza Kimikoa Saila, Farmazia Fakultatea (UPV/EHU)

* ainara.ateka@ehu.eus

DOI: 10.1387/ekaia.16204

Jasoa: 2016-04-06

Onartua: 2016-05-09

Laburpena: Gero eta arreta gehiago eskaintzen ari zaio klima-aldaketari. Gizakion jardueraren eraginez Lurraren temperatura igotzen ari da. Berotegi-efektuko gasen artean karbono dioxidoa (CO₂) ugariena da, eta energia-iturri fosilen errektuntzan du jatorri antropogeniko nagusia. CO₂-ak denbora luzez irauten du atmosferan, eta ondorioz, beharrezkoa da haren isurketak murriztea. Helburu hori betetzeko, karbono dioxidoaren bahiketa- eta biltegitratze-teknologia (CCS teknologia) erabil daiteke. Horretan, lehenengo pausoa, ekoiztiko CO₂-a bahitzea da, atmosferara isuri aurretik. Ondoren, garraiatu eta formazio geologikoetan (akuifero gazi sakonetan, edota petrolio- edo gas-gordailuetan) biltegitratzen da. CCS teknologiak erregai fosilen erabilera jarraitua ahalbidetzen du, CO₂-aren atmosferarako isurketak murrizten dituen bitartean. Hala ere, baditu zenbait arazo, hala nola, inbertsio ekonomiko eta energia-beharrizan handiak, epe luzerako biltegitratzea iraunkorra dela egiaztatu beharra, biztanleriaren erresistentzia, eta biltegitratzeko lekuen falta herrialde batzuetan.

Hitz gakoak: CO₂, bahiketa, biltegitratzea, balorizazioa, klima-aldaketa, berotegi-efektuko gasak, CCS.

Abstract: Climate change has aroused great interest in the last decades, since human activity is raising Earth's temperature. Among the greenhouse gases, carbon dioxide (CO₂) is the most abundant, and has in the combustion of fossil energy sources its prevailing anthropogenic origin. CO₂ lasts for long periods of time in the atmosphere, and therefore, limiting its emissions is a major objective. In light of this perspective, carbon dioxide capture and storage (CCS) technology can be used. For this purpose, the produced CO₂ needs to be captured before dumping it to the atmosphere, and then transported and stored in geological formations (deep saline aquifers, depleted oil and gas reservoirs).

CCS technologies enable the continued use of fossil fuels while reducing CO₂ emissions into the atmosphere. However, this technology has some drawbacks such as: high investment costs and energy requirements, long term permanent storage needs to be verified, population's reluctance, and scarcity of storage sites in some countries.

Keywords: CO₂, sequestration, storage, valorization, climate change, greenhouse gases, CCS.

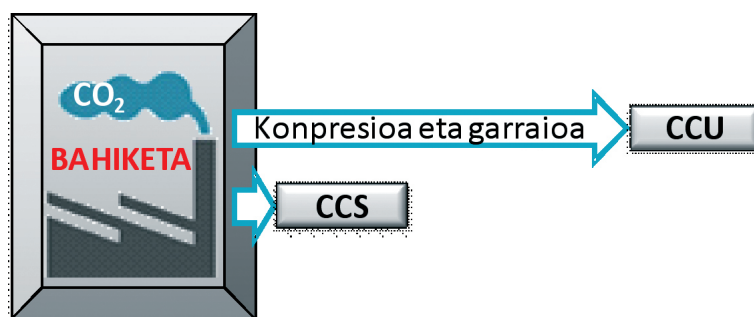
1. SARRERA

Gero eta arreta gehiago eskaintzen ari zaio klima-aldaketa deritzon fenomenoari. Lurraren klima etengabe aldatzen da, kausa naturalak direla medio. Horretaz gain, gizakion ekoizpen-jarduerak eta kontsumo-ohiturek klima aldatzea eragiten dute. Klima-aldaketa oso ondorio larriak izaten ari da (desertifikazioa, arazoak ur-horniketan, ekosistemen aldaketa, etab.), eta aurreikusuten da haren intentsitatea gero eta handiagoa izango dela etorkizunean.

Gizakion jarduerak Lurraren tenperatura igotzea ekarri du (berotegi-efektua). Fenomenoa ulertzeko Lurraren energia-fluxuei erreparatu behar zaie. Eguzkitik datorren erradiazioa Lurraren gainazalera iristen denean, zirkulazio atmosferiko eta ozeanikoez banatu egiten dute, eta geroago espaziora itzultzen da. Jasotako eta itzultitako erradiazioaren arteko orekak biziarentzat egokiak diren baldintzak mantentzen ditu. Berotegi-efektuko gasen kontzentrazioa igotzen bada, aldiz, Lurrak espaziora irradiatzen duen energia kantitatea murriztu egiten da, eta horrek gehiago beroarazten du atmosfera.

Badira berotegi-efektuko gas ugari; horietatik sei araututa daude klima-aldaketari buruzko nazioarteko araudian (Kyotoko protokoloa): karbono dioxidoa (CO₂), oxido nitrosoa (N₂O), metanoa (CH₄), hidrofurokarbonoak (HFC), perfluorokarbonoak (PFC) eta sufre hexafluoruroa (SF₆). Horien artean CO₂ da ugariena. Konposatu hori era naturalean sor daitekeen arren (jarduera bolkanikoan izan dezake jatorria, adibidez), karbono-dun materialen erabilera antropogenikoaren ondorioz (energia-iturri fosilen errekontzaz) bilakatu da klima-aldaketaren eragile nagusia.

Karbono dioxidoa konposatu ez-erreaktiboa da, eta ondorioz, atmosferan denbora luzez irauten du. Karbono dioxidoaren isuriak atmosferan metatzen dira, eta horregatik beharrezkoa da horiek murriztea. 2050. urterako batez besteko tenperatura-igoera 2 °C baino gehiago ez izateko, ezinbestekoa da CO₂-isuriak gutxienez % 50 murriztea [1]. Helburu hori betetzeko hainbat estrategia proposatu dira. Aukera guztietan lehen pausua CO₂-a bahitzea da, atmosferara isuri aurretik, eta ondoren, bi aukera daude (1. irudia): i) biltegitratzea (CCS ingelesez, *Carbon Capture and Storage*) [2, 3]; eta ii) berrerabilteza (CCU ingelesez, *Carbon Capture and Utilization*).



1. irudia. CCS eta CCU teknologiak, CO₂-aren isurketak murrizteko.

CCS eta CCU teknologien funtsa CO₂-aren atmosferarako isurketak saihestea da; horretarako, gas horren bahiketa egin behar da isurketen iturri diren energia-planta edo industria-prozesuetan [4]. Teknologia bien arteko desberdintasuna bahitutako CO₂-aren azken erabileran datza: i) CCS teknologiaren bidez, bahitutako CO₂-a iraupen luzeko biltegitratzea bermatuko duten gunetara bideratzen da [4-9]; ii) CCU teknologiarekin, aldiz, bahitutako CO₂-a produktu komertzial bihurtzen da [4, 10]. Orokorrean, CCU teknologiak bi talde nagusitan sailka daitezke, CO₂-ak aldaketarik jasaten duen ala ez kontuan hartuta. Alegia: i) CO₂-a, inolako aldaketarik jasan gabe zuzenean erabil daiteke, petrolio edo gas naturalaren ustiapenaren etekina handitzeko; edo ii) CO₂-a hondakin moduan hartu beharrean, lehengai modura erabil daiteke, produktu kimikoak, eraikuntzarako materialak, edo erregaiak produzitzeko.

Nahiz eta printzipioz CCU teknologiak soluzio ideala dirudien, teknologia bien artean komenigarriena zein den aukeratzeko, egoera zehatz bakoitzean teknologia biek duten kostu-errentagarritasuna eta ingurugiroarekiko eraginak era sakon batean aztertu behar dira, faktore bien arteko oreka egokia bermatzeko. Gainera, CCU teknologia ezin da CCS teknologiaren alternatiba moduan hartu, kudeatu dezakeen CO₂ kantitatea desberdina baita. Adibide moduan, kalkulatu da produktu kimiko eta erregai sintetikoak ekoizteko bideek CO₂-isurketen % 10 inguru kudea dezaketela [10]. Artikulu honen helburua CCS teknologiaren testuingurua aztertzea da, berrikuspen kritiko baten ikuspuntua hartuta.

2. CCS: KARBONO DIOXIDOAREN BAHIKETA ETA BILTEGIRATZEA

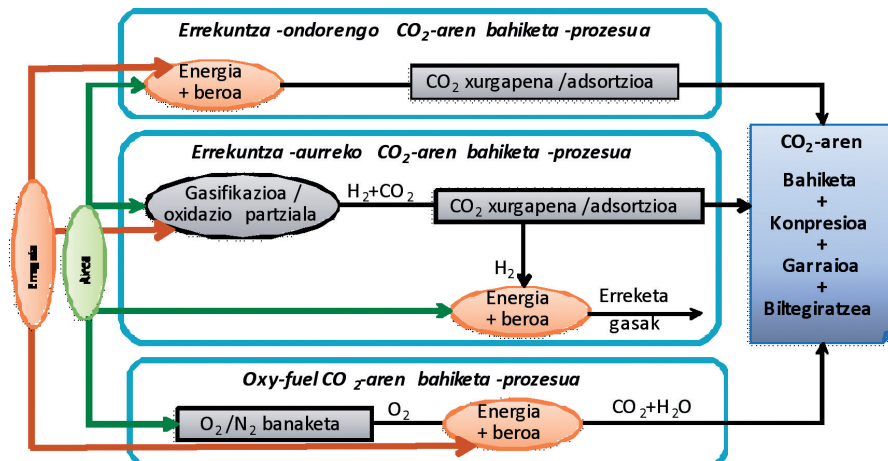
Karbono dioxidoaren bahiketa eta biltegitratze (CCS) teknologiaren definizioa honako hau da: energia-sektoreko iturri industrialetan jatorria duen

CO₂-aren bahiketa, garraioa eta formazio geologikoetan biltegitzea. CO₂-isuriak murrizteko testuinguruan, CCS teknologiaren aukera ekonomikoki eraginkortzat hartzen da.

Teorikoki, teknologia horrek erregai fosilen erabilera jarraitua ahalbidetzen du, CO₂-aren atmosferarako isurketak murrizten dituen bitartean. Hala ere, azken urteetako ikerkuntza-proiektuen emaitzak kontuan hartuta, ezinbestekoa suertatzen da CCS teknologiarekin lotutako arazoak aintzat hartzea. Oro har, CO₂-aren bahiketari inbertsio ekonomiko handiak egoten zaizkio, hala nola, hasierako inbertsioa, operazio-kostu aldagarriak eta kasu gehienetan, energia-beharrizan altuak. Beste alde batetik, biltegitze geologikoak aurre egin behar dio epe luzerako biltegitze iraunkorra lortzeko aukera dela egiaztatzearen erronkari, eta baita komunitateak inguruetan CCS teknologia ezartzearekiko erresistentziari ere. Kontzientziazio arazo horiez gain, zenbait herrialdek ez dute biltegitzeko edukiera nahikorik, edo biltegitzeko duten potentzial bakarra itsas eremuan kokatuta dago; azken kasu horretan, garraio eta biltegitzearen kostu totalak handitu egiten dira [10].

2.1. Karbono dioxidoaren bahiketa

CO₂-a errektuzan sortzen denez, errektuz-prozesuak eragin zuzena du CO₂-a bahitzeko prozesu egokiena aukeratzekoan. Gaur egun, hainbat ikerketa- eta garapen-proiektu egiten ari dira, operazio-kostuak eta energia-kontsumoa murriztera bideratuta. CO₂-a bahitzeko, errektuz-prozesuarekin lotutako hiru sistema nagusi desberdintzen dira: errektuz aurrekoa, errektuz ondorengoa eta oxy-fuel errektuz (2. irudia).



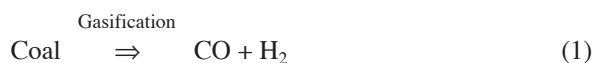
2. irudia. Bahiketa-prozesuak.

2.1.1. Errekuntza ondorengo bahiketa

Prozesu honetan CO₂-a errekontza-gasetatik banatzen da errekontza egin ondoren. Beraz, errekontza ondorengo bahiketa aukera hoberena da gaur egun dauden energia-plantak berregokitzeko. Teknologia hori eskala txikian probatu da, eta berreskuratutako CO₂ mailak 800 t/egun gaintzen du [11]. Ordea, errekontza ondorengo CO₂-aren bahiketaren desabantaila handiena honako hau da: CO₂-a garraiatu eta biltegitratzeko behar den kontzentrazio maila lortzeko (% 95,5 baino handiagoa) kostuak (energia-kostuak eta bestelakoak) handiak dira [12, 13], eta elektrizitatearen kontsumoaren % 70eko igoera estimatzen da [14].

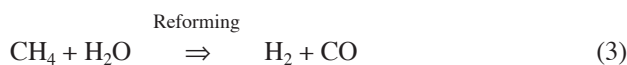
2.1.2. Errekuntza aurreko bahiketa

Prozesu honetan, erregaiak (normalean ikatza edo gas naturala) aurretratamendu bat jasaten du errekontza egin baino lehen. Ikatza kasuan, aurretratamendua oxigeno maila baxua erabiliz egindako gasifikazioan datza (1. ekuazioa). Lortutako produktua sintesi-gasa da, gehienbat CO eta H₂-z osatua, ia gas kutsatzailerik gabea. Sortutako sintesi-gasak lurrun/gas-trukaketa (WGS) erreakzioa jasaten du; horretan ur-lurrunak H₂ gehiago sortzen du, eta CO, CO₂-an bilakatzen da (2. ekuazioa).



H₂/CO₂ nahastearen CO₂ kontzentrazio altuak (> % 20) CO₂-aren banaketa erazten du. Ondorengo urratsean, errekontza egiten da. Horretarako, banatutako H₂ airearekin erretzen da, eta N₂ eta H₂O produktuak lortzen dira. Errekuntza aurreko bahiketa-teknologia aplikatu daiteke ikatza erregai gisa erabiltzen duten gasifikazio integratutako ziklo konbinatuko (IGCC) energia-zentraletan, baina horrek eraginkortasunaren % 7-8 bitarteko galera eragingo luke [11-17].

Gas naturalaren kasuan, gehienbat CH₄-z osatuta dagoenez, sintesi-gasa (H₂+CO) lortzeko erreformatu egin daiteke (3. ekuazioa). Ondoren, H₂-aren edukia handitu daiteke lurrun/gas-trukaketaren erreakzioaren bitartez (2. ekuazioa), eta gainerako prozesua ikatzaren kasuan deskribatutakoaren antzekoa da [18]. Zenbait egilek, gas naturalarekin operatzen duten eta errekontza aurreko CO₂-a bahitzeko sistema duten ziklo konbinatuko zentralen etekin eta kostu analisiak egin dituzte, eta % 80-ko CO₂-bahiketaren etekinak lortzea posible dela ondorioztatu dute, etekina gehiegi murriztu gabe [19].



2.1.3. *Oxy-fuel* errekuntza

Oxy-fuel errekuntzan, airearen ordean oxigenoa erabiltzen da errekuntza egiteko. Horrela, errekuntza-gasen nitrogeno kantitatea murrizten da eta ondorengo banaketa-prozesua errazten da. Prozesu honek badu beste abantaila bat, tenperatura altuen ondorioz sortutako nitrogeno oxidoak (NO_x) murriztea, hain zuzen ere [20]. Errekuntza egiteko oxigeno purua erabiltzen denez, errekuntza-gasen osagai nagusiak CO_2 -a, ura, partikulak eta SO_2 -a dira. Partikulak eta SO_2 -a ohiko metodoak erabiliz bana daitezke (partikulak prezipitagailu elektrostatikoa erabiliz, eta SO_2 errekuntza-gasen desulfurazio-metodoen bidez). Gainontzeko gasen CO_2 -kontzentrazioa altua da (% 80-98 bitartekoa, erabilitako erregaiaren arabera) [21], eta konprimatu, garraiatu eta biltegitatu daitezke. Prozesua teknikoki bideragarria da [20], baina oxigeno purua lortzeko energia-kontsumo altuko aire-bereizketako unitateak erabili behar dira. Ondorioz, energia-kontsumoa % 7 handiagoa izatera irits daiteke, teknologia hau aplikatzen ez duten plantekin alderatuta [17, 22].

2.2. Garraioa

Behin CO_2 -a gainontzeko errekuntza-gasetatik banatuta, biltegitatzegunetara garraiatu behar da. CO_2 -aren azken kokapena edozein izanda ere, garraio-sistema fidagarria, segurua eta ekonomikoki bideragarria izatea ezinbesteko ezaugarria da edozein CCS proiektuan. Erabilitako garraio-sistema CO_2 -aren bolumenaren arabera izango da.

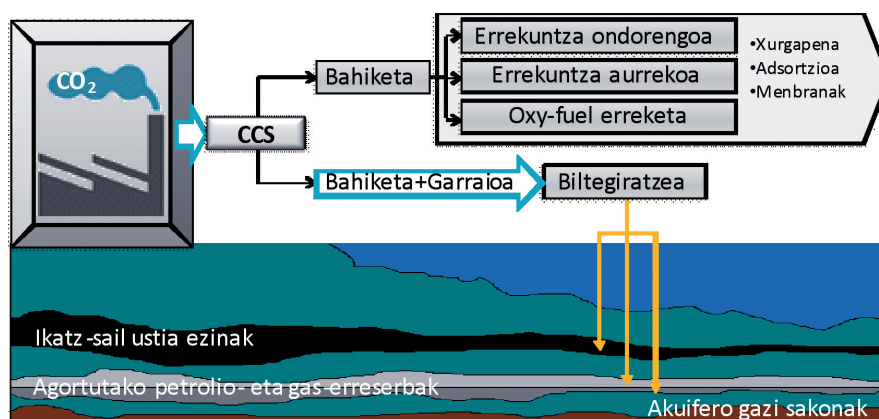
Ipar itsasoan egindako ikerketa batek azpimarratu du CO_2 -a itsasontziz garraiatzea bideragarria eta ekonomikoki lehiakorra dela, LPGen (petrolioaren gas likidotuen) garraiotik eratorritako teknologia erabiliz [23].

Aldiz, lur gainean CO_2 -bolumen handiak distantzia luzeetan garraiatzeko, tutuerien bidezko garraio-metodoa hobesten da, baldin eta CO_2 -aren iturria bizitza luzeko (23 urte baino gehiagoko) energia-zentralak badira. Epe laburragoko biziraupena duten kasuetan, errepide edo trenbide bidezko garraioa lehiakorragoa da [24].

Masa/bolumen erlazioa optimizatzea helburu izaki, CO_2 -a dentsitate handiko fasean garraiatzen da, likido moduan edo egoera superkritikoan (hodian bidezko garraioa egiteko hobesten den egoera). Azken horretan, puntu kritikoari dagozkionak baino presio eta tenperatura altuagoak erabiltzen dira, eta gas eta likidoaren arteko portaera du CO_2 -ak. Horretarako, hoditeriaren tenperatura eta presioa, CO_2 -a egoera superkritikoan mantentzeko mugen barruan (32,1 °C eta 72,9 atm-ren gainetik) mantendu behar dira [25]. CO_2 -a garraiatzeko hoditeriaren ohiko presio- eta tenperatura-tarteak 85-150 bar eta 13-44 °C bitartean mantentzen dira, hurrenez hurren, fase bakarreko jario egonkorra bermatzeko hoditerian zehar [26].

2.3. Biltegitratzea

CO₂-aren bahiketa egin ondoren, hainbat motako formazio geologikoetan gorde edo biltegitratu daiteke, hala nola, beste erabilerarik ez duten akuifero gazi sakonetan, edota petrolio- edo gas-gordailuetan (3. irudia). Gaur egun, biltegitratze geologikoa CO₂ kantitate handiak biltegitratzeko aukera bideragarrientzat jotzen da, klima-aldaketaren murrizketa eraginkorra lortzeko [17, 27, 28].



3. irudia. Bahiketa- eta biltegitratze-prozesuak.

CO₂-aren biltegitratze geologikorako guneak arretaz hautatu behar dira. Biltegitratze geologikorako guneek honako baldintza orokorrak bete behar dituzte: i) biltegia edo gordailua osatzen duen arrokaaren porotasuna, lodiera eta iragazkortasuna egokiak izatea; ii) zigilatze gaitasun egokia duen arroka-geruza izatea; eta iii) inguru geologikoa egonkorra izatea [29]. Aipatutako baldintza orokorrez gain, bestelako eskakizunek biltegitratzeko gunearen bideragarritasuna muga dezakete: CO₂-aren iturrirako distantzia, biltegitratzeko ahalmena, isurketa potentziala edo muga ekonomikoak [30].

2.3.1. Ikatz-sail ustiaezinak

CO₂-a ikatz-ohantze sakonetan injekta daiteke, ikatzaren egitura porotsuan harrapatuta dagoen metanoa berreskuratzeko. Prozesu horrek CO₂-a biltegitratzeko aukera ematen du, harrapatuta zegoen metanoa kentzean sortutako hutsuneetan.

2.3.2. *Petrolio- eta ikatz-erreserba agortuak*

Prozesu honetan CO₂-a petrolio- edo gas-poltsak izan dituzten eta gaur egun agortuta dauden formazio geologikoetan injektatzen da. Ghorbani et al.-ek [31] ikerketa-lana egin zuten Iranen CO₂-aren injekzioen inguruan. Lan honen arabera, mundu mailako sailkapenean, Iran bigarrena da gas naturalaren erreserba-edukietan eta hirugarrena petrolio-erreserben edukietan. Gainera, 2010. urtean egindako beste sailkapen baten arabera, munduko 9. herrialdea zen CO₂-aren produkzioan. Datu hauekin, eta kontuan izanda CO₂-a ekoiztearen eragile diren energia-planten eta petrolio-erreserben arteko gertutasuna herrialde honetan, Ekialde Ertaineko herrialdeen artean Iran aukerarik onena litzateke CO₂-a formazio geologiko natural hauetan injektatzeko. Bestalde, Li et al.-ek [32] Txinako eremuan egindako hainbat lanen datu-bilduma zabala jaso zuten. Azken hauen datuen arabera, aztertutako 41 petrolio-poltsa agortuetatik 23 egokiak lirateke CO₂-aren biltegi moduan erabiltzeko [33]. Teknologia hau luzaroan erabili izan da, 1990eko hamarkadatik aurrera, eta aski ezaguna da. Gainera, CO₂-a guztiz agortu gabeko petrolio- edo gas-poltsan injektatuz gero, horien ustiatze-etekina hobetzen da; izan ere, eremuko presioa handitzean, petrolio eta gasa ateratzea lortzen da (prozesuari EOR «enhanced oil recovery» esaten zaio).

2.3.3. *Itsas hondotan eta akuifero gazi sakonetan biltegitratzea*

Lurraren gainazaletik 700-1.000 m-ko sakoneran kokatzen diren akuifero gazietan gatz maila altuko gatzunak egon ohi dira [34]. Akuifero gazi horiek balio komertzialik ez izan arren, CCS prozesuaren bidez bahitutako CO₂-a injektatuz, hura biltegitratzeko gaitasuna dute. Akuifero gaziak gune zabaletan aurki daitezke, bai lur gainean bai itsas azpian, eta CO₂-a biltegitratzeko ahalmen izugarria dutela uste da [35]. Hala ere, nahiz eta CO₂-a gordetzeko gaitasun handia izan, ikatz- edo petrolio-erreserba moduko gune geologikoekin alderatuta, akuifero gazietan CO₂-a biltegitratzeko ezaugarriei buruz dagoen ezagutza nabarmen murriztagoa da.

Azken hamarkadetan, hainbat ikerketa-lan egin dira zentzu horretan. Yang et al.-ek [36] berrikuspen zabala egin zuten akuifero gazietan egindako CO₂-aren bahiketa gaitzat hartuta. Beste egile batzuk [37, 38] berrikuspen orokorrak egin dituzte bahitutako CO₂-aren biltegitratzearen inguruan, eta akuifero gazietan biltegitratzea bideragarria dela ondorioztatu dute, ingurugiroan inolako kalte edo kalte txikiak eragingo bailituzke. Nolanahi ere, lan horiek azpimarratzen dute biltegitratutako CO₂-aren portaera kontrolatu eta egiaztatzearen garrantzia.

Sakonera handian egindako biltegitratze ozeanikoari dagokionez, 3 km baino sakonera handiagoetan CO₂-a likidotu eta hondoratu egingo litzateke, haren dentsitatea inguruko itsas urarena baino handiagoa baita [30, 39]. Eredu matematikoen aurreraketa dutenez, modu honetan injektatutako

CO₂-a ehunka urtetan mantendu liteke [40]. Sakonera handiagoetako itsas hondoetako sedimentuetan injektatzean, ordea, biltegitratze iraunkorra lortuko litzateke, nahiz eta perturbazio geomekaniko handiak izan [39].

Teknologia honen bidez 2008 urtera arte 20 Mt CO₂ inguru injektatu ziren akuifero gazietan [17]. Gaur egun, injekzio-operazio bakarrean 25 Mt-ko bolumen totala biltegitratzea lortzen da [17]. Dena den, teknologia honetan ere badaude kontuan hartu beharreko ingurumen-ezaugarri batzuk, hala nola ozeanoaren azidifikazioa.

3. LABURTUZ

Klima-aldaketa arintzeko ezinbestekoa da CO₂-aren isurketak murriztea. Helburu hori betetzeko, CCS teknologia (karbono dioxidoaren bahiketa eta biltegitratzea) aukera bideragarritzat hartzen da. Horretan, lehenengo pausua ekoiztutako CO₂-a bahitzea da, atmosferara isuri aurretik. Ondoren, garraiatu egiten da, eta formazio geologikoetan biltegitratzen da. CCS teknologiak erregai fosilen erabilera jarraitua ahalbidetzen du, CO₂-aren atmosferarako isurketak murrizten dituen bitartean. Hala ere, baditu zenbait arazo: inbertsio ekonomiko eta energia-beharrizan handiak, epe luzerako biltegitratzea iraunkorra dela egiaztatzea beharra, biztanleriaren erresistentzia, eta biltegitratzeko lekuen falta herrialde batzuetan.

4. ESKER ONAK

Artikulu honek Eusko Jaurlaritzaren (IT748-13), Euskal Herriko Unibertsitatearen (UFI 11/39) eta Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioaren (CTQ2013-46173-R) diru laguntzak jaso ditu.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] IPCC. 2013.«Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on climate change». Eskuragarri: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. [2016, 04/05].
- [2] DECC. 2012.«CCS Roadmap Storage Strategy, Department of Energy and Climate Change». Eskuragarri: http://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48320/4904-ccs-roadmap--storage-strategy.pdf [2016, 04/05].
- [3] IEA. 2013.«Technology Roadmap Carbon Capture and Storage, organisation for Economic Development & International Energy Agency». Eskuragarri: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapCarbonCaptureandStorage.pdf>. [2016, 04/05].

- [4] MARKEWITZ P., KUCKSHINRICHS W., LEITNER W., LINSSEN J., ZAPP P., BONGARTZ R., SCHREIBER A. eta 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.
- [5] WEISSER D. 2007. «A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies». *Energy*, **32**, 1543-1559.
- [6] HERTWICH E.G., AABERG M., SINGH B. eta STROMMAN A.H. 2008. «Life-cycle Assessment of Carbon Dioxide Capture for Enhanced Oil Recovery». *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **16**, 343-353.
- [7] COOPER C. 2009. «A technical basis for carbon dioxide storage» *Energy Procedia*, **1**, 1727-1733.
- [8] NAGASHIMA S., MIYAGAWA T., MATSUMOTO M., SUZUKI S., KOMAKI H., TAKAGI M. eta MURAI S. 2011. «Life cycle assessment performed on a CCS model case in Japan and evaluation of improvement facilitated by heat integration». *Energy Procedia*, **4**, 2457-2464.
- [9] ZAPP P., SCHREIBER A., MARX J., HAINES M., HAKE J.F. eta GALE J. 2012. «Overall environmental impacts of CCS technologies-A life cycle approach». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **8**, 12-21.
- [10] STYRING P., JANSEN D., DE CONINCK H., REITH H. eta ARMSTRONG K. 2011. *Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy*, Center for Low Carbon Futures. The Centre of Low Carbon Futures, Birmingham.
- [11] WALL T.F. 2007. «Combustion processes for carbon capture». *Proceedings of the Combustion Institute*, **31 I**, 31-47.
- [12] DE VISSER E., HENDRIKS C., BARRIO M., MÅLNVIK M.J., DE KOEIJER G., LILJEMARK S. eta LE GALLO Y. 2008. «Dynamis CO₂ quality recommendations». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2**, 478-484.
- [13] OLAJIRE A.A. 2010. «CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications - a review». *Energy*, **35**, 2610-2628.
- [14] ELWELL L.C. eta GRANT W.S. 2006. «Technology options for capturing CO₂». *Power*, **150**, 60-65.
- [15] KANNICHE M., GROS-BONNIVARD R., JAUD P., VALLE-MARCOS J., AMANN J.-M. eta BOUALLOU C. 2010. «Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture». *Applied Thermal Engineering*, **30**, 53-62.
- [16] ICF INTERNATIONAL. 2009. «Developing a pipeline infrastructure for CO₂ capture and storage; issues and challenges. Technical report prepared for INGAA Foundation». Eskuragarri: <http://www.ingaa.org/File.aspx?id=8228>. [2016, 04/05].
- [17] LEUNG D.Y.C., CARAMANNA G. eta MAROTO-VALER M.M. 2014. «An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **39**, 426-443.

- [18] NORD L.O., ANANTHARAMAN R. eta BOLLAND O. 2009. «Design and off-design analyses of a pre-combustion CO₂ capture process in a natural gas combined cycle power plant». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3**, 385-392.
- [19] HOFFMANN S., BARTLETT M., FINKENRATH M., EVULET A. eta URSIN T.P. 2009. «Performance and cost analysis of advanced gas turbine cycles with Precombustion CO₂ capture». *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **131**, 021701-1-021701-7.
- [20] BUHRE B.J.P., ELLIOTT L.K., SHENG C.D., GUPTA R.P. eta WALL T.F. 2005. «Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation». *Progress in Energy and Combustion Science*, **31**, 283-307.
- [21] ZERO, 2013. Zero Emissions Resource organization. Eskuragarri: <http://www.zeroco2.no>. [2016, 04/05].
- [22] BURDYN T. eta STRUCHTRUP H. 2010. «Hybrid membrane/cryogenic separation of oxygen from air for use in the oxy-fuel process». *Energy*, **35**, 1884-1897.
- [23] ASPELUND A., MOLNVIK M.J. eta DE KOEIJER G. 2006. «Ship transport of CO₂: Technical solutions and analysis of costs, energy utilization, exergy efficiency and CO₂ emissions». *Chemical Engineering Research and Design*, **84**, 847-855.
- [24] NORISOR M., BADEA A. eta DINCA C. 2012. «Economical and technical analysis of CO₂ transport ways». *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, **74**, 127-138.
- [25] JOHNSEN K., HELLE K., RONEID S. eta HOLT H. 2011. «DNV recommended practice: Design and operation of CO₂ pipelines». *Energy Procedia*, **4**, 3032-3039.
- [26] FORBES S.M., VERMA P., CURRY T.E., FRIEDMANN S.J. eta WADE S.M. 2008. *CCS Guidelines: Guidelines for carbon dioxide capture, transport, and storage*. World Resources Institute (WRI), Washington.
- [27] CELIA M.A. eta NORDBOTTEN J.M. 2009. «Practical modeling approaches for geological storage of carbon dioxide». *Ground Water*, **47**, 627-638.
- [28] VAN DER ZWAAN B. eta SMEKENS K. 2009. «CO₂ capture and storage with leakage in an energy-climate model». *Environmental Modeling and Assessment*, **14**, 135-148.
- [29] SOLOMON S., CARPENTER M. eta FLACH T.A. 2008. «Intermediate storage of carbon dioxide in geological formations: A technical perspective». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2**, 502-510.
- [30] BACHU S. 2000. «Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change». *Energy Conversion and Management*, **41**, 953-970.
- [31] GHORBANI A., RAHIMPOUR H.R., GHASEMI Y., ZOUGHI S. eta RAHIMPOUR M.R. 2014. «A Review of Carbon Capture and Sequestration in Iran: Microalgal Biofixation Potential in Iran». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **35**, 73-100.

- [32] LI L., ZHAO N., WEI W. et al SUN Y. 2013. «A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences». *Fuel*, **108**, 112-130.
- [33] ZHANG L., WANG S., ZHANG L., REN S. et al GUO Q. 2009. «Assessment of CO₂ EOR and its geo-storage potential in mature oil reservoirs, Shengli Oilfield, China». *Petroleum Exploration and Development*, **36**, 737-742.
- [34] SINGH N. 2008. «Deep saline aquifers for sequestration of carbon dioxide» *Proceedings of the International Geological Congress*, Oslo.
- [35] IPCC 2005. *Special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge University Press: New York.
- [36] YANG F., BAI B.J., TANG D.Z., DUNN-NORMAN S. et al WRONKIEWICZ D. 2010. «Characteristics of CO₂ sequestration in saline aquifers». *Petroleum Science*, **7**, 83-92.
- [37] WHITE C.M., STRAZISAR B.R., GRANITE E.J., HOFFMAN J.S. et al PENNLINE H.W. 2003. «Separation and capture of CO₂ from large stationary sources and sequestration in geological formations - Coalbeds and deep saline aquifers». *Journal of the Air and Waste Management Association*, **53**, 645-715.
- [38] MICHAEL K., GOLAB A., SHULAKOVA V., ENNIS-KING J., ALLINSON G., SHARMA S. et al AIKEN T. 2010. «Geological storage of CO₂ in saline aquifers - A review of the experience from existing storage operations». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 659-667.
- [39] HOUSE K.Z., SCHRAG D.P., HARVEY C.F. et al LACKNER K.S. 2006. «Permanent carbon dioxide storage in deep-sea sediments». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 12291-12295.
- [40] ADAMS E.E. et al CALDEIRA K. 2008. «Ocean storage of CO₂». *Elements*, **4**, 319-324.