

## CO<sub>2</sub>-a bahitu eta balorizatzeko prozesuen ekarpena Energiaren Nazioarteko

### Erakundearen agertokietan

#### *Role of CO<sub>2</sub> capture and utilization technologies in the IEA scenarios*

*Onintze Parra\*, Ander Portillo, Javier Ereña, Ainara Ateka*

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


**LABURPENA:** Klima-aldaketa da gaur egungo arazo handienetakoa gizartean. Hori dela eta, Energiaren Nazioarteko Agentziak (IEA) hainbat agertoki proposatu ditu, egungo politika eta joeren arabera, jarraitu beharreko gidalerroekin. Ildo horien artean, azkenaldian garrantzi handiagoa ematen zaie CO<sub>2</sub>-a bahitu, biltegitatu eta erabiltzeko prozesuei, bereziki azken horri. Hala ere, CO<sub>2</sub>-a bahitzeko prozesuak (airetik zuzeneko bahiketa, errekontza-aurrekoa, errekontza-ostekoa eta oxierrekuntza) instalatzen diren instalazioetako etapa garestiena dira oraindik. Horregatik, CO<sub>2</sub>-a biltegitatu ordeztu, berotegi-efektua eragiten duen gas hori erabiltzea proposatzen da, hartara, emisio gehigarriak gabeko karbono-zikloak sortzeko. Erabilera-prozesuen artean, prozesu biologikoak eta kimikoak bereizten dira. Lehengo kasuan karbonoaren finkapen biologikoa egiten da mikroorganismoak erabiliz, CO<sub>2</sub>-a bioproduktu bihurtzeko. Prozesu kimikoetan, aldiz, CO<sub>2</sub>-a ezabatzeko eta beste produktu bihurtzeko erreakzioak gertarazten dira. Horien artean, ondorengoak dira aipagarrienak: reforming-a, hidrogenazioa, mineralizazioa, karboxilazioa eta bihurtza kimiko eta elektrokimikoa. Erabilera-prozesu horiek IEAren helburuak lortzen lagunduko lukete, hots, 2050ean karbono-emisio neutroak lortzea.

**HITZ GAKOAK:** CO<sub>2</sub>-aren bahiketa, berotegi efektua, energia-agertokiak, CO<sub>2</sub>-aren balorizazioa

**ABSTRACT:** *Climate change is one of the greatest current problems in society. That is why the International Energy Agency (IEA) has proposed different scenarios according to current policies and trends, with guidelines to follow. Among these guidelines, lately more importance is given to the CO<sub>2</sub> capture, storage and utilization processes, especially the latter. Even so, CO<sub>2</sub> capture processes (pre-combustion, post-combustion, oxy-combustion and direct air capture) are still the most expensive stage in the installation where it these technologies are installed. Therefore, instead of simply storing CO<sub>2</sub>, it is also proposed to use this greenhouse gas as feedstock, in order to generate carbon cycles without additional emissions. Among the utilization processes, biological and chemical processes are distinguished. The former make use of living beings such as microorganisms for the production of value-added compounds or for carbon fixation. Instead, chemical processes give reaction to eliminate CO<sub>2</sub> and convert it in other products. These include reforming, hydrogenation, mineralization, carboxylation and chemical and electrochemical conversion. These utilization processes would help achieve the IEA's goals for achieving carbon-neutral emissions by 2050.*

**KEYWORDS:** CO<sub>2</sub> capture, greenhouse effect, energy scenarios, CO<sub>2</sub> valorization

1

**\*Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** Onintze Parra, Ingeniaritza Kimikoa Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, UPV/EHU, Sarriena Auzoa z/g, 48940, Leioa, Bizkaia.  <https://orcid.org/0000-0001-9624-9932>, onintze.parra@ehu.eus

**Nola aipatu / How to cite:** Parra, Onintze; Portillo, Ander; Ereña, Javier; Ateka, Ainara (2024). << CO<sub>2</sub>-a bahitu eta balorizatzeko prozesuen ekarpena Energiaren Nazioarteko Erakundearen agertokietan >>, Ekaia, 46, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.25997>)

Jasoa: urtarrilak 23, 2024; Onartua: martxoak 14, 2024

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2024 UPV/EHU

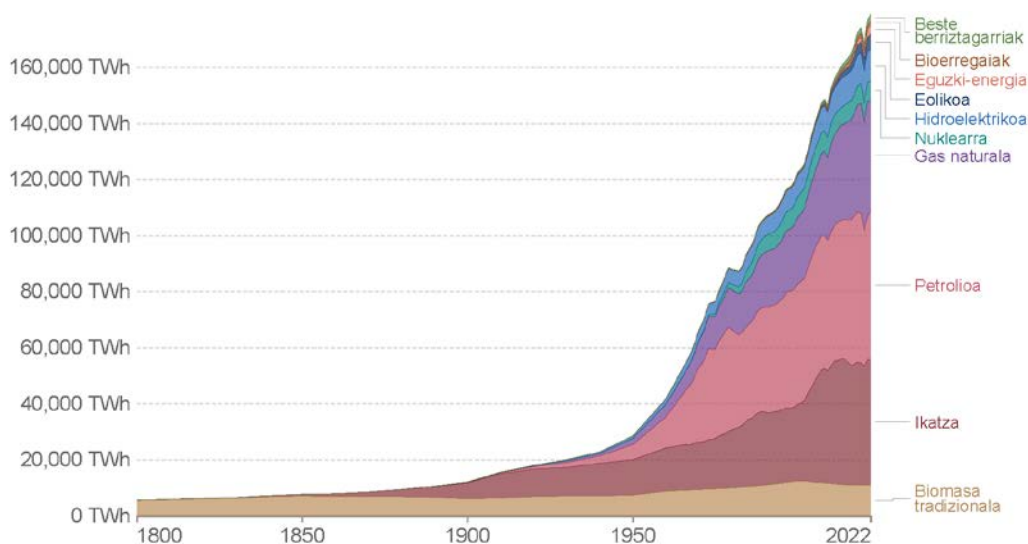


Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziapean dago

## 1. ENERGIA ETA KLIMA-ALDAKETA

Azken hamarkadetan, energiaren bilakaera prozesu eraldatzailea izan da, eta horrek arrasto sakona utzi du eguneroko bizitzako alderdi guztietan. Industria Iraultzatik Aro Garaikideraino, energiaren ekoizpena eta kontsumoa funtsezko eragileak izan dira gizartearen garapen ekonomiko, sozial eta teknologikoan. Bilakaera horrek hainbat esparru hartu ditu, aurrerapen zientifikoan, berrikuntza teknologikoan eta lehentasun politiko eta ingurumeneko aldaketen konbinazioak bultzatua [1,2]. Energia primarioaren kontsumoak hazkunde esponentziala jasan du azken hamarkadetan, eta hedapen nabarmena izan du XX. mendean eta XXI. mendearen hasieran (1. irudia). Hasiera batean energia, batez ere ohiko biomasa-iturrietatik lortzen zen (erregai solidoak erretzetik, hala nola egurra, hondakinak edo egur-ikatz). Hala ere, ikatzaren ustiapenak (Industria Iraultzak bultzatuta) eta ondoren jarraitu zioten petrolioarenak eta gas naturalarenak energia sortzeko eta kontsumitzeko modua birmoldatu egin zuten [3]. Erregai fosilei esker, izugarri handitu zen industria-ekoizpena, garraioa eta etxeko erosotasuna, baina ingurumen-kutsadura eta klima-aldaketa bezalako erronkak ere ekarri zituen.

XX. mendeak aurrera egin ahala, aurrerapausoak eman ziren energia nuklearraren sorkuntzan; energia-iturri garbiagoa izango zela zekarren, baina segurtasunaren eta hondakinen kudeaketaren inguruko kezkek sortzen zituen. Horrekin batera, energia berriztagarri aurreratuagoak sortu ziren, eguzki-energia eta energia eolikoa esaterako, 1970eko hamarkadatik aurrera garatzen hasi zirenak. Teknologia horiek, hasieran garestiak izan arren, gero eta eraginkorragoak eta eskuragarriagoak bihurtu dira, eta, horren ondorioz, erregai fosilekiko mendekotasuna murriztea dute helburu [3].



1. irudia. Energia primarioaren kontsumo globala, energia-motaren arabera [3].

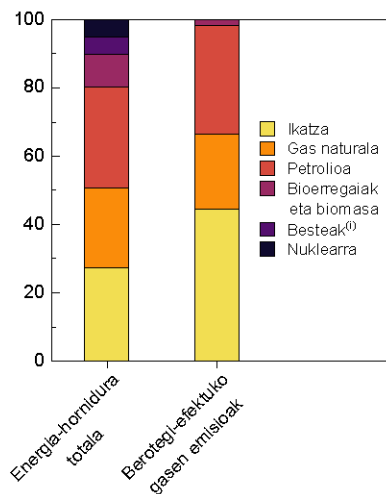
Energia berriztagarriek berotegi-efektua eragiten duten gasen (BEG) emisioak murrizteko gaitasuna badutela frogatu dute (erregai fosilekin alderatuta), baina oraindik ez dira aski klima-aldaketaren ondorioak globalki murrizteko [4]. Ondorio horien artean daude, besteak beste, temperatura globalaren igoera, euri- eta lehorte-denboraldien aldaketak, janari-eskasia, ekosistemen gaineko eraginak eta ondorio ekonomiko eta sozial kaltegarriak, hala nola nekazaritzan eta azpiegituran. Nabarmentzekoa da komunitate ahulek jasaten dituztela gehien klima-aldaketaren ondorioak [5–9].

Azken energia-kontsumo gehiena industrian, garraioan eta eraikinetan erabiltzen da. Prozesu industrialen artean, burdinaren eta altzairuaren industria, industria petrokimikoa eta kimikoa, paperaren industria eta meatzaritza nabarmentzen dira [10]. Energia-kontsumoaren etengabeko igoeraren aurka, neurri ezberdinak ezartzen ari dira: energia-efizientziaren hobekuntza prozesu industrialetan eta eraikuntzetan, energia-sistemaren elektrifikazioa sustatzea edo energia berriztagarrien erabilera sorkuntza elektrikoan iturri bezala [11–13].

Hala ere, neurri horiekin ez da nahikoa BEGen emisioak murrizteko. Izan ere, energia-kontsumoa modu esanguratsuan handitzen doan bitartean, eta gizarteak kontsumo-ohiturak errotik aldatzen ez dituen bitartean, berotegi-efektua eragiten duten gasen emisioek handitzen jarraituko dute. Hori aurreikusten du *Stated Policies Scenario* (STEPS, ingelesez; hots, deklaraturako politiken agertokia) deritzon agertokiak, IEAk (*International Energy Agency*, ingelesez; hots, Energiaren Nazioarteko Erakundea) definitutako egungo konfigurazio politikoa islatzen duen agertokiak. Agertoki horretaz gain, IEAk beste bi agertoki proposatzen ditu: APS (*Announced Pledges Scenario*, ingelesez; hots, iragarritako promesen agertokia) eta NZE (*Net Zero Emissions*, ingelesez; hots, zero emisio garbien agertokia). Lehenengoan, mundu osoko gobernuek hartutako konpromiso klimatikoak bere osotasunean eta puntualki beteko direla onartzen da. Hau da, Parisko Akordioaren bidez hartutako konpromisuak beteko direla. Hots, temperatura globalaren igoera 2 °C baino gutxiagora mugatu, BEG emisioak murriztu eta energia-iturri garbiak erabili. Bigarren agertokiak, berriz, mundu-mailako energia-sektoreak 2050ean CO<sub>2</sub>-rik gabeko agertokia lortzeko bidea ezartzen du [4]. Horetarako, oreka lortu behar da igorritako berotegi-efektuko gasen eta atmosferatik kendutako gasen artean, emisioen kantita garbia zero izan dadin.

2021ean, 1,9 Gt handitu ziren berotegi-efektuko gasen emisioak, eta 36,6 Gt izatera iritsi ziren pandemia osteko hazkunde ekonomiko oso azkarraren eta ikatz-eskaria handitzearen ondorioz, nahiz eta energia berriztagarriaren ahalmena handitu [4]. Energia-iturri bat edo bestea aukeratzeak duen eragina ulertzeko, egun erabiltzen diren energia-iturrien eta berotegi-efektuko gas-emisioen arteko erlazioa

erakusten da 2. irudian. Oraindik ere, iturri fosilekiko mendekotasun handia dago, batez ere ikatzarekiko (errenta baxuko herrialdeen ekarpena nabarmena baita), eta joera horrekin erronka handia da BEGen emisioak murriztea. Izan ere, energia-sorkuntza baino askoz handiagoak dira isuritako emisioak [4]. Horretarako, desazkundearen eta kontsumo-ohituren murrizketa sakonaz gain, beharrezkoa da gero eta gehiago erabiltzen diren teknologiak ikertzen jarraitzea zabalki implementatzeko, hala nola berriztagarriak edo bioerregaiak.



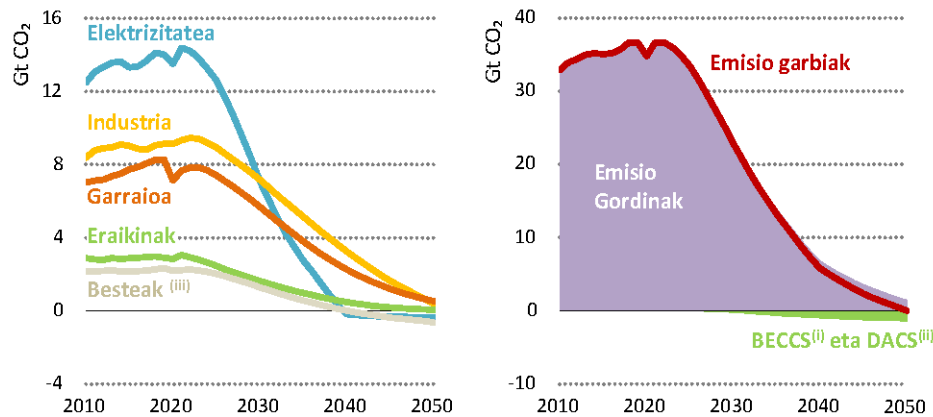
<sup>(1)</sup> "Besteak" taldeak beste energia berriztagarriak bameratzen ditu

**2. Irudia.** BEGen emisioen eragileak eta energia-horniduraren iturriak, mundu-mailan, 2021ean. [3]-an oinarrituta.

Aipatu bezala, elektrizitatearen ekoizpenaz gain, industria, garraioa eta eraikinak dira energia gehien kontsumitzen duten sektoreak, eta, gaur egungo mix energetikoa kontuan hartuz, BEG gehien isurtzen dituztenak (bereziki CO<sub>2</sub>-a) [10]. 3. irudian energiarekin lotutako CO<sub>2</sub>-emisioak sektoreka eta NZE agertokiaren arabera emisio gordin eta garbiak ageri dira, 2010 eta 2050 bitartean.

Agertoki horren arabera, elektrizitatea sortzeko emisio gutxiago isuriko lirateke, eraginkortasun handiagoa eta galera gutxiago izango bailituzke. Horrez gain, energia-sistemaren elektrifikazioak lagunduko luke garraioaren eta eraikinen sektorean emisioak murrizten. Bide hori jarraituz, 2050ean, energia-erabiltzaile nagusiek % 90 baino gehiago murriztuko lituzkete emisioak, egungo mailekin alderatuta; hala ere, CO<sub>2</sub>-aren hondakin-emisioak 0,5 Gt inguru izango lirateke garraioan eta 0,4 Gt industrian [4]. Horiek eta beste sektore batzuetako hondakin-isuri garbiak atmosferatik karbono dioxidoa harrapatzeko teknologiekin (DAC, *Direct Air Capture*, ingelesez; hots, airetik zuzenean

karbono dioxidoa bahitzea) kontrajarriko lirateke. Hala nola, bioerregaiak ekoiztean harrapatutako edo industria-prozesuetan zuzenean harrapatutako karbonoa biltegitatu edo erabiliz [14–16].



<sup>(i)</sup>BECCS = CCUS teknologiadun bioenergia; <sup>(ii)</sup>DACS = Airetik zuzenean harrapatutako karbonoa.  
<sup>(iii)</sup>"Besteak" atalean nekazarita eta energia bihurtzeko beste sektoreak adierazten dira.

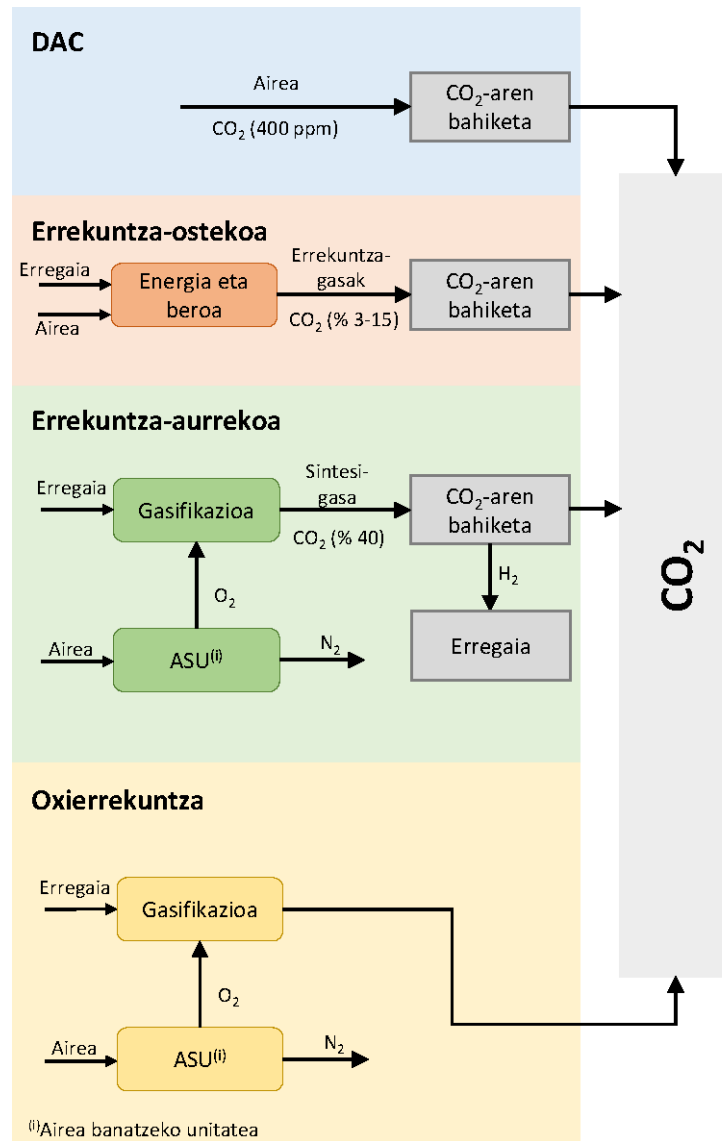
**3. Irudia.** Energiarekin lotutako CO<sub>2</sub>-emisioak sektoreka eta NZE agertokiko emisio gordin eta garbiak. 2010-2050 [3].

## 2. KARBONOA BAHITU, BILTEGIRATU ETA ERABILTZEKO TEKNOLOGIAK

### 2.1. Karbono dioxidoaren bahiketa eta biltegitratzea

CO<sub>2</sub>-a bahitzen, biltegitratzen (CCS, *Carbon Capture and Storage*, ingelesez) edota lehengai modura erabiltzen duten (CCU, *Carbon Capture and Storage*, ingelesez) teknologiak gero eta gehiago ikertzen ari dira. CCS prozesua, bahiketa airetik zein prozesu industrialen tximinietatik gauzatuta, CO<sub>2</sub>-a kontzentratu eta modu iraunkorrean biltegitratuko den tokietaraino garraiatzean datza; oro har, formazio geologikoak, hala nola petrolio- edo gas-erreserba agortuak edo akuifero sakonak [17].

4. irudiak CO<sub>2</sub>-a bahitzeko ikertzen ari diren teknologia nagusiak biltzen ditu. Errekuntza-aurreko bahiketa errektuntza baino lehen deskarbonizatzeko erabiltzen da; eskuarki, gasifikazio edo oxidazio partzialeko prozesuekin konbinatuta, presio eta temperatura altuan, zeinetan sintesi-gasa sortzen baita (hau da, H<sub>2</sub>/CO nahastea) [18,19]. Ezpurutasunak kendu ondoren, sintesi-gasa ur-gasaren errektiorako errektore batetik pasaraztean, eta H<sub>2</sub> eta CO<sub>2</sub>-an aberatsa den korronea lortzen da ur-gasaren errektioan (WGS, *Water Gas Shift* ingelesez, 1. ekuazioa). CO<sub>2</sub> kontzentratua (% 15-60) prozesu fisiko edo kimikoen bidez banatzen da (gehien bat adsortzio, absortzio edo mintzen bidez) [20,21].



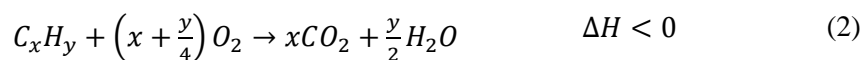
**4. Irudia.** CO<sub>2</sub>-a bahitzeko teknologia nagusiak. [19]-an oinarrituta.

Errekuntza-aurreko prozesuaren bidez lortzen den bereizketa-eraginkortasuna beste prozesu batzuen bano samar handiagoa da, hau da, CO<sub>2</sub> puru-kantitate altuak lortzen dira. Hori sarrerako CO<sub>2</sub>-

aren kontzentrazio eta gasifikazioan erabilitako presio altuagatik gertatzen da [19]. Hala ere, bide hori eraginkorra den arren, gasifikazio-unitatearen kostu handia desabantaila handia da [22].

Beraz, oraingoz, errektuntza-ostekoa da teknologiarik bideragarriena CO<sub>2</sub>-a bahitzeko. Ibilbide horretan, errektuntza-gasak 120-180 °C-ko temperaturan harrapatzen dira tximinietatik atmosferara isuri aurretik [23,24]. Behin harrapatuta, CO<sub>2</sub>-a bereizi egin behar da nahastetik. Dena den, errektuntza-gasen CO<sub>2</sub>-kontzentrazio txikia (<% 20) da bide horren arazo nagusia, eta, horregatik, bereizketa-teknologia eraginkorrek behar dira bera berreskuratzeko. Errektuntza-osteko bahiketa, gainerakoekin alderatuta, teknologia merkeagoa eta malguagoa da, baina CO<sub>2</sub>-aren kontzentrazioa eta presio partziala txikiak direla eta, ezin da bereizketarako prozesu fisikorik erabili. Ondorioz, eskuarki, amina-soluzio urtsuak erabiltzen dira absorbatzaile gisa [25,26], eta horrekin CO<sub>2</sub>-aren % 85 baino gehiago bana daiteke [19]. Horrekin, kostu ekonomikoak ere handitu egiten dira, eta instalatzen denean, energia-eraginkortasun globala murriztu egiten da. Hala ere, errektuntza-osteko teknologia ikatz- eta gas-zentraletara egokitzen da, eta dagoeneko eskala ertainean ezarrita dago [18].

Kontzentrazio handian CO<sub>2</sub>-a lortzeko eta bereizketa-kostua murrizteko, oxierrektuntzako teknologia erabiltzen da [27–29]. Prozesu horren bidez, erregaia oxigeno ia puruarekin erretzen da (>% 95), 2. ekuazioa jarraituz. Purutasun handiko oxigenoa lortzeko, airea banatzeko unitatea (ASU, *Air Separation Unit*, ingelesez) erabiltzen da, zeinak plantan behar den energia guztiaren % 85 inguru erabiltzen baitu. Erabilitako N<sub>2</sub>-kantitatea txikia denez, CO<sub>2</sub>-z, ur-lurrunez eta partikulez osatutako nahastearen bereizketa kondentsazio bitartez. Hala ere, behar den oxigeno puru kantitate handiaren ondorioz, prozesuaren gakoa bereizketaren energia-beharrak gutxitzea da. Oraingoz, airearen bereizketa kriogenikoa da metodorik bideragarriena, nahiz eta diru-galerak sortzen jarraitzen duen instalazioan [30].

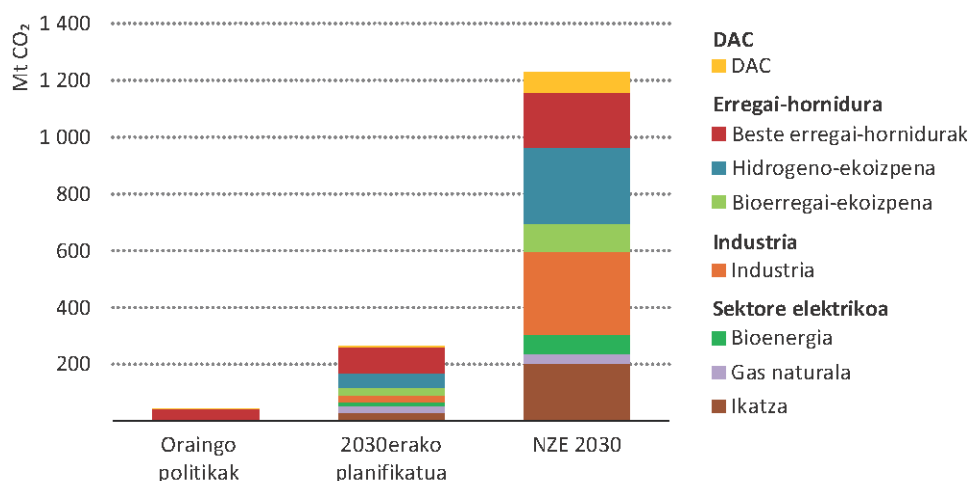


DAC teknologiari dagokionez, CO<sub>2</sub> bahitzeko teknologien artean funtsezko zeregina du, atmosferaren CO<sub>2</sub>-kontzentrazioa murrizteko balio baitu, ez bakarrik emisio guneena, baita unitate deszentralizatuena eta mugikorrena ere [31,32]. Teknologia horren erronka nagusia CO<sub>2</sub>-a kontzentrazio baxuko aire-korronteetatik banatzeko prozesua optimizatzea da, etapa horrek energia-eskakizun oso handiak baititu. Gaur egun, bi bide erabiltzen dira airetik CO<sub>2</sub>-a banatzeko: DAC solidoa [33] eta DAC likidoa [34,35]. DAC solidoak giro-presioan edo presio baxuan (hau da, hutsean) eta tenperatura

ertainean (80-120 °C) funtzionatzen duten adsorbatzaile solidoak erabiltzen ditu. DAC likidoan, berriz, airea hidroxido-/amina-/aminoazido-disoluzioekin kontaktuan jartzen da. Ondoren, tenperatura altuan (300 °C eta 900 °C artean) funtzionatzen duten unitate batzuen bidez harrapatutako CO<sub>2</sub>-a askatu eta berreskuratzen da [19,36]. Gaur egun, inbertsio-premia handiena duen teknologia da; beraz, oso diluituta dagoen CO<sub>2</sub>-aren bereizketa-prozesua hobetzeko ikerketa sakondu behar da, hain interesgarria den teknologia hori bideragarria izan dadin.

## 2.2. Karbono dioxidoaren erabilera

CO<sub>2</sub>-a bahitzeko teknologietan aurrerapenak egin diren arren, planifikatuta dauden politikekin, 2030erako aurreikusten den edukiera NZE agertokiak eskatzen duen CCUS (*Carbon Capture Utilization and Storage*, ingelesez) guztiaren % 20 baino ez da, 5. Irudia [4]. 2050erako zero emisio garbien agertokia betetzeko, teknologia horietan egin beharreko aurrerapenak asko dira. IEAren arabera, NZE agertokian oinarrituz, 2030ean eraikuntza berrietatik nahiz birmoldaketetatik urtean 270 Mt inguru CO<sub>2</sub> harrapatuko lirateke hidrogenoaren ekoizpenean, 300 Mt ikatz, gas natural eta biomasako zentral elektrikoetan eta 300 Mt instalazio industrialetan (zementuaren, altzairuaren edo beste produktu kimikoen ekoizpenean, adibidez). Hala ere, NZE agertokiaren aurreikuspenak betetzeko, beharrezkoa litzateke hilean 10 CCUS instalazio abian jartzea hemendik 2030era [4]. Aurreikuspenak betetzea zaila bada ere, CCUS teknologiei buruzko ikerketak izugarri egin du gora azken urteotan. Hain zuzen, CCUS teknologiei buruz *Scopus*-en argitaratutako artikuluen kopurua 120 aldiz baino gehiagoz biderkatu da 2000. urtetik.





**5. Irudia.** Munduko CO<sub>2</sub>-bahiketa iturriaren arabera, gaur egungo politikekin eta 2030erako proposatutako politikekin, NZE agertokiarekin alderatua, 2030 [4].

Behin CO<sub>2</sub>-a harrapatuta, aurretiaz aipatu den bezala, biltegia daiteke (CCS) edo beste prozesu batzuetako lehengai gisa erabil daiteke (CCU). CO<sub>2</sub>-a bahitu eta geologikoki biltegitratzean, CO<sub>2</sub>-a aurreko prozesuetan aipatu den bezala bereizi eta biltegitratzen da, eta presurizatua garraiatzen da betirako biltegitratuko den kokalekuetara; oro har, formazio geologikoak, hala nola petrolio- edo gas-erreserba agortuak edo akuifero gazi sakonak [18,37,38]. Formazio geologiko horiek egitura arrokatu sakon, porotsu eta oso iragazkorak dira, ezinbestekoa CO<sub>2</sub>-kantitate handiak biltzeko. Biltegitratzea eraginkorra izan dadin, hainbat baldintza bete behar dira; hala nola, gutxienez 850 m-ko sakonera behar da, eta formazio iragazgaitz batek edo gehiagok gainjarri behar dute biltegia, CO<sub>2</sub>-aren gorazko migrazioa saihesteko [37,39]. Aztarnategiko presioaren eta tenperaturaren arabera, CO<sub>2</sub>-a gas konprimitu gisa, likido gisa edo egoera superkritikoan biltegia daiteke. Azken horrek (31,18 °C-an eta 73,8 bar-ean) espazio porotsuaren erabilera baimentzen du eta ihesak zailtzen ditu [40].

Karbonoa biltegitratzeko teknologiak ezinbesteko irtenbide dira emisioak murrizteko eta NZE agertokiaren helburura hurbiltzeko. Hala ere, harrapaketa-sistema isolatuak ezartzeak kostu energetiko eta inbertsio handiak eragiten dizkio industriari; beraz, CO<sub>2</sub> lehengai gisa erabiltzea bereziki interesgarria da, bai ekonomiaren aldetik, bai ingurumenaren aldetik [40–42]. CO<sub>2</sub>-a molekula triatomikoa da, eta gas-egoeran mantentzen da giro-presio eta -tenperaturan. Gas inerte samarra da, eta ez da ez lehergarria ez sukoia ez erregaia; beraz, asko erabiltzen da su-itxalgailuetan edo propulsaizailuetan [43]. Zuzeneko beste erabilera batzuen artean, CO<sub>2</sub>-a edari karbonatuetan ere erabiltzen da, edo kontserbatzaile gisa, giro babesleko ontzietan [44,45]. Horrez gain, petrolio berreskuratzeko EOR teknologian (*Enhanced Oil Recovery*, ingelesez) erabiltzen da. Sistema horretan, ura eta CO<sub>2</sub>-a ustez agortua dagoen hobi batean sartzen dira, atera gabe gera zitekeen petrolio berreskuratzeko [46,47]. CO<sub>2</sub>-a zuzenean erabiltzearen alternatiba balio erantsi handiagoko produktu bihurtzea da. Erabilera horren helburua ez da atmosferako CO<sub>2</sub>-a zuzenean ezabatzea, baizik eta karbono-ziklo bat ezartzea, non CO<sub>2</sub>-a beste konposatu batzuetara bihurtuko baita. Konposatu horiek erabiltzean isuritako karbonoa berriro harrapatu eta prozesuan sartu ahal izango da, emisio gehigarriak sortu gabe [48].

CO<sub>2</sub>-molekulak bere egituraren (karbono atomo bat, lau elektroioak oxigeno atomoei lotuta dituen lotura bikoitz kobalenteen bidez (O=C=O)) ondorioz lortzen duen egonkortasun termodinamikoa dela medio, CO<sub>2</sub>-aren transformazioa zaila da [49]. Horregatik, CO<sub>2</sub>-aren transformazioarako prozesuek

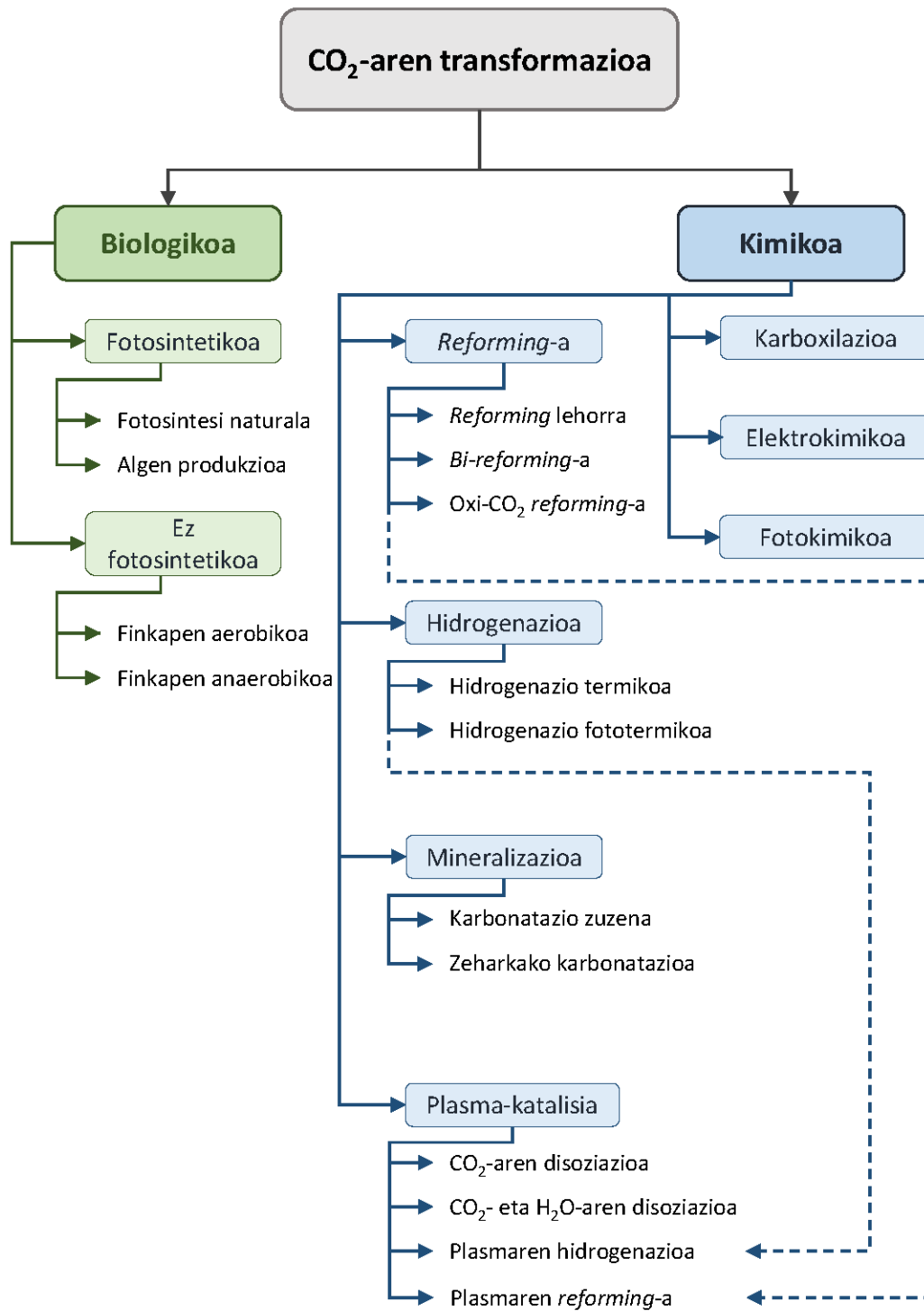
dituzten erronkak asko dira. Besteak beste, energia-behar altuak (iturri berriztagarrietatik eta karbonoan neutroak diren iturrietatik abiatuta izan behar dira prozesua bideragarria izateko), operazio-baldintza zorrotzak (presio eta tenperatura altuak) edo erreakzioak gauzatu ahal izateko katalizatzaile, organismo edo espezie biologiko aktiboen erabilera [50].

6. irudian, CO<sub>2</sub>-a transformatzeko prozesu interesgarrienetako batzuk jaso dira. Oro har, bide nagusiak biologikoak edo kimikoak dira. Transformazio biologikoa CO<sub>2</sub>-aren finkapen fotosintetikoak edo ez-fotosintetikoaren bidez egin daiteke [50]. Lehengo kasuan, finkapen fotosintetikoak bi metodoren bidez egiten da: (i) fotosintesi naturala, eguzkiaren energia xurgatzen duten landareen bidez, CO<sub>2</sub>-a eta ura balio energetiko handiko osagai bihurtzeko, hala nola glukosa; eta (ii) algen ekoizpena, argi-energia, mantenugai ez-organikoak, ura eta CO<sub>2</sub>-a karbono-iturri gisa erabiliz [51,52]. Hala ere, lehenengoa ez da CO<sub>2</sub>-a balorizatzeko metodotzat hartzen, Lurrean bizia mantentzeko ezinbesteko prozesua baita. Beraz, CO<sub>2</sub>-aren finkapen fotosintetikoak algen ekoizpenari dagokio [50]. Finkapen ez-fotosintetikoan, berriz, mikroorganismoak erabiltzen dira energia handiko elektroiturri gisa, CO<sub>2</sub>-a bioproduktu bihurtzeko. Hori modu aerobikoan [53] nahiz anaerobikoan [54,55] egin daiteke. Hala ere, aipatu beharra dago transformazio biologiak zenbait ahulezia izan dezakela. Esaterako, prozesu biologikoetan, kontuan izan behar dira izaki biologikoek behar dituzten ingurune-baldintza bereziak. Horrek eskala handian lan egitea muga dezake.

Bestalde, ibilbide kimikoak edo elektrokimikoak zabalagoak dira, eta teknologia asko barneratzen dituzte (6. irudia). Karboxilazio-prozesuan, CO<sub>2</sub> molekula funtzional bat beste errektibo batekin lotzen da, karbonato organikoak, ureak, karbamatoak eta polimeroak sortzeko; edo olefina, aromatiko edo alkanoen C-H loturan sartzen da azido karboxilikoak sintetizatzeko, hala nola azido azetikoak [56,57]. Erredukzio elektrokimikoaren bidez, azido formikoa [58,59], CO [60,61] edo hidrokarburoak [62,63] sor daitezke. Erredukzio fotokimikoari dagokionez, fotosintesi naturala imitatu nahi du, CO<sub>2</sub>-a energia handiko produktu bihurtuz, baina ez da mikroorganismoak erabiltzen dituen metodo biologikoarekin nahastu behar [50]. Bestetik, reforming-erreakzioei esker, sintesi-gasa sor daiteke reforming lehorraren, bi-reforming-aren (ur-lurrin bidezko eta reforming lehorraren konbinazioa) edo oxi-CO<sub>2</sub> reforming-aren bidez (hau da, oxidazio partziala eta reforming lehorraren konbinazioa) [64–66].

CO<sub>2</sub> bidezko mineralizazioa edo karbonatazioan erreakziona arazten da CO<sub>2</sub>-a, karbonato ez-organikoak (kaltzio- eta magnesio-karbonatoak) sortzeko [50]. Hidrogenazio-prozesua, berriz, erraz defini daiteke CO<sub>2</sub>-ak eta H<sub>2</sub>-akelkarrekin erreakzionatzen duten erreakzioa bezala. Erreakzio horiek beroarekin (hidrogenazio termikoa), argiarekin eta beroarekin (hidrogenazio fototermikoa) edo

plasmarekin (plasmaren hidrogenazioa) egin daitezke [67,68]. Azkenik, plasma-katalisari dagokionez, hainbat energia-, bero- eta argi-forma erabiltzen dira gas-substantzia bat tenperatura handietara berotzeko, elektroiak dagozkien atomoetatik banatuta dauden arte, gas ionizatua deritzon substantzia sortzeko. Gas ionizatu hori plasma izeneko materia-egoeran dago. Plasma-katalisiaren bidez, katalisi heterogeneoa eta plasma ez-termikoaren teknologia konbinatzen dira, gas ionizatua aktibatzeke eta molekula egonkorak (adibidez, CO<sub>2</sub>-a) aktiba ditzaketen elektroio oso energetikoak sortzeko [69]. Prozesu horien guztien artean, CO<sub>2</sub>-aren balorizazio katalitikoak kontuan hartzen dutenak bereziki interesgarriak dira. Izan ere, erronka handienetakoak energia-kostuak murriztea eta prozesu horien eraginkortasuna hobetzea dira, katalisari esker lor daitekeena.



**6. Irudia.** CO<sub>2</sub>-a prozesu kimiko, biologiko eta elektrokimikoen bidez transformatzeko bideak, [50]-an oinarrituta.

CO<sub>2</sub>-a baloritzatzeko prozesu horiek guztiak oso aukera baliagarriak eta gero eta bideragarriagoak dira IEAk proposatutako helburuetara gehiago hurbiltzeko, eta etorkizun hurbilago batean NZE agertokiaren helburuak lortzeko. Horregatik, gizarte gisa energia-baliabideak murrizteko lan egiten bada, CCU prozesuak eta, batez ere, CCS prozesuak ikertzek jarraitu beharreko aukera dira.

### 3. ONDORIOAK

Energia primarioaren kontsumoak hazkunde esponenziala jasan du azken hamarkadetan, eta, horrekin batera BEGen kontzentrazioak. Azken hori aukeratutako energia-iturriaren oso mende dago; beraz, funtsezkoa da iturri fosilekiko mendekotasuna murriztea, eta energia berriztagarriak eta bioerregaiak implementatzea. Horren aurrean, IEAk egungo konfigurazio politikoa islatzen duten hiru agertoki desberdin proposatu ditu (STEPS, APS eta NZE, alegia). Horietan, CCUS teknologien erabilera oso kontuan hartzen da. Izan ere, horri esker, bai isurpenen gutxitzea baita sistema energetikoaren elektrifikazioa ere lortuko lirateke, eta honek % 90 baino gehiago murriztuko lituzke emisioak. DAC teknologiaz gain, CO<sub>2</sub>-a bahitzeko errekontza-osteko, errekontza-aurreko eta oxierrekuntza teknologiak ikertzen ari dira, oraindik industrialki bideragarriak ez diren arren. Horren helburua ez da soilik atmosferatik karbono dioxidoa eliminatzea, beste prozesu batzuen lehengai gisa erabiltzea ere bai. CO<sub>2</sub>-a zuzenean erabili edo beste produktuetara transformatu daiteke. Transformazioek, biologikoak zein kimikoak, etorkizun oparoa dute klima-aldaketari irtenbidea emateko, horietako batzuk ikerketa bidean dauden arren.

### AKRONIMOAK

APS	Announced Pledges Scenario, ingelesez. Iragarritako promesen agertokia.
ASU	Air Separation Unit, ingelesez. Aire banatzeko unitatea.
BEG	Berotegi efektuko gasak
CCS	Carbon Capture and Storage, ingelesez. Karbono dioxidoaren bahiketa eta biltegitratzea.
CCU	Carbon Capture and Utilization, ingelesez. Karbono dioxidoaren bahiketa eta erabilera.
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage, ingelesez. Karbono dioxidoaren bahiketa, erabilera eta biltegitratzea.

DAC	Direct Air Capture, ingelesez. Airetik zuzenean karbono dioxidoa bahitzea.
EOR	Enhanced Oil Recovery, ingelesez. Petrolio hobeki berreskuratzeko sistema.
IEA	International Energy Agency, ingelesez. Energiaren Nazioarteko Erakundea.
NZE	Net Zero Emissions, ingelesez. Zero emisio garbien agertokia.
STEPS	Stated Policies Scenarios, ingelesez. Deklaratutako politiken agertokia.
WGS	Water Gas Shift, ingelesez. Ur-gasaren erreakzioa.

### ESKER ONAK

Artikulu honek UPV/EHUren, Eusko Jaurlaritzaren (IT1645-22 Proiektua) eta Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioaren (PID2022-140584OB-I00) dirulaguntzak jaso ditu. Onintze Parrak eskerrak ematen ditu Eusko Jaurlaritzaren aldetik jasotako laguntzagatik (PRE\_2021\_1\_0014).

### 3. BIBLIOGRAFIA

- [1] AHMAD, T., ZHANG, D. 2020. <<A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far>>. *Energy Reports* ,**6**, 1973–1991.
- [2] KONA, A., BERTOLDI, P., MONFORTI-FERRARIO, F., RIVAS, S., DALLEMAND, J. F. 2018. <<Covenant of mayors signatories leading the way towards 1.5 degree global warming pathway>>. *Sustainable Cities and Society* ,**41**, 568–575.
- [3] Energy consumption by source, World, <https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-country> (last time accessed: February 3, 2023).
- [4] IEA World Energy Outlook, <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption> (last time accessed: August 17, 2023).
- [5] LUO, L. H., KE, C. Q., FAN, Y. BIN, WANG, Z. F. 2023. <<Accelerated glacier mass loss in the southeastern Tibetan Plateau since the 1970s>>. *Advances in Climate Change Research* ,**14**, 372–386.
- [6] LI, Z. C., SUN, W. BIN, LIANG, C. X., XING, X. H., LI, Q. X. 2023. <<Arctic warming trends and

- their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios>>. *Advances in Climate Change Research* ,**14**, 335–346.
- [7] MIRÓN, I. J., LINARES, C., DÍAZ, J. 2023. <<The influence of climate change on food production and food safety>>. *Environmental Research* ,**216**, 114674.
- [8] TEE LEWIS, P. G., CHIU, W. A., NASSER, E., PROVILLE, J., BARONE, A., DANFORTH, C., KIM, B., PROZZI, J., CRAFT, E. 2023. <<Characterizing vulnerabilities to climate change across the United States>>. *Environment International* ,**172**, 107772.
- [9] ZHANG, S., GUO, Q., SMYTH, R., YAO, Y. 2022. <<Extreme temperatures and residential electricity consumption: Evidence from Chinese households>>. *Energy Economics* ,**107**, 105890.
- [10] IEA Final consumption – Key World Energy Statistics 2021 – Analysis - IEA, <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption> (last time accessed: August 17, 2023).
- [11] YUAN, M., THELLUFSEN, J. Z., LUND, H., LIANG, Y. 2021. <<The electrification of transportation in energy transition>>. *Energy* ,**236**, 121564.
- [12] SORKNÆS, P., JOHANNSEN, R. M., KORBERG, A. D., NIELSEN, T. B., PETERSEN, U. R., MATHIESEN, B. V. 2022. <<Electrification of the industrial sector in 100% renewable energy scenarios>>. *Energy* ,**254**, 124339.
- [13] AGHAHOSSEINI, A., SOLOMON, A. A., BREYER, C., PREGGER, T., SIMON, S., STRACHAN, P., JÄGER-WALDAU, A. 2023. <<Energy system transition pathways to meet the global electricity demand for ambitious climate targets and cost competitiveness>>. *Applied Energy* ,**331**, 120401.
- [14] CASTRO-MUÑOZ, R., ZAMIDI AHMAD, M., MALANKOWSKA, M., CORONAS, J. 2022. <<A new relevant membrane application: CO<sub>2</sub> direct air capture (DAC)>>. *Chemical Engineering Journal* ,**446**, 137047.
- [15] ABDULLATIF, Y. M., SODIQ, A., AL-ANSARI, T., NASSAR, N. N., AMHAMED, A. I. 2023. <<Optimizing chemisorption based direct air capture unit efficiency in HVAC systems: A study on the impact of DAC location and adsorption conditions as a response to the climate

- crisis and indoor air quality>>. *Energy Conversion and Management* ,**291**, 117280.
- [16] WANG, X., CHEN, Y., XU, W., LINDBRÄTHEN, A., CHENG, X., CHEN, X., ZHU, L., DENG, L. 2023. <<Development of high capacity moisture-swing DAC sorbent for direct air capture of CO<sub>2</sub>>>. *Separation and Purification Technology* ,**324**, 124489.
- [17] PARRA, O., PORTILLO, A., EREÑA, J., ATEKA, A. 2022. <<Hidrokarburo aromatikoen ekoizpena CO<sub>2</sub>-aren balorizazio zuzenaren bidez>>. *EKAIA EHUko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* ,**43**, 309–324.
- [18] REGUFE, M. J., PEREIRA, A., FERREIRA, A. F. P., RIBEIRO, A. M., RODRIGUES, A. E. 2021. <<Current developments of carbon capture storage and/or utilization–looking for net-zero emissions defined in the paris agreement>>. *Energies* ,**14**, 2406.
- [19] DUBEY, A., ARORA, A. 2022. <<Advancements in carbon capture technologies: A review>>. *Journal of Cleaner Production* ,**373**, 133932.
- [20] FOONG, S. Y., CHAN, Y. H., YIIN, C. L., LOCK, S. S. M., LOY, A. C. M., LIM, J. Y., YEK, P. N. Y., WAN MAHARI, W. A., LIEW, R. K., PENG, W., TABATABAEI, M., AGHBASHLO, M., LAM, S. S. 2023. <<Sustainable CO<sub>2</sub> capture via adsorption by chitosan-based functional biomaterial: A review on recent advances, challenges, and future directions>>. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ,**181**, 113342.
- [21] DAUD, N. K. 2023. <<CO<sub>2</sub> adsorption performance of AC and Zn-MOF for the use of carbon capture and sequestration (CCS)>>. *Materials Today: Proceedings*, DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.231.
- [22] OLABI, A. G., OBAIDEEN, K., ELSAID, K., WILBERFORCE, T., SAYED, E. T., MAGHRABIE, H. M., ABDELKAREEM, M. A. 2022. <<Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals SDGs using novel indicators>>. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ,**153**, 111710.
- [23] SUBRAMANIAN, N. 2022. <<Analysis of CO<sub>2</sub> capture process from flue-gases in Combined Cycle Gas Turbine Power Plant using post-combustion capture technology>>. *Contemporary Problems of Thermal Engineering* ,**282**, 128311.
- [24] MULK, W. U., ALI, S. A., SHAH, S. N., SHAH, M. U. H., ZHANG, Q.-J., YOUNAS, M.,



- FATEHIZADEH, A., SHEIKH, M., REZAKAZEMI, M. 2023. <<Breaking boundaries in CO<sub>2</sub> capture: Ionic liquid-based membrane separation for post-combustion applications>>. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* ,**75**, 102555.
- [25] KIM, S., KO, Y., LEE, G. J., LEE, J. W., XU, R., AHN, H., KANG, Y. T. 2023. <<Sustainable energy harvesting from post-combustion CO<sub>2</sub> capture using amine-functionalized solvents>>. *Energy* ,**267**, 126532.
- [26] ZHU, H., LI, S., ZHANG, J., ZHAO, L., HUANG, Y. 2023. <<A highly effective and low-cost sepiolite-based solid amine adsorbent for CO<sub>2</sub> capture in post-combustion>>. *Separation and Purification Technology* ,**306**, 122627.
- [27] CHEN, S., YU, R., SOOMRO, A., XIANG, W. 2019. <<Thermodynamic assessment and optimization of a pressurized fluidized bed oxy-fuel combustion power plant with CO<sub>2</sub> capture>>. *Energy* ,**175**, 445–455.
- [28] KOOHESTANIAN, E., SHAHRAKI, F. 2021. <<Review on principles, recent progress, and future challenges for oxy-fuel combustion CO<sub>2</sub> capture using compression and purification unit>>. *Journal of Environmental Chemical Engineering* ,**9**, 105777.
- [29] LECKNER, B. 2023. <<Negative CO<sub>2</sub> emission from oxy-fuel combustion in CFB boilers>>. *Fuel* ,**333**, 126425.
- [30] YADAV, S., MONDAL, S. S. 2022. <<A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology>>. *Fuel* ,**308**, 122057.
- [31] SODIQ, A., ABDULLATIF, Y., AISSA, B., OSTOVAR, A., NASSAR, N., EL-NAAS, M., AMHAMED, A. 2023. <<A review on progress made in direct air capture of CO<sub>2</sub>>>. *Environmental Technology and Innovation* ,**29**, 102991.
- [32] JIANG, L., LIU, W., WANG, R. Q., GONZALEZ-DIAZ, A., ROJAS-MICHAGA, M. F., MICHAÏLOS, S., POURKASHANIAN, M., ZHANG, X. J., FONT-PALMA, C. 2023. <<Sorption direct air capture with CO<sub>2</sub> utilization>>. *Progress in Energy and Combustion Science* ,**95**, 101069.
- [33] WIEGNER, J. F., GRIMM, A., WEIMANN, L., GAZZANI, M. 2022. <<Optimal Design and Operation of Solid Sorbent Direct Air Capture Processes at Varying Ambient Conditions>>. *Industrial and Engineering Chemistry Research* ,**2022**, 12649–12667.

- [34] KIKKAWA, S., AMAMOTO, K., FUJIKI, Y., HIRAYAMA, J., KATO, G., MIURA, H., SHISHIDO, T., YAMAZOE, S. 2022. <<Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> Using a Liquid Amine-Solid Carbamic Acid Phase-Separation System Using Diamines Bearing an Aminocyclohexyl Group>>. *ACS Environmental Au* ,**2**, 354–362.
- [35] CUSTELCEAN, R. 2022. <<Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> Using Solvents>>. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* ,**13**, 217–234.
- [36] IEA Direct Air Capture, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture> (last time accessed: August 17, 2023).
- [37] NEWELL, P., ILGEN, A. G. Science of Carbon Storage in Deep Saline Formations: Process Coupling across Time and Spatial Scales. Elsevier 2018, pp. 1–13.
- [38] 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 CO<sub>2</sub> Utilization* ,**9**, 82–102.
- [39] SONG, J., ZHANG, D. 2013. <<Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration>>. *Environmental Science and Technology* ,**47**, 9–22.
- [40] PRASAD, S. K., SANGWAI, J. S., BYUN, H. S. 2023. <<A review of the supercritical CO<sub>2</sub> fluid applications for improved oil and gas production and associated carbon storage>>. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* ,**72**, 102479.
- [41] DZIEJARSKI, B., KRZYŻYŃSKA, R., ANDERSSON, K. 2023. <<Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment>>. *Fuel* ,**342**, 127776.
- [42] CENTI, G., PERATHONER, S. 2023. <<The chemical engineering aspects of CO<sub>2</sub> capture, combined with its utilisation>>. *Current Opinion in Chemical Engineering* ,**39**, 100879.
- [43] NORTH, M. Carbon Dioxide Utilisation: Closing the Carbon Cycle: First Edition. Elsevier 2015, pp. 3–17.
- [44] MONTEIRO, J., ROUSSANALY, S. 2022. <<CCUS scenarios for the cement industry: Is CO<sub>2</sub> utilization feasible?>>. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* ,**61**, 102015.

- [45] HOSSEINI, S. M., ASLANI, A., KASAEIAN, A. 2023. <<Life cycle cost and environmental assessment of CO<sub>2</sub> utilization in the beverage industry: A natural gas-fired power plant equipped with post-combustion CO<sub>2</sub> capture>>. *Energy Reports* ,**9**, 414–436.
- [46] WANG, F., LIAO, G., SU, C., WANG, F., MA, J., YANG, Y. 2023. <<Carbon emission reduction accounting method for a CCUS-EOR project>>. *Petroleum Exploration and Development* ,**50**, 989–1000.
- [47] YANG, J., YANG, C., GU, Q., ZHU, C., LUO, M., ZHONG, P. 2023. <<Economic evaluation and influencing factors of CCUS-EOR technology: A case study from a high water-bearing oilfield in Xinjiang, China>>. *Energy Reports* ,**10**, 153–160.
- [48] VALLURI, S., CLAREMBOUX, V., KAWATRA, S. 2022. <<Opportunities and challenges in CO<sub>2</sub> utilization>>. *Journal of Environmental Sciences* ,**113**, 322–344.
- [49] ATEKA, A., RODRIGUEZ-VEGA, P., EREÑA, J., AGUAYO, A. T., BILBAO, J. 2022. <<A review on the valorization of CO<sub>2</sub>. Focusing on the thermodynamics and catalyst design studies of the direct synthesis of dimethyl ether>>. *Fuel Processing Technology* ,**233**, 107310.
- [50] KAMKENG, A. D. N., WANG, M., HU, J., DU, W., QIAN, F. 2021. <<Transformation technologies for CO<sub>2</sub> utilisation: Current status, challenges and future prospects>>. *Chemical Engineering Journal* ,**409**, 128138.
- [51] FAROOQ, W. 2022. <<Maximizing Energy Content and CO<sub>2</sub> Bio-fixation Efficiency of an Indigenous Isolated Microalga *Parachlorella kessleri* HY-6 Through Nutrient Optimization and Water Recycling During Cultivation>>. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* ,**9**, DOI: 10.3389/fbioe.2021.804608.
- [52] LI, G., XIAO, W., YANG, T., LYU, T. 2023. <<Optimization and Process Effect for Microalgae Carbon Dioxide Fixation Technology Applications Based on Carbon Capture: A Comprehensive Review>>. *C* ,**9**, 35.
- [53] XU, C., FENG, Y., LI, H., JIANG, S., MA, R., YAO, Y., LIU, M., YANG, Y., XUE, Z. 2023. <<Non-photosynthetic chemoautotrophic CO<sub>2</sub> assimilation microorganisms carbon fixation efficiency and control factors in deep-sea hydrothermal vent>>. *Science of the Total Environment* ,**862**, 160805.

- [54] JONES, S. W., FAST, A. G., CARLSON, E. D., WIEDEL, C. A., AU, J., ANTONIEWICZ, M. R., PAPOUTSAKIS, E. T., TRACY, B. P. 2016. <<CO<sub>2</sub> fixation by anaerobic non-photosynthetic mixotrophy for improved carbon conversion>>. *Nature Communications* ,**7**, 1–9.
- [55] MARU, B. T., MUNASINGHE, P. C., GILARY, H., JONES, S. W., TRACY, B. P. 2018. <<Fixation of CO<sub>2</sub> and CO on a diverse range of carbohydrates using anaerobic, non-photosynthetic mixotrophy>>. *FEMS Microbiology Letters* ,**365**, 39.
- [56] KOJCINOVIC, A., LIKOZAR, B., GRILC, M. 2022. <<Heterogeneous catalytic materials for carboxylation reactions with CO<sub>2</sub> as reactant>>. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* ,**66**, 102250.
- [57] HU, C., CHANG, A.-L., CATHERINE, H. N., LEE, Y.-L., ANDREW LIN, K.-Y., CHOU, Y.-J., YU, W.-Y. 2023. <<Enhanced Lewis basicity of ZIF-8 from metal incorporation (Mg, Cu, or Ce) for glycerol carboxylation using CO<sub>2</sub> as a feedstock>>. *Materials Today Sustainability* ,**24**, 100511.
- [58] EWIS, D., ARSALAN, M., KHALED, M., PANT, D., BA-ABBAD, M. M., AMHAMED, A., EL-NAAS, M. H. 2023. <<Electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> into formate/formic acid: A review of cell design and operation>>. *Separation and Purification Technology* ,**316**, 123811.
- [59] LIU, Z., ZONG, X., VLACHOS, D. G., FILOT, I. A. W., HENSEN, E. J. M. 2023. <<A computational study of electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to formic acid on metal-doped SnO<sub>2</sub>>>. *Chinese Journal of Catalysis* ,**50**, 249–259.
- [60] FU, L., QU, Z., ZHOU, L., DING, Y. 2023. <<Boosting electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to CO over interfacial hydroxide-metal catalysts>>. *Applied Catalysis B: Environmental* ,**339**, 123170.
- [61] WANG, C., HE, A., WANG, N., SUN, H., ZHANG, N., MA, Y., YAN, G., XUE, R. 2023. <<Multilayer Zn nanosheets promote electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to CO in KCl electrolyte>>. *Journal of Environmental Chemical Engineering* ,**11**, 109956.
- [62] WANG, M., ZHANG, Z., YILDIRIM, T., FENG, L., ZHANG, L., WANG, J. 2023. <<Organic molecule-modified copper catalyst enables efficient electrochemical reduction of CO<sub>2</sub>-to-methane>>. *Journal of Electroanalytical Chemistry* ,**929**, 117068.
- [63] KIM, Y. J., MAENG, J. Y., HWANG, S. Y., RHEE, C. K., SOHN, Y. 2023. <<Electrochemical

- reduction of CO<sub>2</sub> and CO using interface-engineered Au/Ti electrodes for long-chain hydrocarbon production>>. *Applied Catalysis B: Environmental* ,**338**, 123017.
- [64] DA SILVA, B. C., BASTOS, P. H. C., JUNIOR, R. B. S., CHECCA, N. R., COSTA, D. S., FRÉTY, R., BRANDÃO, S. T. 2021. <<Oxy-CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub> on Ni-based catalysts: Evaluation of cerium and aluminum addition on the structure and properties of the reduced materials>>. *Catalysis Today* ,**381**, 50–64.
- [65] LONG, D. B., HAU, B. T., THUY VAN, N. T., ANH, N. P., GIA-THIEN HO, T., ANH, H. C., PHUONG, P. H., HUY, C. D., TRI, N., LOC, L. C. 2023. <<High active and coke-resistant CeNiO<sub>3</sub>-based catalyst for methane bi-reforming>>. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* ,**8**, 100610.
- [66] KIM, D. H., SEO, J. C., KIM, Y. J., KIM, J., YOON, S., RA, H., KIM, M. J., LEE, K. 2024. <<Ni-Co alloy catalyst derived from Ni<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> via exsolution method for high coke resistance toward dry reforming of methane>>. *Catalysis Today* ,**425**, 114337.
- [67] TAWALBEH, M., JAVED, R. M. N., AL-OTHMAN, A., ALMOMANI, F., AJITH, S. 2023. <<Unlocking the potential of CO<sub>2</sub> hydrogenation into valuable products using noble metal catalysts: A comprehensive review>>. *Environmental Technology and Innovation* ,**31**, 103217.
- [68] ULLAH, N., SU, M., YANG, Y., LI, Z. 2023. <<Enhanced CO<sub>2</sub> hydrogenation to light hydrocarbons on Ni-based catalyst by DBD plasma>>. *International Journal of Hydrogen Energy* ,**48**, 21735–21751.
- [69] SNOECKX, R., BOGAERTS, A. 2017. <<Plasma technology – a novel solution for CO<sub>2</sub> conversion?>>. *Chemical Society Reviews* ,**46**, 5805–5863.