

Készült a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium gondozásában.

Szén-dioxid-tárolási és -hasznosítási (CCS/CCU) lehetőségek Magyarországon **FEHÉR KÖNYV**

KIVONAT

2023

Szegedi Tudományegyetem

Farkas-Csamangó E. • Gyenes P. • Janáky Cs.
Kádár K. • Kószó Zs. • Lukovics M.
Sziebig O. J. • Törőcsikné Görög M.

IFUA Horváth & Partners Kft.

Czirók M. • Dobák K. • Gyurity E.
Parragh V. • Sorossy S. • Vass A.

Szén-dioxid-tárolási és -hasznosítási (CCS/CCU) lehetőségek Magyarországon

FEHÉR KÖNYV



A teljes dokumentum itt érhető el:

<https://greennovation.hu/feherkonyv.pdf>



Írta és szerkesztette:

Szegedi Tudományegyetem: Farkas-Csamangó Erika, Gyenes Péter,
Janáky Csaba, Kádár Krisztina, Kószó Zsófia,
Lukovics Miklós, Sziebig Orsolya Johanna, Törőcsikné Görög Márta

IFUA Horváth & Partners Kft.: Czirók Márton, Dobák Katalin, Gyurity Erik,
Parragh Viktor, Sorossy Sándor, Vass Antal

Nyomdai kivitelezés:

Innovariant Nyomdaipari Kft., Algyő
Felelős vezető: Drágán György
www.innovariant.hu

Grafikai és tördelő szerkesztő:

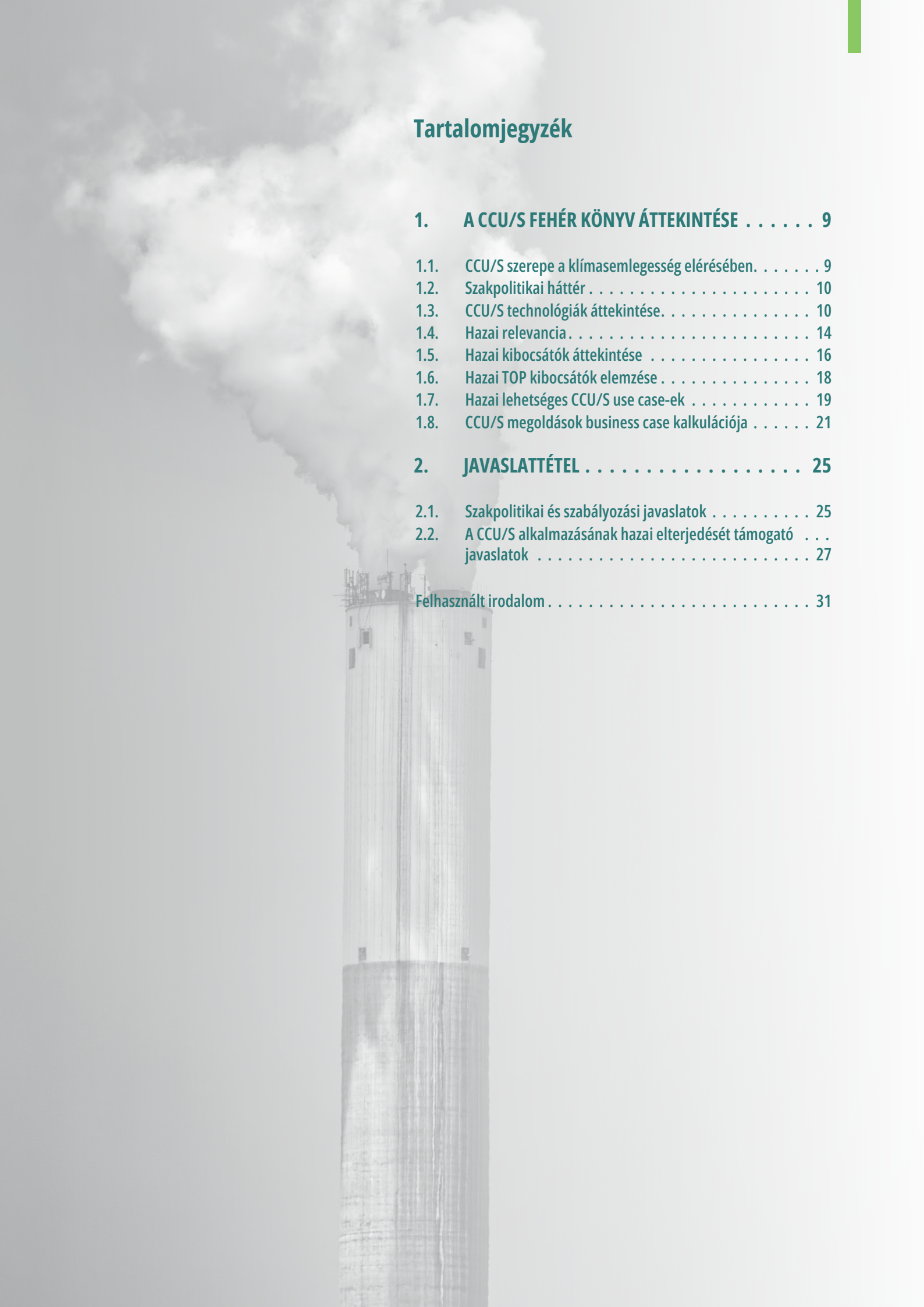
Árokszállási Beáta

2023

RRF-2.3.1-21-2022-00009, azonosítószámú, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg.

Rövidítések jegyzéke

CAPEX	Capital Expenditure - beruházáshoz kapcsolódó költség
CCE	Circular Carbon Economy - körforgásos szén-dioxid-gazdaság
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine - kombinált ciklusú gázturbinás erőmű
CCS	Carbon Capture and Storage - szén-dioxid-leválasztás és -tárolás
CCU	Carbon Capture and Utilization - szén-dioxid-leválasztás és -hasznosítás
CCU/S	Carbon Capture, Utilization and Storage - szén-dioxid-leválasztás, -felhasználás és -tárolás
CfD	Contract for Difference - különbözeti szerződés
DAC	Direct Air Capture - levegőből történő közvetlen befogás
EKHE	Egységes Környezethasználati Engedély
EOR	Enhanced Oil Recovery - másodlagos/harmadlagos olajkitermelés
EU	Európai Unió
EU ETS	European Union Emissions Trading System - Európai Unió Kibocsátáskereskedelmi rendszere
IPCEI	Important Projects of Common European Interest - európai közérdeket képviselő stratégiai jelentőségű projektek
K+F+I	Kutatás-fejlesztés és innováció
OPEX	Operational Expenditures - működési költség
ppm	Parts per million - milliomod térfogatrész
SMR	Steam Methane Reforming - metán-gőzreformálás
TRL	Technology Readiness Level - technológiai érettségi szint
WACC	Weighted Average Cost of Capital – súlyozott átlagos tőke költség



Tartalomjegyzék

1. A CCU/S FEHÉR KÖNYV ÁTTEKINTÉSE 9

- 1.1. CCU/S szerepe a klímasemlegesség elérésében. 9
- 1.2. Szakpolitikai háttér 10
- 1.3. CCU/S technológiák áttekintése. 10
- 1.4. Hazai relevancia. 14
- 1.5. Hazai kibocsátók áttekintése 16
- 1.6. Hazai TOP kibocsátók elemzése 18
- 1.7. Hazai lehetséges CCU/S use case-ek 19
- 1.8. CCU/S megoldások business case kalkulációja 21

2. JAVASLATTÉTEL 25

- 2.1. Szakpolitikai és szabályozási javaslatok 25
- 2.2. A CCU/S alkalmazásának hazai elterjedését támogató . . .
javaslatok 27

Felhasznált irodalom 31

1 A CCU/S FEHÉR KÖNYV ÁTTEKINTÉSE



1. A CCU/S Fehér Könyv áttekintése

Jelen Fehér Könyv a szén-dioxid-leválasztás, -hasznosítás és -tárolás (CCU/S) technológiáinak témakörét járja körül, elsődleges célja pedig a hazai CCU/S ipar szakmai megalapozása. A dokumentum kiindulási alapot szolgáltat a CCU/S technológiák hazai energia- és klímastratégiákba történő jobb beépítéséhez, valamint segít a gazdasági szereplőknek a számukra legmegfelelőbb dekarbonizációs stratégia kidolgozásában. Ehhez átfogó technológiai és gazdasági elemzések állnak rendelkezésre a CCU/S technológiákról és azok hazai alkalmazhatóságáról. A CCU/S technológiák a különböző típusú, fejlettségű és elterjedtségű megoldások mellett szerepelnek a dekarbonizációs eszköztárban, alkalmazásuk komplex környezetben történik technológiai, gazdasági és jogi szempontból egyaránt. A Fehér Könyv nem csak szekunder forrásokat dolgoz fel, hanem a legnagyobb CO₂-kibocsátó szereplők bevonásával készült el, mely révén jobban megérthetjük a kibocsátásuk jellemzőit, illetve a viszonyulásukat a CCU/S technológiákhoz.

1.1. CCU/S szerepe a klímasemlegesség elérésében

A fenntartható, klímasemleges gazdaságra való átálláshoz nem áll rendelkezésre egyetlen, mindenre egyformán jó megoldás, az csak a különböző technológiák széles skálájának alkalmazásával valósítható meg. A CCU/S is fontos szerepet játszik a dekarbonizációban a hatékonyságnövelés, az elektrifikáció, a hidrogén és a fenntartható bioenergia mellett.

A CCU/S négy területen tölt be alapvető fontosságú szerepet: (i) a meglévő energiatermelő eszközök kibocsátásának kezelése, (ii) az alacsony kibocsátású hidrogéntermelés platformjának biztosítása, (iii) megoldás a nehezen dekarbonizálható iparágak számára, (iv) valamint a CO₂ eltávolítása a légkörből annak érdekében, hogy az elkerülhetetlen vagy közvetlenül nem csökkenthető kibocsátásokat ellensúlyozzák.^{1,2}

A CCU/S lehet az egyetlen alternatíva arra, hogy a meglévő erőműveknek és ipari létesítményeknek ne kelljen a másként nem kezelhető kibocsátás miatt idő előtt bezárniuk, illetve üzemellessenek alacsonyabb kapacitáskihasználtság mellett vagy alternatív üzemanyagokkal. Bizonyos iparágakban a nettó nulla kibocsátás elérése CCU/S nélkül

nem lehetséges, hiszen a hatékonyságnövelés, elektrifikáció vagy a hidrogén csak részleges megoldást jelentenek. Ilyen a cementgyártás, mivel jelentős folyamatkibocsátással jár, amely nem a fosszilis tüzelőanyagok használatához kapcsolódik. Továbbá ilyen a vas- és acélipar, melyben a CCU/S alapú gyártás jelenleg a legfejlettebb és legolcsóbb megoldás az alacsony szén-dioxid-kibocsátású acél előállítására. A CCU technológiák oly módon is hozzájárulhatnak a kibocsátáscsökkentéshez, hogy a befogott CO₂ hasznosításával elkerüljük az új kibocsátásokat, továbbá bizonyos esetekben a CO₂ végtermékbe építésével tartós tárolást is megvalósítanak.³ A körforgásos szén-dioxid-gazdaság (CCE) szemléletében a CO₂ újfajta erőforrásként jelenik meg, melynek hasznosításával eddig kihasználatlan lehetőségek nyílnak meg számos iparág számára a klímastratégiai célok elérése érdekében.⁴

1.2. Szakpolitikai háttér

A CCU/S alkalmazások szakpolitikai és szabályozási háttére jelenleg kialakítás alatt áll, azonban az Európai Unió szabályozási javaslatai, továbbá programjai ezekre a technológiákra is tartalmazznak rendelkezéseket. A CCU/S témája megjelenik például a Megújuló Energia Irányelvben⁵, a Kibocsátáskereskedelmi Rendszer felülvizsgálatában⁶, valamint a REPowerEU tervben⁷ is. A Net-Zero Industry Act⁸ keretében pedig az EU célul tűzi ki 2030-ra, hogy az EU-ban a stratégiai szén-dioxid-tárolókban évente 50 Mt besajtolási kapacitást érjenek el. A 2050-re kitűzött karbonsemlegeségi cél teljesítése ösztönzi a CCU/S technológiák elterjedését. Az Európai Bizottság által összeállított CCU/S Vision vagy CCU/S stratégiai jövőkép lesz az EU-ban kidolgozott legjelentősebb, a CCU/S-re vonatkozó szakpolitikai kezdeményezés.⁹ A munkát 2022-ben kezdték meg, melynek hivatalos megjelenési ideje 2023 negyedik negyedévében várható. Az EU széles skálájú finanszírozási programokat kínál a kutatástól egészen a kereskedelmi léptékű projektekig a dekarbonizáció támogatására.¹⁰ Ezek közül a CCS-t és

a CCU-t is támogató jelentősebb finanszírozási eszközök az Innovációs Alap¹¹ és a Horizont Európa¹². Magyarországon a klímaintézkedések nagy része különféle stratégiák formájában jelenik meg. A 2021-ben elfogadott Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia nyolc célterülete között helyet kaptak a szén-dioxid-leválasztási, -hasznosítási és -tárolási technológiák is.¹³ Elsősorban az energiatermelési szektor és a nagy kibocsátással bíró ipari létesítmények esetében tervez az elterjedésükkel, valamint a meglévő rendszerekbe integrálásukkal, a 2030 utáni időszakban. A CCU/S technológiák megjelennek továbbá a Nemzeti Energia- és Klímatervben is, mely 2030-tól számol a CO₂-befogással kiegészített erőművek megjelenésével¹⁴; valamint a Nemzeti Hidrogénstratégiában, amely 2050-ig tekint meghatározóként a CO₂-leválasztással előállított kék hidrogén szerepére¹⁵. A Nemzeti Energiastratégia 2030-as időtávon nem érinti a CCU/S technológiákat, viszont számol a gáztüzelésű erőművek fennmaradásával, amik így az elkövetkezendő 20-25 évben potenciális CCU/S célpontok lehetnek.¹⁶

1.3. CCU/S technológiák áttekintése

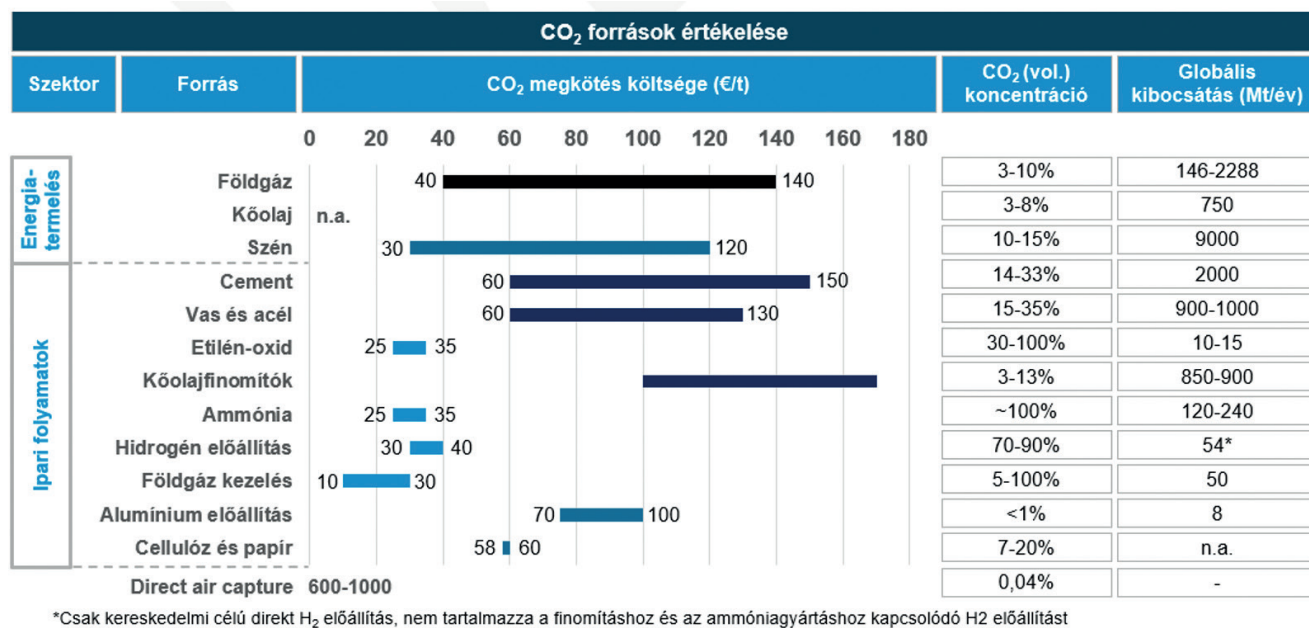
Szén-dioxid-leválasztás

A CO₂-leválasztás történhet nagy kibocsátású pontforrásokból, valamint közvetlenül a légkörből is (1. ábra). A leválasztás annál egyszerűbb és olcsóbb, minél nagyobb a kibocsátott gáz CO₂-koncentrációja és nyomása.¹⁷ Jól megköthető CO₂ jellemzően

a vegyipari, a földgázkezelési és a fermentációs (biofinomítói) folyamatokban fordul elő,

míg a villamosenergia-termelésben, valamint a nehéziparban a leválasztás költségesebb, komplexebb megoldást igényel.^{18,19} A jelenlegi 420 ppm-es légköri CO₂-koncentráció környezeti szempontból káros a növekvő üvegházhatás miatt, azonban műszaki oldalról túl kicsi a befogási technológiák hatékony alkalmazásához.





1. ábra CO₂-források értékelése, [17,19] alapján saját szerkesztés.

A CO₂ befogásához számos technológiai módszer áll rendelkezésre, melyek közül kiválasztható az adott ipari folyamat-hoz műszaki és gazdasági szempontból leginkább előnyös megoldás (2. ábra).²⁰ A módszerek három fő csoportja az égetés előtti (pre conversion/combustion), az égetés utáni (post conversion/combustion), és az oxigénes égetést (oxy-fuel combustion) követő befogás.²¹ Negyedikként említhető a levegőből történő közvetlen befogás (DAC) feltörekvő technológiája.

A pre conversion módszer esetében a CO₂ befogására metángáz-reformálós vagy szénelgázosításos folyamatok közben kerül sor.^{19,20,22} Jellemzően komplex, magas beruházási költségű megoldás, amivel a CO₂ viszonylag könnyen leválasztható, viszont kizárólag bizonyos ipari technológiák esetében alkalmazható. Elsősorban a szénhidrogénekből szintézisgázt előállító ipari folyamatokra jellemző (pl. SMR alapú hidrogén-előállítás).

A post conversion módszer során a tüzelőanyagok égetése után, a füstgázból kerül sor a CO₂ befogására.^{19,20,22} A megoldás szinte minden meglévő, nagy kibocsátású erőmű és ipari létesítmény esetén alkalmazható, viszont jelentős energiaigénye miatt a leválasztás költsége magas.

Az oxy-fuel módszer esetén a tüzelőanyag elégetése levegő helyett oxigénnel történik, az így keletkező tiszta CO₂-áram kerül befogásra.^{19,20} Energiahatékony megoldás, ami csak bizonyos folyamatokban alkalmazható, és magas beruházási költségek mellett alakítható ki. Teret ad innovációs és szinergie lehetőségek kiaknázására az elektrolízis-alapú

hidrogén-előállítás során melléktermékként előálló oxigén hasznosításával.

A szén-dioxid-befogási módszerekhez szorosan kapcsolódnak a szeparációs, avagy elválasztási eljárások, melyek a CO₂ tisztítása valósul meg. Számos elválasztási technológia áll rendelkezésre, melyek közül a megfelelő megoldás az adott befogási módszer, az ipari folyamat és a CO₂-áram jellemzői alapján választható ki. A főbb leválasztási eljárások a kémiai és fizikai abszorpció, az adszorpció, a membránszeparáció, a halmazállapotváltozás-alapú és a chemical looping (kémiai körfolyamat). Ezen kategóriákon belül több egyedi műszaki megoldás is rendelkezésre áll. A legelterjedtebb, legérettebb technológia a kémiai abszorpció, mely alkalmazható kis CO₂-koncentráció és nagy volumen esetén, pre- és post-combustion módszerekben is.^{20,23-25} A fizikai abszorpció érett technológia, ipari méretben és nagy CO₂-koncentráció esetén alkalmazható.

Az adszorpció kis méretben is alkalmazható és alacsony energiaigényű.^{20,23-25} A membránszeparáció magas nyomás és CO₂-koncentráció esetén hatékony, vegyipari és nehézipari alkalmazás esetén demonstrációs fázisban lévő, egyébként érett technológia. A halmazállapotváltozás-alapú, folyékony vagy szuperkritikus technológia jelenleg fejlesztés alatt áll, nagy CO₂-koncentráció esetén alkalmazható, valamint lehetővé teszi a folyékony CO₂ közvetlen gyártását és nagy nyomású tárolását. A chemical looping ígéretes, alacsony érettségű technológia, mely oxy-fuel és pre-combustion megoldások esetén használható

CO ₂ Capture módszer	Post combustion			Pre combustion			Oxy-combustion
	Tüzelőanyagok égetése során keletkező füstgázból kerül leválasztásra a CO ₂			Tüzelőanyagok égetése előtt történik meg a CO ₂ leválasztás, jellemzően szintézisgázból			O ₂ -el való égetés révén tisztá füstgáz
	- Meglévő üzemek felújítására alkalmas lehet – megőrizhető a meglévő infrastruktúra; legtöbb meglévő szén-erőművön jól alkalmazható - Még jelentős fejlődés várható ezen a területen			Magas nyomás és CO₂ koncentráció → alacsonyabb ktkgek			Nagyon magas CO₂ koncentráció a füstgázban
	- Alacsony nyomás és CO₂ koncentráció a füstgázban → nagy teljesítmény, energiaigény és kgt a CO₂ megkötése - Keletkező CO₂ alacsonyabb nyomáson – további kompresszió kell			Komplex megoldás: nem elég a füstgázt befogni, olyan folyamat szükséges, ahol a tüzelőanyag előkezelése történik (pl. SMR, elgázosító)			Magas O₂- és hőigény, ami jelentősen növeli az energiaigényt és a költségeket
CO ₂ leválasztó technológia	Abszorpció	Adszorpció	Membránszép.	Abszorpció	Adszorpció	Membránszép.	Levegőszétválasztás
	CO ₂ folyékony fázison kerül átvezetésre	CO ₂ szilárd felületen kötődik meg	CO ₂ leválasztást membrán végzi	CO ₂ folyékony fázison kerül átvezetésre	CO ₂ szilárd felületen kötődik meg	CO ₂ leválasztást membrán végzi	Levegő oxigén leválasztása
	- Alacsony koncentrációjú CO₂-t is képes megkötni - Oldat regenerációja szükséges - Korrózió, degradáció	- TSA, VSA technológia jól alkalmazható, de csak kisebb méretben - TSA: ipari méretben még nem hatékony a nagy hőigény miatt	- Leskálázható technológia - Kis nyomáson nagyon hatékonytalan technológia	- Jól ismert technológia - Alacsony energiaigény - Oldat regenerációja szükséges - Korrózió, degradáció	- PSA: alacsony energiaigény a magas nyomás miatt - Előnyösebb hulladékkezelés - A szilárd adszorbensről kis hatékonysággal választható le a CO₂	- Földgázkezelésben jól ismert technológia - Magas nyomás és stabil gázáram mellett hatékony - Soklépéses folyamat, mire a CO₂ leválasztásra kerül, ezért komplexebb technológia	- Levegő helyett O₂-val való égetés miatt nem kell a nehézkes N₂ és CO₂ szétválasztást végezni - Kjóvó CO₂ magas tisztaságú - Folyamatos nagy volumenű oxigénellátás szükséges, ami jelentős költség és energia - Extrém magas hőmérséklet szükséges és
Technológiai érettség	Érett (TRL9)	Érett (TRL6)	Érett (TRL5)	Érett (TRL9)	Érett (TRL9)	Pilot (TRL7-8)	Érett (TRL5-6)
Alkalmazási terület	- Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) - IGCC erőmű	- Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) - Erőmű (szén, gáz) - Vas-acél, cement	Erőmű (földgáz)	- Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) - IGCC erőmű	- Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) - IGCC erőmű	Földgázkezelés	Erőmű (földgáz, szén), cementgyártás, vas-és acél

erőssegek hátrányok

2. ábra A legfontosabb szén-dioxid-befogási technológiák összefoglaló értékelése, saját szerkesztés.

erőművekben, illetve szintézisgáz-előállítás során.²⁶ Speciális esete a magasabb érettségű calcium looping technológia.

A felsoroltakon túl, számos további CO₂-leválasztási technológia érhető el, vagy van kutatás-fejlesztési fázisban, melyek mind alkalmazási terület, mind pedig érettségi szint szempontjából rendkívül változatosak.^{24,27–29}

Szállítás és tárolás

A CO₂ leválasztásának helyszíne nem feltétlenül esik földrajzilag egybe a tárolás vagy hasznosítás helyszínével, ezért szállításra van szükség. A jelenleg kereskedelmi léptékben elérhető szállítási módok a csővezetékes, a vasúti és a közúti szállítás, valamint demonstrációs fázisban elérhető a vízi szállítás. A megfelelő megoldás fő kiválasztási szempontjai a szállítási kapacitás, a beruházási és működési költségek, valamint a távolság.²⁴ A csővezetékes, valamint a vízi szállítás a legköltséghatékonyabb megoldás a CO₂ nagy távolságokra és nagy mennyiségekben történő szállításához.^{30,31} A meglévő olaj- vagy gázvezetékek átalakítása akár 90-99%-os költségmegtakarítást is eredményezhet új vezeték létesítéséhez képest, azonban a felújításhoz szükséges műszaki követelmények nem minden esetben adottak. A vasúti és közúti szállítás költsége csak kis kibocsátó üzemek esetén, kis távolságokon lehet versenyképes. Ezeken felül a komplex szállítási megoldások, például a kereslet összevonásán alapuló szállítási központok, klaszterek kialakítása szintén lehetővé teszi a költségek csökkentését az erőforrások megosztásán, a különböző szállítási

megoldások alkalmazásán és a kezelési, előkészítési tevékenységek központosításán keresztül. A földrajzi közelség megteremtí a lehetőségét a CO₂-kibocsátók számára, hogy együttműködéssel CO₂-befogási és/vagy -tárolási klasztert hozzanak létre, és egy kiterjedt infrastruktúrán keresztül csatlakozzanak egy nagyméretű CO₂-tárolóhoz.

A CO₂ tartós tárolása elsősorban földalatti geológiai formációkban lehetséges, melyek közül meghatározó opciók a kimerült olaj- és földgázmezők, illetve a mélyen fekvő sós-vizes formációk (akvifer).²⁴ További lehetőséget jelentenek a kitermelésre alkalmatlan széntelepek és a bazaltos/ultramafikus kőzetek. Egyszerre jelentenek hasznosítási és tartós tárolási megoldást a fokozott olajkihozatal (EOR), valamint a szénágyas metánkihozatal. A kimerült szénhidrogénmezőkben a CO₂-besajtolás technológiája érett, évtizedek óta alkalmazásban van. A tárolás bizonyítottan szivárgásmentes, a monitorozása egyszerű. Mindezek miatt jelenleg ezek jelentik az elsőszámú geológiai tárolási megoldást. A sós-vizes akviferek esetén kevesebb CO₂-besajtolási tapasztalat áll rendelkezésre. Kiépítésük nagyobb költségekkel jár, viszont jelentős mennyiségek biztonságos tárolására alkalmasak. Jelenleg több, nagy volumenű tárolói demonstrációs projekt is működik.

A geológiai tárolásra alkalmas és megfelelő helyszínek azonosítása, illetve kiépítése jelentős költséggel jár, valamint hosszú időt (akár 5-12 évet) vehet igénybe.³² A CO₂ tartós és biztonságos tárolását igazolják a monitoring rendszerek, a besajtolási időszak alatt és azt követően is. A föld alatt tárolt CO₂ szivárgásának lehetősége a lakosság számára biztonsági szempontból aggályos, emiatt több esetben lakossági

Technológiai érettség az értéklánc mentén

A CCU/S értéklánc minden eleméhez rendelkezésre állnak érett technológiai megoldások, továbbá számos területen megjelentek feltörekvő, új megoldások is (4. ábra). A legtöbb technológia már elérte a TRL 4-es szintet, és ezek nagy része 2030-ig átléphet a TRL 7-9 közötti fázisba, illetve elérheti a kereskedelmi bevezetést. A magas technológiai érettség és rendelkezésre állás ellenére sok megoldás még nem terjedt el széleskörűen, ehhez további támogatásokra, ösztönző rendszerekre van szükség.

Nemzetközi use case-ek

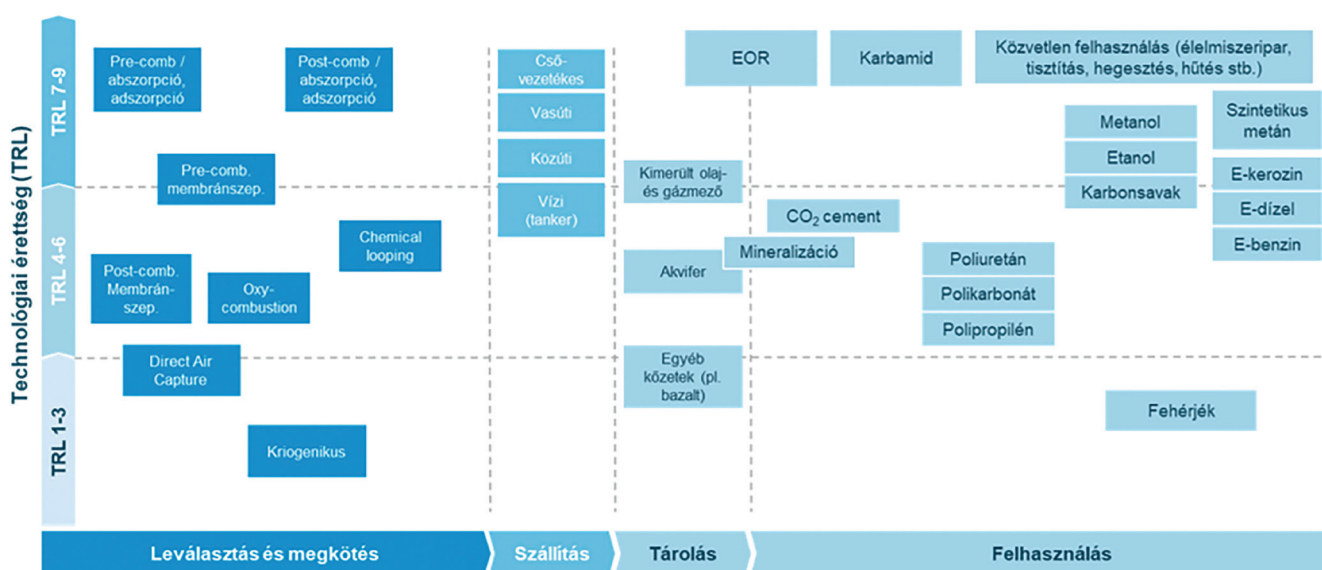
Világszerte és Európában is számos CCU/S alkalmazás létezik, melyek nagysága és kiterjedtsége a laboratóriumi fejlesztésektől, a demonstrációs projekteken keresztül, egészen az ipari méretű létesítményekig és kialakított klaszterekig terjed. A CCU/S technológiák európai bevezetésében élenjárók a nyugati és északi államok. A Fehér Könyvben nemzetközi példákat mutattunk be CO₂-befogási projektekre az építőanyag-gyártásban, a hidrogén-előállításban, a vegyiparban és az energiatermelésben, valamint ismertettük az ezekhez kapcsolódó CO₂-hasznosítási alkalmazásokat is.^{54–60} Továbbá bemutattunk két, kialakítás alatt álló európai CCU/S klasztert is, melyekben a befogáson túl a tárolás kap jelentős szerepet.^{61–63} Az ismertetett példák a működő CCU/S projektek csak egy kis szeletét fedik le. A CO₂ Value Europe szakmai szervezet adatbázisa alapján Európában összesen 79 befejezett és 84 folyamatban lévő CCU/S projekt található.

1.4. Hazai relevancia

Magyarország éves CO₂-kibocsátása 47 millió tonnára tehető, melynek közel fele, kb. évi 22 millió tonna releváns a szén-dioxid befogása szempontjából.^{32,64} A legnagyobb kibocsátású ágazatok az energiaszektor (közcsélú villamosenergia- és hőtermelés), a vegyipar (elsősorban ammónia- és etilényártás) és kőolajfinomítás, az ásványipar (főként cementgyártás), valamint a fémipar (vas- és acélgégyártás). A CCU/S elterjedése számos iparágban hozzájárulhat az ellátásbiztonság növeléséhez, a hazai előállítás fenntartásával és a külföldi kitettség, az import igény csökkentésével. A villamosenergia-termelésben továbbá lehetővé teszi a rugalmas gázerőművi kapacitások alacsony kibocsátás mellett fennmaradását, mely segíti a tervezett időjárásfüggő megújuló termelők terjedését.

Magyarországon a CCU/S technológiák elterjedése szempontjából leginkább kedvező adottságokkal a hazai ammóniagyártás és vegyipar rendelkezik. Számíthatunk a megjelenésre a hazai fémipar és a cementgyártás esetében is, mivel kevésbé kedvező adottságaik ellenére a kibocsátásuk jelentős, az alternatív dekarbonizációs megoldások pedig korlátozottak. Az energiaszektorban a meglévő infrastruktúra megőrzése, a hálózati rugalmasság javítása és az ellátásbiztonság megőrzése miatt valószínű a CO₂-befogás terjedése. Magyarországon a CO₂-leválasztási megoldások már jelen vannak a vegyiparban és a kőolajfinomításban, további elterjedésüket támogatja a nemzetközi technológiák hazai viszonyokra történő adaptálása, valamint saját, új technológiák fejlesztése.

Magyarországon a csővezetékes szállítás meghatározó szerepet fog betölteni a szén-dioxid nagy volumenű továbbításában.



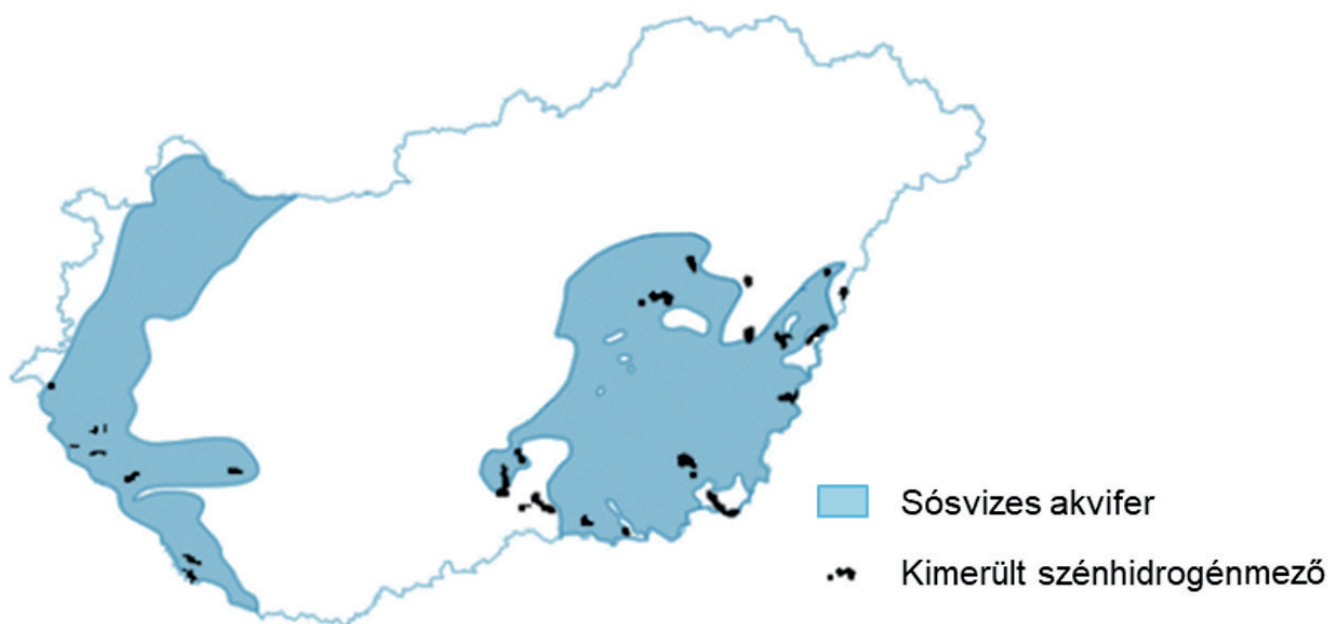
4. ábra CCU/S értéklánc technológiai érettségi térkép (2023), [23,34–53] alapján saját szerkesztés.

A csővezetékes szállítás elterjedése eleinte a nagy energetikai és ipari pontforrások esetében várható, mivel számukra gazdaságilag megtérülő megoldás lehet a saját, önálló infrastruktúra kiépítése, üzemeltetése. Ezek a vonalak a későbbiekben a CO₂-szállítási klaszterek létrejöttéhez szükséges gerinchálózatot adhatják. A CO₂-csővezeték infrastruktúrájának tervezéséhez, létesítéséhez és üzemeltetéséhez szükséges kompetenciák a gáz- és olajipari, valamint a földgázelosztással foglalkozó vállalatoknál megtalálhatók. Az országot behálózó földgázhálózat egyes szakaszai felújítással és átalakítással potenciálisan alkalmassá tehetők a CO₂ szállítására, ily módon jelentős költségmegtakarítás érhető el. Magyarországon a vasúti és közúti szállítás jelenleg is elérhető megoldás a szén-dioxid továbbítására, de a CCU/S ipar fejlődésében csak korlátozott szerepük lesz, elsősorban alacsonyabb vagy időben változó mennyiségek esetében várható a megjelenésük.

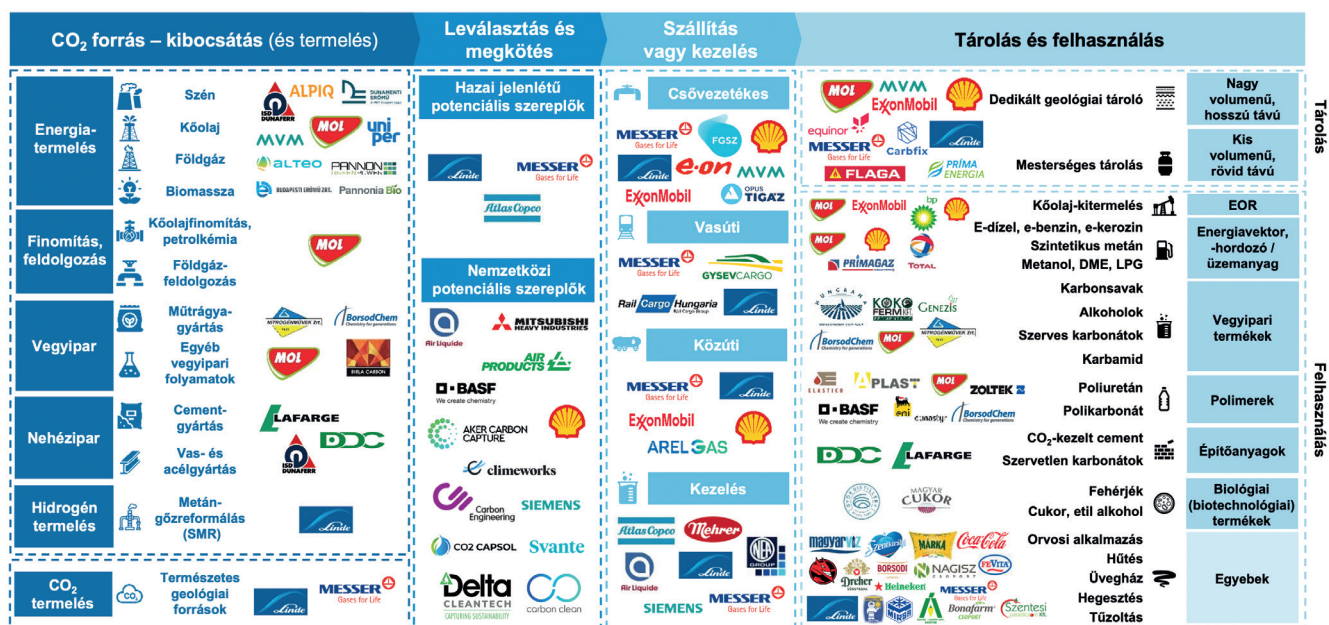
Magyarország területén belül rendelkezésre állnak a nagy mennyiségű CO₂ hosszútávú és biztonságos tárolásához szükséges kimerült olaj- és földgázmezők, illetve sósvizes akviferek egyaránt (5. ábra).⁶⁵ A hazai befogott CO₂ tárolása eleinte kiürült szénhidrogénmezőkben történhet, hiszen ezek költséghatékonyan hasznosíthatók és már rövidtávon is rendelkezésre állnak. Az országban található olaj- és földgázmezőkről a kitermelésük több évtizedes tapasztalatának köszönhetően jelentős hazai tudás és adatvagyon áll rendelkezésre, valamint a hazai érintettek rendelkeznek a sajtoláshoz, illetve a biztonságos tároláshoz szükséges technológiával, ismeretekkel, képességekkel. Ezekben a formációkban összesen kb. 25 millió tonna CO₂-tárolói kapacitás építhető ki gazdaságosan, melynek mértéke növelhető

állami támogatásokkal és ösztönzőkkel. A CCU/S ipar fejlődésének későbbi szakaszaiban kaphatnak meghatározó szerepet a hazai sósvizes akviferek, melyek 2.100-2.700 millió tonna *elméleti* kapacitással az országon belüli teljes tárolói volumen akár 80%-át adhatják.^{65,66} Ezekhez a formációkhoz kapcsolódó hazai sajtolási és tárolási tapasztalat nem áll rendelkezésre, valamint az eddigi kutatások során csak regionális felmérésükre került sor, de nemzetközi szinten már működnek demonstrációs projektek a kiaknázásukra. Magyarországon a fentiekben túl nem várható más geológiai tárolási megoldás elterjedése, azok technológiai bizonytalanságaiból és a versenyképesebb alternatívák jelenlétéből fakadóan.⁶⁷

Magyarországon a befogott szén-dioxid számos ágazatban hasznosítható lehet, a jelenleg keresletet támasztó szektorok mellé a CCU/S ipar fejlődésével újabb piacok bekapcsolódása várható (6. ábra). Jelenleg a CO₂ felvevői között meghatározónak számít az élelmiszeripar és az italgyártás. Ezen szektorok piaca kis méretű és kevés növekedési lehetőséget nyújt, azonban keresletét jelenleg bányászott CO₂ fedezi, melynek kiváltása egyértelmű környezeti előnyökkel jár. További jelentős hazai felhasználó a műtrágyagyártás. A CCU/S ipar fejlődésével és a releváns technológiák, eljárások érettebbé válásával várható a befogott CO₂-felhasználás hazai elterjedése a vegyiparban, az építőanyag-gyártásban, a szintetikus üzemanyagok előállításában és a polimergyártásban, majd a későbbiekben a mezőgazdaságban is. A CCU/S alkalmazások hazai elterjedését átfogóan korlátozza, hogy az ország területén jelentős nagyságú és tisztaságú, természetes eredetű CO₂-készletek találhatók. Ezen telepek viszonylag könnyen és alacsony költség mellett



5. ábra Magyarországon a CO₂ földalatti tárolására alkalmas geológiai formációk földrajzi elhelyezkedése, [65] alapján saját szerkesztés.



6. ábra A hazai CCU/S értéklánc főbb szereplőinek összefoglaló ábrája, saját szerkesztés.

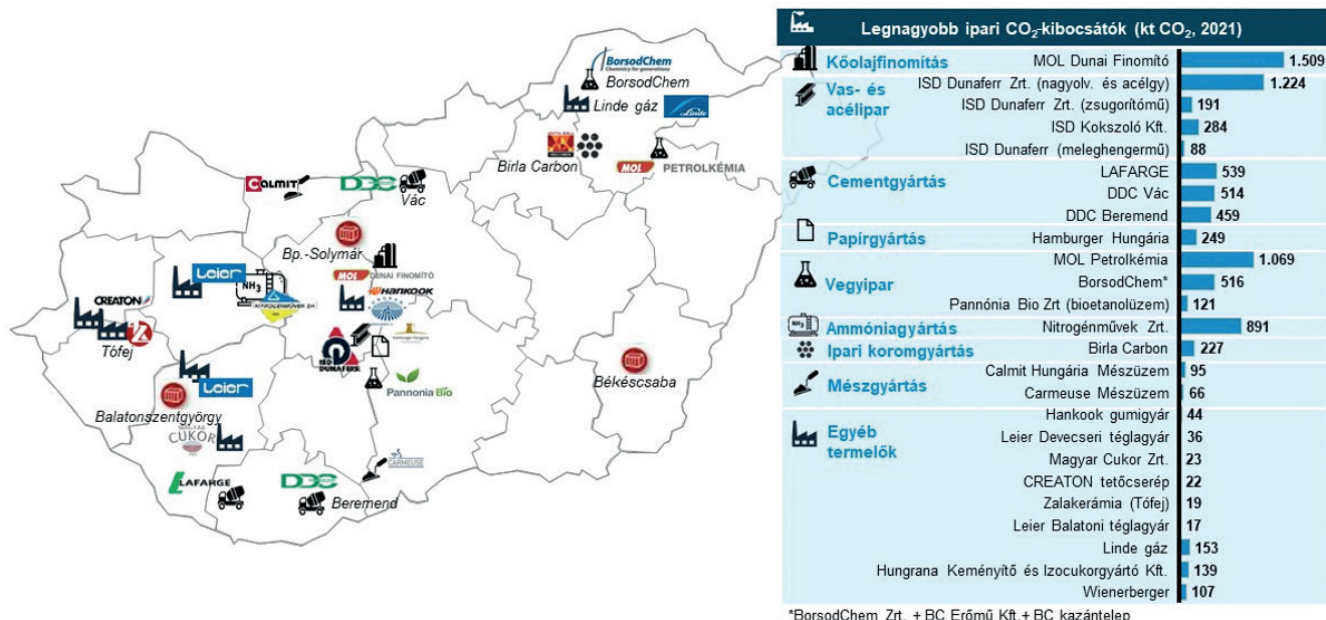
kitermelhetők, így a jelenlegi szabályozási környezetben versenyképesebb megoldást nyújtanak a CCU/S technológiával szemben a CO₂-felhasználók számára.

A hazai CCU/S ipar kulcsszereplője a MOL lehet, további meghatározó szereplői a nagy vegyipari, építőipari, fémipari, energiaipari és fermentálást végző társaságok (Nitrogénművek, BorsodChem, Lafarge, DDC, ISD, MVM, Hungrana, Pannonia Bio), valamint a technológiai szolgáltatók (Linde, Messer) lehetnek, a meglévő kompetenciáik, tőkeerejük és érintettségük alapján. A hazai vállalatok jelen vannak a teljes CCU/S értéklánc mentén, annak minden elemét lefedik. A CCU/S szaktudás és technológiai ismeretek, lehetőségek bővítésének fontos eszköze a hazai kulcsszereplők együttműködése, továbbá az európai szintű együttműködésekben, nemzetközi projektekben való részvétel.

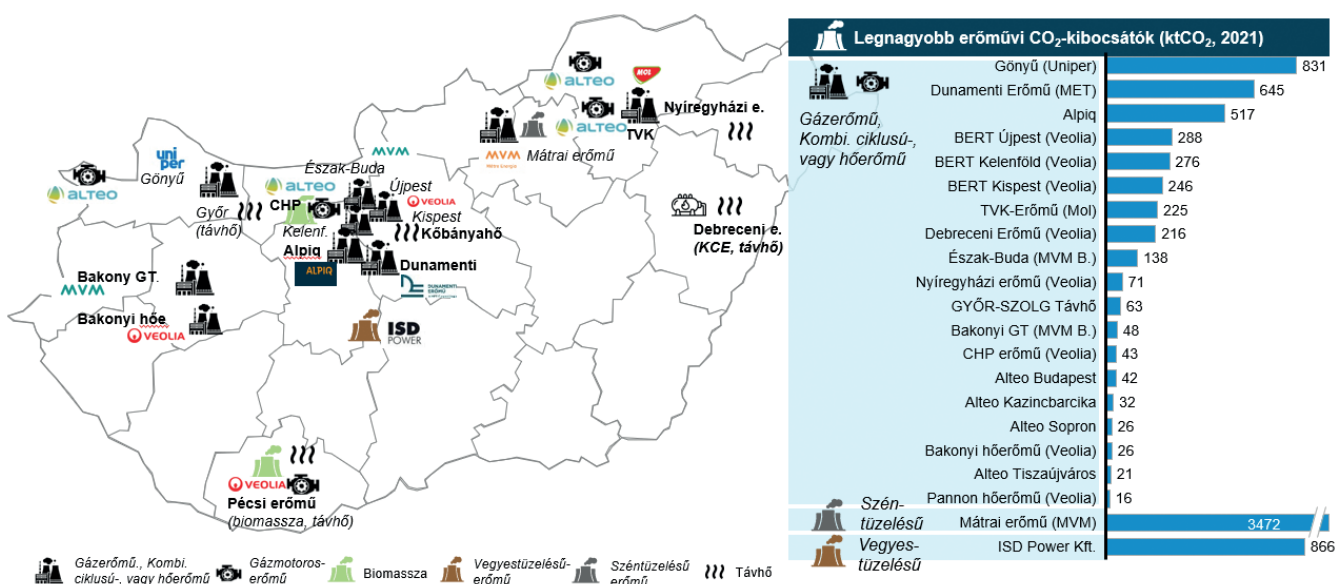
1.5. Hazai kibocsátók áttekintése

A hazai CO₂-kibocsátás nagyrésze a fosszilis tüzelőanyagok erőművi égetése során keletkezik, míg az iparban a fémgyártás, a vegyipar és a cementgyártás a legnagyobb kibocsátók. Szén-dioxid-befogás szempontból az energiaszektor és az ipar lehetnek relevánsak, hiszen pontszerűen, nagy volumenben keletkezik kibocsátás. Az energiaszektoron belül három terület van, ahol nagy

volumenben, koncentráltan, kevés lokáción történik kibocsátás: közcélú villamosenergia- és hőtermelés, ipari energiatermelés és olajfinomítás. Ezen területek együttes éves CO₂-kibocsátása 17 millió tonna. Az energiaszektoron (tüzelőanyag-égetésen) túl, az ipari folyamatokhoz és termékhasználatához kapcsolódó kibocsátási folyamatok lehetnek relevánsak szén-dioxid-megkötés szempontjából, mert jelenleg nincs más olyan technológiai megoldás, amely képes lenne ezeket a kibocsátásokat érdemben csökkenteni. Ez a terület az ipari termeléshez kapcsolódó, nem tüzelési folyamatok által generált kibocsátásokat foglalja magába. Itt jellemzően valamilyen termék előállításánál alkalmazott kémiai reakciók mellékterméke a keletkező szén-dioxid. A leginkább érintett ágazatok a vegyipar (elsősorban ammónia- és etiléngégyártás), ásványipar (főként cementgyártás) és fémipar (vas- és acélgégyártás). A teljes magyarországi ipari folyamatokhoz és termékhasználatához kapcsolódó éves CO₂-kibocsátás 5,1 millió tonna. Az energiaszektor (tüzelőanyag égetése) (17 Mt) és az ipari folyamatok (5 Mt) éves CO₂-kibocsátása tehát nagyságrendileg évi 22 millió tonna.⁶⁸ Ez a mennyiség lehet tágan értelmezve releváns a szén-dioxid befogása szempontjából. Az alábbi két térkép mutatja be a legnagyobb ipari és erőművi kibocsátókat (7. ábra és 8. ábra):



7. ábra Magyarország legnagyobb ipari kibocsátói, [69,70] alapján saját szerkesztés.



8. ábra Magyarország legnagyobb erőművi kibocsátói, [69,70] alapján saját szerkesztés.

Fontos változás várható kibocsátások szempontjából az energiaiparban: a Mátrai lignittüzelésű erőmű az évtized második felében várhatóan leállításra kerül és helyette jelentősen bővül a hazai gáztüzelésű erőműpark: 2 db 500

MW és 1 db 650 MW kapacitású CCGT gázerőmű épül a Mátrai erőmű és Tiszaújváros területén. Ezzel a legnagyobb kibocsátó egység megszűnik és a hazai fosszilisenergia-ipar legfontosabb szereplői a gázerőművek lesznek.



1.6. Hazai TOP kibocsátók elemzése

A CCU/S iparág legfontosabb szereplői a nagykibocsátó-vállalatok lesznek, ezért a Fehér Könyv összeállításába a hazai kulcsszereplőket is bevontuk kérdőíves megkérdezéssel, valamint mélyinterjúkat készítettünk a TOP20 kibocsátó közül 16-tal (ők azok, akik nyitottnak bizonyultak a megkeresésünkre). A kérdőívezés során olyan adatokat gyűjtöttünk a kibocsátó egységekről, amelyek segítenek az adott kibocsátók CCU/S potenciálját értékelni a következő szempontok szerint: éves kibocsátás volumene, kibocsátási volumen szezonalitása/fluktuációja, kibocsátás CO_2 -koncentrációja, leválasztás elméleti költségszintje és helybeni hasznosítás lehetősége.

A CCU/S potenciál szempontjából a vegyipari társaságok bizonyultak a legígéretesebbnek. A Nitrogénművek ammónia-előállító üzeme rendelkezik a legjobb adottságokkal. Nagy tisztaságú, nagy volumenű folyamatos kibocsátással rendelkezik és akár helyben is tudja (részben) hasznosítani a leválasztott CO_2 -ot. Ígéretes terület továbbá a MOL és a Linde (és BorsodChem) hidrogén-előállító üzeme, hiszen kibocsátásuk nagy koncentrációban tartalmaz CO_2 -ot. Fontos terület továbbá a cementgyártás, ahol a CO_2 -koncentráció ugyan elmarad a vegyipari üzemekétől, azonban nincs más ismert alternatíva a kibocsátások jelentős csökkentésére,

ezért ők fontos szereplői lehetnek ennek az iparágak. A gázerőművi kibocsátásokat felmérve az derült ki, hogy bár nagy volumenben bocsátanak ki CO_2 -ot, kibocsátásuk CO_2 -koncentrációja kicsi, illetve működési jövőképük alacsonyabb kihasználtsággal való működést vetít előre.

A kibocsátások elemzésén túl, a CCU/S technológiához való viszonyulásukról, kibocsátáscsökkentéssel kapcsolatos terveikről is megkérdeztük a legnagyobb hazai CO_2 -kibocsátókat. A TOP20 kibocsátó fele rendelkezik valamilyen meghatározott CO_2 -kibocsátáscsökkentési céllal. A kibocsátáscsökkentési célok elérését elsődlegesen megújuló energiák alkalmazásával, hatékonyságnöveléssel és új gyártási technológia bevezetésével képzelik el. A CCU/S technológiát 7 szereplő jelölte meg.

A válaszadók több mint felének (61%) nincs jelenleg futó CCU/S projektje, és nem is tervez a közeljövőben. Ezek a társaságok szinte kivétel nélkül a CCU/S technológia gyenge gazdasági mutatóival (negatív megtérülés, magas beruházási igény) és a technológia gyakorlati alkalmazhatóságával kapcsolatos ismeretek hiányával indokolták válaszaikat. Tényleges szén-dioxid-hasznosítás egy vállalat esetében létezik, ahol a leválasztott szén-dioxid egy részéből karbamidot állítanak elő. Öt vállalat esetében azonban van folyamatban CCU/S technológiára vonatkozó projekt vagy annak előkészítése, további kettőnél jelenleg nincsen,



de tervben van a közeljövőben. Ezek a vegyiparban, illetve az ásványiparban tevékenykednek, és a projektek jelenleg jellemzően előkészítő tanulmányok, tervek, megtérülési számítások szintjén vannak. A legtöbb vállalkozás szén-dioxid-leválasztásban, illetve szén-dioxid-szállításban és -tárolásban keres partnert. Szén-dioxid-hasznosítási partner csak két esetben került említésre, főként vegyipari (metanol-előállítás) és építőipari hasznosítás témákban.

A CCU/S projektek legnagyobb akadályozó tényezői között főként gazdasági elemek vannak. A technológiák magas beruházási igénye, magas működtetési költsége és (ebből fakadón) alacsony megtérülése akadályozza leginkább gazdasági oldalról a projektek megvalósulását. Kiemelt problémaként azonosították a kibocsátók továbbá a CO₂-infrastruktúra hiányát. Amíg nincs regionális alapokon szerveződött CO₂-infrastruktúra (vagy erre vállalkozó szereplő), addig a kibocsátók nem tudnak a leválasztással foglalkozni, és mindaddig a CCU/S csak elméleti alternatíva marad.

További fontos akadályozó tényezők a szakpolitikai bizonytalanság és a szabályozási ösztönzők hiánya. Fennállnak konkrét jogszabályi akadályok, a kibocsátók a hazai ipar- és energiapolitika CCU/S projektek iránti elköteleződésének hiánya miatt nem döntenek ilyen beruházások mellett.

1.7. Hazai lehetséges CCU/S use case-ek

A Fehér Könyvben számos példát mutattunk be a CCU/S technológiák potenciális hazai alkalmazási lehetőségeire az értéklánc mentén. Ismertettünk 7 esetet, melyek fókuszában a CO₂ befogása vagy hasznosítása áll, bemutattunk 1 tárolói esetet, valamint körvonalaztunk 2 kialakítható CCU/S klasztert is. Mindegyik eset leírását értékláncszemléletben készítettük el, így a CO₂ teljes életciklusát leképezzük a keletkezéstől a felhasználásig és tárolásig.

A CO₂ befogását központba állító alkalmazási lehetőségek témái a CCGT alapú villamosenergia-termelés a Mátra Energia esetében, a cementklinkergyártás a Lafarge királyegyházi gyárában, az ISD Dunaferri dunaújvárosi vasgyárában működő nagyolvasztó, a kőolajfinomításhoz szükséges hidrogén-előállítás a MOL Dunai Finomítóban, illetve a petrokémiai folyamatok a MOL Petrokémia tiszaujvárosi üzemében. A CO₂-felhasználásra fókuszáló alkalmazási lehetőségek témái a műtrágyagyártás kibocsátásának helyi hasznosítása és partnerek számára történő értékesítése a Nitrogénművek esetében, valamint a BorsodChem hidrogén-előállító üzemében keletkező CO₂ helyi hasznosítása különböző vegyipari termékek előállításában. A CO₂-tárolói eset témája a Tázlár térségében található kimerült szén-hidrogénmező hasznosítása. A hazai lehetséges CCU/S



klaszterek bemutatása céljából földrajzi elhelyezkedésük alapján körvonalaztuk az Észak-Magyarországi és a Dunamenti CCU/S klasztereket, azonosítottuk az együttműködésekben potenciális résztvevő kulcsszereplőket, CO₂-kibocsátókat és -felhasználókat, a tárolásra alkalmas régiókat, valamint a lehetséges szállítási útvonalakat és hálózatokat.

Lehetséges CCU/S üzleti modellek

A sikeres CCU/S projektek indításához, illetve megvalósításához olyan üzleti modellekre van szükség, melyek biztosítják a finanszírozási forrást és a kiszámítható bevételelőket, gondoskodnak a kockázatok szereplők közötti megosztásáról, illetve elfogadható szinten tartásáról teljes társadalmi elfogadottság mellett, valamint figyelembe veszik a CO₂-értékláncban elfoglalt pozíciót és a tevékenységhez szükséges partnerkapcsolatokat.⁷¹⁻⁷³

Ahhoz, hogy a piaci szervezetek eredményesen tudják CCU/S üzleti modelljüket kialakítani, szükség van egy átfogó támogatói keretrendszerre, gazdasági-politikai környezetre, melyet nemzeti (vagy akár nemzetközi) szinten a szabályozó alakít ki az egész szektorra kiterjedően. A CCU/S ipar fejlődését eredményesen támogató keretrendszerek biztosítják a megtérülést, tisztázzák és elosztják a kockázatokat a tulajdonjogok, illetve kötelezettségek meghatározásán keresztül, egyúttal védik a szereplőket az értékláncban átgűrűző kockázatok hatásaitól. Továbbá képesek piaci finanszírozást bevonítani a szegmensbe, illetve lehetővé teszik első generációs és érettebb projektek elindítását is. A keretrendszernek mindezen felül összhangot kell teremtenie az egyéb ágazati és dekarbonizációs politikákkal, valamint nem ösztönözhet a tevékenység határon kívül helyezését.

A CCU/S projektek eredményessége elsősorban azon múlik, hogy létezik-e hosszútávú és stabil bevételi forrás, mely képes a beruházás megtérülését biztosítani.⁷⁴ A CCU/S alkalmazások esetében is számos támogatáson alapuló és piaci monetizációs lehetőség áll rendelkezésre, melyek a dekarbonizációs, illetve egyéb új technológiák elterjedésében már jelenleg is ismertek és jelentős szerepet játszanak. Az egyik leginkább elterjedt támogatási modell a különbözeti szerződéses (CfD), melyben a szabályozó megtéríti a kibocsátó számára a befogott CO₂ piaci ára és egy meghatározott célár közötti különbséget, így kiszámítható bevételi forráshoz juttatva a beruházót.^{24,32,72,74} Ezentúl az állam az adórendszeren keresztül is támogathatja a CCU/S terjedését adókedvezmények bevezetésével^{24,32,74,75} vagy karbonadó kivételével^{32,74}.

A CCU/S technológiák elterjedésének eredményes ösztönzője lehetne az EU Kibocsátáskereskedelmi Rendszere, azonban az ETS egyelőre nem terjed ki a CO₂-hasznosítási megoldásokra.^{74,75} A bevételi modellek kialakíthatók elismert költség alapon is, tarifaszabályozással vagy közvetlen állami támogatással („költség plusz” mechanizmus).^{24,32,72,74} Egyelőre a CCU/S piaci alapú bevételi forrásait korlátozzák a magas technológiai költségek és az ezekhez mérten alacsony CO₂-árak. Az állam hozzájárulhat a CO₂ iránti kereslet növekedéséhez, valamint a felhasználói piac bővüléséhez szabályozással és ösztönzők bevezetésével. Ilyen eszközök lehetnek az alacsony karbon intenzitású termékek előnyben részesítése és megkülönböztetése, a bizonyos részarányú használatuk kötelezővé tétele, továbbá a befogott CO₂ bányászattal szembeni versenyképességének növelése.^{32,74,75} A piaci alapú bevételi modellek előnye, hogy hosszabb távon a CCU/S ipar fejlett szakaszában állami támogatások nélkül is biztosíthatják a projektek megtérülését.

A CCU/S értéklánc mentén számos projekt és üzleti modell definiálható. A kezdeményezések fókuszálhatnak az értéklánc egyetlen elemére, vagy több elem kombinálásával integrált projekteket is létesíthetnek. Az üzleti modell kialakítása során figyelembe kell venni a tevékenység értékláncban elfoglalt pozícióját, a felelőségek és a kockázatok megosztását az érintettek között, valamint a lehetséges bevételáramokat, illetve a fő költségelemeket. Nemzetközi példák alapján a következő potenciális modelleket azonosítottuk: vertikális integráció, közös vállalat, CCU/S operátori modell, klaszter megközelítés.^{24,74,75}

1.8. CCU/S megoldások business case kalkulációja

A CCU/S megoldások gazdasági vonatkozását, megtérülési képességét is vizsgáltuk a Fehér Könyvben. A CCU/S értéklánc elemei mentén nemzetközi szakirodalom által feldolgozott üzleti eseteket (business case) mutatunk be. Az üzleti esetek kapcsán fontos megállapítás, hogy az egyes CCU/S projektek jelentősen eltérőek lehetnek műszaki és gazdasági eredmények tekintetében. A bizonytalanság oka az egyes kibocsátó technológiák és az egyes leválasztó technológiák egyedisége, az eltérő alkalmazott premisszák, valamint a rendelkezésre álló empirikus adat, tanulmány szűkössége (a kevés működő projekt következtében). Emiatt a tanulmány nem szolgál általános érvényű gazdasági, megtérülési adatokkal, ehelyett több egyedi esetet mutat be szemléltetés és orientáció céljából.

Szén-dioxid-leválasztás kapcsán három eset került vizsgálatra: CO₂-leválasztás hidrogén-előállítás (SMR egységről)⁷⁶, cementgyártás^{77,78} és gázerőművi energiatermelés során^{79,80}. A leválasztás költségét főként a carbon capture berendezés beruházási és működtetési igénye határozza meg. Mindhárom esetben a szén-dioxid-leválasztó egység magas energiaigénye határozta meg legnagyobb mértékben a leválasztás költségét. A három vizsgált eset közül a hidrogén-előállítás esetében volt a legkedvezőbb a leválasztás költsége. A cementgyártás és gázerőművi termelés esetében ez jelentősen energia- és költségigényesebb megoldás. A hidrogén-előállítás esetében kisebb mértékben, míg a cementgyártás során jelentősen drágult a végtermék.



A hazai CCU/S adottságokat figyelembe véve a CO₂ gazdaságos szállítása történhet csővezetéken, vasúton vagy közúton. Mindhárom megoldás esetén a továbbított mennyiség és a távolság a meghatározó a szállítás költsége szempontjából. Magyarországon a nagy volumenű szén-dioxid továbbításának meghatározó módja a csővezetékes szállítás lehet, emiatt ezt mutatjuk be részletesen. A nemzetközi szakirodalomban gyakran hivatkozott, szállítási költségeket elemző tanulmányban a vizsgált forgatókönyvek közül az évi 2,5 millió tonna kapacitású, 180 km távolságú, szárazföldi csővezetékes szállítás közelíti legjobban a hazai viszonyokat.⁸¹ Ez esetben a szállítás fajlagos költsége 5,4 euró/tonna értékre tehető. Magyarországon a várhatóan kisebb szállítási volumenek (nagy forgalmú útvonalak esetén évi 2 millió tonna alatt) miatt a csővezetékes CO₂-szállítás ennél magasabb fajlagos költség mellett valósítható meg. A gazdaságos CO₂-szállítás feltételei Magyarországon a CCU/S klaszterek kialakítása és közös szállítási infrastruktúra létesítése, valamint sósvízes akviferes tárolók kiépítése,

célszerűen a leművelt szénhidrogénmezőkön létrehozott tárolók közelében. A hazai geológiai lehetőségeket figyelembe véve a CO₂ hazai tárolása eleinte kimerült olaj- és földgázmezőkben, később sósvízes akviferekben valósulhat meg. A tárolás költsége elsősorban az adott tárolói formáció adottságaitól függ (méret, geológiai tulajdonságok). A nemzetközi szakirodalomban gyakran hivatkozott, tárolási költségeket elemző tanulmányban vizsgált forgatókönyvek közül a szárazföldi, hasznosítható felhagyott kutak nélküli kimerült szénhidrogénmezős, illetve a sósvízes akviferes tárolás közelíti legjobban a hazai viszonyokat.⁸² Előbbi esetében a tárolás fajlagos költségére 1-10 euró/tonna, utóbbi esetében 2-12 euró/tonna között adódott. Magyarországon az egyes kimerült olaj- és földgázformációk kisebb kapacitása miatt a tárolás várhatóan ennél magasabb fajlagos költség mellett valósítható meg, a sósvízes akviferek esetében viszont kedvező geológiai adottságok esetén elérhető lehet ez a tartomány.



A szén-dioxid-hasznosítási üzleti esetek azért fontosak, mert új megvilágításba helyezik a CO₂-kibocsátást, hiszen bemutatják, hogy a CO₂-ra érdemes erőforrásként, értéként tekinteni, amiből akár piacképes termékek állíthatók elő. Két konkrét esetet vizsgáltunk: szintetikuskerozin-előállítás és CO₂-alapú poliol-előállítás. A szintetikus kerozin előállítása nagy volumenben képes szén-dioxidot felhasználni, azonban emellett jelentős zöld hidrogén igénye is van.^{83,84} Ehhez pedig nagy volumenű megújuló villamos energia szükséges. Ennek a kielégítése jelentős beruházást igényel a szén-dioxid-leválasztás és az üzemanyag-előállító mellett: nagy kapacitású megújulóenergia-termelők és elektrolizálókra. Emiatt az előállított szintetikus kerozin a konvencionális fosszilis alapú kerozinhoz képest akár háromszor is drágább lehet.⁸⁵ Ez a terület ugyanakkor a szabályozás várható alakulása miatt komoly érdeklődésre tart számot.

A poliol-előállítás esetében pedig a CO₂-alapú előállítás 20% fosszilis alapanyagigényt képes kiváltani, mely révén az előállított termék ára kedvezőbb lett, mint a fosszilis alapon előállított. A bemutatott esetben hidrogén-előállító üzemről választják le nagy volumenben a szén-dioxidot, melynek 10%-át képesek hasznosítani a poliol-előállításban, a nagyobbik részét pedig letárolják.⁸⁶ A CCU business case-ek rámutattak arra, hogy érdemes a szén-dioxidra, mint lehetséges erőforrásra tekinteni, és fontos a tárolás mellett a hasznosítási lehetőségek, illetve más egyéb folyamatok szinergiák kiaknázása is. Az üzleti modellek áttekintése kapcsán általános konklúzió, hogy komplex megközelítésre van szükség, hiszen a CCU/S értékláncok is összetettek, és gondos összehangolást igényelnek. Építeni kell a meglévő infrastruktúrára, minél több szinergia kiaknázása szükséges ahhoz, hogy a teljes CCU/S értéklánc gazdasági és technológiai optimuma megvalósuljon.



2 JAVASLATTÉTEL



2. Javaslatétel

2.1. Szakpolitikai és szabályozási javaslatok

Magyarország által is deklaráltan támogatott uniós cél, hogy 2050-re a gazdaság üvegházhatású gázkibocsátása nettó nullára csökkenjen. A jelenlegi szabályozási környezet az EU ETS-re, a megújuló energia támogatására és az energiahatékonysági intézkedésekre terjed ki. Miközben a megújuló energiaforrások és az energiahatékonyság javítása adják a dekarbonizációs lehetőségeink alapjait, és a várható kibocsátáscsökkentésnek mintegy 80%-a ezekhez köthető, vannak olyan nehezen dekarbonizálható tevékenységek, mint például a cementgyártás, acélipar, vegyipar vagy a hulladékfeldolgozás, ahol a kibocsátásmentes működés módja egyelőre nem ismert, vagy túl drága alternatíva lenne.

A visszajelzések, kérdőívek legfontosabb üzenete, hogy míg a meglévő jogi vagy szabályozási rendszerek számos követelményt már tartalmaznak, az átláthatóságra, a felelősség megoszlására, a kiszámíthatóságra, a nyomon követhetőségre vonatkozó követelmények számos gazdasági ágazatban nem képezik részét a jelenlegi jogszabályoknak. Igény mutatkozik iparspecifikus ajánlások és műszaki szabványok, biztonsági elvárások, valamint egységes útmutatók kidolgozására. Ezek a szabványok elősegíthetik a technológiák szélesebb körű elterjedését is. Számos Európai Unió kívüli technológia európai alkalmazása esetén megfelelési tanulmányok és engedélyek beszerzése szükséges, ehhez azonban rugalmas szabványokra és gyorsabb bürokráciára van szükség. A mérési és ellenőrzési bizonytalanságokra egyértelmű szabályozási keret erősítené a vállalkozások bizalmát, és ezáltal felgyorsítaná a technológiák elterjedését. E szabályozási keretnek összhangban kell állnia az európai innovációs kapacitás és versenyképesség előmozdítása érdekében e területen hozott egyéb intézkedésekkel. Ezenkívül társadalmi, környezeti és gazdasági szempontból optimális eredményeket kell biztosítani, és gondoskodnia kell az uniós jogszabályoknak, elveknek és értékeknek való megfelelésről.

Megnehezítheti a jogszabályok alkalmazását és végrehajtását az, hogy a dekarbonizációt támogató jogszabályok egy része bonyolult, folyamatosan változik és sokszor még nem elterjedt, költséges technológiákat ösztönöznek. A jogi keret jobbítása érdekében ezért érdemes megvizsgálni, hogy a jelenlegi jogszabályok képesek-e kezelni a további fejlesztéseket, és a végrehajtásuk hatékonyan kikényszeríthető-e, avagy a jogszabályok kiigazítása,

esetleg új szabályozás kialakítása szükséges. A hatékony alkalmazás és végrehajtás biztosítása érdekében bizonyos területeken – például a szén-dioxid tárolására vonatkozóan – szükségessé válhat a meglévő jogszabályok kiigazítása vagy pontosítása.

Tekintettel a technológia gyors fejlődésére, a szabályozási keretnek teret kell hagynia a további fejlesztésekre. Minden változtatásnak egyértelműen azonosított problémákra kell korlátozódnia, amelyekre léteznek megvalósítható megoldások. A megbízható szilárd európai szabályozási keret, a kiszámítható hosszútávú fejlődési stratégiák védelmet jelenthetnek valamennyi tagállami vállalat számára, minde mellett masszív, előre tervezhető szabályozási környezetet biztosítva hozzájárulhatnak Európa ipari bázisának megerősítéséhez, valamint a dekarbonizációs lehetőségek kiaknázásához és a kibocsátások csökkentéséhez.

A szén-dioxid-kibocsátás, negatív emissziók és számítási módszertanának egységesítésével, fogalmának meghatározásával a jogszabályok jelenleg nem foglalkoznak részletesen. Ez a hiányosság a szabályozás egyértelműsítését teszi szükségessé. A meghatározásoknak valamennyi új jogi eszközben kellően rugalmasnak kell lenniük ahhoz, hogy alkalmazkodjanak a műszaki fejlődéshez, ugyanakkor elég pontosnak is ahhoz, hogy biztosítsák a szükséges jogbiztonságot. A kérdőívekből megállapítható például, hogy nem látható előre a biomassa fenntarthatósági követelményeinek jogi háttere. A biomasszából származó CO₂-CCU/S szabályai így bizonytalanok, nem biztosított ezeknek a negatív emisszióknak az elszámolhatósága az ETS-ben.

A szén-dioxidot hasznosító területek között szerepel például az italgyártás, vagy az élelmiszeripar. Magyarországon a szén-dioxid iránti kereslet növekedését elsősorban az élelmiszeripar és az italgyártás vezeti, de jelentős az ipari felhasználás is. Az élelmiszeripari felhasználók, sör- és üdítőital-gyártók számára talán a legfontosabb, hogy nem tartalmazza a káros, vegyipari eredetű szennyeződések, így garantált a magas élelmiszeripari követelményeknek megfelelő nagy gáztisztaság, továbbá a kitermelés nem függ egy vegyipari üzem termelési ütemétől, rugalmasan tud igazodni a nagyobb CO₂-igényhez is. A kérdőívekben hangsúlyosan szerepel, hogy jelenleg a szabályozás nem ismeri el kibocsátáscsökkentésként a CO₂ élelmiszeripari felhasználását. A javaslatok alapján ezt a szabályozásnak szükséges lenne felülvizsgálnia, mivel a szén-dioxid-ipar közeli jövőjét az új, CO₂-ot hasznosító alkalmazástechnológiák fejlesztése határozza meg, ezen belül elsősorban a környezetbarát „zöld” technológiáké, amelyek célja a különféle ipari folyamatok környezeti terhelésének csökkentése. Magyarországi viszonylatban új irányt jelenthet olyan nagyipari CO₂-kibocsátók megjelenése (pl. bioetanolt

gyártó vagy fermentáló üzem), ahol gazdaságossá válhat a CO₂ újrafeldolgozása, hozzájárulva az ipari CO₂-kibocsátás csökkentéséhez.

A kérdőívekből levonható következtetés, hogy a CCU/S technológiákban rejlő potenciál feltérképezése után a projektek tervezéséhez, kialakításához, kivitelezéséhez fejleszteni kell a CCU/S technológiákhoz kapcsolódó jogi szabályozást. Ezen belül különösen az engedélyezés folyamatának, részletes szabályainak kidolgozása lenne fejlesztendő oly módon, hogy essenek egyszerű, ésszerű határidőn belül lezajló és átlátható engedélyezési eljárásrend alá (pl. környezetvédelmi engedélyeztetés, építési engedélyeztetés, műszaki biztonsági engedélyeztetés során). Lehetőség szerint technológiaspecifikus szabályokat kell beépíteni a releváns jogszabályokba, amelyek könnyítik a jogalkalmazói, engedélyeztetési, tervezési eljárásokat. Mind az Egységes Környezethasználati Engedély (314/2005. (XII. 25.) Korm. rendelet), mind pedig az építési engedélyezés (253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet) esetében szükséges lenne kevésbé szigorú előírásokat alkalmazni az engedélyeztetés során. Egyes szektorokban az Egységes Környezethasználati Engedély (EKHE) megszerzése a projekt megindítását követő minimálisan 10-14 hónapot követően lehetséges. Ezt követően 18 hónapra köthető meg a fővállalkozói szerződés, mely időpont után - egyebektől függően - 30-36 hónap után kezdhető meg a tevékenység. Megfontolandó a klímavédelmi projektek soronkívüliségének, rövidebb engedélyeztetési eljárásának kialakítása.

Javasolt felülvizsgálni a geológiai tárolás hazai engedélyezési eljárását annak érdekében, hogy egyértelművé váljon, a különböző, egymással ellentétes célú használat miként engedélyezhető. Egy ilyen felülvizsgálat utáni módosítás biztosíthatná annak lehetőségét, hogy a bányászati tevékenységgel párhuzamosan lehessen geológiai tárolást is megvalósítani. A jelenlegi jogszabályok szerint a szén-dioxid tárolása nem minősül bányászati tevékenységnek, így bányatelken nem is végezhető. Amennyiben kimerülőben lévő földgázmező kerül bevonásra geológiai tárolásra, a hatályos szabályozás szerint ezt megelőzően a bányászati tevékenységet meg kell szüntetni az adott területen, mivel akadályt jelent, ha a bányavállalkozó adott esetben a bányászati tevékenységgel párhuzamosan geológiai tárolást is meg kíván valósítani. A kérdőívben több kibocsátó vállalat javasolta az ETS rendszer felülvizsgálatát is. Elsősorban az ingyenes kvóták kiosztásának kivezetését, valamint a kvótá-árak növelését említették, mint lehetséges kibocsátáscsökkentő ösztönzőket.

Magyarországon nincs a CCU/S széles körű megvalósítására vonatkozó stratégia, vannak azonban kapcsolódó dokumentumok, amelyek építenek a CCU/S-re. Ilyen például

Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája, amely 2030 után nagy mennyiségű, karbonszegény hidrogén előállításával számol. Elősegítené a CCU/S megoldások elterjedését, ha a Hidrogénstratégiában említett karbonszegény technológia számára piacot teremtené a jogalkotás, például a közlekedésben vagy a mezőgazdaságban. A szabályozás kialakításakor kívánatos a technológiasemleges beavatkozásokra helyezni a hangsúlyt úgy, hogy az ne jelentsen előnyt az egyes alternatíváknak a többi rovására. Megjegyzendő azonban, hogy mindezt úgy kívánatos megteremteni, hogy ne eredményezze a zöld hidrogénnel kapcsolatos törekvések visszaszorítását sem. A közeljövőben áthelyeződik a hangsúly olyan technológiai megoldások fejlesztésének támogatására, melyek a decentralizált zöld hidrogén előállítását gazdaságosan képesek biztosítani, illetve a különböző „negatív emissziós” technológiai megoldások fejlesztésének támogatására is. Ez utóbbi miatt célszerű lenne egységes, hivatalos elnevezési rendszert kialakítani a különböző előállítási módokra.

Az is szükséges, hogy a karbonszegény technológiával előállított termékeket (például hidrogén, műtrágya) meg lehessen különböztetni a hagyományosan előállított termékektől. Ezt olyan tanúsítványok bevezetésével lehetne elérni, amelyek igazolják az adott termékek eredetét, ellenőrizhető módon bizonyítják, hogy milyen forrásból származnak és mekkora az előállításukhoz kapcsolódó karbonkibocsátás (származási garanciák).

Annak ellenére, hogy a CCU/S-hez kapcsolódó keretrendszer alakítása és tartalma kapcsán meghatározó az Európai Unió szerepvállalása, a kutatás során azonosított beavatkozási pontként is értékelhető felvetések, mint például szabványok kialakítása, az engedélyeztetési folyamatok átgondolása, újraszabályozása kapcsán érdemes ezeket a kérdéseket a szabályozásszükséglet horizontjára helyezni. A kutatás eredményeként megállapítható, hogy az iparági szereplők nyitottak a szakmai kommunikációra, az érintettek szoros együttműködést szorgalmaznak. Megfontolandó Magyarországon is egy szakmai-koordinációs-kommunikációs keret létrehozatala, amely kellő platformként szolgál a szükséges szabályozói, technológiai és piaci ismeretek találkozásához.

2.2. A CCU/S alkalmazásának hazai elterjedését támogató javaslatok

A CCU/S technológiák kibővítik az országok és a vállalkozások számára rendelkezésre álló kibocsátáscsökkentési eszköztárat, valamint kiegészítik a már szélesebb körben elterjedt zöld megoldásokat. Alkalmazásuk ösztönzése a kibocsátáscsökkentés komplex megközelítésén keresztül célszerű. A klímasemlegesség eléréséhez a technológiasemleges megközelítés, a rendelkezésre álló alternatív zöld megoldások összehangolt kezelése, a közöttük lévő szinergiák kihasználása szükséges.

Jelenleg a CCU/S alkalmazások bevezetése a piaci szereplők számára nehezen megtérülő, kockázatos befektetésnek minősül. Ennek fő okai a magas beruházási és működési költségek, az elérhető technológiák alacsony ismertsége és elterjedtsége, a hiányzó CO₂-infrastruktúra, valamint a bizonytalan szabályozói környezet. Emiatt a CCU/S megoldások elterjedéséhez elengedhetetlen az állami beavatkozás és támogatás mind a CAPEX tekintetében a beruházások ösztönzéséhez, mind az OPEX tekintetében az üzemeltetés folytonosságának és biztonságának érdekében.

Magyarországon jelentős kibocsátáscsökkentés érhető el viszonylag kevés szereplő bevonásával és együttműködésével, hiszen a hazai CCU/S releváns kibocsátás kb. 70%-át mindösszesen 20 nagy kibocsátó adja (kb. 16 millió tonna évente). Továbbá ezek a szereplők a képességeiket és erőforrásaikat tekintve lefedik a teljes CCU/S értékláncot, így a CO₂-leválasztás, -szállítás, -hasznosítás és -tárolás terén is működnek meghatározó hazai vállalatok.

Az érintett piaci szereplők a velük készített interjúkban és kérdőívekben megnevezték a CCU/S megoldások hazai elterjedését támogató tényezőket. Előtérbe helyezték az állami szerepvállalás és koordináció fontosságát, a gazdasági ösztönzők, finanszírozási támogatások bevezetését, a CO₂-hasznosítás ösztönzését, a szükséges infrastruktúra kiépítését, a hosszútávon kiszámítható szabályozói környezetet, a mintaprojektek megvalósítását, valamint a különböző ágazatok egyedi adottságainak és helyzetének figyelembevételét.

A továbbiakban a hazai szereplők visszajelzései alapján mutatjuk be a főbb beavatkozási területeket, javaslatokat a CCU/S megoldások elterjedésének támogatására és a technológiákban rejlő gazdaságfejlesztési, üzleti, valamint kibocsátáscsökkentési potenciál kiaknázására. A beavatkozások egy része hazai kereteken belül kezelendő, más része uniós szintű megoldást igényel, mely esetekben lényeges a hazai érdekek alapos ismerete és képviselése az uniós jogalkotási folyamatban.

2.2.1. Hazai CCU/S stratégia fejlesztésének lépései

- CCU/S értékláncszereplők igényeinek részletes felmérése (finanszírozás, szabályozási környezet, technológiai szabványok, infrastrukturális követelmények, felelősségi körök)
- CCU/S elterjedését támogató üzleti modellek kialakítása (bevételek, gazdasági ösztönzők, szerepek és felelőségek meghatározása, kockázatok elosztása)
- Hazai CCU/S stratégiai célok kijelölése, megvalósítási akcióterv és ütemezés elkészítése
- Hazai CCU/S klaszterek azonosítása, a klaszterek kialakulását és fejlődését támogató program összeállítása és megvalósítása
- Hazai CCU/S stratégiai célok leképezése az egyes érintett ágazati stratégiákban és szakpolitikákban, valamint a kibocsátáscsökkentési és fenntarthatósági stratégiákban
- CCU/S szektorért felelős kormányzati szerv(ek) kijelölése/kialakítása
- Technológiasemlegesség kialakítása a kibocsátáscsökkentési stratégiákban és támogatási rendszerekben, mely az adott környezetben optimális zöld megoldás kiválasztását teszi lehetővé a piaci szereplők számára (pl. áttérés megújuló energiára, CCU/S alkalmazása, technológiaváltás közötti választás)

2.2.2. CCU/S infrastruktúra fejlesztése

- Vállalkozási platform kialakítása a CO₂-szállítási és -tárolási infrastruktúra fejlesztések összehangolása céljából (a kibocsátók, a technológiai szolgáltatók, a felhasználók, a szállítás és a tárolás megvalósítására képes szereplők részvételével)
- A piaci szereplők támogatása a CCU/S beruházási terveik összehangolásában, a szinergiák kiaknázása és a nagyobb potenciállal járó projektek támogatása érdekében
- Potenciális tároló helyszínek (különösen sós vizet akkumuláló) feltárásának támogatása, együttműködés a piaci szereplőkkel a kockázatok és költségek megosztása érdekében
- Konkrét tároló helyszínek alapos feltárásának támogatása
- CO₂-szállítási infrastruktúra kiépítésének koordinálása, beleértve a csővezetékes, vasúti és közúti szállítási megoldásokat is
- Csővezeték-létesítés könnyítése az engedélyeztetési folyamat és az adminisztratív kötelezettségek egyszerűsítésével
- Geológiai tároló-létesítés szabályozási akadályainak elhárítása, a bányászati tevékenységre vonatkozó szabályozás felülvizsgálata a CO₂-tárolás támogatása érdekében

2.2.3. CCU/S gazdasági ösztönzői

- Világos, átlátható, kiszámítható, megbízható és hosszútávú támogatást nyújtó gazdasági ösztönzők kialakítása
- Beruházásfinanszírozás támogatási rendszerének kialakítása, mely lehetővé teszi a piaci szereplők számára a hosszú megtérülési idővel rendelkező projektek megvalósítását
- Stabil pénzügyi működési támogatási rendszer és adózási keretek kialakítása, mely hosszútávon kiszámítható bevételeket nyújt a projektek megvalósítói számára (pl. állami támogatás, CfD rendszer, WACC prémium)

2.2.4. Szén-dioxid-felhasználói piac bővítése

- Alacsony kibocsátású termékek piacának megteremtése és fejlesztése (pl. alacsony karbonintenzitású építőanyagok és üzemanyagok felhasználására vonatkozó kvóták, alacsony kibocsátású hidrogén és műtrágya használatának megkövetelése)
- A carbon capture alapú CO₂ versenyképességének növelése, hasznosításának ösztönzése a bányászott CO₂-dal szemben (pl. kötelező felhasználási kvóta vagy adókedvezmény bevezetése a carbon capture alapú CO₂ esetén, karbonadó bevezetése a bányászott CO₂ esetén)
- Kibocsátáscsökkentési (zöld) tanúsítványok, termék-címkék bevezetése a CCU/S megoldásokkal előállított termékekre
- Az EU ETS rendszer felülvizsgálatának szorgalmazása a carbon capture alapú CO₂ felhasználásának elismertetése érdekében



2.2.5. CCU/S K+F+I tevékenységek bővítése, a nemzeti tudás és tapasztalatok bővítése

- K+F+I támogatási keretrendszer kialakítása, mely megbízható és hosszútávú támogatást nyújt a kutatás-fejlesztési tevékenységek, projektek számára a zöld átállás területén
- CCU/S pilot projektek kiválasztása és támogatása a Magyarország számára legfontosabb szektorokban, így módon szerezzve tapasztalatot nagyobb komplexitású projektek megvalósításához, valamint sikeres példát adva a piaci szereplők számára

2.2.6. Irányelvek, szabványok és szabályozások

- Megbízható szilárd európai szabályozási keret, kiszámítható hosszútávú fejlődési stratégiák kialakítása, amely hosszútávra lehetővé teszi a projekttervezést
- Egyértelmű kibocsátáscsökkentési célok kitűzése és elérésük támogatása akciótervek kialakításával és pénzügyi támogatással
- CCU/S terén élenjáró országok (pl. Norvégia) szabályozási keretrendszerének vizsgálata, hazai adaptáció lehetőségeinek felmérése
- Klímavédelmi projektek soronkívüliségének, rövidebb engedélyeztetési eljárásának kialakítása
- Elkerült CO₂-kibocsátás számítási módszertanának egységesítése, szabályozása és iránymutató készítése a szereplők számára
- Igény mutatkozik a CCU/S technológiai ajánlások és műszaki szabványok, biztonsági elvárások, valamint egységes útmutatók kidolgozására, amelyek elősegíthetik a technológiák szélesebb körű elterjedését

- Szabályozás kialakításakor a technológiasemleges beavatkozásokra helyezni a hangsúlyt úgy, hogy az ne jelent sen előnyt az egyes alternatíváknak a többi rovására
- Szén-dioxid tárolására vonatkozóan a meglévő jogszabályok kiigazítása, pontosítása

2.2.7. Az érdekelt felek bevonása, együttműködés és know-how terjesztése

- A CCU/S értékláncban érintett iparágak (kibocsátói, felhasználói, infrastrukturális, technológiai) közötti együttműködés elősegítése, koordinációs platform kialakítása
- CCU/S IPCEI projektlehetőségek felmérése, a kiválasztott projektek támogatása
- A CCU/S értéklánc szereplői közötti hosszútávú partnerségek kialakításának ösztönzése, támogatása

2.2.8. Társadalmi szempontok és a közvélemény támogatása, formálása

- CCU/S népszerűsítése és a társadalmi tudatosság növekedése tájékoztató kampányok lebonyolításával
- További, szélesebb körű tájékoztatás az azonosított klaszterek régióiban
- A CCU/S alkalmazások, különösen a tárolás kockázataival és azok kezelésével kapcsolatos nyílt kommunikáció
- Együttműködés a helyi hatóságokkal és közösségekkel a CCU/S beruházások kapcsán





Felhasznált irodalom

1. International Energy Agency (IEA). *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf (2020).
2. International Energy Agency (IEA). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. (2021).
3. *Summary Report on CCU/S Integration in Energy and Industrial Systems*. (2022).
4. Alsarhan, L. M., Alayyar, A. S., Alqahtani, N. B. & Khadary, N. H. Circular Carbon Economy (CCE): A Way to Invest CO₂ and Protect the Environment, a Review. *Sustainability* 13, 11625 (2021).
5. Zygierewicz A & Sanz S. *Renewable Energy Directive: Revision of Directive (EU) 2018/2001*. <https://euagenda.eu/upload/publications/eprs-bri2021662619-en.pdf> (2021).
6. Liese, P. *Revision of the EU Emission Trading System (ETS)*. [https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/carriage/revision-of-the-eu-emission-trading-system-\(ets\)/report?sid=6001](https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/carriage/revision-of-the-eu-emission-trading-system-(ets)/report?sid=6001) (2022).
7. REPowerEU: Európa megfizethető, biztonságos és fenntartható energiaellátásáért. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_hu (2022).
8. European Commission. Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1665 (2023).
9. Biro H, Aragonés P M, Nagell S L & Wendolowski M. *Untapped potential: linking the CEE region to European CCS initiatives*. <https://ccs4cee.eu/wp-content/uploads/2022/11/31-10-Bellona-Report-FINAL.pdf>.
10. *The potential for CCS and CCU in Europe*. (2019).
11. European Commission. What is the Innovation Fund? https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en?fbclid=IwAR2ccVpj-7d5AnHTVrk58tJzgNkfc2frxy8VxMQyyuMtVHm9DzurWpf2J2as.
12. Az EU Horizont Európa kutatási és innovációs keretprogramja. <https://nkfih.gov.hu/hivatalrol/nemzetkozi-kapcsolatok/horizont-europa> (2021).
13. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia 2020-2050*. <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/5/54/54e/54e01bf45e08607b21906196f75d836de9d-6cc47.pdf> (2020).
14. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve*. https://2015-2019.kormany.hu/download/b/40/c1000/Strategiak_20200116.zip#!DocumentBrowse.
15. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Magyarország Nemzeti Hidrogén-stratégiája*. <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/6/61/61a/61aa5f835c-cf3e726fb5795f766f3768f7f829c1.pdf> (2021).
16. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig: tiszta, okos, megfizethető energia*. https://2015-2019.kormany.hu/download/b/40/c1000/Strategiak_20200116.zip#!DocumentBrowse (2020).

17. *Putting CO2 to use: Creating value from emissions*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf (2019).
18. *Efficient MAN CCU/S*. <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q1-2023/Download/efficient-man-CCU/S/c76a4375-0ad3-4979-af06-4b9ed45956c4/Carbon-Capture-Utilization-Storage> (2022).
19. Van Dael, M. *Market study report CCU*. https://vito.be/sites/vito.be/files/2019-sct-r-1876_-_enop_wp5-t5.2_market_report_public.pdf (2018).
20. Cuéllar-Franca, R. M. & Azapagic, A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *J. CO2 Util.* 9, 82–102 (2015).
21. Deák, G. & Bartha, L. *A szén-dioxid befogás és tárolás*. (2009).
22. Khosroabadi, F., Aslani, A., Bekhrad, K. & Zolfaghari, Z. Analysis of Carbon Dioxide Capturing Technologies and their technology developments. *Clean. Eng. Technol.* 5, 100279 (2021).
23. Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A. & Rezaei, F. Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technol.* 5, 834–849 (2017).
24. Debarre, R., Gahlot, P., Grillet, C. & Plaisant, M. *Carbon Capture Utilization and Storage*. <https://www. Kearney.com/documents/17779499/17781864/CCU/S-2021+FactBook.pdf> (2021).
25. Global CSS Institute. *Technology Readiness and Costs of CO2*. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (2021).
26. Fan L S. *Chemical looping systems for fossil energy conversions*. (John Wiley & Sons, 2011).
27. Madejski, P., Chmiel, K., Subramanian, N. & Kuś, T. Methods and Techniques for CO2 Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. *Energies* 15, 887 (2022).
28. Global CCS Institute. *Technology Readiness and Costs of CO2*. at (2020).
29. Discepoli, G., Cinti, G., Desideri, U., PENCHINI, D. & Proietti, S. Carbon capture with molten carbonate fuel cells: Experimental tests and fuel cell performance assessment. *Int. J. Greenh. Gas Control* 9, 372–384 (2012).
30. Zero Emissions Platform, Z. *IEA Greenhouse The Costs of CO2 Capture, Transport and Storage*. (2011).
31. Zero Emissions Platform (ZEP). *A Trans-European CO2 Transportation Infrastructure for CCU/S: Opportunities & Challenges*. <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/A-Trans-European-CO2-Transportation-Infrastructure-for-CCU/S-Opportunities-Challenges-1.pdf> (2020).
32. International Energy Agency (IEA). *Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage: CCU/S in clean energy transitions*. (2020).
33. Turnau, S. et al. *Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies, including their regulatory aspects : final report*. (2019).
34. Baena-Moreno, F. M. et al. Carbon capture and utilization technologies: a literature review and recent advances. *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 41, 1403–1433 (2019).
35. Van Peteghem, L. et al. Towards new carbon-neutral food systems: Combining carbon capture and utilization with microbial protein production. *Bioresour. Technol.* 349, 126853 (2022).

36. Daneshvar, E., Wicker, R. J., Show, P.-L. & Bhatnagar, A. Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review. *Chem. Eng. J.* 427, 130884 (2022).
37. Chauvy, R., Dubois, L., Lybaert, P., Thomas, D. & De Weireld, G. Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide. *Appl. Energy* 260, 114249 (2020).
38. Huynh, H. L., Tucho, W. M., Yu, X. & Yu, Z. Synthetic natural gas production from CO₂ and renewable H₂: Towards large-scale production of Ni-Fe alloy catalysts for commercialization. *J. Clean. Prod.* 264, 121720 (2020).
39. Yang, N., Kang, F., Liu, Z., Ge, X. & Zhou, Y. An integrated CCU-plant scheme and assessment for conversion of captured CO₂ into methanol. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 17, 550–562 (2022).
40. Nyári, J., Magdeldin, M., Larmi, M., Järvinen, M. & Santasalo-Aarnio, A. Techno-economic barriers of an industrial-scale methanol CCU-plant. *J. CO₂ Util.* 39, 101166 (2020).
41. Lee, U. *et al.* Using waste <sc>CO₂</sc> from corn ethanol biorefineries for additional ethanol production: life cycle analysis. *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 15, 468–480 (2021).
42. Liu, A.-H., Yu, B. & He, L.-N. Catalytic conversion of carbon dioxide to carboxylic acid derivatives. *Greenh. Gases Sci. Technol.* 5, 17–33 (2015).
43. Murcia Valderrama, M. A., van Putten, R.-J. & Gruter, G.-J. M. The potential of oxalic – and glycolic acid based polyesters (review). Towards CO₂ as a feedstock (Carbon Capture and Utilization – CCU). *Eur. Polym. J.* 119, 445–468 (2019).
44. Iijima, T. & Yamaguchi, T. K₂CO₃-catalyzed direct synthesis of salicylic acid from phenol and supercritical CO₂. *Appl. Catal. A Gen.* 345, 12–17 (2008).
45. Li, X., Li, Q., ZHAO, Y., KANG, M. & WANG, J. Utilization of carbon dioxide in polyurethane. *J. Fuel Chem. Technol.* 50, 195–209 (2022).
46. Wacht, A., Kaluza, S. & Fleiger, P. Carbon Capture and Utilization in Cement Industry—Aspects of the Production of E-Fuels by Upcycling Carbon Dioxide. in 603–612 (2023). doi:10.1007/978-3-031-15602-1_44.
47. Langanke, J. *et al.* Carbon dioxide (CO₂) as sustainable feedstock for polyurethane production. *Green Chem.* 16, 1865–1870 (2014).
48. Alagi, P. *et al.* Carbon Dioxide-Based Polyols as Sustainable Feedstock of Thermoplastic Polyurethane for Corrosion-Resistant Metal Coating. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5, 3871–3881 (2017).
49. Yi, N., Unruangsri, J., Shaw, J. & Williams, C. K. Carbon dioxide capture and utilization: using dinuclear catalysts to prepare polycarbonates. *Faraday Discuss.* 183, 67–82 (2015).
50. Romanov, V. *et al.* Mineralization of Carbon Dioxide: A Literature Review. *ChemBioEng Rev.* 2, 231–256 (2015).
51. Pan, S.-Y. *et al.* An Innovative Approach to Integrated Carbon Mineralization and Waste Utilization: A Review. *Aerosol Air Qual. Res.* 15, 1072–1091 (2015).
52. Hills, C. D., Tripathi, N. & Carey, P. J. Mineralization Technology for Carbon Capture, Utilization, and Storage. *Front. Energy Res.* 8, (2020).
53. Zajac, M., Skoceck, J., Ben Haha, M. & Deja, J. CO₂ Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry. *Energies* 15, 3597 (2022).
54. CO₂ Value Europe. AGGRECO₂. <https://database.co2value.eu/projects/278>.

55. Air Liquide. Air Liquide to build two new hydrogen production units with carbon capture technology in Shanghai Chemical Industry Park. https://www.airliquide.com/sites/airliquide.com/files/2022-10/air-liquide-build-two-new-hydrogen-production-units-carbon-capture-technology-shanghai-chemical_62d65264eede0.pdf (2022).
56. Patel, S. Carbon Capture Begins at India's Largest Coal Power Plant. <https://www.powermag.com/carbon-capture-begins-at-indias-largest-coal-power-plant/> (2022).
57. Mitsubishi Heavy Industries. MHIENG's First Compact CO2 Capture System Goes into Commercial Operation at Biomass Power Plant in Hiroshima. <https://www.mhi.com/news/22063001.html> (2022).
58. NEFCO. Advancements in CCU/S offer new investment opportunities for impact investors – CRI commissions the world's first commercial CO2-to-methanol plant. <https://www.nefco.int/news/CCU/S-offer-investment-opportunities-for-impact-investors/> (2022).
59. Carbon Recycling International. The Shunli CO2-to-methanol plant: commercial scale production in China. <https://www.carbonrecycling.is/projects-shunli>.
60. Carbon Recycling International. The Finnfjord E-methanol Project: Commercial Scale E-methanol Production in Norway. <https://www.carbonrecycling.is/finnfjord-emethanol>.
61. Porthos CO2 Transport & Storage. Project. <https://www.porthosco2.nl/en/project/>.
62. Trendafilova P. Porthos Plant Granted \$2.4 Billion By The Dutch Government For Carbon Capture. (2021).
63. Biogradlija A. EPC awarded for world's first CCS at waste to energy plant in Norway CCU/S. (2022).
64. Országos Meteorológiai Szolgálat. Nemzeti Kibocsátási Leltár 1985-2020. at (2022).
65. Falusi, G., Szamosfalvi, Á., Vidó, M., Török, K. & Jencsel, H. A hazai földtani szerkezetek felmérése a szén-dioxid visszasajtolás szempontjából. *Magy. Tudomány* 450–458 (2011).
66. Kubus, P. *Szén-dioxid összegyűjtés és visszasajtolás realitása a hazai olajipar szempontjából.* (2010).
67. Szunyog I. A villamos erőműi szén-dioxid-kibocsátás föld alatti tárolásának lehetőségei Magyarországon. *Műszaki Földtudományi Közlemények* (2012).
68. United Nations Climate Change. *Hungary 2022 National Inventory Report (NIR)*. <https://unfccc.int/documents/461959> (2022).
69. European Commission. EU ETS Database. https://climate.ec.europa.eu/index_hu (2021).
70. Nemzeti Klímavédelmi Hatóság. Klímagáz Adatbázis.
71. Goldthorpe, W. & Avignon, L. A Systems Approach to Business Models and Public-private Risk Sharing for Large Scale CCS Deployment. *SSRN Electron. J.* (2021) doi:10.2139/ssrn.3816435.
72. SPE London Net Zero. Business Models for Carbon Capture, Utilisation and Storage. (2022).
73. Honegger, M. Toward the effective and fair funding of CO2 removal technologies. *Nat. Commun.* 14, 534 (2023).
74. Muslemani, H., Liang, X., Kaesehage, K. & Wilson, J. Business Models for Carbon Capture, Utilization and Storage Technologies in the Steel Sector: A Qualitative Multi-Method Study. *Processes* 8, 576 (2020).

75. International Centre for Sustainable Carbon. CCU/S Business Models and Incentives. (2022).
76. Collodi, G., Azzaro, G., Ferrari, N. & Santos, S. Techno-economic Evaluation of Deploying CCS in SMR Based Merchant H₂ Production with NG as Feedstock and Fuel. *Energy Procedia* 114, 2690–2712 (2017).
77. Roussanaly, S. *et al.* Techno-economic Analysis of MEA CO₂ Capture from a Cement Kiln – Impact of Steam Supply Scenario. *Energy Procedia* 114, 6229–6239 (2017).
78. Subraveti, S. G., Rodríguez Angel, E., Ramírez, A. & Roussanaly, S. Is Carbon Capture and Storage (CCS) Really So Expensive? An Analysis of Cascading Costs and CO₂ Emissions Reduction of Industrial CCS Implementation on the Construction of a Bridge. *Environ. Sci. Technol.* 57, 2595–2601 (2023).
79. Zero Emissions Platform (ZEP). *The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage - Post-demonstration CCS in the EU*. [https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO₂-Costs-Report.pdf](https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf) (2011).
80. Zero Emissions Platform (ZEP). *The Costs of CO₂ Capture: Post-demonstration CCS in the EU*. [http://www.graz-cycle.tugraz.at/pdfs/CO₂-Capture-Report.pdf](http://www.graz-cycle.tugraz.at/pdfs/CO2-Capture-Report.pdf).
81. Zero Emissions Platform (ZEP). *The Costs of CO₂ Transport: Post-Demonstration CCS in the EU*. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/119811/costs-co2-transport-post-demonstration-ccs-eu.pdf> (2011).
82. Zero Emissions Platform (ZEP). *The Costs of CO₂ Storage: Post-demonstration CCS in the EU*. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/119816/costs-co2-storage-post-demonstration-ccs-eu.pdf> (2013).
83. Eberle, U. *Renewables in Transport 2050: Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity*. (2016).
84. Adolf, J., Warnecke, W., Balzer, C. & Fu, X. *The Road to Sustainable Fuels for Zero-Emissions Mobility. Status of and Perspectives for Power-to-Liquids (PTL) Fuels*. https://www.researchgate.net/publication/350955491_The_Road_to_Sustainable_Fuels_for_Zero-Emissions_Mobility_Status_of_and_Perspectives_for_Power-to-Liquids_PTL_Fuels (2018).
85. IATA. Jet fuel price monitor. <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/> (2023).
86. Fernández-Dacosta, C. *et al.* Prospective techno-economic and environmental assessment of carbon capture at a refinery and CO₂ utilisation in polyol synthesis. *J. CO₂ Util.* 21, 405–422 (2017).
87. Magyar Közlöny. A Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia elfogadásáról. (2021).
88. Kengyel, Á. *Európai Unió Politikák*. (Akadémiai Kiadó, 2020).
89. Európai Parlament. Energiapolitika: általános elvek. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hu/sheet/68/energiapolitika-altalanos-elvek>.

