

Készült a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium gondozásában.

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

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

Szakmai tartalmat nem befolyásoló elütések javítva: 2023. november 21.

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

ISBN 978-963-306-975-2

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

3R	Reduce, Reuse, Recycle - csökkentés, újrafelhasználás, újrahasznosítás
4R	Reduce, Reuse, Recycle, Remove - csökkentés, újrafelhasználás, újrahasznosítás, eltávolítás
BAU	Business-as-Usual scenárió – szokásos üzletmenet forgatókönyv
BLM	Bureau of Land Management - földgazdálkodásért felelős hivatal
BY	Basis Year - bázisév
CAPEX	Capital Expenditure - beruházáshoz kapcsolódó költség
CC	Carbon Capture - szén-dioxid-leválasztás
CCaaS	Carbon Capture as a Service - CO ₂ -leválasztás nyújtható szolgáltatás formájában
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
CDR	Carbon Dioxide Reduction – szén-dioxid-csökkentés
CE	Circular Economy - körforgásos gazdaság
CEF	Connecting Europe Facility - Európai Hálózatfinanszírozási Eszköz
CEQ	Council on Environmental Quality - Környezetminőségi Tanács
CfD	Contract for Difference - különbözeti szerződés
CNG	Compressed Natural Gas - sűrített földgáz
COVID	Coronavirus Disease - Koronavírus-betegség
CVE	CO ₂ Value Europe
DAC	Direct Air Capture - levegőből történő közvetlen befogás
DCC	Direct Contact Cooler - közvetlen érintkezésű hőcserélő
DME	Dimethyl Ether - dimetil-éter
EAP	Environmental Action Programme - környezetvédelmi cselekvési program
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane - másodlagos szénágyas metánkitermelés
ÉCsT	Éghajlatváltozási Cselekvési Terv
EKHE	Egységes Környezethasználati Engedély
ENSZ	Egyesült Nemzetek Szövetsége
EOR	Enhanced Oil Recovery – másodlagos/harmadlagos olajkitermelés
EOV rendszer	Egységes Országos Vetületi Rendszer
EPS	Emission Performance Standard - kibocsátási teljesítménynorma
EU	Európai Unió
EU ETS	European Union Emissions Trading System - Európai Unió Kibocsátáskereskedelmi rendszere
EU Fit-for 55 csomag	Európai Unió „Irány az 55%!” intézkedéscsomagja
EUMSZ	Európai Unió működéséről szóló Szerződés

FCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change - Éghajlatváltozási Keretegyezmény
FECM	Department of Energy Office of Fossil Energy and Carbon Management - fosszilis energia- és szén-gazdálkodásért felelős hivatal
G	Glicerin
GCCSI	Global CCS Institute
HCS	Halasztott Cselekvés forgatókönyv
HRSNG	Heat Recovery Steam Generator - hővisszanyerő gőzfejlesztő
HTSE	High-Temperature Steam Electrolysis - magas hőmérsékletű gőzelektrolizáló
HUDEX	Hungarian Derivative Energy Exchange - Magyar Derivatív Energiatőzsde Zrt.
IAM	Integrated Assessment Models - egyesített értékelő modellezés
IEA	International Energy Agency - Nemzetközi Energia Ügynökség
IJA	Infrastructure Investment and Jobs Act - Infrastrukturális Beruházásokról és Foglalkoztatásról szóló törvény
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - Éghajlatváltozási Kormányközi Testület
IPCEI	Important Projects of Common European Interest - európai közérdeket képviselő stratégiai jelentőségű projektek
KCs	Korai Cselekvés forgatókönyv
K+F+I	Kutatás-fejlesztés és innováció
KO dob	Knock Out dob - kiütődob
LNG	Liquefied Natural Gas - cseppfolyósított földgáz
LPG	Liquefied Petroleum Gas - cseppfolyósított propán-bután gáz
MEA	Monoetanolamin
MPG	Monopropilén glikol
NDC	Nationally Determined Contribution - nemzetileg meghatározott hozzájárulás
NEKT	Nemzeti Energia és Klímaterv
NES	Nemzeti Energiastratégia
NÉS-2	Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia
NTFS	Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia
OCGT	Open Cycle Gas Turbine - nyílt ciklusú gázturbinás erőmű
OGCI	Oil and Gas Climate Initiative - Olaj- és Gázipari Klímavédelmi Kezdeményezés
O&M	Operation&Maintenance - üzemeltetés és karbantartás költsége
OPEX	Operational Expenditures - működési költség
ÖTK	Ölbe tett kéz forgatókönyv
PCI	Projects of Common Interest - közös érdekű projektek
PEM	Proton Exchange Membrane - protoncserélő membrán
PHMSA	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration - csővezetékek és veszélyes anyagok biztosításával foglalkozó szervezet
PMI	Projects of Mutual Interest - kölcsönös érdekű projektek
PO	Propilén-oxid
ppm	Parts per million - milliomod térfogatrés
PSA	Pressure Swing Adsorption - nyomás lengéses adszorpció
PTSA	Pressure and Thermal Swing Adsorption - nyomás-hőmérséklet lengéses adszorpció

RAB	Regulated Asset Base - elismert eszközérték alapú modell
RED	Renewable Energy Directive - Megújuló Energia Irányelv
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin - nem biológiai eredetű megújuló üzemanyagok
RRF	Recovery and Resilience Facility - Helyreállítási és Rezilienciaépítési Eszköz
RWGS	Reverse Water Gas Shift - fordított víz-gáz eltolási reakció
SAF	Sustainable Aviation Fuel - fenntartható repülőgép-üzemanyag
SCIPIG	Shanghai Chemical Industry Park Industrial Gases
SCOT	SMART CO ₂ Transformation - Okos CO ₂ Átmenet
SMR	Steam Methane Reforming – metán-gőzreformálás
TEN-E	Trans-European Networks for Energy – Transzeurópai Energiahálózatok
TRL	Technology Readiness Level - technológiai érettségi szint
TSA	Temperature Swing Adsorption - hőmérséklet lengéses adszorpció
ÜHG	Üvegházhatású gázok
VSA	Vacuum Swing Adsorption - vákuum lengéses adszorpció
WGS	Water Gas Shift – víz-gáz eltolás
WtE	Waste-to-Energy – hulladékok energetikai hasznosítása
ZEN	Zero Emission Network
ZEP	Zero Emissions Platform

Tartalomjegyzék

1.	Vezetői összefoglaló	11
2.	Bevezetés és problémafelvetés	13
2.1.	Bevezetés	13
2.2.	A klímaváltozás és a szén-dioxid kapcsolata	13
2.3.	Nemzetközi klímapolitika	14
2.4.	Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Hatodik Értékelő Jelentése	15
2.5.	Körforgásos szén-dioxid-gazdaság	16
3.	Pozicionálás	19
4.	Szakpolitikai háttér	21
4.1.	A CCU/S helyzete az Európai Unióban, kitekintéssel az USA-ra és Ázsiára	22
4.2.	Hazai energia- és klímastratégiák feltérképezése	35
5.	Szabályozási háttér Magyarországon	41
5.1.	A magyar kibocsátáskereskedelmi rendszer	41
5.2.	A szén-dioxid geológiai tárolásának jogszabályi alapja	42
6.	CCU/S technológiák áttekintése	45
6.1.	Szén-dioxid-(pont)források	45
6.2.	CC technológiák: szén-dioxid-befogás és -leválasztás	47
6.3.	Szén-dioxid-szállítás és -tárolás	52
6.4.	CCU technológiák	56
6.5.	CCU/S technológiákra vonatkozó K+F+I területek	65
6.6.	Nemzetközi use case-ek	66
7.	A CCU/S értéklánc hazai relevanciája	73
7.1.	Értékláncelemek mentén hazai adottságok / relevancia elemzése	73
7.2.	Hazai potenciális CCU/S értéklánc ábra és potenciális szereplők az egyes értékláncelemek esetében	77
8.	Hazai kibocsátók áttekintése, elemzése	81
8.1.	Hazai CCU/S releváns szén-dioxid-kibocsátás áttekintése	81
8.2.	Hazai TOP kibocsátók elemzése	91
8.3.	TOP kibocsátók kibocsátáscsökkentési törekvéseiről és CCU/S technológia iránti viszonyulásról szóló felmérés	99
9.	Hazai lehetséges CCU/S use case-ek	105
9.1.	Lehetséges hazai use case-ek definiálása	105
9.2.	Üzleti modell / monetizációs lehetőségek	122
10.	CCU/S megoldások business case kalkulációi	131
10.1.	Carbon capture – Szén-dioxid-befogási technológiák üzleti kalkulációja	131
10.2.	Szén-dioxid-szállítás üzleti kalkulációja	142
10.3.	Szén-dioxid-tárolás üzleti kalkulációja	144
10.4.	Carbon capture and utilization – Szén-dioxid-hasznosítási technológiák üzleti kalkulációja	148
11.	Összefoglalás	155
11.1.	CCU/S szerepe a klímasemlegesség elérésében	155

11.2.	Szakpolitikai háttér	155
11.3.	CCU/S technológiák áttekintése	156
11.4.	Hazai relevancia	160
11.5.	Hazai kibocsátók áttekintése	162
11.6.	Hazai TOP kibocsátók elemzése	163
11.7.	Hazai lehetséges CCU/S use case-ek.	163
11.8.	CCU/S megoldások business case kalkulációja.	164
12.	Javaslatétel.	167
12.1.	Szakpolitikai és szabályozási javaslatok.	167
12.2.	A CCU/S alkalmazásának hazai elterjedését támogató javaslatok.	169
	Felhasznált irodalom.	173
	Melléklet.	186





1

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

1. Vezetői összefoglaló

Jelen Fehér Könyv a szén-dioxid-leválasztás, -hasznosítás és -tárolás (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCU/S) technológiáinak témakörét járja körül, elsődleges célja pedig a hazai CCU/S ipar szakmai megalapozása. A dokumentum kiindulási alapot szolgáltathat továbbá a CCU/S technológiák hazai energia- és klímastratégiákba történő hatékonyabb beépítésébe, valamint segít a gazdasági szereplőknek a számukra legmegfelelőbb dekarbonizációs stratégia kidolgozásában. A Fehér Könyv egyfajta vitaindítóként és vitaalapként szolgál annak érdekében, hogy az érintett felek között kialakuljon a közös alapelvek és kívánatos fejlődési irányok meghatározását célzó kommunikáció.

A globális iparági áttekintés eredményeképpen megállapítottuk, hogy a CCU/S jelentős stratégiai értéket hordoz, és legalább négy területen játszik alapvető fontosságú szerepet a globális energiarendszerek nettó nulla kibocsátásra való átállásában: (i) a meglévő energiatermelő üzemek kibocsátásának kezelése (retrofit), (ii) az alacsony CO₂-kibocsátású kék hidrogéntermelés támogatása, (iii) megoldás a nehezen dekarbonizálható iparágak (cementgyártás, acélgégyártás, vegyipar) számára, (iv) valamint a CO₂ eltávolítása a légkörből annak érdekében, hogy az elkerülhetetlen vagy közvetlenül nem csökkenthető kibocsátásokat ellensúlyozzák. Ha élünk azzal a nem túl elrugaskodott feltételezéssel, hogy az elkövetkező évtizedekben is szénalapú lesz az életünk (élelmiszer, műanyagok, szerkezeti anyagok, akkumulátorok stb.), akkor célszerű erőforrásként tekinteni a CO₂-ra és nem valami hulladékként, amit a szőnyeg alá kell söpölni.

Azonosítottuk a legnagyobb hazai CO₂-kibocsátókat, és annak érdekében, hogy a hazai kulcsszereplők CCU/S technológiához való viszonyulását, jövőbeli terveit és

dekarbonizációs elképzeléseiket megismerjük, kérdőíves felmérést végeztünk a TOP100 hazai CO₂-kibocsátó körében. A TOP20 kibocsátót mélyinterjúra is felkértük, és 16-an közülük éltek is ezzel a lehetőséggel (ezen kibocsátók lefedik a ETS hatálya alá eső kibocsátás kb. 86%-át). Megállapítottuk, 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 erőforrásait tekintve lefedik a teljes CCU/S értékláncot, a CO₂-leválasztás, -szállítás, -hasznosítás és -tárolás terén is működnek meghatározó hazai vállalatok. Bemutattuk a legfontosabb business case-eket és monetizációs stratégiákat a legnagyobb hazai szereplők aspektusából. Elemeztük a szabályozási környezetet, amely rendkívül szövevényes és számos vonatkozásban idejétmúlt, melynek köszönhetően nem segíti a műszaki-gazdasági szempontból legjobb megoldások elterjedését. Számos szakpolitikai és szabályozási javaslatot is megfogalmaztunk arra vonatkozóan, hogyan lehetne ezen javítani.

Azt is megállapítottuk, hogy a kutatás-fejlesztés és innováció kiemelt fontosságú az új technológiák kifejlesztésében és megvalósításában. A hazai igények és az iparfejlesztési lehetőségek kihasználása érdekében fontos a CCU/S pilot projektek mihamarabbi kiválasztása és támogatása a Magyarország számára legfontosabb szektorokban, így módon szereve tapasztalatot nagyobb komplexitású projektek megvalósításához, valamint sikeres példát adva a piaci szereplők számára.

Végül összefoglaltuk, hogy a Fehér Könyv megállapításai milyen további lépéseken keresztül fordíthatók át stratégiává annak érdekében, hogy a magyar gazdasági szereplők a dinamikus növekvő CCU/S ipar nyertesei lehessenek.



2 BEVEZETÉS ÉS PROBLÉMAFELVETÉS



2. Bevezetés és problémafelvetés

2.1. Bevezetés

A Fehér Könyv, mint az európai uniós jog- és stratégiaalkotás folyamataiban gyakran használt megalapozó dokumentum, általában olyan globális problémákra reflektál, melyek kezelésében egységes és összehangolt (sokszor nemzetközi) cselekvési tervre van szükség. Jelen Fehér Könyv a szén-dioxid-leválasztási, -hasznosítási és -tárolási (CCU/S) technológiák témakörét járja körül, elsődleges célja pedig a hazai CCU/S ipar szakmai megalapozása. A dokumentum továbbá kiindulási alapot szolgáltat a CCU/S technológiák hazai energia- és klímastratégiákba történő hatékonyabb beépítésébe, 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. Mivel a CCU/S technológiák a különböző típusú, fejlettségű és elterjedtségű megoldások mellett szerepelnek a dekarbonizációs eszköztárban, alkalmazásuk egy meglehetősen komplex környezetben történik technológiai, gazdasági és jogi szempontból egyaránt.

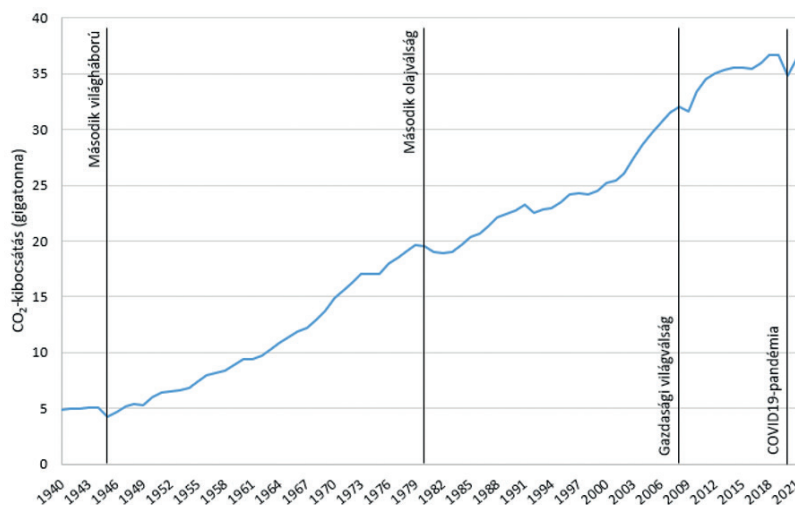
A Fehér Könyv természetes korlátja, hogy nem képes az összes felmerülő problémát feloldani és mindenre megoldást kínálni, hiszen sok fontos kérdés megválaszolásához egységes, nemzetközi (főként Európai Unió) szintű szabályozási keret és részletes kutatásra van szükség. Jelen Fehér Könyv egyfajta vitaindítónak és vitaalapként szolgál annak érdekében, hogy az érintett felek között kialakuljon a közös alapelvek és kívánatos fejlődési irányok meghatározását célzó kommunikáció. Emellett lényeges az is, hogy tisztázzódjanak azon kérdéskörök és vélemények, melyek

akár konfliktusforrást jelenthetnek az érdekeltek körében. Mindezek szükségesek ahhoz, hogy Magyarországon is kezdetét vegye a CCU/S technológiák széleskörű elterjedése.

2.2. A klímaváltozás és a szén-dioxid kapcsolata

A globális felmelegedés problémaköre évtizedek óta az egyik legsúlyosabb és egyben legsürgetőbb kérdés, melynek következményeinek ellensúlyozása érdekében világszintű összefogásra van szükség. A kihívás hatékony kezelése és a probléma mérséklésére irányuló stratégiák kidolgozása érdekében fel kell tárni a kiváltó okokat, és meg kell érteni a háttérben megbúvó összefüggéseket. Az üvegházhatású gázok (ÜHG-k), mint például a szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid és egyéb ipari gázok, az elmúlt évszázad feljegyzései alapján egyre nagyobb koncentrációban vannak jelen légkörünkben, az éves kibocsátott mennyiségük 2019-re pedig csaknem 50 gigatonna CO₂ egyenérték volt.¹ Az ÜHG-k közül kiemelkedik a szén-dioxid, melynek légköri koncentrációja az elmúlt 10 ezer évben az ipari forradalom kezdetéig közel állandó szinten volt, kb. 280 milli-omod térfogatrész (parts per million, ppm). Ezt követően ez az érték folyamatosan növekedett, mára elérte a 415 ppm szintet.²

Jóllehet a 2019-ben kezdődő COVID-járvány és az azzal járó globális lezárások visszavetették az ipari tevékenységet, a leállásnak köszönhető kibocsátási visszaesés nem maradt tartós.³ Az elmúlt csaknem egy évszázad idősoros adatait vizsgálva megállapítható, hogy a globális szén-dioxid-kibocsátás mértéke több mint nyolcszorosára nőtt, a kibocsátásbeli jelentősebb visszaesések pedig jellemzően a globális gazdaságot érintő hátrányos események hatására következtek be (1. ábra).



1. ábra A globális szén-dioxid-kibocsátás éves mennyisége, 1940-2021, [°] alapján saját szerkesztés.

A környezeti szempontok mellett az ellátásbiztonság kérdése is hangsúlyos. Az energiahordozók iránti megnövekedett kereslet az energiaárak emelkedését eredményezte világszerte.⁴ A globális energiakereskedelem sebezhetősége és a fosszilis tüzelőanyagár-ingadozás miatt ismételten megerősítést nyert az az elgondolás, miszerint mihamarabb szükséges átállni a hagyományos fosszilis alapú gazdaságunkról kiszámíthatóbb, olcsó és emellett alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiarendszerekre. Minden iparágban, különösen azokban, amelyek nagy mennyiségű energiát fogyasztanak, törekedniük kell alacsony szén-dioxid-kibocsátású lehetőségek mielőbbi alkalmazására.

2.3. Nemzetközi klímapolitika

A nemzetközi környezetvédelmi jog az államközi együttműködés eredményeképpen olyan globális környezeti kérdéseket vont szabályozási körébe, amelyek minden állam és azok régiói számára is kiemelt jelentőséggel bírnak. A környezetpolitika kialakítása iránti igény az 1960-as években kezdődött el, amikor a nemzetközi közösség is felismerte a környezeti problémák fenyegető hatásait a fejlődésre és az emberi életre. A nemzetközi szinten történő párbeszéd és az egyes instrumentumok – nemzetközi szerződések, de elsősorban *soft law* (a fogalom a „4. Szakpolitikai háttér” fejezetben kerül részletesebb kifejtésre) jellegű dokumentumok – elfogadása az ENSZ (Egyesült Nemzetek Szövetsége) létrehozását követően, így valójában a II. világháború után kezdődött el. A nemzetközi környezetjogi szabályok vagy a kiemelt természeti/környezeti értékek védelmét biztosítják (pl. világörökségvédelem, biológiai sokféleség védelme, klasszikus természetvédelem), vagy a globális környezeti problémák elleni küzdelmet támogatják (gondolva a klímaváltozásra, a globális felmelegedésre, a légszennyezettségre).⁶ A környezetpolitika esetében nem egyes területeken megmutatózó, elszigetelt és eseti lépésekről beszélünk, hanem a környezet egészére és annak alkotóelemire, valamint az emberi cselekvésekre vonatkozó széles körű szabályozási területről.⁷ A nemzetközi klímapolitika a nemzetközi tanácskozásokon és különös tekintettel az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményéhez kötődő részes felek konferenciáin elfogadott megállapodásokon nyugszik.

Az éghajlatváltozás elleni globális küzdelemben kiemelkedő jelentőséggel bírt a 2015-ben aláírt és 2016-ban hatályba lépett klímaváltozásról szóló Párizsi Megállapodás. Az egyezmény jelentősége többek között abban rejlik, hogy a korábbiakkal ellentétben mind a fejlett, mind pedig a fejlődő országok számára kötelezettségeket fogalmazott meg ÜHG-kibocsátásuk szabályozására. Ugyanakkor, az Egyezmény fontos elvként tekint a szolidaritásra, így a fejlett

államok támogatják a fejlődő államokban az éghajlatváltozás elleni küzdelmet, különös tekintettel a reziliencia kialakítása érdekében.

A kormányok abban állapodtak meg, hogy a globális éves átlaghőmérséklet emelkedését az iparosodást megelőző szinthez képest jóval 2 °C alatt tartják, és erőfeszítéseket tesznek annak érdekében, hogy az emelkedés mindössze 1,5 °C legyen. 2050-ig egyensúlyba hozzák a kibocsátás mértékét a természet ÜHG-megkötő képességével, elérve ezáltal a karbonsemleges globális gazdaság létrejöttét. Bár a megállapodás aláírása idején fontos mérföldkőnek számított, a benne foglalt vállalások teljesítése továbbra sem elegendő ahhoz, hogy a kitűzött céloknak eleget tegyenek. Ennek okán a 2020 után életbe lépő vállalások ötvenkénti felülvizsgálatakor a korábbi Nemzetileg Meghatározott Hozzájárulásokhoz (Nationally Determined Contribution, NDC) képest új, ambiciózusabb célokat kell megfogalmazni.



2.4. Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Hatodik Értékelő Jelentése

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) rendszeresen készít összefoglaló tanulmányokat, és végez értékelést az éghajlatváltozással kapcsolatos legfrissebb tudományos eredményekről, valamint megoldási lehetőségeket is ajánl a felmerülő problémák kezelésére.⁸ A szervezet ezekkel a jelentésekkel kívánja felhívni a világ döntéshozóinak figyelmét a globális változások mértékére. Már az első, 1990-ben kiadott Értékelő Jelentés is bizonyította a rohamléptékű globális környezeti változások tényét, melynek hatására az ENSZ tagállamok 1992-ben elfogadták az Éghajlatváltozási Keretegyezményt (United Nations Framework Convention on Climate Change, FCCC). Jelentőségét az is mutatja, hogy a mai napig ez biztosítja a

klímátárgyalások (és a Párizsi Klímaegyezmény) nemzetközi keretét.

Az IPCC 2022-ben megjelent Hatodik Értékelő Jelentésének harmadik aljelentése (IPCC AR6 WG3)⁹ szerint a Párizsi Klímaegyezményt aláíró országok tervezett nemzeti hozzájárulásai nem megfelelő mértékűek, a benne foglalt kötelezettségvállalások túl széles skálán mozognak és nem elegendők, így a jelenlegi NDC-k nem járulnak hozzá kellőképpen a Klímaegyezményben kitűzött célok eléréséhez. Ebben főként az energiaszektor és az ipar érintett, ahol jelentős átalakulásra lesz szükség, beleértve a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának számottevő csökkentését, az alacsony kibocsátású energiaforrások alkalmazását, valamint az energiahatékonyság és -megtakarítás növelését.¹⁰

A Jelentés azonban azt is kiemeli, hogy sok országban valóban számos intézkedést hoznak az éghajlatváltozás



mérséklésének érdekében, melyek egy része igen hatékonyan bizonyul. Javaslatuk alapján szükség volna ezek kibővítésére, igazságos és szélesebb körű alkalmazására, hiszen ezek által jelentős kibocsátáscsökkenést lehetne elérni.

2.5. Körforgásos szén-dioxid-gazdaság

A klímacélok elérése érdekében 2050-re a globális gazdaságnak teljeskörű átalakuláson kell keresztülmennie, amelyhez szükség van a modern technológiákat alkalmazó fejlett ipari folyamatok széles körben történő elterjesztésére. Amellett, hogy a megújuló energiaforrások és technológiai újítások használatával csökkentjük a CO₂-kibocsátás mértékét, a Zöld Megállapodásban említett körforgásos gazdasági (Circular Economy, CE) modell alkalmazása is komoly szerepet játszik a klímaváltozás hosszútávú, káros hatásainak megelőzésében.¹¹ A CE a hagyományos, lineáris gazdasági modellel szemben egy olyan modell, amelynek célja az anyagok újrahasznosításának elősegítése, amely által elérhető a gazdasági növekedés fenntartása a nem megújuló erőforrások felhasználása nélkül.⁴ Ennek mintájára a körforgásos szén-dioxid-gazdaság (Circular Carbon Economy, CCE), mely a szén-dioxid segítségével érné el a fenntartható gazdasági növekedést, alapvető szerepet játszhat a klímastabilizáció elérésében is. A körforgásos szén-dioxid-gazdaság 4R (Reduce, Reuse, Recycle, Remove) modellje abban különbözik a körforgásos gazdaság 3R (Reduce, Reuse, Recycle) modelljétől, hogy a csökkentés,

újrafelhasználás és újrahasznosítás mellett figyelmet fordít egy negyedik komponensre, a CO₂ eltávolítására is (2. ábra).

Csökkentés (Reduce):

Olyan módszerek használata, amelyek csökkentik a szén-dioxid-kibocsátást. Az energiahatékonyság növelésével - mind a kínálat, mind a kereslet tekintetében - csökkenthető az energiafogyasztás és az ahhoz kapcsolódó kibocsátott szén-dioxid mennyisége.

Újrafelhasználás (Reuse):

A CO₂ újrafelhasználása azt jelenti, hogy a CO₂ nem lép kémiai reakcióba, eredeti formájában átalakítás nélkül hasznosítják. Számos iparág közvetlenül hasznosítja a szén-dioxidot akár gáz (pl. szénsavasítás), akár folyékony (pl. hűtőfolyadék) halmazállapotban.^{13,14}

Újrahasznosítás (Recycle):

A CO₂ kémiai reakciók által új, gazdaságilag is előnyös anyagokká alakítható át. Az újrahasznosítás a természet szénkörforgásában is megjelenik, például a növények, a talaj és az óceánok működése során, amelyek kivonják a légkörből a CO₂-ot, mely aztán bomlás vagy égés által újra felszabadul.

Eltávolítás (Remove):

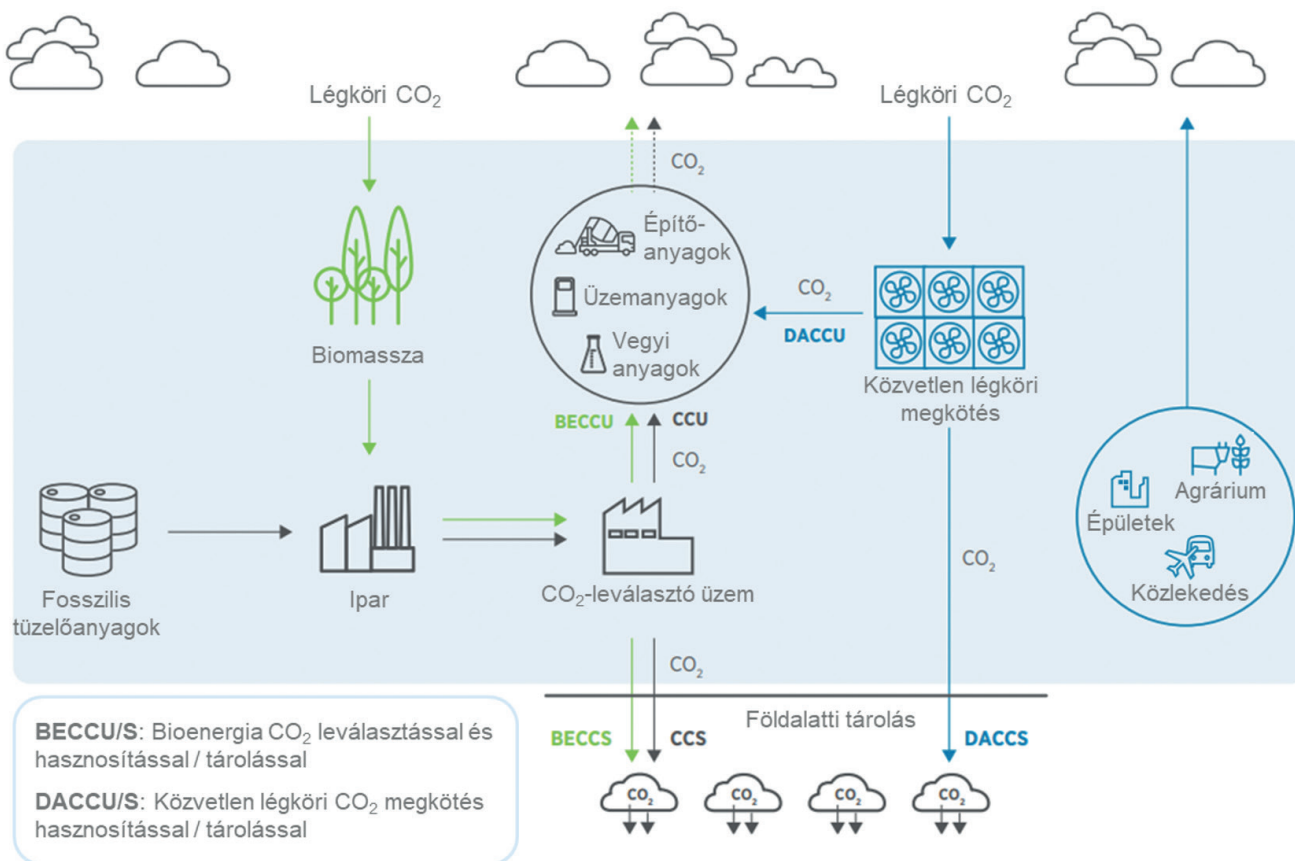
A szén-dioxid eltávolítása a légkörből, és annak tárolása. A CO₂ közvetlenül leválasztható az ipari folyamatok során azok kibocsátási helyszínén, illetve a levegőből is. Ezen eltávolítási megoldások alkalmasak a szénkörforgás lezárására.



2. ábra A körforgásos szén-dioxid-gazdaság négy eleme (4R),^[12] alapján saját szerkesztés.

A gazdaság zöld átállása során, valamint egy fenntartható és klímasemleges gazdaságban is szükséges a szén-dioxid folyamatos rendelkezésre állása, mivel a CO₂ a mezőgazdaság és számos ipari folyamat fontos alapanyaga. A körforgásos szén-dioxid-gazdaság kialakítása a zöld átállás során lehetőséget ad a kibocsátáscsökkentésre, a klímasemleges jövőben pedig fenntartható módon biztosítja a CO₂, mint alapanyag, hozzáférhetőségét (3. ábra). Ehhez kulcsfontosságú a CCU/S technológiák elterjedése, mely

szükségtelemé teszi a szén-dioxid kitermelését, és lehetővé teszi a nem elkerülhető kibocsátás megkötését, a CO₂ változatos ipari hasznosítását, valamint a tartós tároláson keresztül a klímaváltozás hatásainak visszafordítását. A fenntartható jövőben a leválasztási technológiákkal és közvetlen légköri megkötéssel befogott CO₂ számos értékes termék (pl. szintetikus üzemanyagok, építőanyagok, vegyi anyagok) előállítására kerül, így mozdítva elő a gazdaság klímasemleges működését.



3. ábra Körforgásos szén-dioxid-gazdaság, [15] alapján saját szerkesztés.

3

POZICIONÁLÁS



3. Pozicionálás

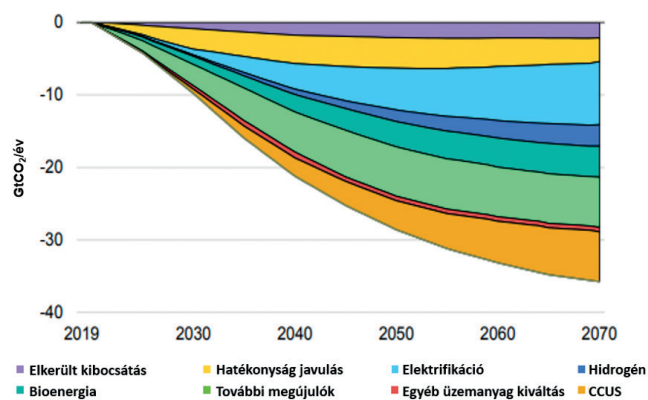
A megfogalmazott klímapolitikai célok elérése, a nettó nulla kibocsátású energiarendszerre való átállás megköveteli az energiatermelés és -felhasználás alapvető átalakítását, melyhez nem áll rendelkezésre egyetlen, mindenre egyformán jó megoldás, így ez csak a technológiák széles skálájának alkalmazásával valósítható meg. A hatékonyságnövelés, az elektrifikáció, a hidrogén és a fenntartható bioenergia mellett a CCU/S is fontos szerepet játszik, hiszen olyan technológiákat foglal magába, amelyek segítségével közvetlenül hozzájárul a kulcsfontosságú ágazatok kibocsátásának csökkentéséhez, valamint a CO₂ „kivonásához”, az elkerülhetetlen kibocsátások ellensúlyozása érdekében – amely a nettó nulla kibocsátási célok egyik kritikus pontja.^{16,17}

A CCU/S jelentős stratégiai értéket hordoz, négy fő területen játszik alapvető fontosságú szerepet a globális energiarendszerek nettó nulla kibocsátásra való átállásában: (i) a meglévő energiatermelő eszközök kibocsátásának kezelése, (ii) az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogéntermelés platformjának biztosítása, (iii) megoldás a nehezen dekarbonizálható ágazatok számára, (iv) valamint a CO₂ eltávolítása a légkörből annak érdekében, hogy az elkerülhetetlen vagy közvetlenül nem csökkenthető kibocsátásokat ellensúlyozzák.

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 üzemelhessenek alacsonyabb kapacitáskihasználtság mellett vagy alternatív üzemanyagokkal. A CO₂-leválasztó berendezések utólagos felszerelése (retrofit) lehetővé teszi a meglévő üzemek, valamint a kapcsolódó infrastruktúra és ellátási láncok további működését jelentősen csökkentett kibocsátás mellett. Mindez hozzájárulhat a foglalkoztatás és a gazdasági jólét megőrzéséhez azokban a régiókban, amelyek kibocsátásintenzív iparra támaszkodnak.

A nettó nulla kibocsátási célok eléréséhez minden ágazatban kezelni kell a keletkező kibocsátásokat. A megújuló energiaforrások által termelt villamosenergiával a jelenlegi energiahordozók részben kiválthatók lehetnek, azonban számos ipari folyamat nehezen vagy egyáltalán nem helyezhető át elektromos alapokra. Ilyen terület például a nehézipar és a távolsági szállítási módok, beleértve a légi közlekedést, a közúti árufuvarozást és a tengeri szállítást. Ezekben az ágazatokban a fosszilis tüzelőanyagok alternatívái vagy

megfizethetetlenül drágák, mint például az extrém magas hő előállítására szolgáló villamos energia, vagy nem praktikusak, mint például az elektromos meghajtású repülőgépek vagy tankerhajók. Egyes ágazatok esetében pedig egyszerűen nem lehetséges a nettó nulla kibocsátás elérése CCU/S nélkül. A cementgyártás kiváló példa erre, hiszen jelentős folyamatkibocsátással jár, amely nem a fosszilis tüzelőanyagok használatához kapcsolódik, így mivel nincs egyéb bizonyított alternatív cementgyártási mód, a CCU/S az egyetlen lehetőség a dekarbonizációra. Emellett például a vas- és acéliparban a CCU/S technológiákon alapuló gyártási módok jelenleg a legfejlettebb és legolcsóbb alacsony szén-dioxid-kibocsátású megoldások az új acél előállítására. A Nemzetközi Energia Ügynökség (International Energy Agency, IEA) fenntartható fejlődési forgatókönyvében (Sustainable Development Scenario) 2070-re vetítik az energiaszektor globális CO₂-kibocsátásának nettó nullára való csökkenését, melyben jelentős szerepet játszanak a CCU/S technológiák. Azon forgatókönyvhöz képest, amely a jelenlegi nemzeti energia- és éghajlat-politikai kötelezettségvállalások figyelembevételével kalkulál (Stated Policies Scenario), a CCU/S technológiai megoldások összességében a globális CO₂-kibocsátás kumulált csökkentésének közel 15%-át teszik ki (4. ábra). A technológia fejlődésével, a költségek csökkenésével és az egyéb olcsóbb csökkentési lehetőségek kimerülésével a CCU/S kibocsátáscsökkentéshez való hozzájárulása növekedni fog az idő múlásával.



4. ábra A globális energiaszektor CO₂-kibocsátásának csökkentése intézkedésenként 2019-2070, [18] alapján saját szerkesztés.

4 SZAKPOLITIKAI HÁTTÉR



4. Szakpolitikai háttér

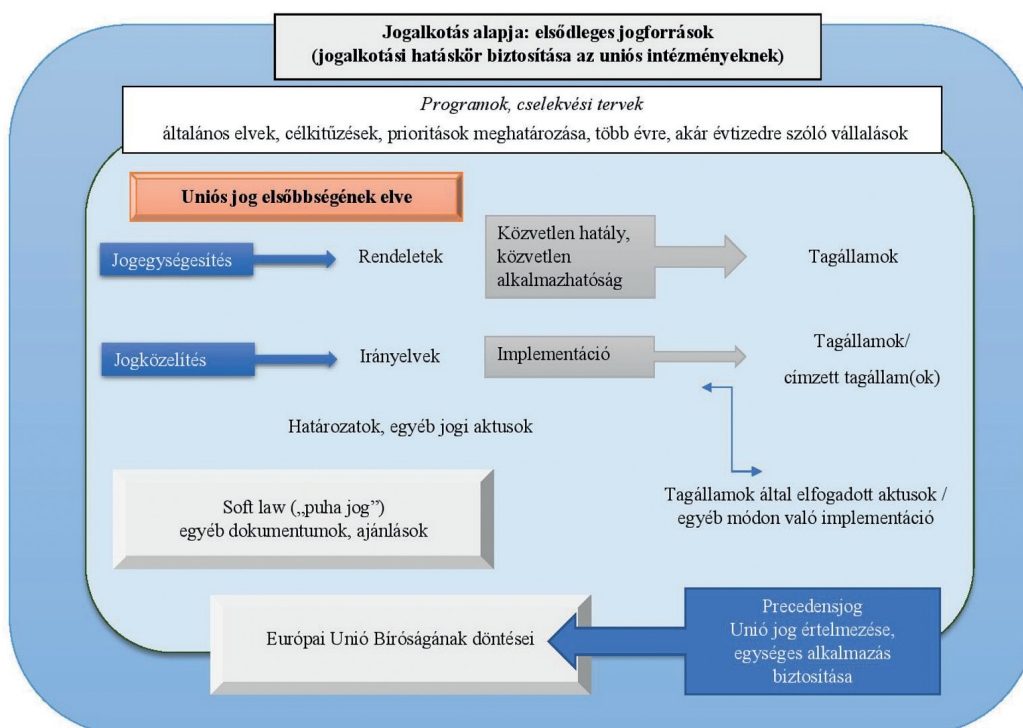
Az Európai Unió (EU) környezetpolitikája kiterjedt jogi alapokon nyugszik, amelyeket számos stratégia és kiterjedt *soft law* jellegű szabályozás egészít ki. Az uniós jogrendben a *soft law* jellegű, kötelező erővel nem bíró forrásoknak kiemelt jelentősége lehet, azok változatos formát öltenek.¹⁹ Általános megközelítésben a *soft law*, vagyis puha jog kifejezés többféle jelentéstartalommal is használatos, az egyes dokumentumok elnevezése is változatos. Elsősorban olyan jogot érthetünk puha jog alatt, amely nem kötelező. Másodsorban, a „*soft law*” „enyhébben kötelező” szabályokat is jelenthet, ha az egyébként jognak tekinthető szabály tartalma még nem alakult ki, vagy kétséges, kivel szemben kellene alkalmazni vagy akár a két kritérium együttesen áll fenn. Buza László a nemzetközi jog „nem teljes értékű szabályait” „programjellegű normáknak” nevezi, amelyek idővel teljes értékű szabályokká válnak, de a jogalkotás egyelőre kezdeti fázisban van, és a „vázra” a konkrét szabályok később épülnek majd fel.^{20,21} A *soft law* instrumentumok egy része nemzetközi szervezetek keretében kerül megállapításra, azok számos mechanizmust alakítanak ki az egyébként nem kötelező formában elfogadott cselekvési tervek megvalósításának felügyeletére és ellenőrzésére. Ezzel pedig gyakorlatilag irrelevánssá válik, hogy az adott forrást egyébként puha jogként fogadták el.²² Különösen hangsúlyos a szektorális környezeti szabályozás, amely gyakorlatilag átfogja a környezeti elemeket és az

azokat szennyező vagy veszélyeztető emberi cselekvést. Becslések alapján a teljes uniós joganyag mintegy 12-14 százalékát teszi ki a környezetvédelmi szabályozás.²³ A tagállami környezetvédelem hátterét is jelentős részben, csaknem 80%-ban biztosítja az uniós jog. Erre enged következtetni a Bizottság által indított kötelezettségszegési eljárások magas aránya is, az összes ügy csaknem egyötöde környezeti tárgyú.

Jogforrási hierarchia az Európai Unióban

Az uniós jog elsőbbségének elve (supremacy, primauté) magába foglalja annak tilalmát, hogy a tagállamok az uniós joggal ellentétes, illetve az EU kizárólagos hatáskörébe tartozó, illetve az uniós jog számára „fenntartott” területeken jogot alkossanak. Az uniós jog elsőbbségének elve szerint, ha a tagállami bíróság által alkalmazandó uniós jogszabály ütközik a tagállami jogszabállyal, akkor a bíróságnak az uniós joggal ellentétes tagállami jogot „félre kell tenni”, nem alkalmazhatja (Duty to Disapply, inapplicable de plein droit). Az elv továbbá azt is magába foglalja, hogy a bíróságnak ilyen esetben nem kell kérnie és nem kell megvárnia, hogy a nemzeti jogrendben az ilyenkor – tehát jogszabályok ütközése esetén – egyébként szokásos eljárást lefolytassák, esetleg a kérdésben előzetesen döntést hozzon az Európai Bíróság.²⁴

Az uniós jogforrási hierarchiában legmagasabb szinten az elsődleges jogforrások helyezkednek el (az EU alapító szerződésai, azok módosításai és az Alapjogi Charta) (5. ábra).



5. ábra A jogalkotás alapja: elsődleges jogforrások az Európai Unióban, saját szerkesztés.

Az EUMSZ (Európai Unió működéséről szóló Szerződés) 11. és 191–193. cikke alapján az EU a környezetpolitika minden területén – a lég- és vízszennyezés, a hulladékgazdálkodás és az éghajlatváltozás terén is – rendelkezik hatáskörrel. A másodlagos jogforrásokat az EU jogalkotási hatáskörrel rendelkező intézményei és szervei fogadják el, a jogszabályok elfogadására irányuló különböző eljárásokban (ezek lehetnek jogalkotási [rendes és különleges] és nem jogalkotási eljárások). Az elfogadható jogi aktusok tipikus formáit az EUMSZ 288. cikke határozza meg. Kötelező erővel bírnak: a rendelet, az irányelv és a határozat, míg nem kötelező források a vélemény és az ajánlás. A rendelet általános hatállyal bír, teljes egészében, minden elemében kötelező és közvetlenül alkalmazandó valamennyi tagállamban. Nem függ a tagállamok további végrehajtó aktusaitól, így a rendelet elsősorban a jogegységesítés eszköze. A (környezet-)szakpolitika terén rendeleti jogalkotásra akkor kerül sor, ha fontos, hogy az adott szabályozást minden uniós tagállamban egységesen, maradéktalanul és további végrehajtó jogszabályok elfogadása nélkül hajtsák végre. Ezzel szemben az irányelv a jogközelítés eszköze, amely keret-jellegű aktus, vagyis a címzett (vagy az összes) tagállam(ok) számára az elérendő célt határozza meg. A tagállamok az irányelveket implementálják, amely többféleképpen történhet (pl. törvényalkotással, a már hatályos jogszabályok módosításával vagy az irányelvbe ütköző jogszabályok hatályon kívül helyezésével).

4.1. A CCU/S helyzete az Európai Unióban, kitekintéssel az USA-ra és Ázsiára

Az éghajlatváltozás lassítása és hatásainak mérséklése kapcsán számos keretjogszabály és cselekvési terv készült nemzetközi szinten. Az ezekben foglaltak alapvető irányokat és célokat határoznak meg mind a közeli, mind pedig a távolabbi jövő tekintetében. A vizsgált nemzetközi instrumentumok fő fókusza az Európai Unióra vonatkozik, azonban fontos megvizsgálni a világ vezető hatalmainak kötelezettségvállalásait, így kitekintünk az USA, valamint az ázsiai régió három fejlett gazdasággal rendelkező államának – Japán, Kína és Dél-Korea – CCU/S törekvéseire is.

4.1.1. Európai Unió

4.1.1.1. Átfogó szabályozási eszközök és cselekvési tervek az Európai Unióban

Az uniós környezetpolitika alapvető keretét a program-jellegű cselekvési tervek biztosítják. A Bizottság 1973 óta ad ki többéves környezetvédelmi cselekvési programokat (Environmental Action Programme, EAP), amelyek az uniós környezetpolitika számára meghatározzák a sorra kerülő jogalkotási javaslatokat és célokat. 2020 végén a Bizottság előterjesztette a nyolcadik környezetvédelmi cselekvési programra vonatkozó javaslatát, amely 2021-től 2030-ig tart.

Az Európai Parlament és a Tanács 2022/591. sz. határozata a 2030-ig tartó időszakra szóló általános uniós környezetvédelmi cselekvési programról az Európai Zöld Megállapodásra építve a következő hat kiemelt célkitűzést rögzíti: (1) az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére vonatkozó, 2030-ig elérendő uniós célkitűzés teljesítése, és a klímasemlegesség megvalósítása 2050-ig; (2) az alkalmazkodóképesség növelése, a reziliencia erősítése és az éghajlatváltozással szembeni kiszolgáltatottság csökkentése; (3) előrelépés egy regeneratív növekedési modell felé, a gazdasági növekedés függetlenítése az erőforrás-felhasználástól és a környezetkárosodástól, valamint a körforgásos gazdaságra való átállás felgyorsítása; (4) szennyezőanyag-mentességi célkitűzés megvalósítása a levegő, a víz és a talaj tekintetében, valamint a polgárok egészségének és jóllétének védelme, (5) a biológiai sokféleség védelme, megőrzése és helyreállítása, valamint a természeti tőke növelése (különös tekintettel a következőkre: levegő, vizek, talaj, erdők, édesvizek, vizes élőhelyek és tengeri ökoszisztémák); (6) a termeléssel és a fogyasztással összefüggő környezeti/éghajlati terhelés csökkentése, főképp az energetika, az ipari fejlesztés, az épületek és az infrastruktúra, a mobilitás és az élelmiszerrendszerek területén.²⁵

Az uniós energiapolitika²⁶ alapja az EUMSZ 194. cikke és egyéb speciális szabályok.²⁷ Az EU-nak számos kihívással kell szembenéznie az energiapolitika területén: növekvő importfüggőség, korlátozott diverzifikáció, magas és változó energiaárak, növekvő globális szintű energiaigény, termelő és a tranzitországokat érintő biztonsági problémák, éghajlatváltozásból fakadó növekvő fenyegetettség,

dekarbonizáció, energiahatékonyság területén elért lassú előrehaladás, megújuló energiaforrások részesedésének növelésével kapcsolatos kihívások, az energiapiacok nagyobb átláthatóságának, további integrációjának és összekapcsolódásának szükségessége.

Európai Zöld Megállapodás

Az Európai Bizottság 2019. év végén a Párizsi Klímaegyezménnyel összhangban kidolgozta az úgynevezett Európai Zöld Megállapodást, melynek keretein belül célul tűzte ki az első klímasemleges kontinens megteremtését.⁸ Az Európai Zöld Megállapodás 2050-re biztosítani kívánja az ÜHG-kibocsátás mértékének nettó nullára való csökkenését és a gazdasági növekedés erőforrás-felhasználástól való függetlenedését. Célja a környezeti kihívások lehetőségekké alakítása minden szakpolitikai területen, valamint annak biztosítása, hogy a zöld átmenet igazságos legyen, és lehetőleg minden gazdasági szereplő bevonásra kerüljön. A célok megvalósításának érdekében az Európai Unió tagállamai vállalták, hogy legalább 55%-kal csökkentik az ÜHG-kibocsátást 2030-ig az 1990-es szinthez képest.⁹

A Zöld Megállapodás a következő területeken kíván intézkedéseket végrehajtani⁸:

- éghajlat-politika,
- energiaügy,
- mezőgazdaság,
- ipar,
- környezet és óceánok,
- áru- és személyszállítás,
- pénzügyek és regionális fejlesztés,
- kutatás és innováció.

A felsorolt területeken megvalósított beavatkozások eredményeként nem csupán az adott szektor kerül előnyös helyzetbe, hanem nemzeti/európai szinten is növekedhet a versenyképesség. A Zöld Megállapodás a tiszta, megfizethető és biztonságos energiaellátás jegyében taglalja az energiarendszer további szén-dioxid-mentesítését, vagyis a tervek szerint olyan energiaágazatot kell kialakítani, amely elsősorban megújuló energiaforrások használatán alapul, valamint a szén mielőbbi kivezetésére és a gáz dekarbonizációjára törekszik.

Az Európai Zöld Megállapodás által keltett politikai aktivitás és a 2050-re vonatkozó karbonsemlegeség eléréséhez kapcsolódó, jogilag kötelező érvényű célkitűzések mind a politikai döntéshozók, mind pedig az ipari érdekelt felek érdeklődését felkeltették a szén-dioxid-leválasztás és -tárolás (Carbon Capture and Storage, CCS), valamint a

szén-dioxid-hasznosítás (Carbon Capture and Utilization, CCU) iránt. A CCS és a CCU képes lehet jelentősen támogatni az európai uniós célkitűzések elérését, költséghatékony utat biztosítva az energiaintenzív iparágak számára, valamint segíthet megőrizni a munkahelyeket az EU gazdaságának központi ágazataiban. Mindeközben a CCU/S értéklánc mentén további ágazatok létrehozása valósulhat meg, mely hozzájárulhat az ipari versenyképesség megőrzéséhez. Az EU továbbá annak érdekében is együttműködik a globális partnerekkel, hogy elősegítse a nemzetközi szén-dioxid-piac fejlődését, amely az éghajlat-politikai fellépést előmozdító gazdasági ösztönzők létrehozásának kulcsfontosságú eszköze.

Az Európai Unió Klímarendelete

Az Európai Unió 2021-ben fogadta el az ún. klímarendeleletet, a klímasemlegeség elérését célzó keret létrehozásáról és a 401/2009/EK rendelet, valamint az (EU) 2018/1999 rendelet módosításáról.²⁸ A klímarendelet megerősíti az Európai Zöld Megállapodás által kitűzött klímasemleges kontinens tervét, és konkrét lépéseket határoz meg a tagállamok számára. A rendelet hosszútávú iránymutatást határoz meg a 2050-ig tartó éghajlatsemlegeségi célkitűzés eléréséhez. A rendelet szabályozása az összes uniós politikára hatással van, valamint biztosítja a társadalmi szempontból igazságos és költséghatékony átállást. Már a 2030-ig terjedő időszakra nézve is ambiciózusabb célkitűzéseket határoz meg. Továbbá, az előrehaladás nyomkövetésére egy-egy rendszer hoz létre, amely biztosítja a beavatkozás lehetőségét, amennyiben szükséges. Az átállás folyamatában szavatolni kell a befektetők és más gazdasági szereplők számára az előre tervezés lehetőségét. Végül, de nem utolsónak sorban biztosítani kell, hogy a klímasemlegeségre való áttérés visszafordíthatatlan legyen.

Megújuló Energia Irányelv (Renewable Energy Directive, RED) felülvizsgálata

A megújuló energiákról szóló irányelv (2009/28/EK) 2009-es elfogadása óta a megújuló energiaforrások egyre inkább elterjedtté válnak: az ilyen típusú forrásokból előállított bruttó végső energiafelhasználás aránya 2020-ban elérte a 22%-ot.^{29,30} Az irányelv célkitűzéseit és intézkedéseit többször felülvizsgálták annak érdekében, hogy elérjék azokat a sürgős kibocsátáscsökkentési célszámokat (2030-ig legalább 55%-os kibocsátáscsökkentés), amelyek az EU legújabb éghajlati ambícióinak eléréséhez szükségesek.³¹ A 2018-as felülvizsgálat 2021 júniusában lépett hatályba. A jelenleg hatályban lévő irányelv átfogó célt határozott

meg a megújuló energiára vonatkozóan, emellett szabályokat is hoztak a lehetséges akadályok felszámolására, a beruházások ösztönzésére és a technológiák költségeinek csökkentésére.

Nem sokkal a felülvizsgálat hatályba lépése után, 2021 júliusában a Bizottság újabb felülvizsgálatot javasolt (COM/2021/557 végleges) a megújuló energiaforrások uniós elterjedésének felgyorsítása és a 2030-ra kitűzött energia- és éghajlati célkitűzések elérése érdekében. Az Európai Bizottság és az Európai Parlament közötti, 2023. március 30-ai ideiglenes megállapodás az EU energiafogyasztását illetően a megújuló energia mennyiségére vonatkozóan 42,5%-os célt határoz meg 2030-ig - ezt további 2,5%-os indikatív kiegészítéssel 45%-ra növelnék.³²

Az ideiglenes megállapodás a közlekedési ágazatban 2030-ra 14,5%-kal csökkentené a közlekedési üzemanyagok ÜHG-intenzitását, valamint további 5,5%-os részcélt határoz meg a fejlett bioüzemanyagokra és a nem biológiai eredetű megújuló üzemanyagokra (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO) vonatkozóan.³² Ezen belül 2030-ig a nem biológiai eredetű megújuló üzemanyagok új rész célját 1%-ban határozza meg, valamint egy új cél fogalmazódott meg az RFNBO 42%-os részesedésére az ipari hidrogénfogyasztásban 2030-ig, és 60%-os részesedésére 2035-ig. Ezek a konkrét elvárások elősegítik az iparon belül (főként a petrokémia és finomítás területén) a CCU termékek piacának megteremtését is, hiszen a közlekedési ágazat szereplőitől megkövetelik a célszámok teljesítését, vagyis a CCU termékek vásárlását.

Szintén 2030-ra kitűzött cél, hogy a vegyi és műanyag termékekben felhasznált szén legalább 20%-a fenntartható, nem fosszilis forrásokból származzon, teljes mértékig szem előtt tartva az EU biológiai sokféleséggel és körforgásos gazdasággal kapcsolatos célkitűzéseit, valamint a hamarosan megjelenő, a bioalapú, biológiailag lebomló és komposztálható műanyagokra vonatkozó szakpolitikai keretet.³³

A Bizottság a Megújuló Energia Irányelvben³⁴ előírt két, felhatalmazáson alapuló jogi aktus elfogadásával részletes szabályokat javasol annak meghatározására, hogy mi minősül megújuló hidrogénnek az EU-ban. Ezek a jogi aktusok az uniós szabályozási keret részét képezik, amelybe többek között beletartoznak az energiainfrastruktúra-beruházások és az állami támogatási szabályok csakúgy, mint a megújuló hidrogén összefüggésében az ipar és a közlekedési ágazat által elérendő, jogszabályban foglalt célok. A jogi aktusok biztosítani fogják, hogy a nem biológiai eredetű megújuló üzemanyagok megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia felhasználásával készüljenek. A két jogi aktus összefügg egymással. A második felhatalmazáson alapuló jogi aktus³⁵ egy olyan módszertant határoz meg, amellyel

kiszámítható a nem biológiai eredetű megújuló üzemanyagok teljes életciklusra számított üvegházhatásúgáz-kibocsátása. A módszertan azt is egyértelművé teszi, miként kell kiszámítani a megújuló hidrogén vagy származékai üvegházhatásúgáz-kibocsátását abban az esetben, ha azokat olyan létesítményben állítják elő, amely fosszilis tüzelőanyagokat is termel. A várható szabályozás határidőket is tartalmaz a CO₂-kibocsátó források számára.^{36,37}

Az uniós kibocsátáskereskedelmi rendszer (European Union Emissions Trading System, EU ETS)

A rendszert a 2003/87/EK irányelv hozta létre, mely jogszabály a rendszer fejlődésével azóta többször is módosult. Az Európai Unió kibocsátáskereskedelmi rendszerének jelenlegi, negyedik kereskedési időszaka 2021-től 2030-ig tart. A rendszer a következőkre vonatkozik: erőművekre; energiaigényes ipari ágazatok széles körére; repülőgépekre, amelyek az EU, Norvégia és Izland repülőterei között közlekednek; az alábbi gázok kibocsátásának vonatkozásában: CO₂, nitrogén-oxid, perfluor-karbonok, metán, hid-ro-fluor-szénhidrogének és kén-hexafluorid. Az EU ETS által lefedett ágazatokat a 2003/87/EK irányelv I. melléklete sorolja fel, például ilyenek a tüzelőanyag-égető berendezések 20 MW-ot meghaladó teljes bemenő hőteljesítménnyel (kivéve a veszélyeshulladék-égető és települési hulladék-égető létesítményeket), erőművek, távfűtőművek, ásványolaj-feldolgozás, vas- és acélgyártás és kapcsolódó iparágai, alumíniumgyártás, cement- és mészgyártás, üvegyártás, téglá-, cserép- és kerámiagyártás, számos vegyipari alapanyag előállítása, papírgyártás. Az EU ETS alá nem eső ágazatok például a közlekedés, háztartások, mezőgazdaság, erdészet, települési hulladékégető létesítményekből származó kibocsátások. A rendszer kiterjesztési lehetősége a tengeri közlekedésre, valamint az épületekre és a közúti közlekedésre, települési hulladékégető létesítményekre vonatkozóan egy külön ETS létrehozását jelentené. Az EU ETS hatálya alá nem tartozó kibocsátások esetében a tagállamok vállaláselosztási jogszabály szerint kötelező nemzeti kibocsátáscsökkentési célokat (éves) alkalmaznak (erőfeszítés megosztási határozat). A tagállamok kibocsátási egységek birtokában bocsáthatnak ki (szennyező fizet elv). Az uniós rendelet létrehoz egy rugalmassági mechanizmust a tagállamok számára, egy meghatározott időszakra biztosított éves kibocsátási jogosultságaik adott arányát előzetesen is felhasználhatják, vagy átvihetik későbbi időszakra. A rendszer „a fix összkvótás kereskedés” elve alapján működik. Meghatároz egy felső határt vagy korlátot a rendszerbe tartozó gyárak, erőművek és más létesítmények által maximálisan kibocsátható ÜHG teljes mennyiségére.

Évente meghatározza a kibocsátható üvegházhatású gázok mennyiségének felső határát (összkvóta; cap), amely a kereskedelmi időszak alatt forgalomba bocsátott kibocsátási egységek számának felel meg. Ezt a felső határt idővel csökkentik annak érdekében, hogy a teljes kibocsátás mennyisége csökkenjen.

Az uniós kibocsátás-kereskedelmi rendszer központi eleme az ÜHG-kibocsátási egység. Egy kibocsátási egység egy tonna szén-dioxid meghatározott időn belül történő kibocsátására jogosít. A kvótákat a nemzeti hatóságok bocsátják ki, és azokat az uniós forgalmi jegyzékben tartják nyilván. Az EU ETS 3. szakaszától kezdődően a kibocsátási egységek kiosztásának 57%-a árverés, 43%-a pedig ingyenes kiosztás útján történik. A kvótakiosztás egy uniós szinten harmonizált rendszer, amiben a kibocsátási egységek többségét aukcionálják, azaz árverés útján értékesítik, ez a kibocsátási egységek kiosztásának alapértelmezett módja. Az árveréseket a Bizottság 1031/2010/EU rendelete szabályozza. Az aukción értékesített kvóták eladásából származó bevételek a tagállamok központi költségvetését gyarapítják, a bevételeknek legalább 50%-át klímavédelmi célokra kell fordítani. Ingyenes kiosztásban részesülhetnek a kedvező kibocsátási teljesítménymutatókat eredményező létesítmények, valamint az új belépők és a kapacitásukat jelentősen megnövelő létesítmények. A térítésmentes kiosztás 2030-ig folytatódni fog, de a mértéke folyamatosan csökken. A 2003/87/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv értelmében villamosenergia-termelés kapcsán ingyenesen nem osztható ki kibocsátási egység, kivéve például a hulladék-gázokból előállított villamos energia. Ugyancsak nem kerül sor ingyenes kiosztásra a szén-dioxid-leválasztásra szolgáló létesítmények, valamint a szén-dioxid szállítási csővezetékének és tároló helyeinek esetében. A kibocsátási egység összkvótája 2021-től kezdve évente 2,2%-kal – a lineáris csökkentési tényezővel – csökken, kevesebb ingyenes kibocsátási egység fog rendelkezésre állni. A kiosztásra két fordulóban kerül sor, először a 2021–2025 közötti időszakra, majd a 2026–2030 közöttire.

Abból a célból, hogy csökkentsék a kibocsátásokat, a rendszerben részt vevők kereskedhetnek a kvotáikkal. Ez azt jelenti, hogy aki tevékenységével kevesebb szén-dioxidot bocsátott ki, mint amennyi kvótával rendelkezik, az a feleslegessé vált kvótákat eladhatja annak, aki többletet bocsátott ki. Kvóta vásárlása a tagállami aukciókon (tőzsdén – elsődleges piac) vagy más szereplőktől (tőzsdén – másodlagos piac vagy egymás között) történhet. Mivel a kvóták szabadon adhatók-vehetők, azok ára is szabadon mozog a kereslet-kínálat függvényében. A kvóták ára percről percre változik a tőzsdéi kereskedelemben, és mindig az határozza meg, hogy épp mekkora a kvóták iránti kereslet.

EU ETS felülvizsgálata

Az EU ETS irányelvének legutóbbi, 2018-ban elfogadott felülvizsgálata a 4. fázisra, azaz a 2021–2030 közötti időszakra határozza meg a kibocsátási egységek teljes mennyiségét, összhangban az EU korábbi kibocsátás-csökkentési céljával.³⁸

A módosítására irányuló bizottsági javaslat öt fő elemből áll³⁸:

- alacsonyabb kibocsátási felső határ és ambiciózusabb lineáris ÜHG-kibocsátás-csökkentési célszámok meghatározása
- a kibocsátási egységek ingyenes kiosztására és a piaci stabilitási tartalékra vonatkozó szabályok felülvizsgálata
- az ETS kiterjesztése a tengeri szállításra
- egy különálló, új ETS bevezetése az épületekre és a közúti közlekedésre
- az Innovációs és Modernizációs Alap keretének növelése, és az ETS-bevételek felhasználására vonatkozó új szabályok kialakítása.

Az Európai Bizottság és az Európai Parlament ideiglenes megállapodása szerint (az Európai Éghajlati Klímarendeletben megnövelt ÜHG-kibocsátás-csökkentési célokkal való összehangolás érdekében) 2030-ra 62%-kal szükséges csökkenteni az EU ETS-ágazataiból származó kibocsátást.³⁹ A kitűzött cél elérése érdekében a javaslat a lineáris kibocsátás-csökkentési tényezőt évi 2,2%-ról 4,3%-ra emeli 2024 és 2027 között, illetve 4,4%-ra 2028 és 2030 között. A megállapodás továbbá kiterjesztené az EU kibocsátás-kereskedelmi rendszerét a tengeri közlekedésből származó CO₂-kibocsátásra, különös tekintettel a bruttó 5.000 tonna feletti nagyméretű szállítóhajókra, melyet 2025 és 2027 között fokozatosan vezetnének be. Ezen kiterjesztés pozitív hatást gyakorolhat a CCU/S technológiák alkalmazásának elterjedésére, hiszen jelenleg a szintetikus üzemanyagokon kívül nem áll rendelkezésre egyéb alternatíva a szektor számára.⁴⁰

2027-től önálló kibocsátás-kereskedelmi rendszert (ETS II) kívánnak létrehozni³⁹, amelybe a közúti közlekedés üzemanyag-, és az épületek fűtésére használt fosszilis energia elosztása fog tartozni.³⁸ A szabályozott szervezeteknek (üzemanyag-forgalmazóknak) 2024-től kellene jelenteniük a forgalomba hozott üzemanyagok mennyiségét. 2026-tól ennek megfelelő mennyiségű kibocsátási egységet kellene leadniuk. A kibocsátások felső határát 2026-ban határoznák meg, amit fokozatosan csökkentenének, így 2030-ban 43%-os kibocsátás-csökkenés érhető el ezen ágazatokban a 2005-ös szinthez képest. Az ETS II keretein belül minden kibocsátási egységet árverésre bocsátának, és egyiket sem

biztosítanak ingyen. Emiatt valószínűsíthető a közúti közlekedési- és fűtési üzemanyagok árának emelkedése, ezért az ebből adódó közvetett társadalmi hatásokat a Szociális Klíma Alapról szóló jogalkotási javaslat kezeli majd.⁴¹

REPowerEU terv

Az Európai Bizottság 2022 márciusában elindította a REPowerEU tervet, melynek kulcsfontosságú céljai között szerepel az EU-s energiarendszer ellenálló képességének, biztonságának és fenntarthatóságának növelése a fosszilis tüzelőanyagoktól való függés szükséges csökkentése, illetve az energiaellátás uniós szintű diverzifikálása révén, többek között a megújuló energiaforrások felhasználásának, valamint az energiahatékonyság és energiatároló kapacitás növelésével.^{42,43}

A rendeletet 2023 februárjában az Európai Parlament és az Európai Tanács is elfogadta⁴⁴. A tagállamok a NextGenerationEU keretében az új REPowerEU fejezettel egészíthetik ki nemzeti helyreállítási és ellenálló-képességi terveiket, hogy finanszírozzák azokat a kulcsfontosságú beruházásokat, reformokat, amelyek elősegítik a REPowerEU célkitűzéseinek elérését. A Helyreállítási és Rezilienciaépítési Eszköz (Recovery and Resilience Facility, RRF) szolgál a REPowerEU fő finanszírozási forrásaként, az előirányzott intézkedéseket elsősorban a 225 milliárd EUR összegű hitelből finanszírozzák.⁴⁴ A beruházások és reformok finanszírozására legfeljebb 20 milliárd EUR összegű, vissza nem térítendő támogatás vehető igénybe, melynek finanszírozását egyrészt az Innovációs Alap biztosítja (60%), másrészt a kibocsátáskereskedelmi rendszer kibocsátási egységeinek értékesítéséből fedezik (40%).

Egyelőre nem látszik tisztán, hogy a REPowerEU terv milyen hatással lesz a CCU/S technológiákra. A fosszilis források, úgy, mint a földgáz használatának radikális csökkentése és a kialakult ellátási problémák erősen befolyásolhatják, hogy milyen mértékben lesz szükség a CCU/S technológiák alkalmazására. Ugyan a klímapolitikai célokkal ellentétesen bizonyul, a hagyományos energiaforrások közül rövidtávon a szénerőművek teljesítményének növekedésére lehet számítani. Emellett a földgáz és a kőolaj, bár jelentősen kisebb mértékben, még 2030-ban és 2050-ben is az energiarendszer része lesz, ahol így már a CCU/S is szerepet kaphat. Ezen felül a legtöbb kibocsátási forgatókönyv részét képező szén-dioxid-csökkentés (Carbon Dioxide Reduction, CDR) szintén nagymértékben támaszkodik majd a CCS technológiákra, a CCU pedig fontos lesz az e-gázok és e-üzemanyagok (megújuló energiaforrás segítségével előállított üzemanyagok⁴⁵) célszintjének eléréséhez.

A REPowerEU kiemelt figyelmet fordít továbbá a hidrogénipar felvirágoztatására, amelyen belül fontos szerepe van a hidrogénnél az abból előállított termékeknek is, mint például az ammónia, a metanol, az e-kerozin, vagy az e-benzin.⁴⁶ Ez közvetetten hatással van a szén-dioxidra is, hiszen az e-üzemanyagok előállításához a hidrogénnél kívüli szükség van olyan kritikus alapanyagokhoz való hozzáféréshez, mint a fenntartható forrásból származó CO₂.

Net-Zero Industry Act

2023. március 16-án az Európai Bizottság javaslatot terjesztett elő a nulla nettó kibocsátási célt szolgáló iparról szóló jogszabályra (Net-Zero Industry Act) vonatkozóan, melyet a Zöld Megállapodáshoz kapcsolódó ipari terv részeként jelentettek be.⁴⁷ A jogszabály javítani fogja a nulla nettó kibocsátású technológiákba történő beruházások feltételeit azáltal, hogy:

- növeli a rendelkezésre álló információk mennyiségét,
- csökkenti a projektek elindításával járó adminisztratív terheket és
- egyszerűsíti az engedélyezési eljárásokat.

A jogszabály emellett arra irányuló javaslatot is tartalmaz, hogy elsőbbséget élvezzenek a nettó nulla kibocsátási célt szolgáló stratégiai projektek – köztük a leválasztott szén-dioxid biztonságos tárolására vonatkozóak. Az eljárások egyszerűsítése lehetővé fogja tenni, hogy 18 hónapon belül kiadható legyen az engedély ezekre a projektekre.

Továbbá a jogszabály azt az uniós célt tűzi ki 2030-ra, hogy az EU-ban a stratégiai szén-dioxid-tárolókban évente 50 Mt besajtolási kapacitást érjenek el.

A szabályozás az olaj- és gáztermelőket kötelezi a CO₂-tárolási cél eléréséhez szükséges CO₂-tárolási kapacitás kialakítására. Ez enyhíti a CCS fejlesztésének egyik fő akadályát, különösen a kibocsátáscsökkentési nehézségekkel szembenező, energiaigényes ágazatok esetében. A jogszabály célul jelöli meg továbbá, hogy az EU 2030-as éghajlat- és energiaügyi céljainak eléréséhez szükséges stratégiai technológiák legalább 40%-át belföldön állítsa elő, melybe beletartozik a CCU/S is.

CCU/S Stratégia

Bár hivatalos közlemény még nem jelent meg róla, 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.⁴⁸

Az Európai Bizottság vezette munkát 2022-ben kezdték meg, melynek hivatalos megjelenési ideje 2023 negyedik negyed- évében várható. A közlemény keretét fog adni a CCU/S po- tenciális szerepének a 2050-ig tartó uniós éghajlatpolitikai fellépésekben, azonosítva a kulcsfontosságú szakpolitikai, szabályozási és kutatási hiányosságokat, egyben megoldá- sokat is kínálva ezekre.

4.1.1.2. CCS és CCU az európai dekarbonizációs forgatókönyvekben

Jelenleg számos modellt használnak a dekarbonizáció jövő- beli forgatókönyveinek elemzésére nemzeti, regionális és globális szinten egyaránt.⁴⁹ Ezek közül a legkiemelkedőbbek az integrált értékelési modellek (Integrated Assessment Models, IAM), amelyek az IPCC értékelő jelentéseit támaszt- ják alá. A CCU/S technológiák az EU dekarbonizációjában játszott szerepének vizsgálata során tett fontos megállapít- ás, hogy a globális viszonylatú IAM-ekben a CCS techno- lógiák gazdag portfóliója mellett a CCU-ról nem esik szó.⁴⁹ Feltételezve, hogy minden eltervezett tevékenység meg- valósul az elkövetkezendő időszakban, a 2030-as 2°C-os forgatókönyvhöz szükséges célszám adatok még teljesülhet- nek.¹⁰ Azonban ez még mindig távol áll a 1,5°C-os forgató- könyv értékeitől. Több mint valószínű, hogy az összes eltervezett projekt megvalósul, így a jelenlegi scenárió pályáját követve a 2050-es célkitűzéseket nem érhetjük el. Elengedhetetlen, hogy 2030-ig minél több kereskedelmi mértékű projekt induljon el, illetve, hogy ezt követően a ke- reskedelmi méretű kapacitással rendelkező létesítmények minél inkább elterjedjenek 2050-ig.

A CCU hozzájárulása a klímacélokhoz egyelőre tisztázatlan, mivel a szénlábnymot nem minden esetben számszerűsí- tik a modellezés és forgatókönyv készítés során.¹⁰ Azonban az vitathatatlan, hogy a CCU technológiák hozzájárulhatnak a kibocsátáscsökkentéshez azáltal, hogy elkerülik az új kibo- csátásokat a meglévő kibocsátások felhasználásával, vala- mint bizonyos felhasználási módoknál a CO₂-ot képesek tar- tósan tárolni (beépítve a végtermékbe). Becslések szerint 2050-re a CCU technológia által felhasznált CO₂ mértéke akár a 7 gigatonnát is elérheti, melyet olyan anyagok előállításához használhatnak, mint például különböző üzemanyagok és vegyszerek.⁵⁰

4.1.1.3. CCU/S jelenlegi helyzete az EU-ban

Bár a CCU/S technológiák viszonylag újak minősülnek, már napjainkban is léteznek laboratóriumi fejlesztések, demonstrációs projektek vagy akár ipari méretű létesítmé- nyek Európában is. Számos szakmai szervezet gyűjt és közöl

adatokat a működő és bejelentett CCU/S projektekről, köztük az International Energy Agency (IEA), a Global CCS Institute (GCCSI) és a CO₂ Value Europe (CVE). Ezen pro- jektadatbázisok nem feleltethetők meg teljeskörűen egy- másnak, mert az egyes szervezetek különböző módszertani megközelítés szerint, eltérő időtávokon összesítik és rend- szerezik a projekteket. Mindegyikből kiolvasható azonban, hogy az utóbbi években a CCU/S technológiák elterjedési üteme gyorsul, a projektekben érintett iparágak sokszínű- sége növekszik, az alkalmazásban élenjáró földrajzi régiók Észak-Amerika és Európa.

Az IEA adatbázisa⁵¹ jelenleg a CCU/S projektek leginkább tel- jeskörű és legfrissebb gyűjteménye. Tartalmazza az 1970-es évektől működő és 2023 februárjáig bejelentett, az érték- lánc bármely eleméhez kapcsolódó kezdeményezéseket, melyek egyértelmű kibocsátáscsökkentést eredményeznek és legalább 100 ezer tonna éves kapacitással rendelkeznek (a levegőből történő közvetlen befogás [Direct Air Capture, DAC] esetén 1.000 tonna évente), kivéve a hagyományos ipari belső felhasználást (pl. karbamidgyártás) és az ala- csony környezeti hatással rendelkező felhasználási megol- dásokat (pl. italgártás). Mindezek miatt a továbbiakban az IEA adatbázisa alapján mutatjuk be a CCU/S helyzetét Európában.

A 2022-es évig bezárólag mindösszesen 6 CCU/S projekt üzemelt Európában, azonban a jelenleg futó beruházások és aktuális bejelentések alapján 2030-ig 140, majd 2040-ig további 17 új kezdeményezés tervezi megkezdeni a műkö- dést (53 esetben nem áll rendelkezésre tervezett indulási dátum). Közülük 6 projekt már kivitelezés alatt áll, további 204 még a tervezési fázisban van, ezek 25%-a rendelkezik a végső beruházási döntésre vonatkozó rögzített időponttal. Néhány kiemelt európai projekt:

- Magyarországon a MOL az 1990-es években kezdte meg a Szank közelében található gázmezőn a fokozott, másodla- gos/harmadlagos olajkitermelést (Enhanced Oil Recovery, EOR) a földgázkezelés során befogott CO₂ felhasználásával.
- Izlandon a Climeworks Orca közvetlenül légköri meg- kötés útján nyert szén-dioxidot tárol földalatti geoló- giai tárolóban, a projektet a Climeworks és a Carbfix működteti, kapacitása évi 4.000 tonna. Jelenleg kivitelezés alatt áll a partnerek következő, hasonló profillal, de kilencszeres kapacitással (évi 36 ezer tonna) rendelkező kezdeményezése, a Climeworks Mammoth, mely 2024-ben kezdi meg működését.
- Norvégiában a Sleipner és a Snohvit projektek földgáz- kezelés során befogott CO₂ geológiai tárolására fókuszálnak és több évtizedes múltra tekintenek vissza. Előbbi évi 1 millió, utóbbi évi 700 ezer tonna kapacitással működik.

- Kivitelezés alatt áll 2 befogási és 1 szállítási-tárolási projekt a norvégiai Northern Lights CCU/S klaszter részeként, valamint 1 befogási projekt a hollandiai Porthos klaszter részeként. Az ezekben érintett kibocsátó pontforrások a cementgyártásban, a hulladék alapú energia- és hőtermelésben, illetve bioüzemanyagok terén működnek.

A kivitelezés alatt álló európai CO₂-befogási projektek éves kapacitása 1,3 millió tonna. Ehhez képest az egyelőre csak bejelentett, de tervezett működéskezdéssel rendelkező befogási projektek teljes kapacitása közel 100 millió tonna évente, melynek több mint 90%-a 2030-ra megvalósulna, a tárolói projektek összekapacitása pedig 150 millió tonna évente, melyek több mint 85%-a valósulna meg 2030-ra. Látható, hogy az európai CCU/S szektorban számottevő növekedés várható az elkövetkező években. Ezek a kezdeményezések a befogott CO₂ kezelésében elsősorban a tárolásra fókuszálnak, a hasznosítási célú összkapacitás nem éri el az évi 4 millió tonnát.

A tervezett működéskezdéssel rendelkező kezdeményezések legjelentősebb számban az energia- és hőtermelési szektorban találhatóak, a projektek 29%-a (27 darab), az összkapacitás közel 40%-a köthető hozzá. Ezt követi a hidrogén- és ammóniaelőállítás, az összkapacitás 28%-ával (20 projekt), illetve a cementgyártás, az összkapacitás 10%-ával (15 projekt) és a tüzelőanyag átalakítási tevékenységek, pl. finomítás, az összkapacitás 12%-ával (12 projekt). Viszonylag kevés, mindössze kettő projekt tervezett a vas- és acéliparban, 2-4 millió tonna közötti éves kapacitással.

A tervezett európai projektek jelentős része, több mint 70%-a CCU/S klaszterek vagy szállítási hubok részeként kerülne megvalósításra. A Northern Lights klaszter kialakítása nemzetközi együttműködésben, összesen 6 ország részvételével zajlik (Norvégia, Svédország, Finnország, Németország, Hollandia, Egyesült Királyság), a befogás terén számos ágazatot érint közel 6 millió tonna éves kapacitással, fókuszában a befogott CO₂ geológiai tárolása áll. Több CCU/S klaszter kiépítésére vonatkozó, ambiciózus tervekkel rendelkezik az Egyesült Királyság és Hollandia, előbbi évi 40 millió tonna befogási összkapacitással 4 régióban, utóbbi évi 15 millió tonnával 2 régióban. Az Egyesült Királyság tervezett klaszterei a Northern Endurance Partnership, a Liverpool Bay CO₂ Storage, a Viking CCS és az Acron CCS. Hollandia klaszterei a Noorkeap és a Porthos. Kiseb léptékű klaszterkialakítási tervekkel rendelkezik Írország, Görögország, Olaszország, Franciaország és Horvátország is, egyenként 0,2 és 2,5 millió tonna közötti éves befogási kapacitással.

4.1.1.4. Nemzetközi CO₂ infrastruktúra: szállítás és tárolás

A CO₂ leválasztása területén tapasztalható növekvő kereslet egyre növeli a szállítási és tárolási infrastruktúra iránti igényt is⁵², melynek tükrében az európai uniós CO₂-tárolás gyorsan fejlődött. A CO₂ szállítása elsősorban csővezetéken történik, de más szállítási módok, például a vízi, a vasúti vagy a közúti szállítás is egyre fontosabbá válnak.¹⁰ Számos Európában tervezett CCS projekt része a CO₂ egyik országból a másikba történő szállítása.⁵³ A határokon átnyúló CO₂-szállítás elősegítheti a regionális együttműködést és az infrastrukturális kapcsolatok kialakulását (pl. a norvég Northern Lights és a Teesside projekt az Egyesült Királyságban). A CO₂-szállítási infrastruktúra fejlesztése, az ipari klaszterek és a tárolóhelyek összekapcsolása nélkülözhetetlen a méretgazdaságosság kiaknázásának érdekében regionális, nemzeti és európai uniós szinten egyaránt. A hatékony CO₂-hálózatok fejlesztése szempontjából kulcsfontosságú az egyéni pontszerű megoldásról a csomópontok és klaszterek létrehozására való átállás.

2022 júniusában lépett hatályba a Transzeurópai Energiahálózatokról (Trans-European Networks for Energy, TEN-E) szóló új rendelet, melynek egyik célja a tagállamok határon átnyúló energetikai infrastruktúra-hálózatainak összekapcsolása, dekarbonizálása és korszerűsítése.⁵⁴ A rendelet azon szabályokat foglalja össze, melyek alapján kiválasztásra kerülnek és különböző támogatásokban részesülnek az európai közös érdekű projektek (Projects of Common Interest, PCI), valamint a harmadik országokkal közös kölcsönös érdekű projektek (Projects of Mutual Interest, PMI). PCI projekteket többek között „szén-dioxid-hálózat” kategóriában, PMI projekteket pedig többek között „szén-dioxid határokon átnyúló szállítása és tárolása” kategóriában jelölhetnek a projektgazdák. Mindemellett az új TEN-E rendelet alapján készült költség-haszon-elemzési módszertanokat nyilvános konzultációra bocsátotta az Európai Bizottság (2023. január 6-ig voltak véleményezhetőek⁵⁵), melynek egyik infrastruktúra-kategóriája a szén-dioxid-hálózatokra vonatkozik.

4.1.1.5. A szintetikus üzemanyagok fogalma, különös tekintettel a CO₂-alapú szintetikus üzemanyagokra

A közlekedési ágazat a teljes ÜHG-kibocsátás mintegy negyedéért felelős, de további negatív környezeti hatásokat is eredményez, ideértve a biológiai sokféleség csökkenését, a levegő, zaj- és fény-szennyezést. Az EU kibocsátáscsökkentési terveinek eléréséhez elengedhetetlen a közlekedési ágazat zöldítése, és ebben kaphat szerepet a CCU/S technológiákat felhasználva a szintetikus üzemanyagok fejlesztése.

Ugyanakkor, a belső égésű motorok teljes kivezetése és a szintetikus, illetve bioüzemanyagok megítélése jelentős vitát generált az EU-s jogalkotó intézmények és a tagállamok között.

A megújuló erőforrásokról szóló irányelv több módosításon ment keresztül. Az Európai Zöld Megállapodás megvalósítása érdekében a Bizottság 2021 júliusában az irányelv újabb felülvizsgálatát javasolta, a kibocsátáscsökkentési cél 32%-ról 40%-ra emelésével, a „Fit for 55” csomag részeként. Ugyanakkor, tekintettel az orosz-ukrán háborúra és arra, hogy az EU egyik fő célja az energiafüggettség minimalizálása lett, a Bizottság javasolta, hogy a célt 45%-ra emeljék. 2023. március 30-án ideiglenes megállapodás született (REDIII), amely kimondja, a 2030-ra vonatkozó kötelező érvényű cél legalább 42,5%, de törekszenek a 45%-ra. Amint e jogalkotási folyamat befejeződik, a jogszabályt hivatalosan is elfogadják, és az új rendelkezések hatályba lépnek.²⁹ A megállapodás megerősíti a megújuló energia közlekedésben történő felhasználásának szabályozási keretét is. Cél az üvegházhatású gázok intenzitásának 14,5%-os csökkentése vagy a megújuló energia 29%-os részaránya a végső energiafogyasztásban, ideértve a kombinált 5,5%-os részarányt a fejlett bioüzemanyagokra és a nem-biológiai eredetű megújuló üzemanyagokra (RFNBO) vonatkozóan, beleértve az 1%-os minimumküszöböt az utóbbiak tekintetében. A meghatározott rendelkezések alátámasztják az EU megújuló hidrogénforrások elterjesztésére irányuló törekvéseit.⁵⁶

A REDIII hatásvizsgálatban az Európai Bizottság az „e-üzemanyagokat” dekarbonizált üzemanyagok heterogén halmazaként határozza meg, olyan „szektorokban, ahol a villamosítás nem kivitelezhető, nem hatékony vagy csak magasabb költséggel”. Az „e-üzemanyagok” meghatározása magában foglalja a hidrogént, valamint a szintetikus metánt vagy a folyékony szintetikus üzemanyagokat is.⁵⁷

A belső égésű motorok kivezetése egyes, az autópárhazban jelentősen érdekelt tagállamok számára (pl. Németország) aggályos volt, és álláspontütközés alakult ki az uniós jogalkotók, a tagállamok és a piaci szereplők között. Olaszország, Portugália, Szlovákia, Bulgária és Románia az eredeti, 2035-ben meghatározott céldátumot kívánta 2040-re módosítani. Az újonnan javasolt szabályozás alapján azonban a belső égésű motorral rendelkező járműveket 2035 után is forgalomba lehet helyezni, ha kizárólag szén-dioxid-mentes üzemanyagot tankolnak. További kérdés a bioüzemanyagok elismerése, amely kapcsán szintén biztosítékokat kért Olaszország.⁵⁸

Az új javasolt uniós szabályozás⁵⁹ utat enged a szintetikus üzemanyagok technológiai fejlesztésének, a napjainkban is használatos belső égésű motorok megtartásának és a töltőállomás-infrastruktúra átalakításának. A

kompromisszumos javaslat elfogadása mindenképpen üdvözlendő, különösen az elektromos járműveket és akkumulátorokat ért kritikai észrevételek miatt is.

A folyékony *szintetikus üzemanyag* egy olyan szintetikus szénhidrogén termék, amelyet elektrolízissel nyert zöld hidrogén és szén-dioxid reakciójával állítanak elő akár szintézisgázon, akár metanolon keresztül. Az elégetés vagy ipari folyamatok során keletkező szén-dioxidot használják fel az üzemanyag gyártásához, amely így zárt folyamatot alkot. Továbbá, az üzemanyag gyakorlatilag korom- és nitrogén-oxid-mentes. A szintetikus üzemanyagok elterjedésének jelenleg azok költségigénye (jelenleg 10 dollár/liter), illetve az előállítás kapacitás hiánya szab gátat.

Az alternatív üzemanyagok infrastruktúrájáról szóló rendelet az elkövetkező évekre vonatkozóan konkrét célértékeket határoz meg a tekintetben, hogy milyen módon kell az ilyen infrastruktúrának kiépülnie az Unióban.⁶⁰ A rendelet (továbbiakban javaslat) jelenleg elfogadás alatt van, így a jogalkotási folyamat még nem zárult le. A javaslat fontos alapvetést határoz meg az alternatív üzemanyagok kapcsán, amelyek közé sorolhatóak a szintetikus üzemanyagok is.

Alapfogalmak:

„*alternatív üzemanyagok*”: a közlekedés energiaellátásában a fosszilis üzemanyagokat legalább részben helyettesítő üzemanyagok vagy energiaforrások, amelyek potenciálisan hozzájárulnak a közlekedési ágazat dekarbonizációjához, és javítják annak környezeti teljesítményét. Ezek az üzemanyagok többek között a következők:⁶¹

„*kibocsátásmentes gépjárművek alternatív üzemanyagai*”:

- villamos energia,
- hidrogén,
- ammónia;

„*megújuló üzemanyagok*”:

- az (EU) 2018/2001 irányelv 2. cikkének 27. pontjában meghatározott, biomasszából előállított üzemanyagok és ugyanezen cikk 33. pontjában meghatározott bioüzemanyagok,
- megújuló energiaforrásokból előállított szintetikus és paraffinos üzemanyagok, beleértve az ammóniát is;

„*alternatív fosszilis üzemanyagok*” átmeneti ideig:

- földgáz, gáz-halmazállapotú (sűrített földgáz – Compressed Natural Gas, CNG) és cseppfolyósított (cseppfolyósított földgáz – Liquefied Natural Gas, LNG) formában,
- cseppfolyósított propán-bután gáz (Liquefied Petroleum Gas, LPG),
- megújuló energiaforrásokból előállított szintetikus és paraffinos üzemanyagok;

„biomasszából előállított üzemanyagok”: biomasszából előállított szilárd és gáz-halmazállapotú üzemanyagok;⁶²

„bioüzemanyagok”: a biomasszából előállított folyékony halmazállapotú, a közlekedésben használt üzemanyagok;⁶³

„fejlett bioüzemanyagok”: a IX. melléklet A. részében felsorolt alapanyagokból előállított bioüzemanyagok;⁶⁴

„széntartalom újrahasznosításával nyert üzemanyag”: meg nem újuló eredetű, a 2009/28/EK irányelv 4. cikkével összhangban történő hasznosításra nem alkalmas folyékony vagy szilárd hulladékáramokból, vagy meg nem újuló eredetű, ipari létesítmények gyártási folyamatainak elkerülhetetlen, nem szándékos következményeként kibocsátott hulladék-technológiai gázokból és égéstermékekből előállított folyékony és gáznemű üzemanyagok;⁶⁵

„nem biológiai eredetű, folyékony vagy gáznemű, megújuló energiaforrásokból származó közlekedési célú üzemanyagok”: a bioüzemanyagok és a biogázok kivételével olyan folyékony vagy gáznemű üzemanyagok, amelyek energiatartalma a biomasszától eltérő megújuló forrásokból származik, és amelyeket a közlekedési ágazatban használnak.⁶⁶

4.1.1.6. CCU/S klaszterek és szervezetek az EU-ban

A CCU/S technológiák esetében már kialakulóban vannak alulról szerveződő csomópontok és klaszterek, és a technológia alkalmazásának elterjedését erre szakosodott szervezetek is elősegítik az Európai Unióban. A klaszterek kialakításánál előnyként mutatkozik a CCS esetében, hogy világszerte számos kibocsátásintenzív létesítmény (akár az ipar vagy az energetika területén) földrajzi elhelyezkedése egy szűk területen belül koncentrálódik.⁶⁷ Ilyen klaszterek találhatóak például az energiaellátást biztosító létesítmények és kikötők körül. Ez lehetőséget ad arra, hogy az egymáshoz viszonylag közel elhelyezkedő CO₂-kibocsátók összefogásával CO₂-befogási és/vagy -tárolási klasztert hozzanak létre, és egy kiterjedt infrastruktúrán keresztül csatlakozzanak egy nagyméretű CO₂-tárolóhoz. Ebben az esetben az infrastruktúra mérete nem az egyedi felhasználó, hanem a felhasználók együttes igényéhez van méretezve.

Az Európai Unióban és szerte Európában több létező CCS klaszter is azonosítható⁶⁷, például:

- Franciaország - Le Havre klaszter (COCATE)
- Nagy-Britannia – Teesside és Yorkshire klaszterek
- Skandináv régió – Skagerrak/Kattegat klaszter
- Bulgária – ANRAV CCU/S klaszter⁶⁸

Mindezek mellett az Európai Unióban számos olyan szervezet alakult, melyek a CCU/S technológiák alkalmazását és azok elterjedését tűzték ki célul:

CO₂ Value Europe

A CO₂ Value Europe (CVE) egy nemzetközi nonprofit szövetség, amelyet 2017 novemberében alapítottak az EU FP7 által finanszírozott SCOT (SMART CO₂ Transformation, Okos CO₂ Átmenet) eredményeire és lelkesedésére építve.⁶⁹ Néhány éven belül a CVE az európai CCU közösség legitim képviselőjévé vált. A szövetség több mint 70 úttörő tagot vonzott, lefedve a teljes CO₂-értékláncot (beleértve az iparágakat, kutatószervezeteket, egyetemeket, startupokat, regionális klasztereket), valamint kifejlesztette azon egyéb szervezetek és egyének hatalmas hálózatát, akik egyetértenek abban, hogy a CCU technológiák szükségesek az EU éghajlati céljainak eléréséhez. Ez igen hasznos lehet a hazai szereplők számára az EU-s partnerségek kiépítésének tekintetében.

A szervezet képviselőjével folytatott interjú keretében megosztották tapasztalatukat, miszerint globálisan kb. két éve kezdtek el komolyabban foglalkozni a CCU technológiákkal. Ezen megoldások jelentős elterjedése 2025-2026-ban várható, mely igen dinamikus fejlődésnek mondható. Jelenleg a nemzeti CO₂-stratégiák létrehozása csak tervezés szintjén merül fel, jellemzően ezek is inkább az energia- és klímastratégiákban jelennek meg. Említésre került továbbá, hogy készül, és hamarosan megjelenik a CCU/S SET-Plan, melynek célja létrehozni Európa nulla üvegházhatásúgáz-kibocsátású gazdaságát 2050-re.⁷⁰ Európa energia- és ipari ágazatai hozzájárulhatnak ehhez a célhoz az alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiák nagyléptékű bevezetésével. A klímastratégiákban foglalt célok miatt a piac megteremtí magát, hiszen a vállalkozásoknak meg kell felelniük a célszámoknak (pl. fenntartható repülőgép-üzemanyag [Sustainable Aviation Fuel, SAF]), így rákényszerülnek a szabályozások által meghatározott termékek vásárlására, használatára. Véleményük szerint az energiapiac (üzemanyagok) jelenti majd a legnagyobb piacot, hiszen a közlekedés bizonyos szegmensei nehezen zöldíthetők villamosenergiaival. A klaszterek kérdéskörével kapcsolatban úgy gondolják, a meglévő klaszterek jó lehetőséget jelentenek, hiszen már kiépültek kapcsolatok, kapcsolódási pontok a vállalatok között. A következő lépés a hagyományos termékek CCU termékekre történő cseréje.

CCU/S Zero Emission Network (ZEN)

A Zero Emissions Network egy olyan kezdeményezés, amely többek között segít a vállalkozásoknak csökkenteni kibocsátásukat és javítani a helyi levegőminőséget.⁷¹ A hálózat ingyenes tanácsokat és szolgáltatásokat kínál az alacsony kibocsátású energiákra és közlekedési lehetőségekre való átálláshoz. A "Zero Emission Network to facilitate CCU/S uptake in industrial clusters" című projektjének célja, hogy hálózatok kiépítésével Európa-szerte felgyorsítsa a CCU/S elterjedését, valamint a CCU/S-sel kapcsolatos ismeretek, tapasztalatok megosztásával hozzájáruljon az ipari klaszterek és csomópontok CO₂-kibocsátásának csökkentéséhez.⁷² Feladatai között szerepel:

- Az érdekelt felek számára fontos információk nyújtása annak érdekében, hogy megalapozott döntéseket hozzanak a CCU/S-sel kapcsolatban
- Konkrét és megvalósítható tervek kidolgozása a CCU/S értékláncok fejlesztésére

A ZEN partnerek széles körű szakértelemmel és tudással rendelkeznek a CCU/S értékláncban, beleértve a szárazföldi- és vízi szállítást, a csővezeték- és energiaipart, valamint a CO₂-tárolást.⁷³ A két és fél évig tartó CCU/S ZEN projekt 2022 szeptemberében indult, melyet a Horizont Európa finanszíroz.

Zero Emissions Platform (ZEP)

A ZEP az EU egy, a CCU/S bevezetésével és az infrastruktúra kiépítésével foglalkozó műszaki tanácsadó szerve.⁷⁴ Tevékenységei közé tartozik a tanácsadás mellett tanulmányok és jelentések írása, valamint konzultációs lehetőségek biztosítása is. A szervezet tagjai között olyan multinacionális vállalatok is jelen vannak, mint a BP, a Shell, az ExxonMobil vagy a GE.

A szervezet szerint a CCU/S klaszteralapú megközelítésének elősegítése érdekében fel kell térképezni a régiók kibocsátási forrásait, valamint egységes álláspontot kell kidolgozni a tagállamok és az ipar között a közös felhasználói infrastruktúra kiépítésére. Ezt a tagállamok az iparral összehangolt módon hajthatnák végre annak érdekében, hogy jobban be tudják azonosítani, hol lehetnek klaszter-lehetőségek a szén-dioxid hatékony befogására ésállítására, illetve hogyan lehetne ösztönözni a CO₂-infrastruktúra korai állami pénzügyi támogatását.

CCU/S Fórum

A CCU/S Fórum az Európai Bizottság által évente megrendezett esemény, amely az érdekelt felek számára

közös platformként szolgál.⁷⁵ A fórum célja, hogy összehozza az uniós intézmények, az EU és a harmadik országok, a civil szervezetek, az üzleti élet, valamint a tudományos körök képviselőit annak érdekében, hogy könnyebbé tegyék a CCU/S technológiák alkalmazásának elterjedését. Az első magas szintű CCU/S Fórumra 2021 októberében került sor. Az esemény közel 400 résztvevőt vonzott, ami azt mutatja, hogy a CCU/S iránti érdeklődés egyre nagyobb, és hogy szükség van az érdekelt felek közötti folyamatos párbeszédre.

Az első fórum eredményeként három munkacsoport jött létre. Az első munkacsoport a CO₂-infrastruktúrával foglalkozik, és az infrastruktúra fejlesztésének hiányosságait kezeli. A második csoport egy CCU/S jövőkép-dokumentumot hivatott kidolgozni, amely vizsgálja a CCU/S szerepét az EU energia-dekarbonizációjában. A harmadik csoport az ipari partnerségek kialakításáért felel, célja az iparágak technológiai alkalmazásba történő nagyobb mértékű bevonása. A CCU/S Fórum második ülésén a CCU/S stratégiai jövőképét, a CO₂-infrastruktúrát és a CCU/S ipari partnerségeket vitatták meg.⁷⁶

CCUS Hub - OGCI

A CCU/S hub-ok (központok) célja az ipari dekarbonizáció felgyorsítása olyan infrastruktúra létrehozásával, mely alkalmas többféle forrásból származó CO₂ biztonságos, tartós és környezetbarát módon történő szállítására és tárolására.⁷⁷ A „CCUS Hub” célja, hogy támogassa a szakpolitikai döntéshozókat, a potenciális központ-fejlesztőket és a kibocsátókat, akik érdeklődnek egy CCU/S hub létrehozása iránt, a legfejlettebb központoktól származó tudás és tapasztalat megosztásával. Ezt a platformot az Olaj- és Gázipari Klímavédelmi Kezdeményezés (Oil and Gas Climate Initiative, OGCI) nevű szervezet hozta létre, mely számos partnerszervezet tudására és támogatására támaszkodik. Az OGCI tagvállalatai jelenleg mintegy 25 feltörekvő hub fejlesztésében vesznek részt aktívan, illetve világszerte több mint 40 központ áll tervezés vagy építés alatt. A platform három kulcseszközzel rendelkezik: a „CCUS Hub” Search (interaktív térkép 56 ország 279 potenciális CCU/S központjának azonosítására), a Playbook (a Valence Solutions független tanácsadó cég készítette mélyinterjúk alapján, kérdés-válasz formában), valamint a Hubs in Action (a jelenleg is fejlesztés alatt álló CCU/S hub-ok profiljainak összessége).

4.1.1.7. Támogatási rendszer

Az EU széles skálán kínál finanszírozási programokat az energiaprojektek támogatására (a kutatástól egészen a kereskedelmi léptékű projektekig), beleértve a CCS-t és a CCU-t is.⁵³ Az uniós finanszírozási rendszerek és innovációs hálózatok létfontosságúak ezen technológiák korai bevezetésének támogatásában.

Európai Innovációs Alap

Az Innovációs Alap a szén-dioxid-kvóta árától függően 2020 és 2030 között mintegy 38 milliárd eurós támogatást nyújt (az említett időszakban árverésre bocsátott 450 millió kibocsátási egység alapján) az innovatív, alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiák kereskedelmi demonstrációjára, amelynek célja az Európa dekarbonizációját és klímasegélyezésre való átállását szolgáló ipari megoldások piaci bevezetése.⁷⁸ Ezen célt többek között a CCU és CCS megoldásokra fókuszáló kis- és nagyszabású projektekre való felhívások által kívánja megvalósítani.

A 2021-es első felhívás kedvezményezettjei közül négy projektnek volt CCS vonatkozása (6. ábra).⁷⁹ A finn, belga, svéd és francia CCS létesítmények a hidrogén-, a vegyipari-, a bioenergia-termelés és a cementgyártás területén fejlesztendő projektjeik számára szereztek támogatást. A második felhívás eredményei között hét CCS és CCU projekt finanszírozását jelentették be 2022-ben. Bulgáriában, Izlandon, Lengyelországban, Franciaországban, Svédországban és Németországban megvalósuló projektek kerültek kiválasztásra, melyek tématerületei az alacsony

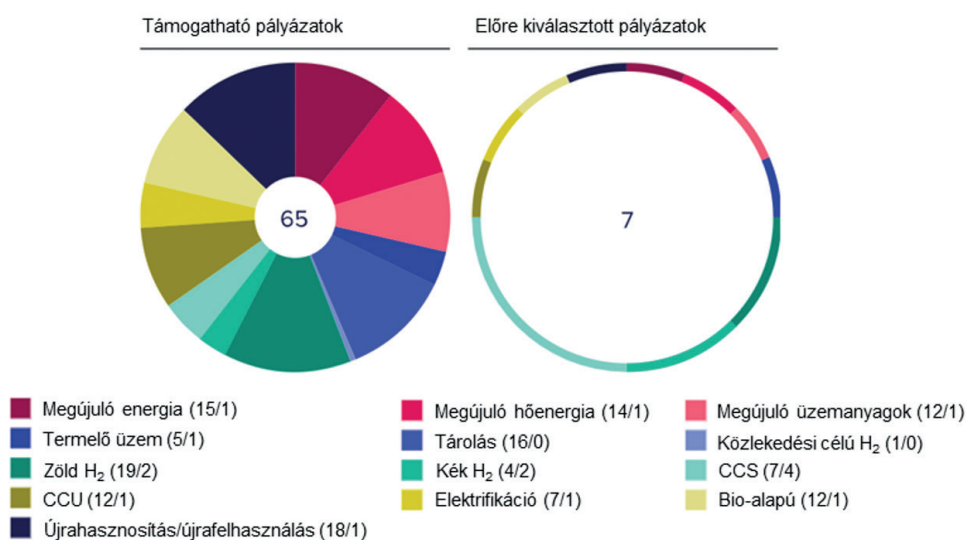
szén-dioxid-kibocsátású cementgyártástól kezdve, a karbonátvány-tárolók kialakításán keresztül, egészen a fenntartható repülőgép-üzemanyag (SAF) gyártásig terjednek. Az Európai Bizottság 2022 novemberében meghirdette a harmadik pályázati felhívást.⁸⁰ A zöld átmenet felgyorsításának érdekében az előző felhívás 1,5 milliárd eurós keretéhez képest az összesen 3 milliárd euró értékben meghirdetett ösztönzőcsomag főként a nagyszabású projektekre fókuszál.^{79,81} A 2022-es felhívás várhatóan fellendíti az ipari megoldások alkalmazását Európa szén-dioxid-mentesítésére. A REPowerEU Terv prioritásaira összpontosítva a felhívás további támogatást nyújt az EU orosz fosszilis tüzelőanyagoktól való függőségének megszüntetésére.

A felhívás a következő témákat felölelő innovatív projekteket finanszírozza⁸⁰:

- Általános dekarbonizáció (1 milliárd euró);
- Innovatív villamosítás és a hidrogén használata az iparban (1 milliárd euró);
- Tiszta technológiájú gyártás (0,7 milliárd euró);
- Közepes méretű kísérleti projektek (0,3 milliárd euró).

Horizont Európa

Az Európai Unió kutatási és innovációs keretprogramja, a Horizont Európa 2021 júniusában indult 95,5 milliárd eurós keretösszeggel, mely a 2021 és 2027 közötti hétéves időszakot fedi le.⁸² Az új, Horizont 2020 keretprogramhoz képest ambiciózusabb keretprogram 30%-kal több forrást biztosít a kutatási kiválóság és az áttörést hozó innovációk támogatására, valamint a legfontosabb társadalmi kihívások kezelésére. Emellett előtérbe kerül a közvetlenül



6. ábra Európai Innovációs alap pályázók és CCU/S pályázók száma - első felhívás, 2021, ^[79] alapján saját szerkesztés.

érzékeny társadalmi- vagy gazdasági hasznosság követelménye, illetve a zöld és digitális átmenet elősegítése.

Az intézkedések elősegítik a tiszta energiára való átállást (összhangban a REPowerEU-tervvel), és felgyorsítják a Zöld Megállapodás megvalósítását.⁸³ Ennek támogatása érdekében a Horizont Európa teljes költségvetésének legalább 35%-át éghajlat-politikai célokra fordítja.

A keretprogram második pillérét jelentő „Globális kihívások és európai ipari versenyképesség” költségvetése 53,5 milliárd euró, melyből a „Klíma, energia és mobilitás” klaszter összesen 15,35 milliárd euróban részesül.⁸² Az Európai Bizottság a 2022. év végén elfogadott Horizont Európa 2023-2024. évi fő munkaprogramjával mintegy 13,5 milliárd eurót fektet be az Európai Unió jövőjét alakító kutatási és innovációs tevékenységekbe.⁸⁴ A finanszírozási összeg jelentős részét olyan célzott intézkedésekre fordítják, amelyek támogatják a társadalom és a gazdaság zöldebbé válását.

A „Klíma, energia és mobilitás” klaszter számos felhívása a teljes CCU/S értéklánc vagy annak külön részeinek (CC, CCU vagy CCS) alkalmazását tűzi ki célul, valamint további klaszterek, például a „Digitális gazdaság, ipar és világűr” klaszter, az „Élelmiszer, biogazdaság, természeti erőforrások, mezőgazdaság és környezetvédelem” klaszter szintén említi felhívásaiban a CCU/S technológiák valamelyikének alkalmazását.

4.1.2. USA

Az Egyesült Államok hosszútávú stratégiát dolgozott ki, melyben ambiciózus éghajlati célokat tűzött ki a következő évtizedekre.⁸⁵ Ezen célkitűzések közé tartozik a 100 százalékban tiszta villamos energiára való átállás 2035-re, valamint a nettó kibocsátásmentes gazdaság elérése 2050-ig. Az USA nemzeti klímastratégiájának szerves részét képezi a CCU/S technológiák alkalmazása.

A célkitűzések megvalósítása melletti elköteleződést jelzi, hogy a Fehér Ház 2021 novemberében elfogadta azt az infrastrukturális beruházásokról és foglalkoztatásról szóló törvényt (Infrastructure Investment and Jobs Act, IJJA)⁸⁶, amely szerint 2026-ig terjedően összesen 12,1 milliárd dollárt fordítanak szén-dioxid-leválasztási technológiák fejlesztésére és bevezetésére (demonstrációs és kereskedelmi méretű projektekre), CCU piacfejlesztésre, valamint szén-dioxid-szállítási és -tárolási infrastruktúra kiépítésére. Az IJJA keretében módosult az „Outer Continental Shelf Act” nevű törvény is, ami arra utasítja a Belügyminisztériumot, hogy dolgozzon ki szabályozást a tengeri CO₂-tárolás engedélyezési keretrendszerének létrehozására.⁸⁶ Az Egyesült Államok emellett hatályba léptette a 2022-es Inflációcsökkentési Törvényt⁸⁷, amely az Internal Revenue

Service 45Q szakaszának továbbfejlesztését tartalmazza. A módosítások jelentősen megemelték a CCU/S adójóváírási összegét, feltéve, hogy a kibocsátáscsökkentés egyértelműen kimutatható. Ezenkívül a 2022-es változások csökkentették a támogatható projektekkel szemben elvárt kapacitást, valamint meghosszabbították a projektek kivitelezésének kezdeti határidejét és az adójóváírásra való jogosultságot.

A fent említetteken túl számos iránymutatás is készült, amelyek szintén a CCU/S technológiák alkalmazásának elterjedését segítik elő:

- A Környezetminőségi Tanács (Council on Environmental Quality, CEQ) elősegíti a CCU/S projektek felelős fejlesztését és engedélyezését.⁸⁸ Az iránymutatás részei közé tartozik a szövetségi döntéshozatal megkönnyítése a CCU/S projektekkel és a CO₂-vezetékekkel kapcsolatban, a nyilvánosság bevonása, a környezeti hatások megértése és a szén-dioxid eltávolítása.

- A fosszilis energia- és szén-gazdálkodásért felelős hivatal (Department of Energy Office of Fossil Energy and Carbon Management, FECM) a CCS előmozdítására vonatkozó stratégiát dolgozott ki.⁸⁹ A Stratégiai Vízió keretét hozta létre a megalapozott szén-dioxid-gazdálkodási döntések meghozatalához.

- A csővezetékek és veszélyes anyagok biztonságával foglalkozó szervezet (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)⁹⁰ új biztonsági intézkedéseket jelentett be a CO₂-csővezetékekre vonatkozóan, és új szabályalkotást kezdeményezett, valamint frissített tanácsadói közleményt adott ki a geológiai tárolás veszélyeiből eredő problémákról.

- A földgazdálkodásért felelős hivatal (Bureau of Land Management, BLM) CO₂ tárolására vonatkozó útmutatása összhangban áll a hatályos földgazdálkodási törvénnyel.⁹¹

Számos CCS projektet fejlesztenek a különböző szektorokban, az új projektek bejelentése is folyamatos.⁷⁹ A magas szintű aktivitás számos okra vezethető vissza, ideértve a CCS értékláncban eltérő képességekkel és követelményekkel rendelkező vállalatok közötti együttműködést és partnerséget, a szakpolitikai változásokat (például az adójóváírások növelése), továbbá azon innovatív csővezeték-szolgáltatási változásokat, melyek a földgázzal a CO₂-szállításra történő átalakításokat készítik elő. Néhány példa ezekre az innovatív projektekre:

- NEXT Carbon Solutions és a California Resources Corporation⁹²
- Carbon America⁹³
- Tallgrass⁹⁴
- Red Trail Energy⁹⁵.

4.1.3. Ázsia

4.1.3.1. Japán

2020 októberében a japán kormány bejelentette, hogy 2050-re megvalósítja a teljes szén-dioxid-semlegességet, melynek elérésében fontos szerepe van a 2021-ben kiadott "Green Growth Strategy"-nek, azaz a Zöld Növekedési Stratégiának.⁹⁶ A Stratégia olyan iparpolitikák összessége, amelyek célja egy gazdasági és környezeti szempontból is etikus körforgásos gazdaság létrehozása, és amelyben a CCU/S technológiák is nagy jelentőséggel bírnak.⁹⁷

A 2022 március végéig, összesen 11 helyszínen végzett vizsgálatok alapján kb. 16 milliárd tonna tárolási kapacitást feltételeztek.⁹⁷ Kísérleti számítások alapján a japán becslült éves CCS tárolási kapacitás 2050-ben hozzávetőlegesen 120–240 millió tonnára tehető.

A karbonsemlegesség elérésének céljából a kormány létrehozott egy 2 billió jen (~14,7 milliárd USD) „zöld innovációs alapot”, melynek kezelésével az új Energia- és Ipari Technológiai Fejlesztési Szervezetet bízták meg.⁹⁶ Az állami támogatás által arra számítanak, hogy a magánvállalatok ösztönözve lesznek további 15 billió jen befektetésére kutatás-fejlesztési tevékenységbe.

Az energiainportra való támaszkodás és a korlátozott CO₂-tárolókapacitás, valamint a 2050-es "net zero" célkitűzés arra készítette Japánt, hogy a térség éghajlati és energiaügyi támogatójaként lépjen fel.⁷⁹ Emellett Japán továbbra is támogatja a két- és többoldalú CCU/S együttműködést az ázsiai-csendes-óceáni térségben.

A japán hajózási társaságok is egyre aktívabbak a cseppfolyósított CO₂ szállításában, melyet főként annak végső tárolási helyszínére szállítanak.⁷⁹ A Japan CCS a Kansai Electric Power vállalattal együtt dolgozik egy demonstrációs projekten, amelynek célja a CO₂ szállítása a Kansai Electric Power kiotói széntüzelésű energiakomplexumából a 2024-ben kezdődő Tomokomai CCS projektbe.⁹⁸ Emellett az NYK és a Knutsen Csoport új üzletet hozott létre a cseppfolyósított CO₂ szállítására és tárolására; a Mitsubishi Shipbuilding egy CO₂-bemutató hajó építésén dolgozik⁹⁹; valamint a Mitsui O.S.K. Lines és a Petronas szándéknyilatkozatot írt alá a cseppfolyósított CO₂ szállításáról a CCU/S számára.^{100,101}

4.1.3.2. Kína

2020 szeptemberében Hszi Csin-ping elnök bejelentette, hogy a Kínai Népköztársaság „célja, hogy a CO₂-kibocsátás 2030 előtt érje el a csúcspontját, és 2060 előtt pedig a szén-dioxid-semlegességet”.¹⁰² Ennek megfelelően, a CCU/S technológiákra az elmúlt években egyre nagyobb figyelem

irányult Kínában.⁷⁹ A kutatások rávilágítottak a CCU/S potenciális szerepére a karbonsemlegesség elérésében, és a javaslatok szerint ezen technológiai megoldások 2050-re évi 0,6–1,45 milliárd tonnával, 2060-ra pedig évi 1–1,82 milliárd tonnával csökkenthetik a CO₂-kibocsátást.¹⁰³ Kína szén-dioxid-semlegességi ígéretének eredményeként a kínai kormány különböző minisztériumai aktívabbá váltak a CCU/S dekarbonizációban betöltött szerepének megértésében, megalapozva ezzel a szakpolitikák kidolgozását.⁵² Ennek hatására Kína XIV. ötéves terve tartalmazott először nagyszabású CCU/S demonstrációs projekteket.¹⁰⁴ 2021 májusában az Ökológiai és Környezetvédelmi Minisztérium több más minisztériummal együtt bejelentette, hogy támogatja a CCU/S kísérleti és demonstrációs projektjeit a szabadkereskedelmi övezetekben.¹⁰⁵

Egy CCU/S szabványosítási munkacsoport, amelyet a Kínai Nemzeti szén-dioxid-kibocsátás szabványosítási technológiai bizottság támogat; Nemzeti Energetikai Infrastruktúra és Gazdálkodási Szabványügyi Bizottság; és a Nemzeti Környezetgazdálkodási Szabványügyi Bizottság CCU/S szabványokat dolgoz ki a feltörekvő iparágak számára.¹⁰⁶ A nemzetközi vállalatok együttműködési kapcsolatokat kezdenek kiépíteni kínai beszállítókkal és fogyasztókkal az éghajlatváltozással és a CCU/S-sel kapcsolatban. Jó példa erre a tendenciára a BHP és a China Baowu Steel Group közötti partnerség, amely támogatja a CCU/S alkalmazására irányuló kutatást a China Baowu egyik gyártóüzemében.¹⁰⁷ A People's Bank of China elindított egy strukturális monetáris politikai eszközt, amely alacsony költségű hiteleket biztosít a pénzintézeteknek a dekarbonizációs projektek támogatására, amelybe a CCU/S is bekerült.¹⁰⁸ Az előrehaladás és néhány, a CCU/S szerepét felvázoló szakpolitikai dokumentum ellenére a CCU/S szakpolitikai alapú, fenntartható üzleti modelljének hiánya továbbra is akadályozza a bevezetést.

A projektfejlesztést a nagy állami energiavállalatok vezetik.⁷⁹ Erre egy példa Kína első integrált, egymillió tonnás CCU/S projektje, amelyet a SINOPEC fejlesztett ki, 2022 augusztusának végén lépett teljeskörűen üzembe, melynek keretében a leválasztott CO₂-ot a másodlagos olajkitermeléshez használják.

4.1.3.3. Dél-Korea

A Koreai Köztársaság 2020-ban adta ki nemzeti stratégiáját¹⁰⁹, melynek fő célja a karbonsemlegesség elérése 2050-re. A 2050-es jövőképben felvázolt kulcselemek Korea politikai döntéshozatalát, társadalmi átalakulását és technológiai innovációit fogják irányítani a zöld átmenethez.

Ezek között megtalálható a CCU/S technológiák alkalmazása is, melyek segítségével főként az energiaszektor és az ipar dekarbonizációját hajtják végre. A dél-koreai tudományos minisztérium 2021. június 15-én bejelentette, hogy 2030-ig 14 CCU/S terméket kíván kereskedelmi forgalomba hozni.¹¹⁰ Ennek érdekében a minisztérium 2023-tól évi 89,5 millió dolláros forrást biztosít a technológiák fejlesztésére. Célja továbbá, hogy 2050-re a leválasztott szén-dioxid költségét a jelenlegi 70 dollár/tonna CO₂-ról 20 dollárra csökkentse. Az ország további 1,4 billió wont (1,18 milliárd USD) fektet be 2030-ig a CCS technológiák fejlesztésébe.¹¹¹ Ebből az összegből körülbelül 1 billió won értékű beruházást eszközölnék a szén-dioxid-tárolási technológiák fejlesztésébe, mintegy 400 milliárd wont fordítanak a tárolóhelyek feltárására és biztosítására, mindezek mellett pedig további 120 milliárd wont biztosítanak a kapcsolódó nemzetközi projektekben való részvételre.

Az egyik legjelentősebb koreai érdekeltségű kezdeményezés a koreai energiavállalathoz, az SK E&S-hez köthető, amely egyetértési megállapodást írt alá az ausztrál Santoszal, hogy támogassa és együttműködjön CCS projektek és csomópontok fejlesztésében Ausztráliában és Bayu-Undanban.¹¹² Dél-Korea hazai petrokémiai ipara továbbra is vizsgálja és telepíti a CCU/S-t megvalósíthatósági tanulmányi és kísérleti demonstrációs szinten.

4.2. Hazai energia- és klímastratégiák feltérképezése

A CCU/S vonatkozású nemzetközi szakpolitikai háttér feltárása mellett a hazai helyzet feltérképezése szintén szükséges. Jelen fejezetben a CCU/S technológiák által nyújtott lehetőségek számbavételének szemszögéből vizsgáljuk a legfontosabb hazai energia- és klímastratégiákat.

4.2.1. Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia 2020-2050

2021. szeptember 3-án jelent meg a Magyar Közlönyben az 1620/2021. (IX. 3.) számú kormányhatározat a Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS) elfogadásáról.¹¹³ Ezen stratégiával Magyarország az első közé tartozott azon európai uniós tagállamokból, melyek törvénybe foglalták a teljes klímasemlegesség elérését 2050-ig, mindezt anélkül, hogy végrehajtása veszélyeztetné az ország gazdasági növekedését vagy a nemzeti jólétet. Az NTFS elkészítésébe az érdekeltek széles körét vonták be egyeztetés céljából.¹¹⁴ A stratégia megvalósításának egyik kiemelt szempontja, hogy a klímasemlegesség elérése közben biztosítani kell az ellátásbiztonságot és az igazságos átmenetet.

A stratégiában három forgatókönyv került kidolgozásra, melynek segítségével az üvegházhatásúgáz-kibocsátás (ÜHG-kibocsátás) előrejelzésére tettek kísérletet a 2050-ig terjedő időszakra:

1. Ölbe tett kéz (ÖTK) forgatókönyv, vagy más néven Business-as-Usual scenárió (BAU)
2. Halasztott Cselekvés (HCs) dekarbonizációs forgatókönyv
3. Korai Cselekvés (KCs) dekarbonizációs forgatókönyv

A három forgatókönyvből a HCs és KCs forgatókönyvekben jelentek meg a klímasemlegességi célkitűzések elérésére irányuló cselekvések. A számítások szerint mindkét forgatókönyv teljesíti az Európai Tanács általi 2030-as megemelt célkitűzést (55%), valamint a nettó nulla kibocsátás is elérhető 2050-re, ugyanakkor a tiszta energiaátmenet más ütemben valósul meg, melyek eltérő gazdasági-társadalmi hatásokkal bírnak. Az NTFS-ben meghatározott 2050-es nettó nulla ÜHG-kibocsátás eléréséhez a stratégia megalkotásakor ismert technológiai fejlesztési irányok alapján nyolc célterületet állapítottak meg, melyek között helyet kaptak a szén-dioxid-leválasztási, -hasznosítási és -tárolási technológiák is. Ezeket első sorban az energiatermelési szektorban, valamint a nagy kibocsátással bíró ipari létesítmények esetében tervezték alkalmazni. Az elektrifikáció nyújtotta lehetőségek megvalósítása Magyarországon is fontos szerepet kap, ami nagymértékben hozzájárul a klímasemlegességi célok eléréséhez, ugyanakkor ez önmagában nem képes a teljes gazdaság karbonmentesítésére. A villamosenergia-felhasználás terjedésével egyidejűleg a CCU/S technológiák piaci bevezetését is szorgalmazni kell, hiszen a jelenlegi ismeretek szerint a szén-dioxid megkötése nélkül nem lenne lehetséges a meghatározott szintre csökkenteni az ÜHG-kibocsátást.

Számos szektorban, így például a közlekedésben, egyes ipari folyamatokban, illetve egyéb szegmensekben (például a mezőgazdaság energiateljesítményének csökkentése) a teljes dekarbonizáció a szén-dioxid-leválasztási, -hasznosítási és -tárolási technológiák nélkül. Különösen indokolt ezen alternatívák megvalósítása, hiszen a jelentős kibocsátással rendelkező ipari termelés (például a vegyipar) és az építőipar (ezzel együtt a cement-, illetve vas- és acélipar) terén bővülés várható a jövőben, ami a tervezett beavatkozások nélkül a kibocsátások szignifikáns növekedését eredményezné.

Az NTFS megállapítja, hogy bár a CCU/S technológiák fontos szerepet töltenek be a hazai klímasemlegeségi célok megvalósításában, azok reális elterjedése, illetve a meglévő rendszerekbe történő integrálása az energia- és az ipari szektorokban a felvázolt forgatókönyvek szerint a 2030 utáni időszakra tehető (a HC-s és KC-s forgatókönyvekben egyaránt).

Ennek legfőbb oka a technológiák kereskedelmi életképessége, valamint az olcsóbb megoldások elérhetősége az ÜHG-kibocsátás csökkentésére. Az elterjedést szintén gátolja a megtérülő business case-ek hiánya (magas CO₂-kvótaár környezet szükséges tartósnak), illetve CCS esetében a CO₂ tárolására alkalmas helyek, geológiai formációk korlátossága. A CCU-nak ipari méretekben – pl. szintetikus üzemanyag előállítás – szintén magas a beruházáshoz kapcsolódó költség (Capital Expenditure, CAPEX) és a működési költség (Operational Expenditures, OPEX) igénye. Ebben az időszakban a fokozatos térnyerésnek köszönhetően egyre nagyobb jelentőséggel bírnak majd mind a CCU/S, mind pedig a hidrogén-technológiák, melynek köszönhetően 2050-re elérhetővé válik a nettó nulla kibocsátási cél. A CCU/S technológiák kiváltképp nélkülözhetetlenek a nehezen szénmentesíthető iparágak és ipari folyamatok kibocsátáscsökkentésében.

Az NTFS-ben említésre került a Nemzetközi Energia Ügynökség azon megállapítása is, mely szerint nem csupán az egyes elemek, de az egész CCU/S értéklánc magas érettségi szintje szükséges a teljes dekarbonizációhoz. Ebből kifolyólag a stratégia főbb beavatkozási irányainak definiálásánál egyrészt az ezen technológiákba történő beruházások élénkítését, másrészt pedig a technológiák alkalmazását szorgalmazták a közeljövőben, amely kiegészítésként szolgál az ipari termelési folyamatok hatékonyságnövelése mellett.

A CCU/S technológiák és az egyéb alternatív megoldások használatát, továbbá a fogyasztási szokások átalakítását szemléletformálási tevékenységgel kívánják támogatni, mely pozitív hatással bírhat az ipari kibocsátások alakulására. Mindezek mellett közvetett irányokat is meghatároztak, melyek megkönnyítik a technológiák elérhetőségét, terjedését, valamint integrálódását, például a kutatás-fejlesztés és innováció támogatása vagy az olyan szakemberek oktatása, képzése, illetve továbbképzése, akik képesek az új technológiák, eljárások kifejlesztésére, telepítésére és/vagy alkalmazására.

4.2.2. Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve

2016 novemberében az Európai Bizottság nyilvánosságra hozta a „Tiszta energia minden európainak” javaslatcsomagot, mely többek között egy egységes módszertanon, egységes tartalmi követelményen alapuló Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) kidolgozását kérte a tagállamoktól.¹¹⁵ Ennek eleget téve 2020-ban hazánk is bemutatta a magyar Nemzeti Energia- és Klímatervet. A dokumentumok egyik legfontosabb célkitűzése az energiatermelés dekarbonizálása, amely kizárólag az atomenergia és a megújuló energiák együttes alkalmazásával érhető el, valamint megjelenik a „szennyező fizet” elvének érvényesítése.

Az Európai Bizottság előírásainak megfelelően a magyar NEKT legfontosabb célkitűzései öt különböző dimenzió szerint kerültek csoportosításra. Így a dekarbonizációs témakörön belül szó esik többek között az ÜHG-kibocsátással és -eltávolítással kapcsolatos célokról (pl. szén-dioxid-mentes villamosenergia-termelés). Emellett hazánk 2030-at követően kizárólag karbonsemleges energiaforrásból kívánja biztosítani a végső energiafelhasználás esetleges növekményét. A NEKT továbbá kiemeli a határokon átnyúló (pl. Horvátország) gázpiaci integráció erősítését, illetve az integráció egyéb lehetőségeinek vizsgálatát. Hazánk számára az innovációs teljesítmény növelése mellett kiemelt célkitűzés az energetikai innováció és a klímaváltozás területén megbízható gazdaságfejlesztési lehetőségek maximális kiaknázása is. Mindemellett a stratégiában ösztönözni kívánják az olyan újszerű megoldások alkalmazását, amelyek hozzájárulnak az ellátásbiztonság erősítéséhez és az energiaszektor klímabarát átalakításához, növelik a magyar kutatási, fejlesztési és innovációs (K+F+I) kapacitást, valamint iparfejlesztési lehetőségeket teremtenek.

A CCU/S technológiák nyújtotta lehetőségek közül említésre kerül a CCS, azonban a CO₂ megkötéssel kiegészített erőműveket csak 2030-tól tervezett elérhetővé tenni. Ezen kívül, a NEKT a 2020-2040-es időtávban kalkulál esetleges CCS alkalmazással, mely időszakban vizsgálják a villamosenergia- és hőtermelő létesítmények, azon belül is a konvencionális erőművek feltételezett élettartamát, hatásfokának változását, valamint ezek költségadatait CCS technológia nélkül és annak alkalmazása esetében is.

A Nemzeti Energia- és Klímatervet (NEKT) június 30-ig kell az EU tagországainak frissíteniük, így Magyarországnak is.¹¹⁶ Előzetesen fejlesztésre érdemes közös nevezőként azonosították a nukleáris energia hosszútávú alkalmazása mellett az energiaközösségek ösztönzését, az energiahatékonyság javítását, az időjárásfüggőkön túl más megújuló energiaforrások, a geotermikus energia és a biomassza, biogáz

fokozott hasznosítását. A jelenlegi évtizedre szóló Nemzeti Energia- és Klímaterv elkészítése óta alapjaiban rajzolódtott át az energiapiaci és az általános gazdasági környezet is. A dokumentum finomhangolását ezen felül például a naperőművi kapacitások vártnál sokkal gyorsabb bővülése is időszerűvé teszi.

4.2.3. Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig

A kormány 2020 januárjában fogadta el azt az új Nemzeti Energiastratégiát, amely 2030-ig határozza meg a hazai energia- és klímapolitikai prioritásokat 2040-es kitekintéssel.¹¹⁷ A Nemzeti Energiastratégia (NES) középpontjában a tiszta, okos és megfizethető energetikai szolgáltatás áll, valamint fontosabb elvei között szerepel a „szennyező fizet” elvének érvényesítése. Az energetikában három fontos célkitűzés van, melyek közül a 2011-es stratégia leginkább az

ellátásbiztonságra és a megfizethetőségre helyezte a hangsúlyt, míg az új, 2019-es energiastratégia fókuszja elsősorban a fenntarthatóságra és az energiatermelés dekarbonizációjára került.¹¹⁸

A stratégia¹¹⁹ egyik fő pontja az energiaszektor klímabarát átalakításának végrehajtása, melynek célkitűzéseit a villamosenergia-mix átalakításával, a nukleáris termelőkapacitások szinten tartásával és a megújuló energiaforrásokkal együtt történő alkalmazásával érné el. Emellett erős napelemes kapacitásokkal, a lignit alapú áramtermelés alacsony karbonintenzitású áramtermeléssel történő kiváltásával, valamint CCGT egység (Combined Cycle Gas Turbine, kombinált ciklusú gázturbinás erőmű) telepítésével járulna hozzá a célkitűzésekhez. Ugyanakkor a felsorolt törekvéseken túl konkrét CCU/S technológiai megoldással nem számol a stratégia. Mivel a gáztüzelésű erőművek dekarbonizációjáról nem esik szó, így az elkövetkezendő 20-25 évben ezek a fosszilis erőművek valószínűleg fennmaradnak, így potenciális CCU/S célpontok lehetnek.



4.2.4. Nemzeti Hidrogénstratégia

2021-ben Magyarország kihirdette Nemzeti Hidrogénstratégiáját, mely a hidrogéngazdaságra vonatkozóan tűzött ki célokat 2030-ra.¹²⁰ A stratégia a hazai hidrogéngazdaság beindítását tűzte ki célul 2030-ig, fókuszterületei a hazai hidrogén-előállítás, hidrogén-logisztika (szállítás, tárolás), meglévő hidrogén-felhasználás zöldítése és új felhasználási területek (pl. hidrogén-mobilitás, energetika, acélipar) fellendítése (7. ábra). A hidrogén-előállítás terén CCU/S szempontból fontos stratégiai alapelv a technológiasemlegesség: a Hidrogénstratégia is számol az elektrolizáló alapú zöld hidrogén mellett a kék hidrogén előállításával (a kék hidrogén a földgáz alapú gőzreformáló

egységek szén-dioxid-leválasztó [Carbon Capture, CC] technológiával való felszerelésével állítható elő). A kék hidrogén 2050-ig meghatározó marad a stratégia szerint, főként az első időszakban, amíg a zöld kapacitások olyan volumenűre nem nőnek, hogy már képesek legyenek kielégíteni az ipar igényét. Ezzel kapcsolatban kiemelt intézkedésként lett megemlítve a kék hidrogénre és CCS-re vonatkozó ösztönző szabályozási környezet, illetve támogatási rendszer kialakítása. A nemzetközi trendek és makrogazdasági történések tükrében a közeljövőben szükségesnek mutatkozik a stratégia felülvizsgálata, valamint a releváns akciótervek elkészítése.

HIDROGÉNSTRATÉGIAI JÖVŐKÉP			
Erős kompetenciákat fejlesztünk ki a hidrogén értéklánc kulcsfontosságú elemei mentén, mely célzott KFI, valamint gazdaságfejlesztési tevékenységekkel kiegészítve a karbonsemleges társadalom felé való elmozdulást és a magyar gazdaság versenyképességének fenntartását szolgálja.			
KIEMELT CÉLOK – 2030			
<p>Nagyvolumenű karbonszegény és decentralizált karbonmentes hidrogén előállítása</p> <p>A felhasználói igényekhez illeszkedő, versenyképes árú, karbonszegény és karbonmentes hidrogénelőállítás feltételeinek megteremtése.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 ezer tonna /év karbonszegény hidrogén + • 16 ezer tonna/év „zöld”* és egyéb karbonmentes hidrogén • 240 MW elektrolizáló kapacitás** 	<p>Ipari felhasználás dekarbonizációja részben hidrogénnel</p> <p>Ipari termelési folyamatainak és termékhasználatának zöldítése kezdetben főleg karbonszegény hidrogén felhasználásával, hosszabb távon karbonmentes hidrogénfelhasználásra történő átállással.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 ezer tonna /év karbonszegény hidrogén + • 4 ezer tonna/év „zöld”* és egyéb karbonmentes hidrogén • 95 ezer tonna CO²-kibocsátás elkerülése 	<p>Közlekedés zöldítése</p> <p>Tiszta közlekedési módokra való átállás felgyorsítása a gázolaj-felhasználás tiszta alternatívákkal történő fokozatos kiváltásával. Ennek keretében a 2030-as időtávon a hidrogén elsősorban a nehézgépjármű-forgalomban jelenik meg reális alternatívaként.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10 ezer tonna /év „zöld”* és egyéb karbonmentes hidrogén • 20 hidrogén töltőállomás / 40 töltőpont • 4,8 ezer HFC jármű • 130 ezer tonna CO²-kibocsátás elkerülése 	<p>Támogató villamosenergia- és (föld)gáz-infrastruktúra</p> <p>Szektorintegrációs képesség – elsősorban szezonális áramtárolási képesség – kiépítése a szektorok közötti szinergiák kihasználásával, a karbonsemleges áttérést lehetővé tevő infrastruktúra kiépítésével és a meglévő infrastruktúra átalakításával.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 60 MW átlagos leszabályozási képesség • évi min. 2% térfogatarányos bekeverés a földgázrendszerben (ahol indokolt)
TÁMOGATÓ CÉLOK			
<p>Ipar- és gazdaságfejlesztési lehetőségek kihasználása</p> <p>Az iparági trendek és a hazai erősségek közös metszetében található tevékenységek megerősítése a versenyképesség növelése és a hazai penetráció elősegítése céljából.</p>	<p>Horizontális feltételrendszer: ösztönző működési környezet kialakítása</p> <ul style="list-style-type: none"> • Átfogó szabályozási és működési keretek kialakítása, • partnerség és nemzetközi együttműködés erősítése. 	<p>KFI és oktatás, ami támogatja a hidrogén sikerét az átmenetben</p> <ul style="list-style-type: none"> • A stratégiai célok megvalósításához nélkülözhetetlen az olyan tudományos, technológiai és horizontális kompetenciaegyüttes kiépítése, amely megalapozza az új technológiák hazai alkalmazását és fejlesztését, valamint demonstrálja azok hazai létjogosultságát. 	

7. ábra A Nemzeti Hidrogénstratégia céljai.¹²⁰

4.2.5. Magyar Nemzeti Akkumulátor Iparági Stratégia

A hagyományos energiatermelés „zöldítésének” fontosságát felismerve Magyarország Európában az elsők között dolgozta ki a 2021 decemberében elfogadott, magyar Nemzeti Akkumulátor Iparági Stratégia 2030 dokumentumot.¹²¹ A stratégia többek között a villamosenergia költséghatékony tárolási lehetőségeinek tömegessé tételével kíván hozzájárulni a vállalt éghajlatpolitikai célkitűzések eléréséhez.¹²² Fő célja Magyarországot az európai akkumulátor értéklánc egyik központjává tenni, melyet hat célkitűzésen keresztül tervez megvalósítani, mint például a megfelelő villamosenergia-tárolókapacitás biztosítása a megújuló energiaforrások alkalmazásához. Az erőforrás-hatékonyabb és kevesebb veszélyes anyagot tartalmazó, fenntartható akkumulátorok kulcsfontosságú szerepet fognak játszani a növekvő villamosenergia fogyasztási igények kielégítésében, és az éghajlat-politikai célok teljesítésében, így előtérbe került az ellenállóbb, belföldi akkumulátor-értékláncok fejlesztése. Az európai akkumulátor térképen Magyarország ideális helyzetben van, e pozíciót kívánják megtartani és tovább erősíteni.



5 SZABÁLYOZÁSI HÁTTÉR MAGYARORSZÁGON



5. Szabályozási háttér Magyarországon

Magyarországon a klímavédelem szabályozásában kiemelkedő szerepet töltenek be a nemzetközi és uniós szabályok, programok, valamint az állami irányítás jogi eszközei, azaz a különféle stratégiák. A hazai klímaintézkedések nagy része nem jogszabályban, hanem az állami irányítás jogi eszközeiben, azaz különféle stratégiák formájában jelenik meg (lásd a korábbi fejezet). Ezek megalkotása nemzetközi és uniós kötelezettség, azonban jogi kötőerővel nem bírnak. A célkitűzések, kötelezettségek jogilag nem számonkérhetők. A célok pedig néha részben átfedik egymást. Ezek a főbb dokumentumok kronológiai sorrendben: Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS-2), Hazai Dekarbonizációs Útiter, Nemzeti Adaptációs Stratégia, Éghajlatváltozási Cselekvési Tervek (ÉCsT), Nemzeti Energia- és Klímater, Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia, Nemzeti Hidrogénstratégia.

A klímavédelemről szóló 2020. évi XLIV. törvény biztosítja a jogi keretet a Kormány számára a rövid-, közép- és hosszútávú klímavédelmi és klímaalkalmazkodási intézkedések megvalósítására.¹²³ A *törvény* 3.§ (1) bekezdése alapján kimondja, hogy Magyarország az üvegházhatású gázok kibocsátását legalább 40%-kal csökkenti 2030-ig az 1990. évhez képest. Ez a normatív tartalom összhangban áll az Európai Unió célkitűzésével. A Kiotói Jegyzőkönyv alatt vállalt kötelezettségek teljesítésére jött létre az Európai Unió kibocsátáskereskedelmi rendszere. A 2005-ben elindított kibocsátáskereskedelmi rendszer, amely az „Irány az 55%!” csomag része, kifejezetten az ipart célozza meg. Hazai szabályozása szorosan illeszkedik az uniós rendszerhez.

5.1. A magyar kibocsátáskereskedelmi rendszer

Az emisszió-kereskedelemmel kapcsolatos hazai szabályozás egyik első megnyilvánulása a 2007. évi LX. törvény¹²⁴ az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye és annak Kiotói Jegyzőkönyve végrehajtási keretrendszeréről, valamint annak végrehajtási rendelete, a 323/2007. (XII. 11.) Korm. rendelet¹²⁵. Ezeket követte az üvegházhatású gázok közösségi kereskedelmi rendszerében és az erőfeszítés-megosztási határozat végrehajtásában történő részvételről szóló *2012. évi CCXVII. törvény* (ÜHG törvény), és annak végrehajtási rendelete, a 410/2012. (XII.28.) Korm. rendelet az üvegházhatású gázok közösségi kereskedelmi rendszerében

és az erőfeszítés-megosztási határozat végrehajtásában való részvételről.

A *2012. évi CCXVII. törvény* (ÜHG törvény) hatálya kiterjed:

- a kibocsátási egységek és a légiközlekedési kibocsátási kereskedelmére, és
- az 1. mellékletében meghatározott tevékenységekre és az e tevékenységekből származó, az 1. mellékletében felsorolt üvegházhatású gázok kibocsátására,
- a 2019/1603 EU felhatalmazáson alapuló bizottsági rendelet 2. cikkében meghatározott repülésekre és az azokból származó üvegházhatású gázok kibocsátására.

A szabályozás hatálya azon tevékenységekre terjed ki, melyeket az EU irányelv¹²⁶ is tartalmaz. Ezen tevékenységek a törvény 1. melléklet I-XXI. pontjaiban kizárólag a klímavédelemért felelős hatóság által kiadott jogerős kibocsátási engedély alapján folytathatók. Ez az engedély csak a kibocsátásra vonatkozik, a környezethasználatra nem, és a kibocsátások nyomon követése az üzemeltető kötelezettsége. A hatóság a kibocsátási engedélyt akkor állítja ki, ha az üzemeltető képes a kibocsátások nyomon követésére és jelentésére. A kibocsátási engedély visszavonásig hatályos. A hatóság a kibocsátási engedélyt rendszeresen, de legalább öt évente felülvizsgálja. A működéshez természetesen rendelkeznie kell a létesítménynek jogerős környezethasználati engedéllyel, amely többségében IPPC engedélyt kíván.

Az üzemeltető a kibocsátást az engedély mellett *ÜHG-egység (kvóta)* birtokában folytathatja. Az ÜHG-egység dematerializált, immateriális forgalomképes vagyoni értékű jog. Kibocsátási egységekhez az üzemeltetők többféle módon juthatnak hozzá. Egyrészt az állam ingyenesen az üzemeltetők rendelkezésére bocsátja a szükséges kvóták egy részét, ezt minden év február 28. napjáig kell kiosztani. Másrészt a megmaradt kvótákat az állam árverésen keresztül értékesíti. A létesítmények részére történő térítésmentes kiosztásra való jogosultság elbírálása a Nemzeti Klímavédelmi Hatóság hatáskörébe tartozik. A létesítményeknek évente *térítésmentesen* kiosztható kibocsátási egység-mennyiséget a Nemzeti Végrehajtási Intézkedés tartalmazza. A Nemzeti Végrehajtási Intézkedés tervezetét a miniszter készíti el, és nyújtja be jóváhagyásra az Európai Bizottságnak.

A szén-dioxid elkülönítését szolgáló létesítmények, a szén-dioxid szállítására szolgáló csővezetékek, a szén-dioxid-tárolóhelyek és a villamosenergia-termelők nem részesülhetnek kiosztásban, kivéve, ha a 2003/87/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv 10c. cikkében, valamint a 2012/27/EU európai parlamenti és tanácsi irányelv 2. cikk 34. pontja szerinti nagy hatásfokú kapcsolt energiatermelés a gazdaságilag indokolt módon, kereslet kielégítése céljából valósul meg. Villamosenergia-termelés céljára új

belépő nem részesülhet térítésmentes kiosztásban.¹²⁷ A kibocsátási egységekkel történő kereskedelem gyakorlati megvalósulását az ún. forgalmi jegyzékek rendszere teszi lehetővé. Az ÜHG-egységek kereskedelmével kapcsolatos adatok nyilvánosak, környezeti információnak minősülnek. Az ÜHG-egységek kiosztásának, forgalmának, visszaadásának, törlésének nyilvántartására a forgalmi jegyzékben és az európai uniós ügyleti jegyzőkönyvben kerül sor.

A felhasznált egységeket évente utólag, a fel nem használt kvótákat a kereskedési időszak végén vissza kell adni az Állam részére. Ez a művelet forgalmi jegyzékben történő rögzítéssel teljesíthető, amit elektronikusan vezetnek. Ezt követően az egység törlődik, érvénytelenedik. A kibocsátási egységek értékesítéséből származó állami bevételek 50%-át a magyar klímapolitika és a zöldgazdaság-fejlesztés megvalósítására kell fordítani.

A Nemzeti Klímavédelmi Hatóság az Energiaügyi Minisztérium szervezetébe integrált, önálló főosztályi besorolással rendelkező szervezeti egység. Az ÜHG-kibocsátási engedélyezési eljárásokban elsőfokú klímavédelmi hatóságként jár el országos illetékességgel. Tevékenységének eleme az EU emisszió-kereskedelmi rendszer (ETS rendszer) hatálya alatt üzemelő szektorok és vállalkozások felügyelete, valamint a Közösségi Forgalmi Jegyzék vezetése és a vonatkozó intézkedések megtétele, továbbá a térítésmentes kibocsátási egységek kiosztásával kapcsolatos hatósági feladatok ellátása.

Az üvegházhatású gázok kibocsátásához kapcsolódó jogkövetkezmények között megemlíthendők az alábbiak:

Ha az üzemeltető a kibocsátási engedély megszerzésére, a változások bejelentésére, a kibocsátások nyomon követésére, jelentésére és a jelentés hitelesítésére, valamint a kibocsátási egység visszaadására irányuló kötelezettségének részben vagy egészben nem tesz eleget, a hatóság az üzemeltetőt *bírság megfizetésére* kötelezi. Ismételt kötelezettségzegés esetén, annak súlyára figyelemmel a hatóság a tevékenységet *korlátozza, felfüggeszti vagy a kibocsátási engedélyt visszavonja*. A bírság megfizetésére tekintet nélkül, ha az üzemeltető vagy a légi jármű üzemeltető a jelentési és hitelesítési kötelezettségének, vagy az ÜHG-egységek visszaadására irányuló kötelezettségének határidőre részben vagy egészben nem tesz eleget, a megfelelően hitelesített jelentés benyújtásáig vagy az ÜHG-egységek visszaadásáig *nem jogosult ÜHG-egységek átruházására*. Továbbá, ha az ÜHG-egységek visszaadására irányuló kötelezettségének részben vagy egészben nem tesz eleget, a hatóság az üzemeltető *nevét és a köteletségzegés tényét honlapján nyilvánosságra hozza*.

A bírság megfizetésére tekintet nélkül az üzemeltető köteles az elmulasztott ÜHG-egységekkel egyező mennyiségű

ÜHG-egységet az állam részére visszaadni. Ennek elmulasztása esetén a tárgyévet követő harmadik évben az üzemeltető és a légi jármű üzemeltető számláján a mulasztással érintett mennyiséggel *csökkentett mennyiségű ÜHG-egység kerül jóváírásra*.

5.2. A szén-dioxid geológiai tárolásának jogszabályi alapja

A szén-dioxid geológiai tárolása a szén-dioxid-áramoknak a földfelszín alatti geológiai formációkba történő besajtolása, az ott megvalósuló tárolással együtt. Szén-dioxid geológiai tárolása vízoszlopban, valamint ivó-, ásvány-, gyógy- és hévízcélú hasznosításra már igénybevett, valamint ivóvíz, ásványvíz, gyógyvízhasznosításra alkalmas rétegekben, vízádókban, víztestekben nem engedélyezhető. A bányászatról szóló 1993. évi XLVIII. törvény (Bt.) hatálya kiterjed az energetikai és ipari eredetű szén-dioxid tárolására alkalmas földtani szerkezetek kutatására, tárolásra történő kialakítására, hasznosítására és bezárására, és a szén-dioxid geológiai tárolás céljából csővezetékén történő szállítására. III/A. része az energetikai és ipari eredetű szén-dioxid geológiai tárolásának szabályait tartalmazza. A szén-dioxid geológiai tárolásához kapcsolódó földtani kutatás időtartama legfeljebb 4 év, amely legfeljebb 2 évvel meghosszabbítható.

A 145/2012. (VII. 3.) Korm. rendelet¹²⁸ tartalmazza a szén-dioxid geológiai tárolásának szabályait, illetve a 29/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet tartalmazza az energetikai és ipari eredetű szén-dioxid tárolására alkalmas földtani szerkezetekkel kapcsolatos részletes szabályokat. A Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (bányafelügyelet) térben lehatárolja a potenciális tároló-komplexumokat és meghatározza ezek felszíni vetületét. A bányafelügyelet a szén-dioxid geológiai tárolására potenciálisan alkalmas földtani szerkezetek listáját a honlapján közzéteszi.¹²⁹ A szén-dioxid geológiai tárolásához kapcsolódó földtani kutatási engedélyben a bányafelügyelet meghatározza a kutatás engedélyezett időtartamát, a műszaki-biztonság és a tulajdon védelme érdekében szükséges feltételeket, a kutatási területtel érintett település nevét és az érintett ingatlanok helyrajzi számát és a kutatási terület sarokpontjainak Egységes Országos Vetületi Rendszer (EOV rendszer) szerinti koordinátáit, valamint jóváhagyja a kutatási munkaprogram tartalmát. Egy kutatási blokk területe legfeljebb 400 km² lehet. Tárolási engedélyt csak olyan létesítményre lehet kérelmezni, amelyre az üzemeltető végleges környezetvédelmi engedéllyel vagy végleges egységes környezethasználati engedéllyel rendelkezik. A tárolási engedély akkor adható meg, ha a szén-dioxid geológiai tárolásához kapcsolódó földtani kutatás alapján a tárolóhely szén-dioxid

geológiai tárolására alkalmas. A bányafelügyelet a tárolóhelyre vonatkozó kutatási engedély jogosultját a tárolási engedély megadásakor előnyben részesíti, feltéve, hogy a kutatási engedélyben meghatározott feltételek teljesültek és a tárolási engedély iránti kérelmet a kutatási engedély hatálya alatt nyújtotta be. Az üzemeltetőnek a tárolási engedély kapcsán pénzügyi biztosítékot kell nyújtania, mely nem lehet kevesebb mint 200 millió forint. Ha az üzemeltető a szén-dioxid geológiai tárolására irányuló tevékenységet tárolási engedély nélkül folytatja, a bányafelügyelet a tárolóhelyet haladéktalanul bezárja, és az üzemeltetőt bírság megfizetésére kötelezi (Bt. 42 W (2) bek.).

A bányafelügyelet eljárása során az ügyintézési határidő a szén-dioxid geológiai tárolásával kapcsolatban: a tárolási engedélyezésére vonatkozó eljárás során 70 nap, a bezárást követő időszakra vonatkozó terv elbírálására 45 nap.

Aszén-dioxid-áram összetételére és besajtolására vonatkozó szabályok tartalmazzák, hogy a szén-dioxid-áramnak legalább 95%-ban szén-dioxidból kell állnia. Hulladékot vagy más anyagot e hulladék vagy más anyag ártalmatlanítása céljából tilos a szén-dioxid-áramhoz adagolni.

Az üzemeltetőnek a tárolási engedély véglegessé válásától számított 2 éven belül a szén-dioxid besajtolását meg kell kezdeni. Amennyiben határidőben nem tudja megkezdeni a besajtolást és a határidő előtt nem kérte az engedély meghosszabbítását legfeljebb egy évvel, úgy a tárolásra vonatkozó engedély a hatályát veszti, kivéve, ha bizonyítja, hogy a szén-dioxid besajtolását rajta kívül álló ok miatt nem tudta megkezdeni.



6 CCU/S TECHNOLOGIÁK ÁTTEKINTÉSE



6. CCU/S technológiák áttekintése

6.1. Szén-dioxid-(pont)források

A szén-dioxid természetes úton és emberi tevékenység eredményeként is számos módon kerülhet a légkörbe. Az emberi tevékenység elsősorban a fosszilis alapú energiatermelés és egyes ipari folyamatok révén, illetve a természetes földek hasznosításával (pl. fakitermelés, mezőgazdasági vagy városi területtel alakítás) juttat szén-dioxidot a légkörbe. Ezen kibocsátásokkal az emberiség jelentősen beavatkozik a bolygó természetes szénkörforgásába, melynek részeként többek között az élőlények légzési folyamatai, a szerves anyagok bomlása, a természetes égés (pl. erdőtüzek), és számos további folyamat (pl. óceánokba oldódás, vulkánkitörés) révén kerül CO_2 a légkörbe, és vonódik is ki onnan. A fosszilis eredetű szén-dioxiddal szemben biogén szén-dioxidnak nevezzük azokat a kibocsátásokat, melyek természetes folyamatok révén vagy biológiai aktivitás következtében kerülnek a légkörbe. Ezen kívül egyes emberi tevékenységek, mint a biomasza-tüzelés, az ipari fermentációs folyamatok (pl. sörfőzésben, lepárlásban, cukorgyártásban) és a bioüzemanyagok használata, szintén biogén kibocsátást eredményeznek.

A CCU/S szempontból a legnagyobb jelentőséggel rendelkező CO_2 -források a pontforrások (pl. erőművek, ipari létesítmények), melyek esetében a tevékenység kibocsátása egy jól körülhatárolható, konkrét helyen (pl. kéményen, kivezető csövön) jut a légkörbe, így a kiáramló anyag jellemzői

méréssel vagy műszaki számítással egyértelműen meghatározhatók. A nagy kibocsátású pontforrásoknál jelentős mennyiségű CO_2 hatékony befogására nyílik lehetőség.

A szén-dioxid befogása, vagyis eltávolítása a légkörből, a körforgásos szén-dioxid-gazdaság sarkalatos pontja. Bár ez a kézenfekvő koncepció egyszerűnek tűnik, mégis kihívásokkal teli, hiszen a szén-dioxid koncentrációjának problémája többrétű. Környezeti szempontból a 420 ppm-es légköri koncentráció egyértelműen káros a fokozott üvegházhatás miatt, ugyanakkor technológiai oldalról ez a koncentráció nagyon alacsony a hatékony befogási technológiák alkalmazásához. A CO_2 befogása, illetve megkötése kétféleképpen történhet: egyrészt a CO_2 megköthető nagy kibocsátású pontforrásokból, másrészt közvetlenül a nyílt légkörből is. A környezeti levegőből történő befogással szemben a pontforrásból származó gázokban a CO_2 koncentrációja lényegesen magasabb.

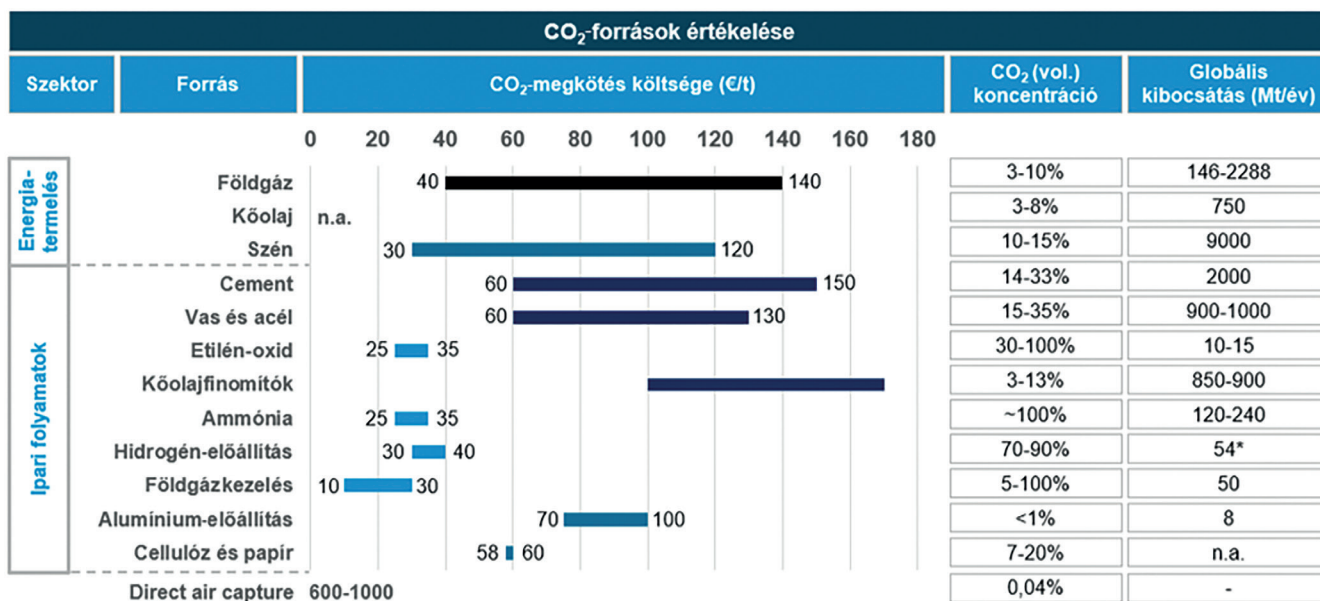
Az egyes szektorokban eltérő folyamatok eltérő koncentrációban bocsátanak ki CO_2 -ot (8. ábra).^{14,130} Minél nagyobb a kibocsátott gáz CO_2 -koncentrációja, illetve minél nagyobb nyomáson van, annál olcsóbb és egyszerűbb a CO_2 megkötése, szállítása, valamint további felhasználása. Jól megköthető, nagy koncentrációjú CO_2 jellemzően a vegyipari, a földgázkezelési és a fermentációs (biofinomítói) folyamatokban fordul elő. A villamosenergia-termelés és a nehézipar kibocsátása viszont alacsony koncentrációban tartalmaz CO_2 -ot, ezért a megkötés költséges, komplexebb megoldást igényel.

	Kibocsátási forrás leírása	CO_2 -koncentráció	CO_2 -nyomás
Villamosenergia-termelés	<ul style="list-style-type: none"> Áramtermelés során fosszilis tüzelőanyagok (földgáz, szén, olaj, biomasza) elégetéséből származó kibocsátás. Jellemzően a légkörbe kerül (vagy részben hasznosításra kerül kapcsolt termeléssel). 	<15%	standard nyomás
Földgázkezelés	<ul style="list-style-type: none"> A földgázkezelés során a felszínre hozott gázkeletgy a metán mellett nagy mértékben tartalmazhat CO_2-ot is. Ezt a gázkeletgyet a kitermelés során megtisztítják a CO_2-tól, és elengedik a légkörbe, vagy a gázkeletgyet fokozzák vele. 	96-100%	0,5-44 bar
Vas- és acélipar	<ul style="list-style-type: none"> Az acélgázkeletgynek rendkívül magas hőigénye van, és jellemzően fosszilis tüzelőanyagok segítségével biztosítják azt. A gyártás során keletkező füstgázot elfákllyazzák, vagy kiengedik a légkörbe (vagy részben helyben áramelőállításra használják fel). 	15-25%	standard nyomás
Cementgyártás	<ul style="list-style-type: none"> A cementgyártás kibocsátásának fő forrása a cementkeletgy kemencék felfűtéséhez használt tüzelőanyagok elégetéséből adódik (40%), valamint a kálcium-karbonát kálcium-oxidá történő alakítása során (60%). 	15-30%	standard nyomás
Etilén, etilén-oxid-előállítás	<ul style="list-style-type: none"> Az etilén jellemzően naftából és etánból kerül előállításra. CO_2 a gázkeletgyel történő tisztítás során keletkezik, amely a légkörbe kerül. Az etilén-oxid előállítás során is jelentős mennyiségben keletkezik CO_2, mely szintén a légkörbe kerül. 	30-100%	2-3 bar
Ammónia-előállítás	<ul style="list-style-type: none"> Az ammónia-előállításához szükséges hő és nyomás biztosításához elégetett fosszilis tüzelőanyagok bocsátanak ki CO_2-ot (33%), valamint az un. water-gas shift reakció során keletkezik jelentős CO_2 (66%). Ez utóbbinak több, mint fele hasznosításra kerül (karbamid-előállítás). 	90-100%	5 bar
Hidrogén-előállítás	<ul style="list-style-type: none"> A fosszilis alapú (szürke) hidrogént a metán gőz-reformálása révén állítják elő un. SMR üzemekben. Az eljárásnál szintézisgáz keletkezik (H_2-CO_2, CO), melynek tisztítása során a H_2 leválasztásra kerül további felhasználásra, a CO_2 pedig jellemzően a légkörbe. 	70-90%	3-5 bar
Kőolaj-finomítás	<ul style="list-style-type: none"> A kőolajfinomítás folyamata több ponton is bocsát ki CO_2-ot. Egyrészt jelentős energia-, hő- és gőzigénye van, melyet fosszilis tüzelésű erőművekből nyer. Továbbá jelentős kibocsátással jár a katalitikus krakkoló üzem működése is. 	3-13%	eltérő

8. ábra Az eltérő szektorok CO_2 -kibocsátásának jellemzői, [14,130] alapján saját szerkesztés.

Azokban az iparágakban jár alacsony költséggel a szén-dioxid befogása, ahol a füstgázban nagy koncentrációban található CO₂, hiszen gyakorlatilag azonnal felhasználható minőségben áll rendelkezésre. Ez azonban csupán kis részét képezi a teljes kibocsátásnak (9. ábra).¹⁴ A pontforrásokból leválasztható kibocsátás teljes mennyisége hozzávetőlegesen 12,7 gigatonna, melynek csupán 2%-a származik nagy koncentrációjú forrásból.¹³¹ A nagyobb nyomáson előállított CO₂ könnyebben és olcsóbban befogható (10. ábra). Az etilén-oxid-, az ammónia- és a hidrogén-előállítás előnyös a szén-dioxid-befogás szempontjából. Az alacsony CO₂-tartalmú füstgázzal rendelkező pontforrások (pl. villamosenergia-termelés) esetén a megkötés drágább.¹³²

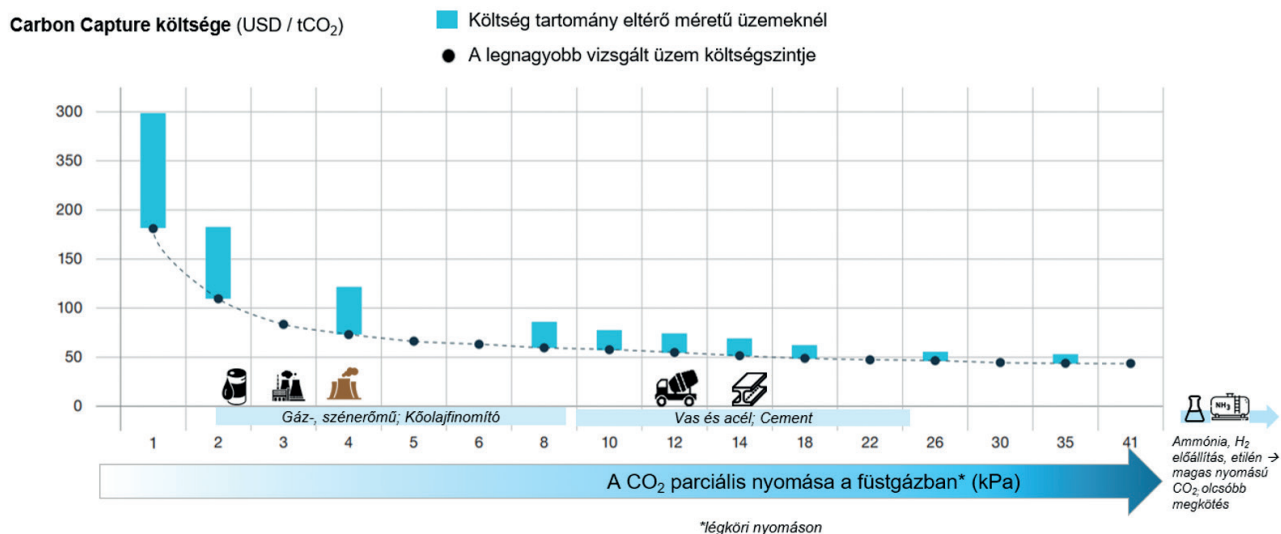
A biogén szén-dioxid-kibocsátó pontforrásokat általában karbonsemlegesnek tekintik, emiatt – néhány kivételtől eltekintve – nem tartoznak az ETS hatálya alá. Közülük előnyös tulajdonságokkal rendelkeznek a fermentációval foglalkozó üzemek (biofinomítók), melyekben nagy tisztaságú, koncentrált, biogén CO₂-kibocsátás keletkezik. Ez alacsonyabb költséggel befogható, emiatt megtérülő CCU/S beruházás építhető rá. További üzleti lehetőséget jelent, hogy a biofinomítók által előállított bioüzemanyagok alacsonyabb kibocsátású alternatívát jelentenek a hagyományos üzemanyagokhoz képest, így ezek használatával kibocsátásmegtakarítási prémium (GHG saving premium) érhető el.



*Csak kereskedelmi célú direkt H₂-előállítás, nem tartalmazza a finomításhoz és az ammóniagyártáshoz kapcsolódó H₂-előállítást

9. ábra CO₂-források értékelése, [14,130] alapján saját szerkesztés.

CO₂ parciális nyomásának hatása a szén-dioxid megkötés költségére



10. ábra A CO₂ parciális nyomásának hatása a megkötés költségére, [132] alapján saját szerkesztés.

6.2. CC technológiák: szén-dioxid-befogás és -leválasztás

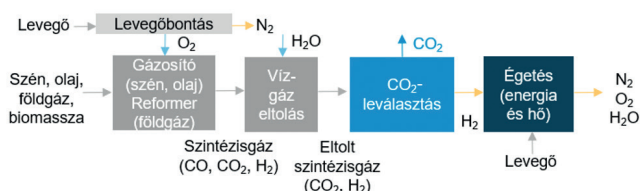
A CO₂-ot kibocsátó ipari folyamatok sokfélesége miatt nem megvalósítható egyféle, mindenre megoldást jelentő befogási technológia.¹³ Emiatt a CO₂-befogási rendszerek széles választéka áll rendelkezésre az adott ipárral való kompatibilitás biztosítása érdekében. Ezen technológiák három fő csoportba sorolhatók attól függően, hogy a CO₂ az ipari folyamat mely fázisából származik¹³³:

- égetés/átalakítás előtti (pre conversion/combustion),
- égetés utáni (post conversion/combustion), és
- oxigénes égetés utáni (oxy-fuel combustion).

Mindezek mellett létezik még egy negyedik kategória is, a levegőből történő közvetlen befogás technológiája (DAC), amely jelenleg feltörekvő fázisban van.

6.2.1. Égetés/átalakítás előtti befogás (pre conversion/combustion)

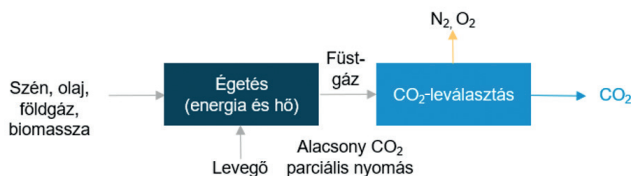
Az égetés/átalakítás előtti szén-dioxid-befogás egy olyan technológia, amely során valamely égési/átalakítási folyamat előtt történik meg a szén-dioxid befogása (11. ábra).^{13,134} A pre conversion folyamatok során a tüzelőanyag (pl. földgáz) előkezelésre kerül gőz reformálási és elgázosítási eljárásokkal, mely révén hidrogén, szén-dioxid és szén-monoxid keletkezik.¹³⁰ Ez elsősorban olyan ipari folyamatokra jellemző, melyek során szénhidrogénekből szintézisgázt állítanak elő (pl. hidrogén-előállítás gőzreformálással [Steam Methane Reforming, SMR]). A szintézisgázon ezután vízgőz hozzáadásával víz-gáz eltolási (Water Gas Shift, WGS) folyamat megy végbe, melynek eredményeként a gázelegy 17-38% koncentrációban tartalmaz CO₂-ot és H₂-t. A technológia előnye, hogy a CO₂ relatíve könnyen elválasztható a hidrogéntől. Hátránya, hogy csak bizonyos folyamatoknál alkalmazható (pl. SMR, elgázosító). Jellemzően komplex és magas beruházási költségű technológia.



11. ábra Égetés/átalakítás előtti szén-dioxid-befogás, [13] alapján saját szerkesztés.

6.2.2. Égetés utáni befogás (post conversion/combustion)

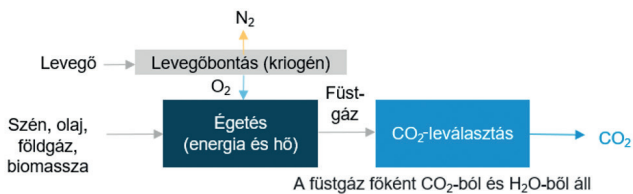
A post conversion folyamatok a tüzelőanyagok égetése után távolítják el a szén-dioxidot a „füstgázból” (12. ábra).^{13,134} Az ilyen folyamatok különösen meglévő erőművek felújítása/átalakítása szempontjából lehetnek érdekesek. Post conversion típusú megkötés szinte minden meglévő gyárra/erőműre felszerelhető, ahol nagy volumenű, stabil CO₂-forrás található. Ezt az erőmű/gyár füstgázhálózatára szükséges kötni. A legnagyobb kihívások ezzel kapcsolatban a megkötéshez felhasznált jelentős mennyiségű energia és a megkötés magas költsége, melyek elsősorban a füstgáz alacsony CO₂-koncentrációja miatt jelentkeznek. A füstgáz jellemzően maximum 15%-os CO₂-koncentrációval rendelkezik, ezért további tisztítás és kompresszió szükséges a szállításhoz, felhasználáshoz.¹³⁰



12. ábra Égetés utáni szén-dioxid-befogás, [13] alapján saját szerkesztés.

6.2.3. Oxigénes égetés utáni befogás (oxy-fuel combustion)

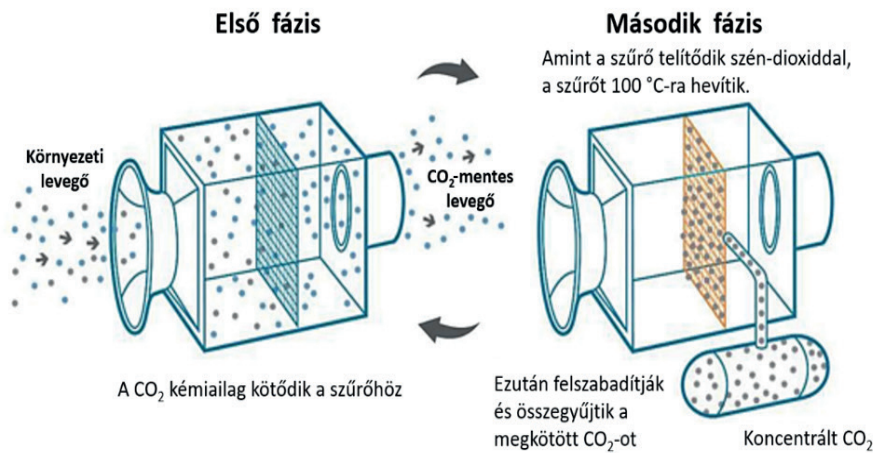
Az oxy-fuel combustion folyamatokban a tüzelőanyagok elégetéséhez levegő helyett oxigént alkalmaznak, ezzel csökkentve a bekerülő nitrogén mennyiségét (13. ábra).^{13,130} Az így keletkező füstgáz 80-98%-ban tartalmaz CO₂-ot, mely közel szállításra kész állapotban van. További szárítás, tisztítás és kompresszió után a CO₂ elszállítható. A levegő helyett tiszta oxigénnel való égetés előnye, hogy nincs szükség a nehézkes N₂ és CO₂ szeparációra, ezáltal sokkal energiahatékonyabb, mint a post-combustion rendszerek, valamint csekély oxigénfelesleg mellett sem keletkezik szén-monoxid. Hátránya, hogy jelentős mennyiségű oxigén és extrém magas hőmérséklet szükséges, ugyanakkor ez egy innovációs lehetőség lehet az elektrolízis során keletkező oxigén felhasználására. Az oxigén-előállításához szükséges levegőszétválasztó berendezés további beruházást és energiát igényel.



13. ábra Oxigénes égetéssel történő szén-dioxid-befogás, [13] alapján saját szerkesztés.

6.2.4. A szén-dioxid közvetlen befogása a levegőből (DAC)

A CO₂ közvetlen befogása a levegőből a közelmúltban jelentős figyelmet kapott a kutatók körében.¹³⁴ Ennek az új, feltörekvő technológiának a legfőbb előnye, hogy a használata a hagyományos befogási eljárásoktól eltérően nem korlátozódik a CO₂-pontforrásokra, hanem bárhol képes csökkenteni a légköri koncentrációt.¹³⁵ A zárt rendszerben „szűrők” segítségével köti meg a CO₂-ot, majd az összegyűjtött, koncentrált gázt szállítják tovább a jövőbeli felhasználókhoz (14. ábra). A DAC technológia azonban sokkal drágább, mint a hagyományos módszerek, valamint nagy energiaigénnyel rendelkezik.¹³⁰



14. ábra A szén-dioxid közvetlen befogása a levegőből, [136] alapján saját szerkesztés.

6.2.5. Szén-dioxid-leválasztási eljárások

A szén-dioxid-befogási technológiákhoz szorosan kapcsolódnak a szeparációs, avagy leválasztási eljárások, mellyel a befogott CO₂ tisztítása valósul meg, előállítva ezzel a további felhasználásra alkalmas szén-dioxidot. A leválasztási eljárásoknak számos formája létezik, de a mindenkori legjobb

megoldást a CO₂-befogási technológiák (és a CO₂-forrás) adottságai határozzák meg. A szeparációs eljárások közül az alábbi fő típusokat határozhatjuk meg:

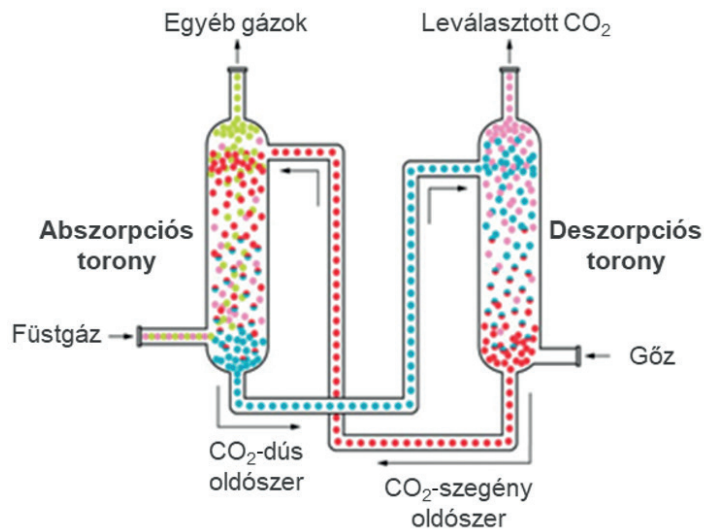
- abszorpció,
- adszorpció,
- membránszeparáció,
- halmazállapot-változás, és
- chemical looping (kémiai körfolyamat).

Az abszorpció eljárások végezhetőek fizikai és kémiai oldószerek által egyaránt, így ezeket a megoldásokat külön-külön ismertetjük.

A.1) Kémiai abszorpció - A CO₂ kémiai oldása folyékony oldószerben

A kémiai abszorpció a legelterjedtebb és legérettebb technológia, mely alacsony CO₂-koncentráció esetén is alkalmazható.^{13,135,137,138} Kémiai abszorpció esetén a CO₂ elválasztása kémiai oldással történik (15. ábra). A gáz-halmazállapotú, szén-dioxidot tartalmazó gázelegyet folyékony fázison vezetik át. A folyékony fázis olyan komponenseket tartalmaz, amellyel a CO₂ képes kémiai kötést létrehozni, ezzel megkötve azt. Alkalmazható pre- és post-combustion megoldások esetén, erőművekben, illetve SMR alapú hidrogén-előállításnál is. Előnye, hogy alacsony CO₂-koncentrációjú gáz esetében is hatékony, nagy kapaci-

tásban, rugalmasan alkalmazható és gyors reakcióra képes. A technológia hátránya egyrészt a magas energiaigénye, az oldószer gyors elhasználódása miatti regeneráció vagy pótlás szükségessége, továbbá a leválasztott, alacsony nyomású CO₂ szállításához előkezelés szükséges. Bár érett, kereskedelmi forgalomban elérhető technológiáról van szó,



15. ábra A CO₂ kémiai oldása folyékony oldószerben, [146] alapján saját szerkesztés.

további fejlesztések vannak kilátásban, melynek keretében elsősorban újfajta aminosavakkal kísérleteznek.^{139–145}

A.2) Fizikai abszorpció - A CO₂ fizikai oldása inert, folyékony oldószerben

A fizikai abszorpció magas CO₂-koncentráció esetén javasolt, érett és ipari méretben alkalmazható technológia.^{13,135,137,138} Fizikai abszorpció esetén a CO₂ fizikai tulajdonságain alapuló oldódás történik, kémiai inert oldószer alkalmazásával. A gáz-halmazállapotú szén-dioxid oldása folyékony fázison átvezetve történik. Az abszorpció történhet vízben vagy szerves oldószerekben (pl.: metanol, N-metil-2-pirrolidon, dimetil-éter). Alacsony hőmérséklet- és magas nyomásigény esetén a leghatékonyabb technológia. A technológiát leginkább a földgázfeldolgozási, valamint a széneldőztési eljárásoknál alkalmazzák. A kémiai abszorpcióhoz képest alacsonyabb energiaigénnyel rendelkezik, továbbá a gyenge CO₂-kötés miatt egyszerűbb és olcsóbb az oldószer regeneráció. Ugyanakkor korlátozó tényező, hogy csak nagy koncentrációjú CO₂ esetében működik hatékonyan. A technológia fejlesztésére irányuló tevékenységek az új abszorber közegek használatára fókuszálnak, hogy a technológiát minél szélesebb körben lehessen alkalmazni.^{147,148}

B) Adszorpció

Az adszorpció leválasztás kis méretben is alkalmazható és alacsony energiaigényű, típustól függően már kereskedelmi fázisban is elérhető technológia.^{13,135,137,138} Adszorpció esetén a CO₂ a szilárd adszorbens felületén kötődik meg, fizikai vagy kémiai úton (16. ábra). Az adszorbens gyakran porózus és nagy fajlagos felülettel rendelkezik, a nagyobb

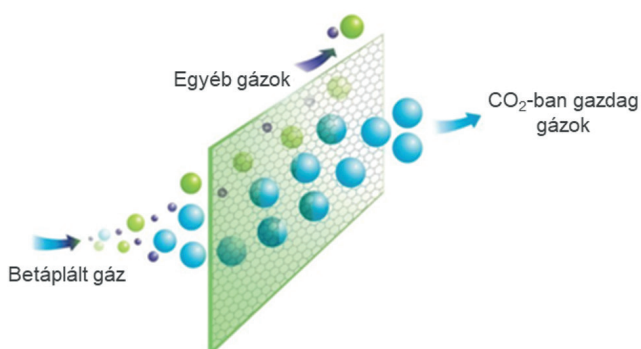
menyiségű szén-dioxid megkötése érdekében. Az adszorbens regenerálása általában magas hőmérséklettel és csökkentett nyomással történik. Elterjedt technológiák a nyomás lengéses adszorpció (Pressure Swing Adsorption, PSA), a hőmérséklet lengéses adszorpció (Temperature Swing Adsorption, TSA), a vákuum lengéses adszorpció (Vacuum Swing Adsorption, VSA) és a nyomás-hőmérséklet lengéses adszorpció (Pressure and Thermal Swing Adsorption, PTSA). A már említett kis méret és viszonylag kis energiaigény mellett előnye, hogy kis CO₂-leválasztási költségek jellemzik, valamint hulladékkezelése is előnyösebb az abszorpciónál. A technológia legfőbb korlátja, hogy a CO₂ leválasztása jelenleg még alacsony hatékonyságú, ezért új, hatékonyabb adszorberek fejlesztését tűzték ki célul a jövőben.



16. ábra A CO₂ fizikai vagy kémiai megkötése szilárd felületen, [146] alapján saját szerkesztés.

C) Membránszeparáció

A membrán alapú szétválasztás jól ismert, magas nyomás és CO_2 -koncentráció mellett hatékony technológia.^{13,135,137,138} Membránszeparáció esetén a komponensek molekula-méretén vagy kémiai tulajdonságain alapul a gázelegyek elválasztása. Bizonyos molekulák át tudnak haladni a membránon, míg mások nem (17. ábra). A különböző kialakítású membránok (fém, polimer, kerámia alapú membránok) lehetőséget nyitnak a magasabb hőmérsékleten való alkalmazásra, illetve arra, hogy a CO_2 -szeparáció különféle kémiai vagy fizikai mechanizmusok alapján menjen végbe. Érett technológiának számít földgázkezelés esetében, ugyanakkor egyéb alkalmazásai (vegyipar, nehézipar) jelenleg demonstrációs fázisban vannak.^{149,150} Stabil technológiáról van szó, továbbá fejlesztés alatt áll kisméretű alkalmazása is, melynél a fajlagos hatékonyság a méret csökkenésével sem romlik majd. A technológia hátránya, hogy magas a nyomásigénye, ezért alacsony nyomású és koncentrációjú füstgáz esetén előkezelés szükséges.



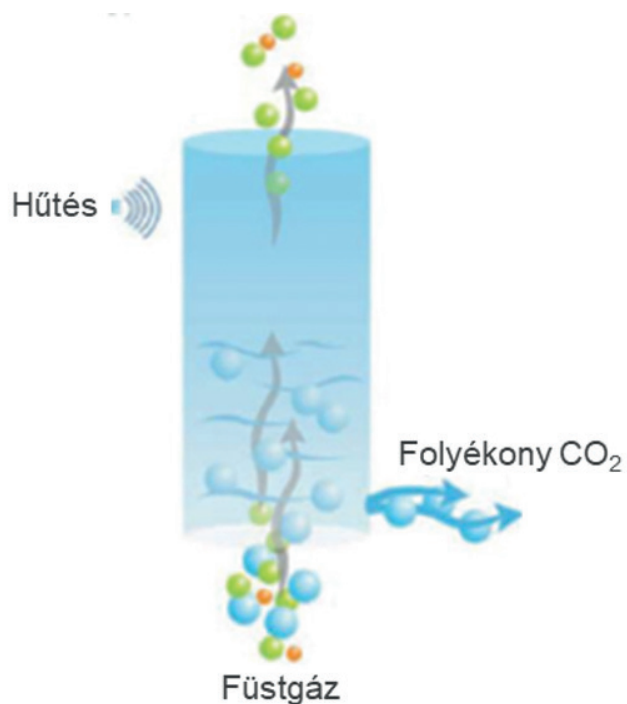
17. ábra A CO_2 leválasztása áteresztő membrán alkalmazásával, [146] alapján saját szerkesztés.

D) Halmazállapot-változáson alapuló szétválasztás

A folyékony vagy szuperkritikus leválasztás energiaigényes, fejlesztés alatt álló technológia.^{13,135,137,138} Folyékony szeparáció esetén az alacsony hőmérsékletre hűtés során a kondenzálódó CO_2 elválik a gázeleg többi komponensétől (18. ábra). Ehhez 5,19 bar feletti nyomás, valamint a nyomástól függően $-56,57\text{ °C}$ és $31,03\text{ °C}$ közötti hőmérséklet szükséges. A módszer lehetővé teszi a folyékony CO_2 közvetlen gyártását és magas nyomású tárolását. Szuperkritikus CO_2 -áram hűtésével is lehet folyékony CO_2 -ot előállítani, illetve melegítéssel a folyamat fordított irányban is működik. Főleg nagy CO_2 -koncentrációjú forrásoknál alkalmazható, használják földgázkezelésnél és különböző erőműveknél is skálázhatósága miatt. A technológia fő korlátai a magas

energiaigény és a vele járó emelkedett megkötési költségek, illetve nagy nyomás fenntartása szükséges a zavartalan működéshez. A jelenleg kísérleti méretekben lévő technológia jövőbeli fejlesztési területei a fajlagos költség csökkentése, valamint a hatékonyság növelése.

Az AirLiquide kriogén technológiája a szén-dioxid fagyáspontjának kihasználásán alapul, amelynek köszönhetően nagy tisztaságú CO_2 -ot lehet kinyerni a füstgázból. A technológia széles körben alkalmazható különböző ipari folyamatokban, és saját fejlesztésű berendezéseket használ nagy hatékonysággal, illetve kis energiafogyasztással. Az AirLiquide rendszerének kulcsfontosságú eleme a kriogénikus levegőszétválasztó rendszer. A technológia modularitása és skálázhatósága lehetővé teszi az egyszerű integrációt a meglévő folyamatokba, valamint a rendszer testreszabható különböző alkalmazásokhoz, illetve alapanyagokhoz. A technológia képes a CO_2 kinyerésére és tisztítására alacsony és magas koncentrációjú égéstermékekből, valamint biogázból is.^{151–154}



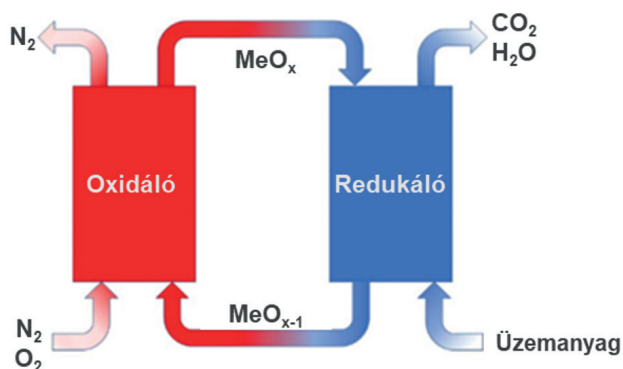
18. ábra Halmazállapot-változáson alapuló szétválasztás, [137] alapján saját szerkesztés.

E) Chemical looping

A chemical looping ígéretes, korai érettségű technológia, mely a tüzelőanyag elégetése során nagy tisztaságú CO_2 -áramot állít elő, többlet-energiafelhasználás nélkül.¹⁵⁵ Ehhez első lépésében kis fémrészecskékkel (pl. vas, mangán) megkötik az oxigént a levegőből, így fém-oxidok

képződnek (19. ábra). A második lépésben ezek a fém-oxidok biztosítják a tüzelőanyag elégetéséhez szükséges oxigént, ezáltal energiát és nagy tisztaságú szén-dioxidot állítva elő. A technológiát oxy-fuel és pre-combustion megoldások esetén használják erőművekben, illetve szintézisgáz előállításánál. Egyelőre pilot méretű alkalmazásokban megtalálható technológia, nagy léptékű demonstrációs alkalmazásra még nem került sor, így 2030 után várható az elterjedése. Ennek akadályozó tényezője a magas nyomásigény, valamint a megfelelő oxigénhordozók hiánya, ezért a jövőbeli fejlesztések fő fókusza ezen oxigénhordozók vizsgálata.

Ennek egy speciális esete, amikor a fém ion a kalcium. A „calcium looping” technológia viszonylag érett, technológiai érettségi szintje (Technology Readiness Level, TRL) TRL 6-7. Ezen eljárás során a CO_2 szállítása Ca^{2+} ionokhoz való reverzibilis kötődéssel valósul meg. A CO_2 -tartalmú gázelegyből kalcium-oxid segítségével kötik meg a CO_2 -ot, amely így kalcium-karbonátot (CaCO_3) alkot, mely egy másik reaktorban regenerálható, tiszta CO_2 -áramot állítva elő. Előnye, hogy a pre-, post- és oxy-fuel-megoldások, valamint Direct Air Capture CO_2 -befogási típusok bármelyikénél alkalmazható. Hátránya ugyanakkor a nagy energiaigény a regenerálás során. A calcium looping technológiák közé tartozó, kevésbé érett (TRL 3-5) technológia az ásványképzés. Ezen eljárásban a CO_2 reakcióba léptetése zajlik le fém-oxidokkal – elsősorban magnéziummal és kalciummal –, mely során karbonátok keletkeznek. A végtermékek közvetlenül is felhasználhatók, pl. az építőiparban cementgyártáshoz.



19. ábra A CO_2 kémiai körfolyamattal történő leválasztása, [137] alapján saját szerkesztés.

A felsorolt technológiákon túl léteznek egyéb CO_2 -leválasztási technológiák is, melyek mind alkalmazási terület, mind pedig érettségi szint szempontjából rendkívül változatosak.^{137,156–158} A hibrid CO_2 -leválasztó rendszerek több különböző technológia együttes alkalmazásán alapuló megoldások (pl. oldószeres és membrán), melyeket főként post-combustion megoldásoknál használnak, érettségi szintjük pedig TRL 4-6 közé tehető. Az elektrokémiai pumpa eljárás hasonló fejlettségi szinten áll (TRL 3-6), alkalmazási területe az SMR alapú hidrogén-előállítás. Ez a technológia az SMR szintézisgázban található H_2 és CO hatékony szétválasztását elektrokémiai reakciók és protoncserélő membrán (Proton Exchange Membrane, PEM) alkalmazásával hajtja végre. Egyik fő jellemzője, hogy egyszerre képes a szén-dioxidtól és szén-monoxidtól elválasztani, illetve sűríteni a hidrogént. További CO_2 -leválasztási lehetőség a karbonát-olvadékos üzemanyagcella használata (TRL 5-6), amely post-combustion technológiaként felhasználva közvetlenül alakítja át a kémiai energiát elektromos energiává, így az áramtermelés mellett a CO_2 szeparációja is megtörténik a füstgázból.^{159,160}

A felsoroltakhoz képest a mikrobiális és alga rendszerek a szén-dioxid-leválasztáson túl már egyfajta szén-dioxid-hasznosításnak (CCU) is tekinthetők. Az algák magas fotoszintetikus aktivitásuk miatt hatékonyan kötik meg a szén-dioxidot és biomasszát állítanak elő, amennyiben a növekedési feltételek rendelkezésre állnak. A technológia által egyrészt a füstgáz ártalmatlanítható az algatavakban, másrészt pedig a hulladékhő felhasználható az algatavak fűtésére. A mikrobiális és alga rendszerek jelenleg demonstrációs fázisban lévő technológiának minősülnek, világszinten több pilot projekt is üzemel.

A szén-dioxid-befogási és -leválasztási technológiák összefoglaló értékelését az alábbi ábra (20. ábra) szemlélteti:

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
	<ul style="list-style-type: none"> Meglévő üzemek felújítására alkalmas lehet – megőrizhető a meglévő infrastruktúra; legtöbb meglévő szén-erőművön jól alkalmazható Még jelentős fejlődés várható ezen a területen 			<ul style="list-style-type: none"> Magas nyomás és CO₂ koncentráció -> alacsonyabb ktgek 			<ul style="list-style-type: none"> Nagyon magas CO₂ koncentráció a füstgázban 	
	<ul style="list-style-type: none"> Alacsony nyomás és CO₂ koncentráció a füstgázban -> nagy teljesítmény, energiaigény és ktg a CO₂ megkötése Keletkező CO₂ alacsonyabb nyomáson – további kompresszió kell 			<ul style="list-style-type: none"> Komplex megoldás: nem elég a füstgázt befogni, olyan folyamat szükséges, ahol a tüzelőanyag előkezelése történik (pl. SMR, elgázosító) 			<ul style="list-style-type: none"> 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	
	<ul style="list-style-type: none"> Alacsony koncentrációjú CO₂-t is képes megkötni Oldat regenerációja szükséges Korrózió, degradáció 	<ul style="list-style-type: none"> TSA, VSA technológia jól alkalmazható, de csak kisebb méretben TSA: ipari méretben még nem hatékony a nagy hőigény miatt 	<ul style="list-style-type: none"> Leskálázható technológia Kis nyomáson nagyon hatékonytalan technológia 	<ul style="list-style-type: none"> Jól ismert technológia Alacsony energiaigény Oldat regenerációja szükséges Korrózió, degradáció 	<ul style="list-style-type: none"> PSA: alacsony energiaigény a magas nyomás miatt Előnyösebb hulladékkezelés A szilárd adszorbensről kis hatékonysággal választható le a CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Földgázkezelésben jól ismert technológia Magas nyomás és stabil gázáram mellett hatékony Soklépéses folyamat, mire a CO₂ leválasztásra kerül, ezért komplexebb technológia 	<ul style="list-style-type: none"> Levegő helyett O₂-val való égetés miatt nem kell a nehézkes N₂ és CO₂ szétválasztást végezni Kjövő CO₂ magas tisztaságú Folyamatos nagy volumenű oxigénellátás szükséges, ami jelentős költség és energia Extrem magas hőmérséklet szükséges es 	
Technológiai érettség	Érett (TRL9)	Érett (TRL6)	Érett (TRL5)	Érett (TRL9)	Érett (TRL9)	Pilot (TRL7-8)	Érett (TRL5-6)	
Alkalmazási terület	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) IGCC erőmű 	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) Erőmű (szén, gáz) Vas-acél, cement 	<ul style="list-style-type: none"> Erőmű (földgáz) 	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) IGCC erőmű 	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) IGCC erőmű 	<ul style="list-style-type: none"> Földgázkezelés 	<ul style="list-style-type: none"> Erőmű (földgáz, szén), cementgyártás, vas-és acél 	

erőssegek hátrányok

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

6.3. Szén-dioxid-szállítás és -tárolás

6.3.1. Szén-dioxid-szállítási módok áttekintése


A leginkább költséghatékony megoldások azok, amikor a szén-dioxid megkötése és tárolása/hasznosítása ugyanazon a helyszínen történik. Ugyanakkor a CO₂ leválasztásának helyszíne földrajzilag ritkán esik egybe a tárolás/hasznosítás helyszínével, ezért szükséges számításba venni a rendelkezésre álló szállítási lehetőségeket. A CO₂ szállításának számos szárazföldi, vízi és egyéb módja létezik:

- csővezeték,
- tankerhajó,
- vonat,
- tartályos teherautó stb.

Ezekon kívül, a CO₂-ot kisebb volumenben is lehet szállítani palackozott formában, mely főként a rövid távolságra történő közúti szállítás során jelent jó megoldást.

A legoptimálisabb szállítási mód kiválasztásakor számos tényezőt szükséges mérlegelni (21. ábra). Figyelembe kell venni többek között a szállítási kapacitást, a beruházási és működési költségeket, valamint a távolságot is. A legtöbb szállítási mód már napjainkban is kereskedelmi léptékben elérhető, azonban a helyi adottságok nagyban befolyásolják használatukat.



	Csővezeték	Tankerhajó	Vonat	Teherautó	Palackozva
					
Mennyiség	<ul style="list-style-type: none"> Nagy volumen Korlátlan számú csővezeték építhető 	<ul style="list-style-type: none"> Nagy volumen műszakilag lehetséges ~1800 t / tartály 	<ul style="list-style-type: none"> Kis / Közepes volumen 	<ul style="list-style-type: none"> Kis volumen ~40 t / teherautó 	<ul style="list-style-type: none"> Nagyon kis volumen ~100 kg / palack
Költség	CAPEX: magas OPEX: alacsony	CAPEX: közepes / alacsony OPEX: magas	CAPEX: alacsony OPEX: magas	CAPEX: alacsony OPEX: magas	CAPEX: alacsony OPEX: magas
Távolság	 Nagy	 Nagy	 Nagy	 Rövid	 Rövid
Állapot	 Szuperkritikus	 Cseppfolyós	 Cseppfolyós	 Cseppfolyós	 Cseppfolyós
Rugalmasság	Csővezetékre kapcsolódás szükséges	Kikötői elhelyezkedés szükséges	Rugalmas, ha a vasúti megközelítés megoldott	Rugalmas, ha a közúti megközelítés megoldott	Rugalmas, ha a közúti megközelítés megoldott
Technológiai státusz	Kereskedelmi forgalomban kapható	Műszakilag rendelkezésre áll	Kereskedelmi forgalomban kapható	Kereskedelmi forgalomban kapható	Kereskedelmi forgalomban kapható
Alkalmazás	Nagy léptékben telepíthető	Jelenleg csak kis léptékben történik	Vasúti telephelyek közti szállításhoz	Közeli célponthoz történő szállításhoz	Nagyon kis volumen szállításához

21. ábra A CO₂ szállításának fő típusai és jellemzői, [137] alapján saját szerkesztés.

A csővezetéken keresztüli CO₂-szállítás hosszútávon a legköltséghatékosabb megoldás, ha feltételezzük a klímapolitikai célok és a körforgásos szén-dioxid-gazdaság megvalósulását nemzetközi szinten. A CO₂-vezetékek sokban hasonlítanak, de különböznek is a kontinenst átszövő földgázzsállítás vezetékektől.¹⁶¹ A földgázzsállítás nyomása max. 80–90 bar, azonban a CO₂-vezetékek üzemnyomása ennél nagyobb, akár 100–180 bar között lehet¹⁶¹, amit még jelentősen befolyásolhatnak a gázban esetlegesen megtalálható egyéb összetevők is (pl. metán, kén-hidrogén stb.). A nagynyomású CO₂-vezeték meghibásodásánál számolni kell a gyors nyomáscsökkenés miatti hűlés okozta szárazjég képződésével, valamint a jelentős környezeti lehűlés miatt a cső anyaga, a kompresszorok, szelepek és tömítések elhidegülésével is. A földgázhálózathoz képest a CO₂-vezeték-hálózatán kevesebb a csatlakozási pont (CO₂ esetén leválasztási pont és

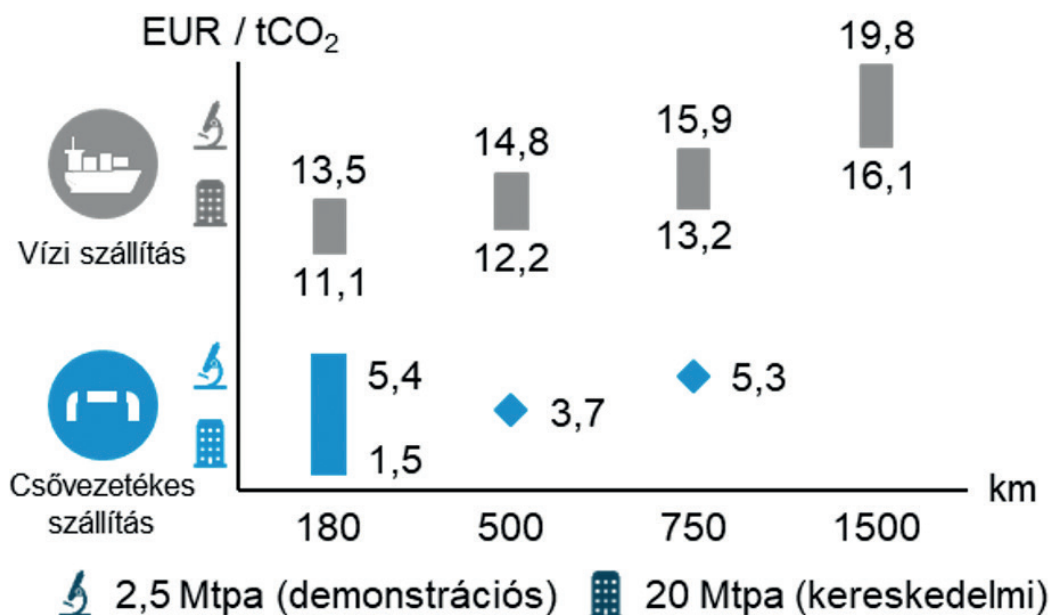
letárolási hely), ebből kifolyólag kisebb a szállítási balesetek valószínűsége is. Mindemellett a CO₂-vezetékek esetében kiemelten kerülni kell a lakott zónákat és a fejlesztési tervekben kijelölt építési övezeteket, valamint a völgyeket, zártabb területeket, mivel a gáz sűrűbb a levegőnél, és ezeken a helyeken feldúsulva akár halált is okozhat. Fokozottan figyelni kell a megfelelő, szabvány által előírt vezetékmag kiválasztására, valamint a hegesztési technológia és a varratellenőrzés megfelelőségére. Mivel a CO₂-gáz vízzel savas közeget képez, fontos a leválasztott CO₂ víztelenítése, szárítása. A külső korrózió kivédéséhez pedig a passzív szigetelések alkalmazása. A CO₂ nem alkot robbanóképes elegyet a levegővel (szemben a földgázzal, mely levegővel elegyedve robbanásveszélyes). Ettől függetlenül környezeti, illetve gazdasági szempontokból fakadóan is elengedhetetlen egy – főként a szivárgás elkerülését célzó – monitoring rendszer telepítése és alkalmazása az üzemeltetés teljes időszakában.



A csővezetékes és vízi szállítás a legköltséghatékonyabb megoldás a CO₂ nagy távolságokra és nagy mennyiségekben történő szállításához (22. ábra).^{162,163} A csővezetékes szállítás költsége a távolsággal arányos, így jelentős a méretgazdaságossági potenciál. Ezzel szemben a vízi szállítás költsége kisebb mértékben függ a távolságtól, de magasabbak a belépési költségek (pl. cseppfolyósító üzem). A meglévő olaj- vagy gázvezetékek átalakítása akár 90-99%-os költségmegtakarítást is eredményezhet új vezeték létesítéséhez képest, azonban a felújításhoz szükséges technikai követelmények nem minden esetben adóttak.

A vasúti és közúti szállítás költsége csak kis kibocsátó üzemek esetén, kis távolságokon lehet versenyképes. A szállítás költsége egyedileg, az alkalmazási környezet alapján határozható meg (pl. meglévő szállítási és rakodási infrastruktúra). A költségre az előkészítés és a szállítás infrastrukturális igénye van legnagyobb hatással, a távolság kisebb mértékben befolyásolja. A vasúti szállítás egységköltsége általában kedvezőbb a közúti szállításénál.

Ezenek 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. Kis kibocsátók számára költséghatékony megoldás lehet egy másik kibocsátó nagy kapacitású csővezetékére való csatlakozás, alacsony/közepes nyomású vezeték létesítésével.



22. ábra A vízi és csővezetékes CO₂-szállítás költségének és távolságának kapcsolata, [164] alapján saját szerkesztés.

6.3.2. Szén-dioxid-tárolási módok áttekintése

A CO₂ tárolása több eltérő geológiai formáció igénybevételével is lehetséges, ezek különböző jellegzetességekkel bírnak. A biztonságosság és a monitoring tevékenység egyszerűségét figyelembe véve az egyes tárolási módok alkalmazási sorrendje a következő¹³⁷:

- kimerült olaj- és földgázmező,
- mélyen fekvő sósvizes formációk (akvifer),
- szénágyas metánkihozatal-fokozás, és
- bazalt/ultramafikus kőzetek.

A kimerült olaj- és földgázmezők alacsony nyomású porózus kőzetképződmények, amelyek CO₂-ot raktározhatnak szerkezeti-, illetve rétegcsapdáknban, a túlnyomás kockázata nélkül. Ezek korábban a kőolajat vagy a földgázt több millió éven át megtartották, mielőtt az kitermelésre került volna, így hasonló módon képesek a besajtolt CO₂-ot is eltárolni. Megbízható, könnyen monitorozható technológia.

Szintén biztonságos, de még kevés tapasztalat áll rendelkezésre a mélyen fekvő sósvizes formációk igénybevételénél. Ezek fedőkövet által határolt sós vízzel (sóoldattal) telített porózus és átteresztő kőzetrétegek, amelyekben a CO₂ lassan terjedhet felfelé. A CO₂ hidrodinamikusan bezáródik a mikropórusokba. Ezek a szikes képződmények mind a szárazföldi, mind a tengeri üledékes medencékben nagy mennyiségben vannak jelen. A CO₂ lassú terjedése diffúz tárolást eredményez, ezért szeizmikus monitorozás szükséges ezekben a képződményekben, amivel a túlnyomás további kockázata mérsékelhető.

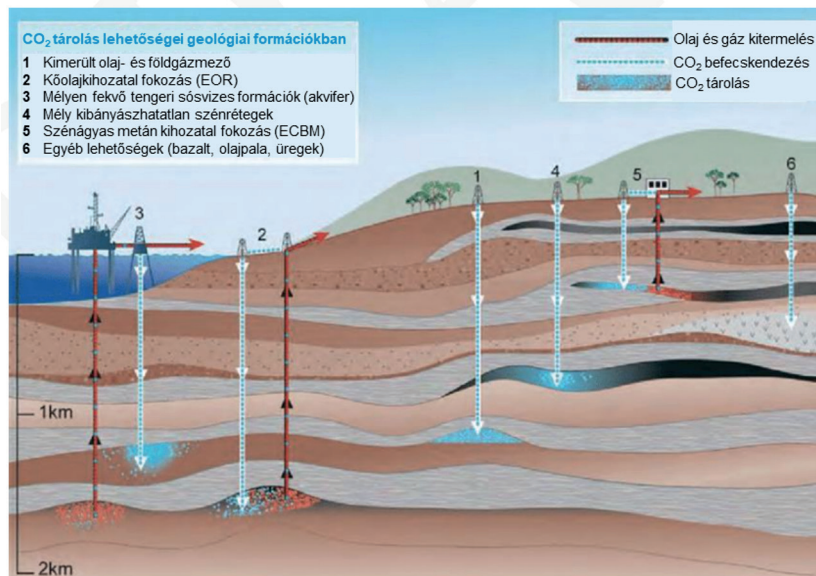
Alacsony biztonsági szint jellemző a szénágyas metánkihozatal-fokozás esetében. A szénágyakon olyan törések jelennek meg, amelyek nagymértékben növelik a közeg átteresztőképességét, és lehetővé teszik a CO₂ átvándorlását a szénrétegeken, így a szén mikropórusai fizikailag megkötik azt. Tárolási kapacitása nehezen becsülhető, valamint egyelőre nem áll rendelkezésre hatékony monitoring és verifikációs rendszer.

A bazalt, illetve ultramafikus kőzetek biztonságossága egyelőre nem ismert. A nagy porozitású bazalt és ultramafikus kőzetek ideális közeg lehetnek a CO₂ befecskendezésére és tárolására. A bejuttatott CO₂ reakcióba lép a kémiai komponensekkel, stabil ásványi anyagokat képezve, megkötve a CO₂-ot. A technológia korai érettségi szakaszban jár (TRL 3), azonban a bazaltos képződmények a világ számos pontján (szárazföldön és tengerben egyaránt) megtalálhatóak. Pilot-ok során a vizet és a CO₂-ot külön-külön befecskendezték be olyan arányokban, amelyek biztosítani

tudták a CO₂ teljes oldódását a víz mélyén, de egyelőre kevés tapasztalat van ezen a területen.

Az említett monitoring rendszerek igazolják a CO₂ biztonságos megkötését a tároló teljes életciklusa során. A CO₂ detektálásától a geológiai formáció megfigyelésén keresztül a létesítmény megfigyeléséig a monitoring rendszer különböző pontokat vizsgálhat - ilyenek például a megkötött CO₂ és tárolói nyomás, a szivárgási pontok, a föld szeizmikus mozgásai vagy a fúrt kutak állapota. A megfelelő monitoring technológiák kiválasztásához számos tényező figyelembevétele szükséges, pl. a tárolói mélység, a geológiai formáció típusa, a besajtolási ráta, a működési élettartam stb. A monitoring költségek széles skálán mozoghatnak, ezért a költség-haszon arány meghatározása nehézséget okozhat. A monitoring költségek általában a teljes CCS projekt költségének kevesebb mint 5%-át teszik ki.¹⁶⁵ A kereskedelmi léptékű 1 Mt CO₂ / év nagyságrendű tároló átlagos monitoring költsége évi 1 – 4 millió USD között alakul, de érvényesül a méretgazdaságosság elve, vagyis a magasabb tárolási volumen alacsonyabb monitoring egységköltséghez vezet. A monitoring költségek tovább mérsékelhetők a tervezési fázis során elkészített elemzések segítségével.

A tárolás (storage) és a felhasználás (utilization) sok esetben kéz a kézben jár (bár ezt a szabályozási környezet nem minden esetben ismeri el), melynek legjobb példája a másodlagos/harmadlagos olajkitermelés (EOR) és a másodlagos szénágyas metánkitermelés (Enhanced Coal-Bed Methane Recovery, ECBM).¹³ A geológiai formációkban való CO₂-tárolást az olajipar már évtizedek óta alkalmazza EOR módszerrel, ami a kőolajkitermelés során CO₂-befecskendezéssel fokozza a felhozatal mennyiségét (23. ábra).¹⁸ A tároló területek feltárása és annak kereskedelmi tevékenységekben történő hasznosítása között 5-12 év is eltelhet, különösképpen az akvifer típusú formációk esetén. A föld alatt tárolt CO₂ szivárgásának lehetősége a lakosság számára aggályos biztonsági szempontból, emiatt több esetben is lakossági ellenállásba ütköztek CCS projektek. A szivárgás kockázatát alaposan fel kell mérni a tároló kialakítását megelőzően minden formáció esetében, a besajtolási időszak végeztével pedig megfelelően gondoskodni kell a kutak szivárgásmentes lezárásáról. A nagyméretű CO₂-tárolás több évtizedes tapasztalata azonban azt mutatja, hogy a CO₂ légkörbe való szivárgása vagy a talajvíz szennyeződése hatékonyan kezelhető a működésben lévő tárolók és a lezárt egyedi kutak tekintetében is. Mértéke ma már elenyésző, a kockázatok idővel csökkennek.



23. ábra A CO₂-tárolás lehetőségei geológiai formációkban, [166] alapján saját szerkesztés.

6.4. CCU technológiák

A megkötött szén-dioxid további kezelési módja annak hasznosítása (24. ábra). Bár a CO₂-ot említések leggyakrabban a klímaváltozással hozták kapcsolatba, manapság egyre nagyobb szerepe van számos iparágban magas hozzáadott értékű termékek előállításában is, mint kiindulási alapanyag (nyersanyag). A CO₂-ot széleskörű felhasználási lehetőségei miatt számos iparágban hasznosítják, napjainkban mintegy 230 millió tonna szén-dioxidot használnak fel évente.¹⁴

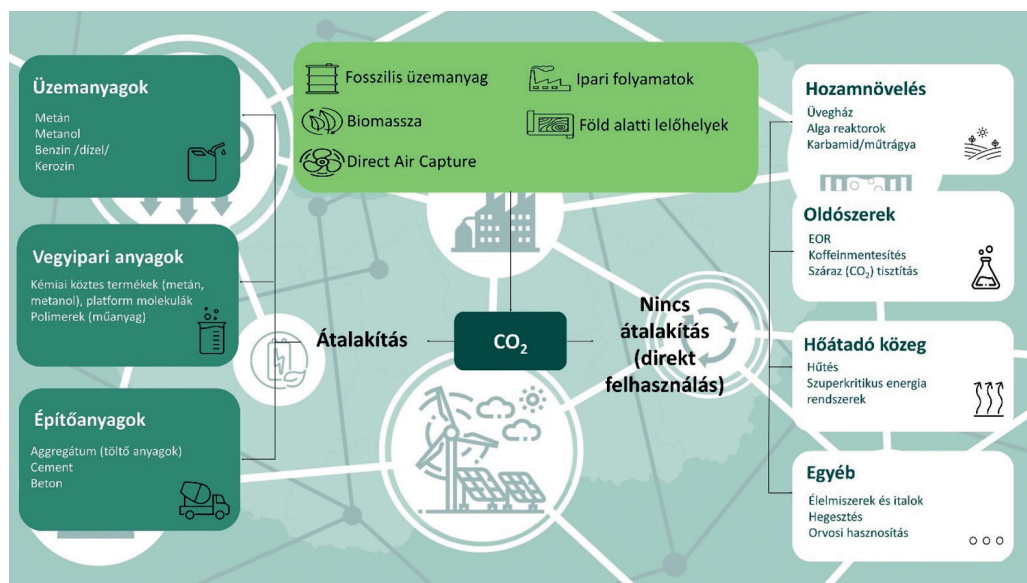
A CCU technológiákat többféle módon lehet megközelíteni: egyrészt a hasznosítási utak szempontjából, másrészt pedig a technológia által előállított végtermék szempontjából. Ezek bővebb ismertetésére az alábbiakban kerül sor.

6.4.1. Szén-dioxid-hasznosítási utak áttekintése

Ahogy a körforgásos szén-dioxid-gazdaság modelljében is utalnak rá (2.5. fejezet, 2. ábra), a CCU módszerek két kategóriába sorolhatók:

- A) közvetlen (átalakítás nélküli), vagy
- B) átalakítással történő hasznosítás.

Ezen két CCU kategórián belül a CO₂ lehetséges alkalmazási módja rendkívül szerteágazó, mind a hasznosító iparág, mind pedig az alkalmazott eljárás tekintetében. A felsorolt átalakítási folyamatok részletesebb megismerése céljából az alábbiakban bemutatunk néhány példát a teljesség igénye nélkül.



24. ábra A különböző CCU irányok áttekintése, saját szerkesztés.

A) Közvetlen felhasználás

Az átalakítás nélküli felhasználásnál a CO₂-ot közvetlenül hasznosítják, vagyis az nem változik meg kémiaiilag. A közvetlen felhasználási módszerek érettségi szintje TRL 8-9 közé tehető, vagyis érett, kereskedelmi forgalomban lévő eljárásokról van szó (25. ábra). Számos iparág hasznosítja közvetlenül a szén-dioxidot, például az élelmiszer- és itáliparban gyakran használják szénsavasításra, tartósítószerként, csomagológázként, valamint oldószerként az aromák kivonásához és a koffeinmentesítéshez.¹³ Más alkalmazási formában is megtalálható, például az olajiparban (EOR), vagy a gyógyszeriparban, ahol a CO₂ légzésserkentőként vagy gyógyszer-szintézisben reagensként használható. Ezeket az igényeket jelentős mértékben bányászott szén-dioxidból fedezik, a jövőben pedig olyan CO₂-kibocsátási forrásokra korlátozódnak, amelyek nagy tisztaságú CO₂-hulladékáramokat termelnek.



B) Átalakítással történő felhasználás

A CO₂ úgy is hasznosítható, hogy azt kémiai vagy biológiai folyamatok segítségével feldolgozzák, és értékes anyagokká alakítják át.¹³ Hasonlóan a közvetlen hasznosításhoz, a szén-dioxid átalakítását alkalmazó technológiák is számos iparágban és területen alkalmazhatók, mint például a vegyipar, valamint a műtrágyaipar.

B.1) Kémiai átalakítás

A CO₂ kémiai átalakításának fő csoportjait a következők szerint határozhatjuk meg:

- hidrogén nélküli konverzió,
- hidrogén felhasználásával történő átalakítás,
- elektrokémiai redukció,
- fotokémiai redukció és
- száraz reformálás.



Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 Direkt felhasználás (átalakítás nélkül)	Szén-dioxid	EOR, italgártás, tartósítás, hűtés, koffeinmentesítés, oldószer, technológiai fluid, biztonsági gáz, üvegház, stb.	TRL 8-9 

25. ábra A közvetlen CO₂-felhasználás lehetséges módjai, [13,167] alapján saját szerkesztés.

A már kereskedelmi forgalomban lévő technológiák mellett egy ígéretes hasznosítási megközelítés a sóatlanítás. Ez a módszer tengervíz és CO₂ felhasználásával történő hidrátképzést jelent, mely után a sóoldattól elválasztott CO₂-hidrát elbontásával tiszta víz állítható elő.¹³⁵ Ebben a megközelítésben a CO₂ lehet gáz vagy folyékony halmazállapotú. A CO₂-hidrátokat az óceánba rakják vagy elszállítják.

B.1.1) Hidrogén nélküli konverzió

A hidrogén nélküli konverziós eljárások során a reakcióban hidrogén helyett más anyagokkal reagáltatják a szén-dioxidot, így képezve többek között karbonátokat, karbamátokat, poliuretánt vagy szén-monoxidot (26. ábra). A különböző technológiák viszonylag magas fejlettségi szinten állnak (TRL 5-9), illetve egyes technológiákat ipari termelés során is alkalmaznak.

Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 Kémiai átalakítás Hidrogén nélkül	Karbonátok Karbamátok Polikarbonát Poliuretán Karbamid Szén-monoxid	Építőipari alapanyag, mineralizáció, akkumulátor elektrolit, oldószer, reakció közti termék Poliuretán gyártás kiinduló terméke Autóalkatrész, CD/DVD, optikai lencse, építőipar Autókarosszéria, ágybetét, műbőr, ragasztó, szigetelő Műtrágya alapanyaga Redukálószerként acélgártás, petrokémia	TRL 5-9 

26. ábra Hidrogén nélküli kémiai átalakítás termékei és hasznosítási módjai, [13,167] alapján saját szerkesztés.

A hidrogén nélküli konverzió egyik példája az ásványi karbonátképzés. Ebben a kémiai folyamatban a CO₂ fém-oxidokkal, például magnézium-oxiddal vagy kalcium-oxiddal lép reakcióba, így képezve karbonátokat.¹³ A magnézium-oxid és a kalcium-oxid általában szilikát ásványok formájában található meg a természetben, mely ásványok nagy lelőhelyei Finnországban, Ausztráliában, Portugáliában és az Egyesült Államokban találhatóak.¹⁶⁸ A reakció alapanyagként az alumíniumgyártásból visszamaradt zagy is felhasználható¹⁶⁹, melynek fémes komponenseivel reagálva a CO₂ karbonátokat képez, egyúttal ártalmatlanítja a veszélyes hulladéknak minősülő vörösiszapot. A technológia alacsonyérettségi szintű, azonban Ausztráliában már léteznek demonstrációs projektek, melyek többek között téglát és egyéb építőanyagokat állítanak elő ily módon.¹⁷⁰ Az ásványi karbonátképzés egy sor reakciót foglal magában, amelyek egy- vagy többlépéses folyamatban játszódhatnak le. Az eljárásához nem szükséges nagy tisztaságú CO₂ használata, mivel a füstgázban lévő szennyeződések (például nitrogén-oxidok) jelenléte nem zavarja meg a karbonátképző reakciót. Ebből kifolyólag a tiszta CO₂-áramot előállító elválasztási lépés kihagyható, a CO₂-ot tartalmazó kibocsátások közvetlenül felhasználhatók. Az ásványi karbonátképzés fő előnye a stabil karbonátok képzése, amelyek képesek hosszú ideig (évtizedekig, akár évszázadokig) tárolni a CO₂-ot anélkül, hogy a CO₂-szivárgás veszélye fennállna. Ezen technológia kifejlesztése még nem teljessé vált ki ipari méretű alkalmazáshoz, mivel az energiavesztés és a költségek egyelőre túl magasak. Továbbá az ásványok bányászata, szállítása és előkészítése is magas energiaigényű, ami szintén csökkenti a szén-dioxid-eltávolítás általános hatékonyságát.



forgalomba hozataluk is rövidebb időtávon belül megvalósítható lehet. A hidrogénezéssel előállított termékek között megtalálható a metanol és különböző szénhidrogének, melyek elsősorban alternatív üzemanyagként (e-fuel) szolgálnak. Ugyanakkor a metanol hasznosítható oldószerként és reakció kiindulási termékként is (vegyipari platform-molekula) (27. ábra). További lehetséges végtermék a hangyasav, amely alapanyagként és üzemanyagként is használható.¹⁷¹ Nagyságrendileg évi 800.000 tonna hangyasavat állítanak elő világszerte, amit többek között a textiliparban, tisztításhoz és tartósítószerként használnak fel.

A hangyasav, hangyasav-észterek és formamidok szintézise elvégezhető homogén és heterogén katalizátorokkal egyaránt.¹⁶⁷ Ez utóbbinak számos műszaki előnye van, mint például a stabilitás, a könnyű szétválasztás, valamint a katalizátor újrafelhasználása. A nyilvánvaló előnyök ellenére a heterogén úton szintetizált vegyületek köre még mindig viszonylag szűk.

A hidrogén felhasználásával történő átalakítási eljárások közül a szuperkritikus CO₂ hidrogénezése egyre nagyobb érdeklődést vált ki, mivel a CO₂ kettős jelentőséggel bírhat reagensként és oldószerként, amely így nem termel hulladékot.¹⁶⁷ Ezenkívül szuperkritikus CO₂-dal nagyon magas H₂-koncentráció érhető el.

B.1.3) Elektrokémiai- és fotokémiai redukció

A kémiai CO₂-átalakítási módszerek közül az elektrokémiai- és fotokémiai redukciók bizonyulnak a legkevésbé érett technológiáknak (TRL 3-7), ugyanakkor ezen eljárások az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kaptak.¹⁷² Előnyeik

Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 <p>Kémiai átalakítás</p> <p>Hidrogén felhasználásával</p>	<p>Metanol</p> <p>Szénhidrogének</p> <p>Hangyasav</p> <p>Szén-monoxid</p>	<p>Alternatív üzemanyag, oldószer, reakció kiindulási termék</p> <p>Üzemanyag</p> <p>Reakciópartner, oldószer</p> <p>Redukálószerként acélgégyártás, petrokémia</p>	<p>TRL 6-9</p> 

27. ábra Hidrogén felhasználásával történő kémiai átalakítás termékei és hasznosítási módok, [^{13,167}] alapján saját szerkesztés.

B.1.2) Hidrogén felhasználásával történő átalakítás

A CO₂ hidrogénezését széles körben vizsgálják a CO₂ hasznosítására.¹⁶⁷ Ezzel az eljárással számos vegyipari terméket lehet előállítani, valamint a technológiák érettségi szintje is viszonylag magas, TRL 6-9 közötti, így kereskedelmi

közé tartozik, hogy a redukció alacsony hőmérsékleten is megvalósítható, továbbá a fotokémiai átalakítás alacsony nyomáson és viszonylag kis energiabefektetéssel is elvégezhető. Az előállítási folyamatok elsősorban termékei a

szén-monoxid, a karbonsavak, a metanol és a metán, melyeket széles körben alkalmaznak az acélgártástól a petrolkémiai felhasználásig (28. ábra).

A CO₂ elektrokémiai módszerekkel történő átalakítására már a 19. század második felében is javaslatot tettek, azonban még nem alkalmazzák kereskedelmi forgalomban, kivéve a magas hőmérsékletű elektrolízist (pl. SunFire, Haldor-Topsoe).¹⁷² A megoldást a potenciális környezeti és gazdasági előnyei miatt széles körű érdeklődés övezi, több tucat start-up indult ilyen típusú technológia fejlesztése céljából. Ráadásul így módon a megújuló forrásból előállított villamosenergia közvetlenül felhasználható.



A fotokémiai eljárásnál a napenergia molekuláris kötések formájában közvetlenül tárolható, ami hasonló a természetes fotoszintetikus folyamathoz.¹⁷²

Ezen folyamatok ugyanakkor még alacsonyabb technológiai érettségű szinten vannak.



B.1.4) Száraz reformálás

Az átalakítással történő felhasználás harmadik, egyben utolsó fő csoportja a száraz reformálás, melyben szén-dioxidot és metánt egyszerre alakítanak át. Az a potenciál, miszerint két üvegházhatású gázt hasznos intermedierré (szintézisgáz) lehet átalakítani, vonzó lehetőséggé teszi a száraz reformálást a CO₂ kémiai megkötésére (29. ábra).^{173,174} A szintézisgáz számos vegyipari termék előállításának egyik kiinduló anyaga, amely önmagában is hasznosítható tüzelőanyagként, vagy felhasználható nagyobb kereslettel rendelkező, magas hozzáadott értékű termékek előállítására, mint például a metanol, a folyékony szintetikus üzemanyagok (pl. benzin, kerozin, gázolaj) vagy a polimerek.^{174,175} A száraz reformálás kevésbé elterjedt, mint a gőzreformálás, és fő felhasználása olyan eljárásokban történik, amelyeknél a szintézisgázban nagy mennyiségű szén-monoxidra (CO) van szükség.

Az eljárás évtizedek óta vizsgálat tárgyát képezi a tudományos szakemberek körében, jelenlegi fejlettsége alapján a TRL 7-es érettségi szintet éri el. Ennek ellenére azonban még mindig vannak olyan feldolgozási és technikai kihívások, amelyek hátráltatják kereskedelmi forgalomba hozatalát.¹⁷⁴ Ráadásul a száraz reformálás földgázt igényel, így a fosszilis energiahordozókról való leválás stratégiájával kevésbé kompatibilis. Emellett - gazdasági szempontból - a száraz reformáláshoz koncentrált CO₂-forrásra van szükség

Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 <p>Kémiai átalakítás Elektrokémiai és fotokémiai redukció</p>	<p>Szén-monoxid</p> <p>Karbonsavak</p> <p>Metanol</p> <p>Metán</p>	<p>Redukálószerként acélgártás, petrolkémia</p> <p>Oldószer, kiindulási termékek</p> <p>Alternatív üzemanyag, oldószer, reakció kiindulási termék</p> <p>Alternatív energiahordozó (hőtermelés, üzemanyag)</p>	<p>TRL 3-7</p> 

28. ábra Elektrokémiai és fotokémiai redukciós termékek és hasznosítási módok, [^{13,167}] alapján saját szerkesztés.

Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 <p>Kémiai átalakítás Száraz reformálás (CO₂ + metán)</p>	<p>Szintézisgáz</p>	<p>Szintetikus üzemanyag és egyéb vegyipari folyamatok kiinduló gáza</p>	<p>TRL 7</p> 

29. ábra Száraz reformálás terméke és hasznosítási módok, [^{13,167}] alapján saját szerkesztés.

ahhoz, hogy a rendszer működési hatékonysága és termelékenysége elérje a tőkebefektetéshez szükséges kritériumok értékét.

B.2) Biológiai átalakítás

A CO₂ biológiai átalakítását tekintve két csoportot azonosítottunk:

- fotoszintézissel történő átalakítás, valamint
- fotoszintézis nélkül végbemenő átalakítás.

A fotoszintézis nélküli módszerek a napfénytől függetlenek, vagyis hatékonyságukra és termelékenységükre nincsenek hatással az ezen megújuló energiaforrás jellegéből adódó korlátozó tényezők.



B.2.1) Fotoszintézissel történő biológiai átalakítás

A CO₂ fotoszintézissel, vagyis fotoszintetikus organizmusok által történő biológiai átalakításával olyan értékes termékek állíthatók elő az élelmiszer- és vegyipar számára, mint az etil-alkohol, cukor, ecetsav, metán, metanol vagy fehérjék (30. ábra). A fotoszintetikus organizmusok meglehetősen sokfélék lehetnek, de alapvetően mindegyikük ugyanazt az átalakítási stratégiát alkalmazza.^{13,167} Mivel a legtöbb növény általi fotoszintézis reakciója nem elég hatékony, az ipari méretekhez való igazodás érdekében szükség van olyan biológiai CCU technológiákra, mint például a szabályozott vagy mesterséges fotoszintetikus reakciók. Példa erre a fotobioreaktor rendszer alkalmazása, ahol a természetes fotoszintézis ellenőrzött környezetben megy végbe. A mikroalgák CO₂-megkötési hatásfoka 10-szer nagyobb a



szárazföldi növényeknél, valamint képesek a CO₂-ot közvetlenül megkötni a hulladékáramokból (például a füstgázokból, valamint a gázban található nitrogént tápanyagként felhasználni), így ideális módszerek bizonyulnak. A nyílt tavas rendszerekhez képest a fotobioreaktorok területigénye kisebb, ugyanakkor költségeik is. A vékony polietilén fóliából készült, vertikális síkpaneles reaktorok¹⁷⁶ tőkeköltségei és energiaigénye jóval alacsonyabb, így várhatóan a jövőbeni rendszereknek is ez lesz az alapja. Ezen túlmenően a fotobioreaktorok megkötési rátájának fokozására és a rendszerek lehetséges méretnövelésére irányuló fejlesztések is folyamatban vannak.¹⁶⁷

B.2.2) Baktérium általi, fotoszintézis nélküli biológiai átalakítás

A nem fotoszintetikus biológiai rendszerek számos előnnyel rendelkeznek a fotoszintetikus rendszerekkel szemben.¹⁷⁷ Ezek közé tartozik az alkalmazható organizmusok széles köre, a lehetséges végtermékek sokszínűsége, valamint általuk elkerülhető a fotoszintézis során felmerülő környezeti feltételektől való függőség, amely az alacsony hatásfokért felelős. Az aerob rendszerek előnye a nagy termelékenység, a termelés/termesztés folyamatossága, valamint a mesterséges fotoszintézissel való kompatibilitás. Egyes nem fotoszintetikus organizmusok a megújuló energiaforrásokból származó villamosenergiát használhatják ki (ezek a bioelektrokémiai rendszerek). Az eljárási útvonalak sokfélesége és a növekedési potenciál miatt a CO₂ átalakítására képes nem fotoszintetikus organizmusok a mikrobiális termelés elsődleges célpontjává váltak, a technológia jelenlegi

Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 Biológiai átalakítás Fotoszintézis	Etil-alkohol Cukor Ecetsav Protein	Oldószer, élelmiszeri és vegyipari alapanyag Élelmiszeripar Oldószer, élelmiszeri és vegyipari alapanyag Állati tápanyagok	TRL 3-6 

30. ábra Fotoszintetikus biológiai átalakítás termékei és hasznosítási módok, [^{13,167}] alapján saját szerkesztés.

Átalakítás módja	Termék	Felhasználás	Érettség
 Biológiai átalakítás Baktérium által, fotoszintézis nélkül	Metán Metanol	Alternatív energiahordozó (hőtermelés, üzemanyag) Alternatív üzemanyag, oldószer, reakció kiindulási termék	TRL 4-6 

31. ábra Fotoszintézis nélküli biológiai átalakítás termékei és hasznosítási módok, [^{13,167}] alapján saját szerkesztés.

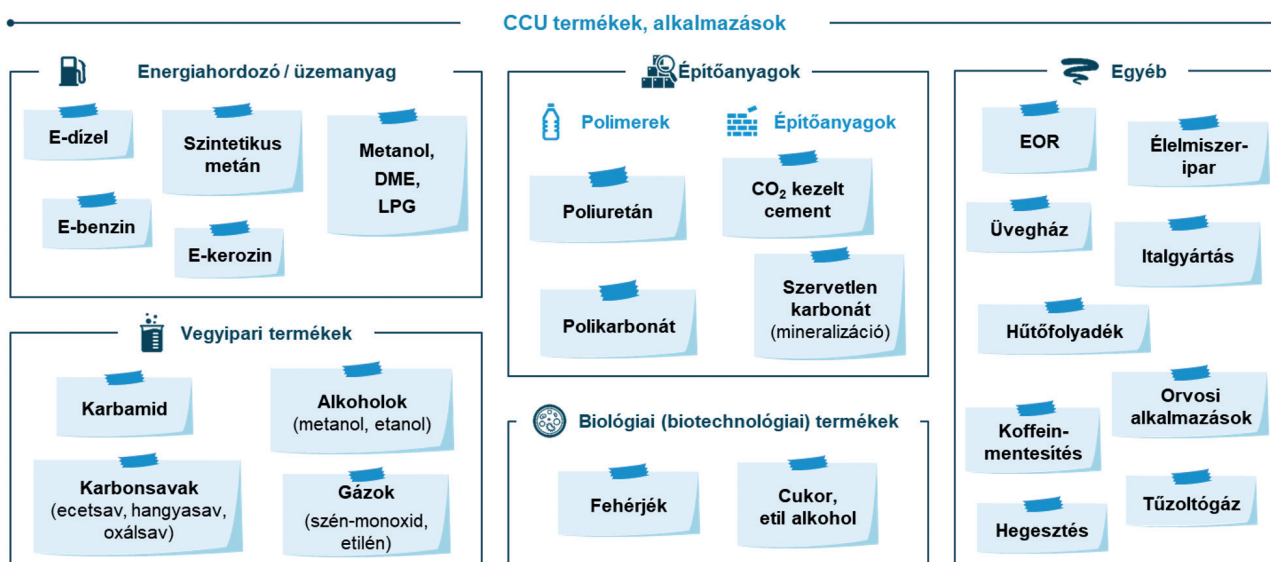
érettségi szintje pedig TRL 4-6 közötti (31. ábra). Ugyanakkor az eljáráshoz kötődő jelentős kihívásokat is kezelni kell annak érdekében, hogy ezen technológiák elérjék a megfelelő technológiai érettséget.¹⁷⁷ Ilyen kihívás például a CO₂ és H₂ rossz oldódása, a genetikai eszközök és az anyagcsere-folyamatok megértésének hiánya, a vizsgált törzsek

korlátozott száma, valamint a termékek feldolgozásának korlátozott módszerei.

6.4.2. A CCU módszerek termék szempontú bemutatása

A CO₂-hasznosítási lehetőségek egy másféle megközelítéskor az előállított termékek és azok alkalmazási területe kerül a fókuszba (1. táblázat). A technológiai szempontú áttekintésnél felsorolt termékek az alábbi kategóriák szerint csoportosíthatók (32. ábra):

- energiahordozó/üzemanyag
- vegyipari termékek
- anyagok
- biológiai (biotechnológiai) termékek
- egyéb.



32. ábra CCU termékek és alkalmazási területük, saját szerkesztés.

1. táblázat Szén-dioxid alapú (CCU) termékek áttekintése, saját szerkesztés.

CCU termék/ jellemezők	Előállítás	Alkalmazási terület/ iparág	Technológiai érettség	Piacméret és potenciál ¹⁷⁸	Korlátok
Szintetikus üzemanyag ^{179,180}	Fordított víz-gáz eltolási reakció (Reverse Water Gas Shift, RWGS) és Fischer-Tropsch reakció. Alternatíva a metanolon keresztüli útvonal.	Üzemanyagipar, közlekedés. Főleg légi közlekedés és hajózás.	TRL 6-8 (2023) TRL 8 (2030)	CO₂-megkötési kapacitás: 3,1 tCO ₂ / t termék Teljes EU termelés és import: ~167 Mt üzemanyag (elméleti); reális piac ennek töredéke elektromobilitás térnyerése miatt (kerozin kereslet: 26,7 Mt/év) Teljes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: ~768 Mt /év (elméleti), reális piac ennek töredéke elektromobilitás térnyerése miatt (e-kerozin: 83,8 Mt/év)	Fordított vízgáz-eltolódási reakció (RWGS) TRL szintje 6. A teljes karbonsemleges átalakítás hatékonysága alacsony.
Szintetikus metán	Metanizációs reakció	Földgáz-helyettesítés	TRL 8	CO₂-megkötési kapacitás: 2,7 t CO ₂ / t termék Teljes EU termelés és import: ~304 Mt (2022) Teljes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: 820 Mt CO ₂ / év	Nagyon energiaigényes folyamat, mely drága végterméket eredményez. Emiatt nehezen értékesíthető.
Polikarbonát	Katalitikus polimerizáció (CO ₂ és epoxidok)	Autóipar, építőipar	TRL 6-7 (2023) TRL 8-9 (2030)	CO₂-megkötési kapacitás: 0,2 t CO ₂ / t termék Teljes EU termelés: 1,3 Mt termék / év Teljes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: 0,2 Mt CO ₂ / év	Méretnövelés szükséges a széleskörű alkalmazáshoz. Versenyképes alternatívák állnak rendelkezésre.
Poliuretán	Katalitikus polimerizáció (CO ₂ és diol vagy epoxidok), majd polimerizáció diizocianáttal	Autóipar, karosszéria elemek Építőipar, bútorgyártás	TRL 4-7 (2023) TRL 8 (2030)	CO₂-megkötési kapacitás: 0,4 t CO ₂ / t termék Teljes EU termelés: 3,3 Mt termék / év Teljes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: 1,4 Mt CO ₂ / év	„Megújuló” forrásból származó CO ₂ -alapanyag magasabb költségekkel jár, mint a konvencionális fosszilis forrású.

CCU termék/ jellemzők	Előállítás	Alkalmazási terület/ iparág	Technológiai érettség	Piacméret és potenciál ¹⁷⁸	Korlátok
Szén-dioxid-kezelt cement	Kalcium és CO ₂ reagáltatása különböző módokon Sav-bázis reakció	Cementgyártás, építőipar	TRL 6-7 (2023) TRL 7-9 (2030)	CO₂-megkötési kapacitás: 0,4 t CO ₂ / t termék (építőanyagok összesen) Tejjes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: 115 Mt CO ₂ / év (építőanyagok összesen)	CO ₂ -megkötési módok fejlesztést igényelnek a cement tulajdonságainak javítása érdekében. A végtermék ára egyelőre magas.
Alkoholok	Számos vegyi úton előállítható (többnyire CO ₂ és H ₂ felhasználással)	Üzemanyag Oldószer, vegyipari alapanyag	TRL 7-8 (2023) TRL 9 (2030)	CO₂-megkötési kapacitás: 3,3 t CO ₂ / t termék (metanol és etanol együtt) Tejjes EU termelés: 13,2 Mt termék / év Tejjes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: 20,9 Mt CO ₂ / év (metanol és etanol együtt)	A CCU alapú, vagy zöld metanol / etanol jelentősen drágább a konvencionálisnál. Nagy mennyiségben van szükség zöld hidrogénre.
Karbamid	Ammónia és CO ₂ reagáltatása	Műtrágya-gyártás	TRL 9	CO₂-megkötési kapacitás: 1,4 t CO ₂ / t termék Tejjes EU termelés: 16 Mt termék / év (10 termelés + 6 import) Tejjes EU-s CO₂-felhasználási potenciál: 21,8 Mt CO ₂ / év	Érett, kiforrott technológia. Jelenleg is alkalmazott.
Szén-monoxid	RWGS, elektrolízis	Vegyipar	TRL 5-7	CO₂-megkötési kapacitás: 3,3 t CO ₂ / t termék 1,3 t CO ₂ / t termék	Közepes technológiai érettség, az élettartamot még igazolni kell.
Karbonsavak	Többféle előállítási lehetőség, pl. Koble-Schmitt reakció	Gyógyszeripari alapanyag	TRL (3)-9 (2023) TRL 9 (2030)	n/a	Létezik kiforrott konkurens technológia.

Az egyes megoldások és előállított termékek esetében azt is érdemes megvizsgálni, hogy milyen hosszú ideig képesek tárolni a megkötött szén-dioxidot, vagyis, hogy a megkötött szén-dioxid mikor kerül vissza újra a szén-körforgásba.

Minél hosszabb ideig képes az adott CO₂-ot felhasználó termék a CO₂-ot eltárolni, annál kedvezőbb a környezeti hatása.

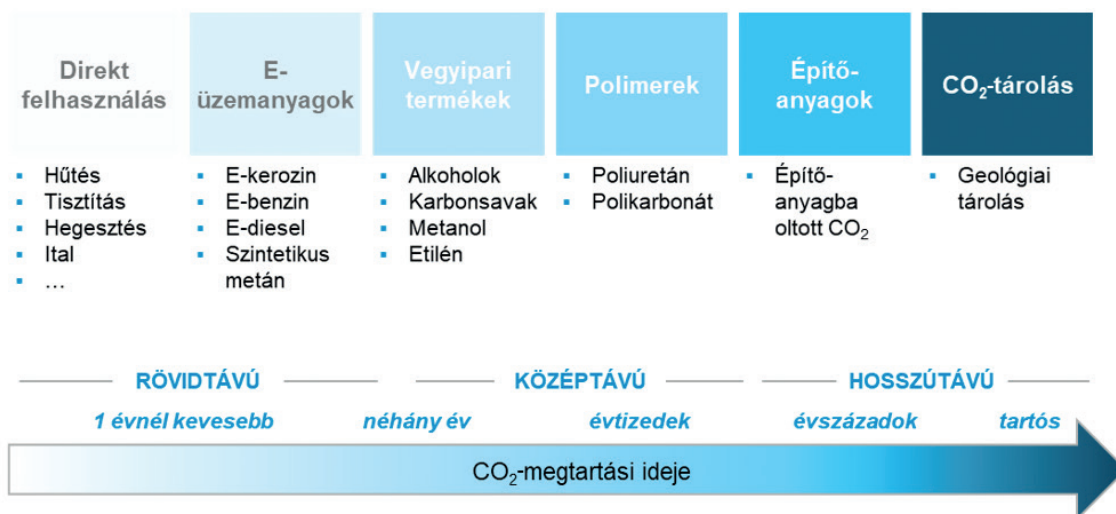
Ez alapján a legrövidebb CO₂-megtartási idővel a CO₂ direkt felhasználása bír, melyet az e-üzemanyagok követnek (33. ábra). Ezen termékek fogyasztása, illetve használata során a CO₂ kevesebb mint egy év alatt ismét visszakerül a légkörbe. Valamivel tartósabb a vegyipari termékek köre, ahol a különböző anyagok néhány éven keresztül is magukba zárhatják a CO₂-ot, míg a polimereknél ez akár évtizedekig kitart. A CO₂ hosszútávú megkötése a felhasználási technológiákat figyelembe véve az építőanyagoknál teljesül: az építőanyagokba oltott CO₂ évszázadokon keresztül az anyagba zárva marad. Ezen felül a másik hosszútávú megoldás a geológiai tárolás, mely során a CO₂ még hosszabb ideig elzárva marad, mint az építőanyagok esetén. Ugyanakkor a geológiai tárolás esetében számolni kell a CO₂-gáz esetleges szivárgásával is, így ennek kezelésére és megelőzésére komoly erőfeszítések szükségesek.

A CCU termékek piaci potenciálja az egyes termékek CO₂-megkötési kapacitásából és a jelenlegi piacméretből kiindulva becsülhető meg (34. ábra). Ezek figyelembevételével az energiahordozók, illetve üzemanyagok elméletben nagy potenciális piaccal rendelkeznek, azonban ezen a területen a versengő zöld technológiák (pl. biomassa) egyelőre nagyobb szerepet kapnak.¹⁷⁸ Valós piaci potenciál ezért

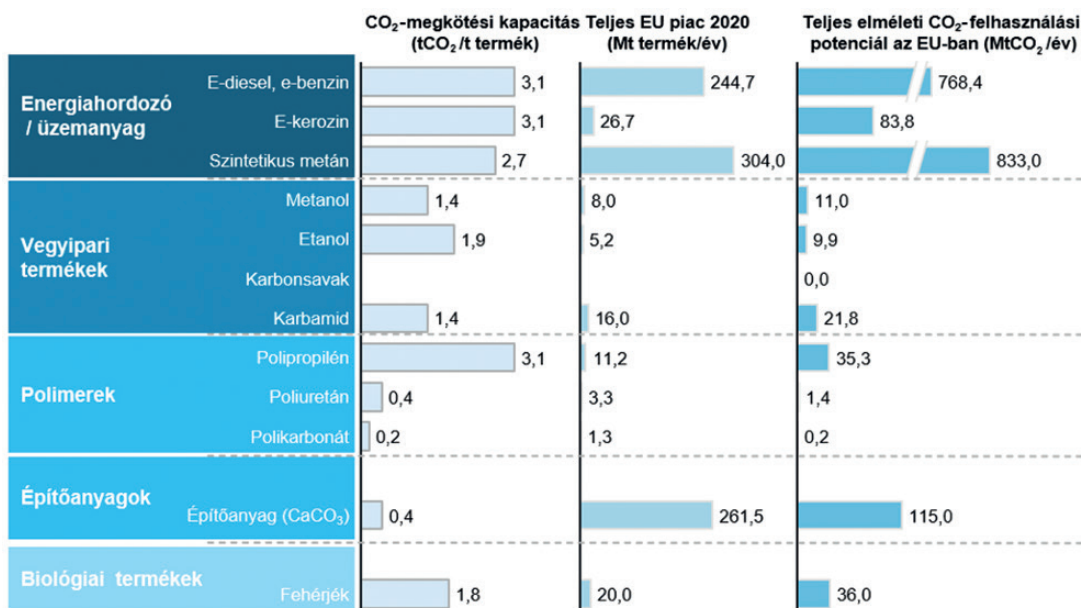
elsősorban részpiacokon (pl. e-kerozin) érhető el, ugyanakkor a szabályozás folyamatos változásával ez is változhat. Szén-dioxid-csökkentési szempontból hatásuk korlátozott, továbbá előállításuk is energiaigényes.

A CO₂ értékes alapanyagként számít a vegyiparban, mert sokféle termék állítható elő belőle. Széleskörű alkalmazhatóságuknak, valamint a növekvő piacnak köszönhetően magas CCU potenciállal rendelkeznek. Mindemellett ebben az iparágban a dekarbonizáció szempontjából a CO₂-hasznosítás kiemelten fontos a körforgásos gazdaság megvalósításához.

A különböző polimereket nagy mennyiségben alkalmazzák. Előnyös tulajdonságuk, hogy a CO₂-ot hosszú ideig képesek megtartani, ezért a CCU technológiával előállított, fenntarthatóbb műanyagok vonzóak lehetnek olyan iparágak számára, mint például az autóipar. Ezen okokból a polimerek piacmérete várhatóan növekedni fog a jövőben. Az anyagok másik nagy alcsoportját elemzésünkben az építőanyagok alkotják. Bár fajlagos CO₂-megkötési kapacitása más termékekhez képest alacsony, összességében nagy piacmérettel rendelkeznek. Ezen felül az építőipar számára kevés alternatív dekarbonizációs technológia létezik, ami tovább növeli a CCU technológiák fontosságát ezen a területen. Az építőanyagokhoz képest a biológiai termékek helyzete fordított: a magas fajlagos CO₂-hasznosítási képességhez jelenleg alacsony piacméret társul, ugyanakkor a magas hozzáadott értékű piac növekedése várható.



33. ábra Az egyes CCU/S megoldások szén-dioxid-megtartási képessége, [132] alapján saját szerkesztés.

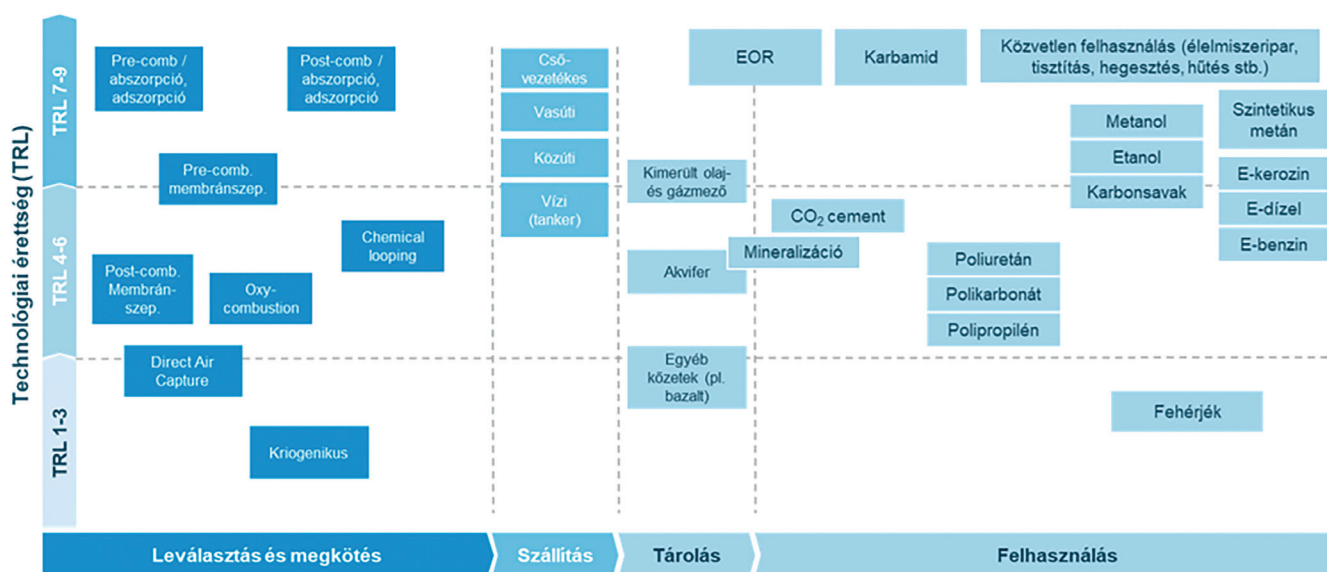


34. ábra Az egyes CCU termékek szén-dioxid-megkötési kapacitása és elméleti potenciális piacméretek, [178] alapján saját szerkesztés.

6.5. CCU/S technológiákra vonatkozó K+F+I területek

A technológiák áttekintését követően megállapítható, hogy a CCU/S értéklánc mentén az egyes technológiai megoldások eltérő fejlettségi szinten állnak. A legtöbb technológia, függetlenül az értékláncban betöltött szerepétől, már legalább TRL 4-es fázisban van, melyek közül számos technológia 2030-ig átléphet a TRL 7-9 közötti fázisba, illetve elérheti a kereskedelmi bevezetést (35. ábra). Mind a leválasztásban,

tárolásban és hasznosításban van már fejlett megoldás, azonban számos területen még jelentős fejlődés szükséges a széleskörű elterjedéshez. Főként a szén-dioxid-hasznosítási megoldások esetében van még jelentős tér az új megoldások előtt. Ez részben azért van, mert eddig ezen új területekre nem volt piaci igény, másrészt a hasznosítási lehetőségek nagyon sokrétűek, számos iparágat érinthetnek.



35. ábra CCU/S értéklánc technológiai érettségi térkép (2023), [135,181-200] alapján saját szerkesztés.

A CCU/S iparág szerteágazó, hosszú és komplex értéklánc mentén épül fel. Több technológiai megoldás együttes alkalmazását és összehangolását igényli, illetve mivel alkalmazási területe nagyon kiterjedt (sokféle szén-dioxid-leválasztó technológia, szállítási, tárolási és hasznosítási mód létezik), számos területen mutatkozik potenciál K+F+I tevékenység folytatására.²⁰¹ Az értékláncban szerepet kapó technológiák érettségét áttekintve elmondható, hogy minden területen van lehetőség fejlesztésre, innovációra. Ezek esetében alkalmazott kutatási és pilot projektek indítása is szükséges.

Javasolt alkalmazott kutatási területek az értéklánc mentén:

Szén-dioxid-leválasztás: kémiai abszorpció esetén újfajta abszorberközegek (aminok, oldószerek) és membránok kutatása, carbon capture rendszerek energiaigényének csökkentése, hibrid CO₂-leválasztó rendszerek fejlesztése, elektrokémiai módszerek CO₂-leválasztásra

Szén-dioxid-szállítás: meglévő olaj- és gázvezetékek átalakítása CO₂-szállításra alkalmas vezetékekké

Szén-dioxid-tárolás: geológiai tárolók CO₂ alkalmazásának technológiai meghatározása, szénhidrogén-termelésben felhagyott kutak átalakítása CO₂-letárolás céljából, CO₂-besajtolási technológia és CO₂ monitoring technológia fejlesztése, fázisállapottól függő CO₂ elhelyezési technológiák vizsgálata/kialakítása

Szén-dioxid-hasznosítás: CO₂-alapú termékek fejlesztése:

- szintetikus üzemanyagok (e-kerozin, metanol, DME, LPG, e-dízel)
- vegyipari termékek (karbonsavak, alkoholok, szén-monoxid)
- építőipari anyagok (polimerek, CO₂ cement/beton, aggregátumok, szervesetlen karbonátok)
- biológiai termékek (fehérjék, etil-alkohol, cukor)
- egyéb direkt felhasználáshoz kapcsolódó fejlesztések

Javasolt pilot projektek:

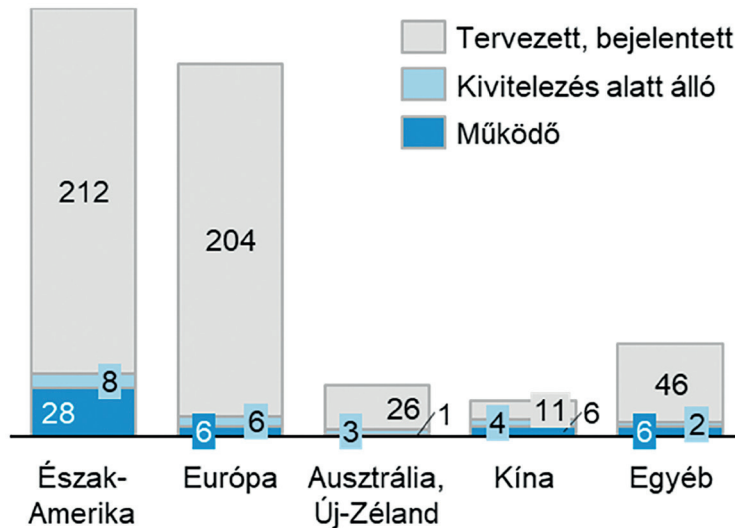
- Vegyipari (hidrogén-előállításból) szén-dioxid-leválasztás és helyben hasznosítás (pl. CO előállítás, metanolgyártás)
- Ammóniagyártás során keletkező CO₂ leválasztása és vegyipari termék előállítása
- Cementgyári szén-dioxid-leválasztás és -tárolás, -hasznosítás – CO₂-alapú építőanyag-gyártás
- Finomítói szén-dioxid-előállítás és szintetikusüzemanyag-előállítás (e-kerozin, e-benzin, e-dízel)

6.6. Nemzetközi use case-ek

6.6.1. Általános áttekintés

A CCU/S technológiák gyakorlati alkalmazására számos példát találhatunk, legyenek azok kísérleti projektek vagy ipari méretű installációk. A globális fajlagos komplex CCS kapacitás (beleértve a megkötést, szállítást és tárolást) növekszik.²⁰² A CCU projektek már az 1970-es évektől kezdve jelen vannak, jellemzően a földgáz- és olajkezelésben, valamint a vegyiparban.⁵² Manapság az új, bejelentett projektek nem csak nagyobbak, de sokrétűbbek is. Továbbá számos új iparágban várható projektek.

Az IEA projektadatbázisa⁵¹ alapján világszinten a 2022-es évig bezárólag 50 CCU/S projekt üzemelt, azonban a jelenleg futó beruházások és aktuális bejelentések alapján 2030-ig 318, majd 2040-ig további 20 új projekt tervezi megkezdeni a működést (185 esetben nem áll rendelkezésre tervezett indulási dátum) (36. ábra). Közülük 23 projekt már kivitelezés alatt áll, további 499 még a tervezési fázisban van, ezek 26%-a rendelkezik a végső beruházási döntésre vonatkozó rögzített időponttal. Az üzemelő projektek 60%-a, összesen 28 darab Észak-Amerikában található, további 6-6 projekt működik Európában és Kínában. A kivitelezés alatt álló projektek 35%-a Észak-Amerikában, 26%-a Európában, 17%-a Kínában található (rendre 8, 6 és 4 darab). A tervezett projektek esetében egyértelmű Észak-Amerika és Európa magasabb elkötelezettsége a CCU/S technológiák alkalmazása iránt, együtt adják a projektek 83%-át, közel egyező arányban.

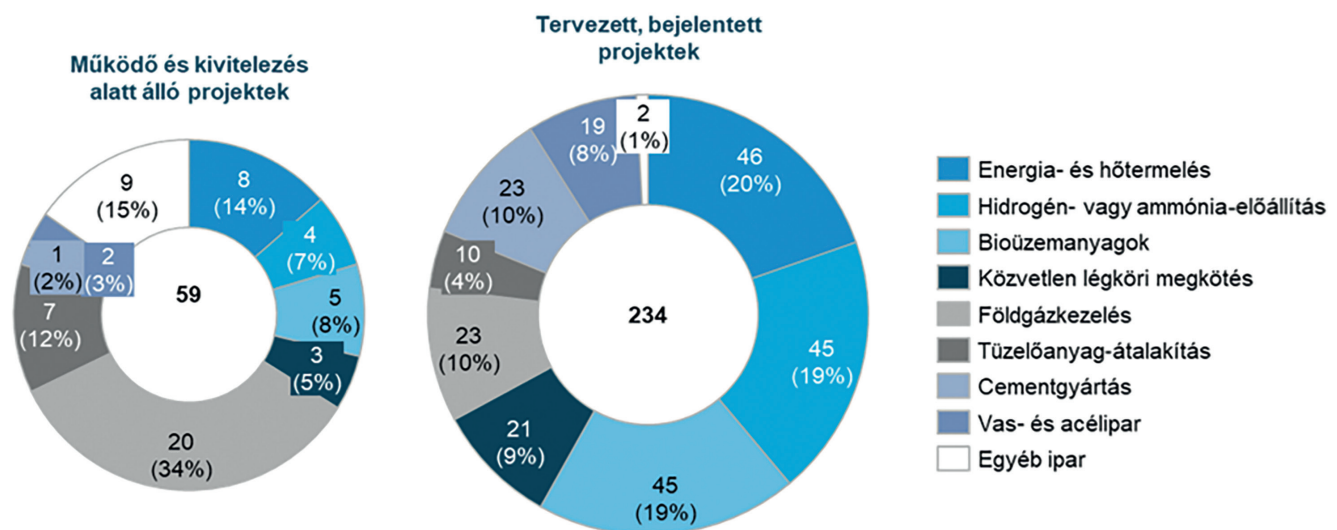


36. ábra Működő, kivitelezés alatt álló és bejelentett CCUS projektek száma a világ egyes régióiban, [51] alapján saját szerkesztés.

A legtöbb működő és kivitelezés alatt álló CO₂-befogási projekt a földgázkezelési és tüzelőanyagátalakítási (pl. finomítási) tevékenységhez kapcsolódik (37. ábra). Ezzel szemben a tervezett projektek 58%-a az energia- és hőtermeléshez, a bioüzemanyagokhoz, a hidrogén- és ammónia-előállításához kapcsolódik, közel egyenlő arányban. Ezeket a közvetlen légköri megkötés követi a projektek kb. 9%-át adva, összesen évi 12,5-13 millió tonna kapacitással. A földgázkezelési és tüzelőanyagátalakítási tevékenységek ezután következnek, együtt a projektek 14%-át adják, ezek hozzáadott kapacitása közel másfélszerese az ezen

szektorokban már meglévő és kivitelezés alatt álló befogási kapacitást.

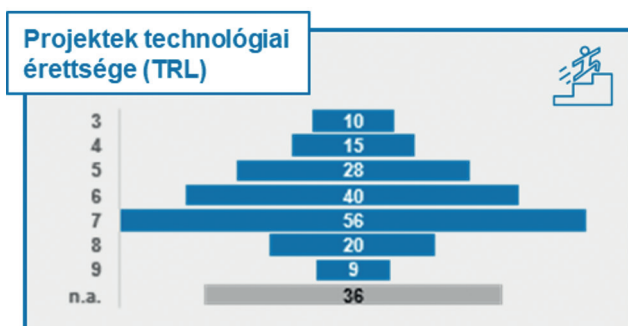
A jelenleg is működő projektek esetében a befogott CO₂ kezelésében a fokozott olajkihozatal (EOR) célú felhasználás a mérvadó, évi 28-35 millió tonnát meghaladó mennyiséggel kb. 75%-át adja az előforduló kezelési módoknak. Ezzel szemben közel évi 9-10,5 millió tonna CO₂ kerül tárolásra, egyéb felhasználásra pedig kevesebb mint évi 1 millió tonna. A kivitelezés alatt álló és a bejelentett projektek körében az EOR jelentősége számottevően csökken, a tervezett évi 30 millió tonna kapacitás növekedéssel az olajkitermelési hasznosítás kevesebb mint 6%-át teszi ki az újonnan



37. ábra CO₂-befogási projektek száma az egyes szektorokban, [51] alapján saját szerkesztés.

befogni kívánt CO₂-mennyiségnek. Helyette a tárolás válik irányadó kezelési móddá, mely évi 418-446 millió tonna mennyiséggel az új befogási kapacitás kb. 75%-ára terjed ki. Az egyéb felhasználási célú új projektek volumene megközelíti az évi 10 millió tonnát.

Az IEA adatbázisa nem tartalmaz információt az egyes CCU/S projektek technológiai érettségéről (TRL). A CO₂ Value Europe gyűjteménye²⁰³ alapján azonban e dimenzió mentén is vizsgálhatjuk a kezdeményezéseket. Utóbbi adatbázis nem teljeskörű, a projekteket a megvalósítók önkéntes alapon tölthetik fel a rendszerbe, a szervezet csupán a platformot biztosítja ehhez. A CO₂ Value Europe adatai alapján az európai CCU/S projektek technológiai érettségében normális eloszlás tapasztalható, hiszen innovációs projektek, piacképeshez közeli technológiák finomhangolása, illetve fejlett technológiák alkalmazása is jelen van a beruházások között (38. ábra). Azonban érdemes megjegyezni, hogy egyes kezdeti stádiumban lévő projektek célja nem egyértelműen, vagy rosszul definiált az adatbázisban. Az adatbázisban világos célokkal rendelkező projekteknél a felhasználás és az előállított termékek szempontjából az energiahordozók (tüzelő- és üzemanyagok) előállítása szignifikáns, mely a vegyi anyagokkal együtt a felhasználás 2/3-át teszik ki. Mindemellett megállapítható, hogy a projektek között – az ETS-en felül – ösztönzők híján a felhasználás domináns (88%) a tárolással szemben. Több projekt-nél is felmerül, hogy az értéklánc több elemét, akár egészét magukban foglalják, és különböző felhasználási formákat tesznek lehetővé, így ezek esetében az összesítő áttekintés-nél a legrelevánsabb került kiválasztásra és bemutatásra.



38. ábra A CCU/S projektek technológiai érettség szerinti megoszlása, [203] alapján saját szerkesztés.

6.6.2. Nemzetközi példák

Az CCU/S értéklánc mentén több nemzetközi projekt is azonosítható, melyek számos iparágat érintenek. Ezek közül néhány jelentősebb tervezett vagy megvalósítás előtt álló projekt jó példával szolgálhat a hasonló tervekkel bíró szereplők részére. A Nemzetközi Energiaügynökség egy nyilvánosan elérhető online projektadatbázist⁵¹ üzemeltet, ahol folyamatosan nyomonkövethetők globális szinten a megvalósuló és tervezett CCU/S projektek. Ez hasznos felület azok számára, akik konkrét CCU/S projektek részletei iránt érdeklődnek.

1) AGGREGACO2

Az AGGREGACO2 projekt a spanyolországi Biscay városában, várhatóan 2024 negyedik negyedévében valósul meg.²⁰⁴ A projektben az SMR-ből származó megkötött CO₂-ot karbonátképzési eljárás alkalmazásával alakítják át újrahasznosított hulladékból származó karbonnegatív építőipari aggregátummá. A CAPEX értéke nagyjából 5,3 – 8,9 millió euró, melyet 36-60% támogatási ráta mellett finanszíroz az Innovation Fund. A CO₂ megkötésére használt technológia a post-combustion eljárások közé tartozik, amely jelenleg TRL 9-es fejlettségi szinten áll, éves megkötési kapacitása pedig 2.200 t CO₂ / évre lesz tehető. Az üzemben építési és egyéb hulladék felhasználásával karbonnegatív aggregátumot állítanak elő (TRL 7), melynek tervezett éves kapacitása 56.000 tonna. A projektgazda PETRONOR mellett további partnerek az O.C.O. Technology és a Repsol Group.

2) SCIPIG

A hidrogéngyártás gyakran a felhasználás helyén történik, ahogyan az az Air Liquide és a Shanghai Chemical Industry Park Industrial Gases (SCIPIG) közös projektjében is megfigyelhető.²⁰⁵ Az energiaipari és vegyipari szereplőket bevonó projektben a hidrogéntermelés során SMR-ből származó CO₂ megkötése zajlik, amit később szén-monoxiddá alakítanak át, hogy abból különböző műanyagokat és vegyipari termékeket gyártsanak. A CO₂ megkötése az égetés előtti, pre-combustion fázisban történik kémiai abszorpció segítségével (TRL 9). A CO₂ újrahasznosításával évente 350.000 tonna CO₂-kibocsátást lehet megelőzni, mely egymillió kínai háztartás kibocsátásával egyenlő. A leválasztott CO₂-ot a helyi szén-dioxid-vezetékbe injektálják, ennek segítségével történik a CO₂ szállítása. Ezen CO₂ felhasználásával polimereket, illetve tisztító- és fertőtlenítőszereket fognak gyártani. A tervezett kapacitás eléri az 55.000 t H₂ / év mennyiséget, valamint a 28.000 Nm³/h

CO anyagáramot. Az üzem Kínában (Sanghaj) épül meg, melynek első fázisa az ütemezés szerint 2023 negyedik negyedévére tehető. A CAPEX értéke meghaladja a 200 millió eurót, a résztvevő partnerek az Air Liquide-en kívül a helyi ipari parki szereplők lesznek.

3) Vindhychal

A zöld átmenethez a CCS szignifikáns technológia, mely a szénelapú energiatermelés magas károsanyag-kibocsátását is képes csökkenteni.²⁰⁶ Ennek példaként India legnagyobb széntüzelésű erőműve, az NTPC a tulajdonában álló 4,8 GW-os Vindhychal Super Thermal Power Station egyik 500 MW-os erőműblokkjára telepített CC technológiát a CO₂ metanollá történő átalakítása céljából. A projekt keretében napi 20 t CO₂ kerül megkötésre a Carbon Clean és a Green Power International által közösen tervezett CC egységben, melyhez a projekt részeként egy napi 2 t H₂ kapacitású magas hőmérsékletű gőzelektrolízáló (High-Temperature Steam Electrolysis, HTSE), illetve egy metanolgyártó-egység kerül telepítésre a megkötött CO₂ e-metanollá alakításához. 2022. júliusában az NTPC és a Gujarat Alkalies and Chemicals Ltd. kölcsönös megállapodást írtak alá, melyben mindketten vállalták 100 MW energiatermelő kapacitás rendelkezésre állását napi 75 t zöld metanol és 35 tonna zöld ammónia előállításához.

4) MHIENG

Nem csak kisebb gyártóüzemek, de erőművek esetében is alkalmazhatók moduláris CO₂-megkötési és -felhasználási megoldások. A Mitsubishi Heavy Industries Engineering (Mitsubishi Group) 2022 végén kezdte meg annak a rendszernek a beüzemelését Japánban, amelyet a Taihei Dengyo által üzemeltetett 7 MW kapacitású biomassza erőműhöz kapcsoltak a CO₂ megkötése érdekében.²⁰⁷ A biomassza alapú post-combustion moduláris rendszer fejlettségi szintje TRL 9-es, teljes éves kapacitása 110 t CO₂ / év. A kompakt rendszer előnye, hogy moduláris felépítésének köszönhetően szállítása, illetve telepítése is gyors és egyszerű, így más erőműveknél történő alkalmazása szintén könnyen kivitelezhető lehet. Az üzem füstgázaiból leválasztott CO₂-ot a helyi üvegházakban használják fel növénytermesztésre.

5) Shunli

A vegyipari folyamatok során kibocsátott CO₂-megkötése karbonnegatív termék gyártásakor jól hasznosítható mellékterméket is jelenthet. Az izlandi cleantech vállalkozás, a Carbon Recycling International társberuházásaként

nemrégiben (2022. október) helyezték üzembe a világ első kereskedelmi CO₂-to-metanol üzemét.^{208,209} A kínai Anyang Cityben található üzem az acélgyártáshoz nyersanyagokat előállító koksizókemence és gázgyártó létesítmény kibocsátását fogja felfogni pre-combustion CO₂-megkötéssel. A 160.000 tonna szén-dioxid éves újrahasznosítási kapacitású kínai Shunli üzem jelenleg a legnagyobb ilyen típusú feldolgozó létesítmény. A projekt keretében a CO₂-ot alacsony karbonintenzitású metanol gyártására használják fel, amivel 110.000 tonna metanol előállítására képesek éves szinten – ez több mint 25-szörös szorzót jelent a korábbi izlandi kísérleti üzemhez képest. Az üzem teljes beruházásának értéke 90 millió USD.

6) FINNFJORD E-METHANOL

Egy új kereskedelmi méretű e-metanol-gyártó létesítmény megvalósítását tervezik, mely Észak-Norvégiában, a Finnfjordban kapna helyet.²¹⁰ Jelenleg ez Európa legnagyobb bejelentett e-metanol üzem, beruházási döntés azonban még nem született róla. A projektet a vezető megújulóenergia-céggel, a Statkrafttal közösen fejleszti a Carbon Recycling International. Az erőmű nyersanyagként a Finnfjord ferroszilícium üzem kibocsátásaiból származó CO₂-ot és a víz elektrolíziséből származó zöld hidrogént használja majd megújuló villamos energia felhasználásával. Az üzem a tervek szerint évente 100.000 tonna e-metanol fog előállítani 150.000 tonna CO₂-ból. Az e-metanol üzem projektje mellett a Finnfjord tervei között szerepel, hogy a pre-combustion eljárással megkötött CO₂-ot algabiomassza előállítására is felhasználja. Ennek kapacitását 75.000 t / évre becsülik, amivel az üzem összességében évi 300.000 tonna szén-dioxid újrafelhasználását valósítaná meg.

7) Porthos

Bár elsődlegesen a CO₂-megkötés a felhasználáshoz kötődik Európában, dedikált geológiai tárolók is fejlesztés alatt állnak. Rotterdam kikötőjében egy olyan projektet fejlesztenek, amelynek keretében a kikötő ipari tevékenységéből származó CO₂-ot az Északi-tenger alatti gázmezőkhöz szállítják és tárolják.^{211,212} A projekt a kontinentális Európa CCS zászlóshajója, egyik legnagyobb szállítási és (vízi) tárolási ökoszisztémája olajipari és CCS vállalatok fejlesztésével, jelentős kormányzati (Rotterdam Önkormányzata 70%, holland kormány 30%) támogatás mellett. A beruházásról 2023-ban várható döntés. A Porthos nevet viselő projekt által tárolni kívánt CO₂-ot különböző cégek fogják megkötöni, amit a kikötő területén áthaladó csővezetékbe injektálnak, és ezen keresztül juttatják el a tenger alatt 3

km mélységben elterülő gázmezőbe. A használt leválasztási technológia nagyban függ az adott partner technológiájától, elsődlegesen post-combustion eljárásokról van szó. A Porthos összesen körülbelül 37 millió tonna CO₂ tárolására lesz képes: évente 2,5 millió t CO₂ 15 éven keresztül. A CAPEX értéke publikus adatok alapján 450 millió euró, de ez potenciálisan jelentősen magasabb. Ezen túlmenően az Európai Hálózatfinanszírozási Eszköz (Connecting Europe Facility, CEF) támogatásának mértéke közel 110 millió EUR, valamint a holland állam további 2 milliárd EUR értékben támogatja a projektet.

8) Hafslund Oslo Celsio

Az újrahasznosításra alkalmatlan hulladékok a körforgásos szén-dioxid-gazdaságban vázolt 4R alapján energia-visszanyerés céljából elégetésre kerülnek, mely égetési eljárás CO₂-megkötési potenciállal rendelkezik. Ezen a területen a Hafslund Oslo Celsio projekt lesz az első hulladékégetéssel foglalkozó (waste-to-energy, WtE) létesítmény a világon, amely CO₂-leválasztással rendelkezik.²¹³ A megvalósítás 2022 végén kezdődött a norvégiai Oslóban: a város károsanyag-kibocsátása 17%-kal csökken az éves 400.000 tonna szén-dioxid-leválasztásnak köszönhetően. A CO₂-ot ezután cseppfolyósítják a Longship projekt részeként, és exportálják a Northern Lights partnervállalat számára, amely az első nyílt, nemzetközi CO₂-szállító és -tároló infrastruktúra-hálózat. A CO₂ megkötését post-combustion eljárással tervezik végrehajtani, ami elsődlegesen háztartási, másodlagosan ipari, újrahasznosításra alkalmatlan hulladék égetéséből származik. Az égetésből felszabaduló energiát kapcsolt villamos- és hőenergia termeléséhez használják. A megkötött CO₂-ot innen először hajókkal szállítják a terminálba, majd onnan csővezetékén keresztül az offshore geológiai tárolóhelyhez (akvifer). Az akviferbe éves szinten nagyjából 1,5 millió t CO₂-ot injektálnak majd, ami a projekt teljes élettartama alatt összesen 37,5 millió t CO₂-ot jelent. A beruházás költsége hozzávetőlegesen 550 millió euró, melynek finanszírozásához az állam 330 millió euró támogatást nyújt, míg Oslo város 210 millió euróval járul hozzá a beruházáshoz. A projektgazdák: Hafslund Eco (60%), Infranode (20%), és HitecVision (20%).





A large white number 7 is positioned on the left side of the page. The background is a deep blue gradient, transitioning from a lighter blue at the top to a darker blue at the bottom. A thick, white, smoke-like trail starts from the top right and curves downwards and to the left, ending near the bottom right corner. The number 7 is partially overlaid by the smoke trail.

7

A CCU/S ÉRTÉKLÁNC HAZAI RELEVANCIÁJA

7. A CCU/S értéklánc hazai relevanciája

7.1. Értékláncok mentén hazai adottságok / relevancia elemzése

7.1.1. Befogás, leválasztás

Magyarország éves CO₂-kibocsátása 47 millió tonnára tehető, melynek közel fele, kb. évi 22 millió tonna releváns a szén-dioxid befogása szempontjából.^{18,214}

Ez elsősorban a közcélú villamosenergia- és hőtermelés, valamint az ipari folyamatok és az ipari energiatermelés során kibocsátott CO₂. A CCU/S technológiákban leginkább érintett ágazatok az energiaszektor (közcélú villamosenergia- és hőtermelés), a vegyipar (elsősorban ammónia- és etilényártás) és kőolajfinomítás, a biofinomítók (főként fermentálással foglalkozó üzemek), az ásványipar (főként cementgyártás) és a fémipar (vas- és acélgártás). Ezen szektorokban a kibocsátás csökkentése csak részlegesen valósítható meg a megújuló energiaforrásokra való áttéréssel és elektrifikációval, illetve az energiahatékonyság növelésével. Az ágazatok teljes dekarbonizációjához szükség van a CCU/S technológiák bevezetésére.

7.1.2. Szállítás és kezelés

A szén-dioxid-befogási technológiával felszerelt kibocsátási pontok földrajzi közelségében nem minden esetben található potenciális hasznosítási vagy tárolási helyszínek. Emiatt a leválasztott CO₂ szállítására van szükség, mely történhet csővezetéken keresztül, vízen tankerhajóval, vasúton speciális szerelvényel, illetve közúton tartálykocsival vagy palackozott formában. Mindegyik megoldás esetén szükséges a leválasztott gáz szállítását megelőző (és sokszor azt követő, felhasználás vagy tárolás előtti) kezelése, azaz CO₂-koncentrációjának és anyagi összetételének szabályozása, nyomásának, hőmérsékletének vagy halmazállapotának megváltoztatása.

Magyarországon a CO₂-kezeléshez szükséges technológia és tudás jelenleg is rendelkezésre áll. Várhatóan az olajipari társaságok, gázgyártással, illetve gázipari berendezések gyártásával és telepítésével foglalkozó vállalatok töltenek be meghatározó szerepet a CO₂ szállításra, felhasználásra és tárolásra történő előkészítésében.

Magyarországon a csővezetékes szállítás meghatározó szerepet fog betölteni a szén-dioxid nagy volumenű továbbításában, ezáltal a CCU/S alkalmazások elterjedésében. Jelenleg is léteznek hazai CO₂-csővezetékek, melyek konkrét felhasználási céllal jöttek létre, többnyire EOR tevékenységhez vagy ipari folyamatok kiszolgálására. Az infrastruktúra tervezéséhez, létesítéséhez, illetve üzemeltetéséhez szükséges kompetenciák a gáz- és olajipari, valamint a földgázszállítással és -elosztással foglalkozó vállalatoknál megtalálhatók.

Nemzetközi összehasonlításban Magyarország előnyös helyzetben van a CO₂-csővezetékes hálózat kiépítése szempontjából.

A szárazföldi tároló formációk (elsősorban kimerült olaj- és földgázmezők) elérhetősége miatt nincs szükség tenger alatti vezetékek kiépítésére, melyek drágábbak és nehezebben kivitelezhetők. A viszonylag kis földrajzi távolságok szintén előnyösek, hiszen a csővezetékes szállítás költsége a távolsággal arányos.

Az országot behálózó földgázhálózat (39. ábra) egyes szakaszai felújítással és átalakítással potenciálisan alkalmassá tehető a CO₂ szállítására, ily módon jelentős költségmegtakarítás érhető el a CCU/S ipar fejlődéséhez szükséges szállítási infrastruktúra kiépítésében. A csővezetékes szállítás elterjedése elsősorban a megatonnás nagyságrendű éves kibocsátással rendelkező, nagy energetikai és ipari pontforrások esetében várható.

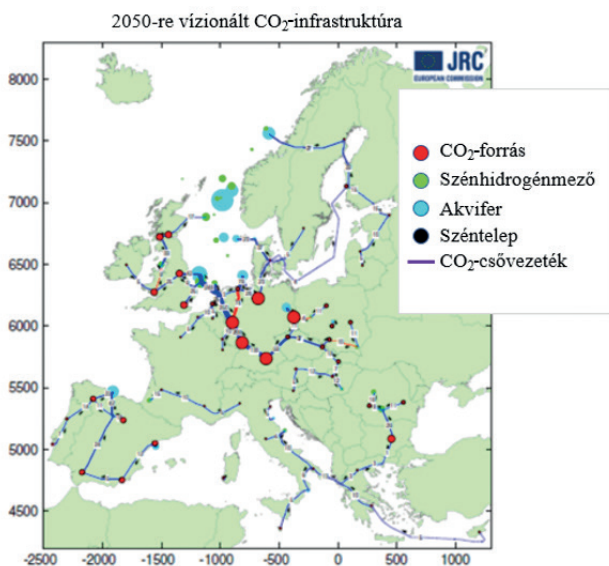
Ezen kibocsátók számára gazdaságilag megtérülő megoldás lehet saját, önálló infrastruktúra kiépítése és üzemeltetése. A későbbiekben ezen nagy kapacitású csővezetékek adhatják a szükséges gerinchálózatot a CO₂-szállítási klaszterek létrejöttéhez. A földrajzilag közel elhelyezkedő kisebb kibocsátók saját, alacsony nyomású vezetékek létesítésével csatlakozhatnak ezekhez a központi hálózatokhoz, így szereve hozzáférést egy költséghatékonyabb szállítási megoldáshoz.

Magyarország alapvetően Ausztriával és Szlovákiával lenne összekötve, de érdemes volna a potenciális kapcsolatrendszert kiterjeszteni Horvátország és Ukrajna felé a meglévő kimerült tárolók elérhetősége miatt. Az országon áthaladó vezeték a fő kibocsátókat és egy potenciális dél-alföldi tárolót érintene.



39. ábra Magyarország földgázzszállító vezetékrendszere, [215] alapján saját szerkesztés.

Mindezekon túl, az országhatárokon átívelő, nemzetközi CO₂-szállításban is meghatározó szerepe lesz a nagy kapacitású csővezeték hálózatoknak, mely Magyarországot is érinti. Hazánk tranzitország szerepét töltheti be a közép-európai régióban befogott CO₂ eljuttatásában tenger alatti tároló formációkhoz.^{216,217} Továbbá a nemzetközi hálózaton keresztül az itthon befogott kibocsátás is továbbítható a lakott területektől jelentősen távol eső, emiatt a társadalom által biztonságosabbnak tartott, elfogadottabb tárolási helyekre. A Zero Emissions Platform 2050-re a következő európai CO₂-szállítási infrastruktúra scenáriót azonosította (40. ábra):



40. ábra 2050-re vizionált CO₂-infrastruktúra, [216] alapján saját szerkesztés.

Magyarországon a közúti szállítás széles körben alkalmazott megoldás a szén-dioxid továbbítására, de a CCU/S ipar fejlődésében csak korlátozott szerepe lesz. A CO₂ szállítása cseppfolyós állapotban tartálykocsiban vagy palackozva történik, általában gázipari vagy logisztikai, szállítmányozási vállalatok által. Elsősorban a kis mennyiségű vagy eseti felhasználási igények kiszolgálásában elterjedt. A közúti szállítás fő előnye, hogy a kiterjedt úthálózat miatt valamennyi kibocsátási és felhasználási pont számára elérhető megoldás. Ezen kívül a szállítási kapacitás rugalmasan alakítható az elérhető CO₂ mennyiségéhez. Ezekből kifolyólag a más módon (pl. vasúton, csővezetékkel) nem vagy nehezen megközelíthető, kis volumenű vagy időben változó kibocsátással rendelkező pontforrások számára teheti hozzáférhetővé a CCU/S alkalmazásokat. Emellett szerepe lehet az egymáshoz közel elhelyezkedő kibocsátók és felhasználók közötti szállításban, illetve a CO₂ továbbításában más szállítási infrastruktúrák betáplálási pontjaihoz. A CCU/S ipar tekintetében közúton a tartálykocsival történő, cseppfolyós szállítás lehet meghatározó, mert a palackozással szemben nagyobb volumenek mozgatására képes.

Magyarországon jelenleg is elérhető a vasúti szén-dioxid-szállítás, a CCU/S alkalmazások térnyerésével a megoldás további elterjedése várható. Elsősorban gázipari és logisztikai, szállítmányozási nagyvállalatok nyújtanak hasonló szolgáltatást. A vasúti szállítás fő előnye, hogy kapacitás szempontjából rugalmas és könnyen skálázható, emiatt kis és közepes volumenű vagy jelentősen ingadozó kibocsátási szinttel rendelkező pontforrások számára is elérhető. Emiatt elterjedésére elsősorban olyan ipari és energetikai kibocsátók esetében várható, melyek a meglévő vasúthálózat mentén helyezkednek el, és a befogható CO₂-mennyiségük alacsony vagy időben változó (pl. kiegészítő szolgáltatást nyújtó gázerművek). A hazai CCU/S ipar működéséhez szükséges a meglévő vasúthálózat fejlesztése, főként a tartós tároló helyszínek összekötése a meglévő infrastruktúrával.

Magyarországon a vízi szén-dioxid-szállítás elterjedése nem várható. Ennek elsődleges oka a szükséges technológia hiánya, valamint az alternatív megoldások elérhetősége és versenyképessége. A CO₂-szállításra alkalmas tankerhajók technológiai érettsége alacsony, a kutatás-fejlesztés fókuszában a nagy volumenű tengeri szállítás kereskedelmi

léptékű megvalósítása áll.¹³⁸ Ezek elsősorban a part közeli és kikötői kibocsátási helyekről a víz alatti tároló formációk sajtoló kútjaihoz továbbítják a szén-dioxidot, de létezik felhasználási célú, kikötők közötti szállítás is. Hazánkban a vízi CO₂-szállítás kizárólag folyami útvonalon történhetne, melynek jelenleg hatékony technológiai megvalósítása nem elérhető (pl. cseppfolyós CO₂ kezelésére alkalmas uszály). Folyóinkon csak kisebb mennyiségek kisebb távolságokra történő továbbítása lenne lehetséges, emiatt nem várható, hogy a közúti vagy vasúti szállítással szemben versenyképes megoldást jelenthet egy folyami szállítási infrastruktúra kifejlesztése és kiépítése.

7.1.3. Tárolás

Magyarország számos előnyös adottsággal rendelkezik a szén-dioxid földalatti tárolásához.

Az ország területén belül rendelkezésre állnak a nagy mennyiségű CO₂ hosszútávú és biztonságos tárolásához szükséges természeti erőforrások. A hazai CCU/S ipar fejlesztése céljából már rövidtávon is elérhető, de arányaiban kisebb volumen befogadására képes geológiai formációk a kimerült olaj- és földgázmezők fontosak, míg a jelentős tárolási kapacitású, de csak hosszabb távon hozzáférhető erőforrások a sósvízes akviferek. Rendelkezésre áll továbbá az ezek felméréséhez, kiépítéséhez és hasznosításához szükséges geológiai és műszaki tudás, tapasztalat is.

A CO₂ földalatti tárolási lehetőségeinek felmérésére irányuló kutatások 2001 óta zajlanak Magyarországon, részben nemzetközi együttműködések részeként, részben hazai kezdeményezésre. Ezen törekvések elsősorban a CCU/S iparral összefüggésben hasznosítható geológiai formációk feltérképezésére irányultak, valamint a lehetséges tárolási helyszínek elméleti kapacitásának kiszámításával is foglalkoztak. Ezen kívül a hazai szénhidrogén kitermelés több évtizedes múltra tekint vissza, a CO₂ visszasajtolása a kitermelés növelése céljából már a '70-es években is zajlott bizonyos területeken. Ebből kifolyólag jelentős tudás és adatvagyon áll rendelkezésre az országban található olaj- és földgázmezőkről; valamint a CO₂ kimerült szénhidrogén-formációkban történő, hosszútávú és biztonságos tárolásához szükséges technológia, ismeretek és képességek is elérhetők. A CCU/S ipar tárolói szegmensében meghatározó szerepet tölthetnek be az olaj- és földgáztermeléssel, a földgáztárolással és a vízkutatással-termeléssel foglalkozó vállalatok, valamint a bányászati és földtani tevékenységet folytató szervezetek.^{218,219}

Magyarországon a CCU/S ipar kifejlődésének kezdetén a CO₂ tárolása az arra alkalmas, kiürült szénhidrogénmezőkben történhet.

A jelenleg is elérhető tudás és tapasztalat miatt ezek a geológiai formációk költséghatékonyan hasznosíthatók és már rövidtávon is rendelkezésre állnak, néhány éven vagy egy évtizeden belül kiépíthetők, illetve üzembe helyezhetők.

A hazai szénhidrogénmezők elméleti CO₂-tárolási kapacitása a becslések alapján 400-450 millió tonnára tehető. Ennél kevesebb a ténylegesen hasznosítható gyakorlati kapacitás, mely helyszíni mérések, elemzések alapján figyelembe veszi a geológiai, műszaki, infrastrukturális és társadalmi kritériumokat is.

Rövidtávon a hazai kimerült szénhidrogénmezőkön összesen kb. 25 millió tonna CO₂-tárolói kapacitás építhető ki gazdaságosan, melynek mértéke növelhető állami támogatásokkal és ösztönzőkkel.

Mivel az egyes hazai szénhidrogénmezős formációkba többnyire 10 millió tonnánál kisebb volumen sajtolható, így a potenciális lokációk egyenként évi 1 millió tonna mennyiségnél kevesebb CO₂ tárolására alkalmasak.^{219,220}

A szénhidrogénmezők CCU/S célú alkalmazásában a meglévő ismereteken, képességeken túl további előnyt jelent, hogy az egyes formációkhoz kapcsolódóan már létezik kiépített sajtolási, monitoring és szállítási infrastruktúra. Ezek egy része felújítással, átalakítással potenciálisan alkalmasá tehető a CO₂ kezelésére, ami csökkentheti a tároló kiépítésének költségét. Fontos azonban megjegyezni, hogy a kőolaj és földgáz anyagi jellemzői lényegesen eltérnek a szén-dioxidtól, emiatt a meglévő kutak és csővezetékek csak korlátozott számban, nagy körültekintéssel, illetve megfelelő átalakítás után hasznosíthatók CO₂-tárolási célból. A szénhidrogénmezők felhagyott kútjai a legtöbb esetben nem rendelkeznek a szükséges saválló cementezésű kialakítással vagy rezisztens béléscsővel, így a tároló formáció kiépítése során várhatóan ezeket fel kell számolni, helyettük új monitoring és sajtoló kutakat kell kiépíteni.²²⁰

Magyarországon az elérhető CO₂-tárolási kapacitás jelentős részét sósvízes akviferek adják, melyek a CCU/S ipar fejlődésének későbbi szakaszaiban lehetnek hozzáférhetőek (41. ábra).

A rendelkezésre álló ismeret csekély ezekről a geológiai formációkról. Az eddigi kutatások során csak regionális felmérésre és az elméleti tárolói kapacitás becslésére került sor, konkrét helyszínek elemzése nem valósult meg. Továbbá

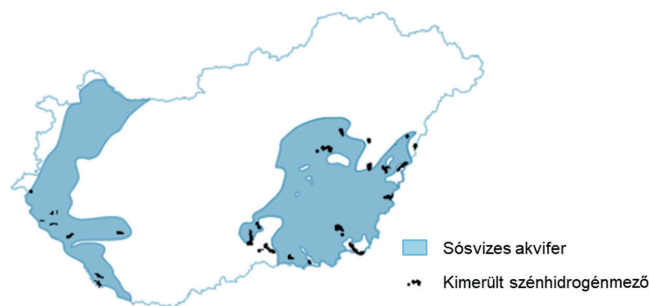
nincs rendelkezésre álló hazai gyakorlati tapasztalat a szállításra vonatkozóan. Mindezek miatt a sósvizes akviferek hasznosítására csak hosszabb távon kerülhet sor, viszont tárolási potenciáljukból fakadóan fontosak lehetnek a hazai CCU/S ipar fejlődéséhez.²¹⁸

A CO₂ hosszútávú és biztonságos tárolására alkalmas hazai sósvizes formációk elméleti kapacitása 2.100-2.700 millió tonnára tehető.^{218,221} Így ezek a területek adhatják akár az országon belüli teljes tárolói volumen 80%-át. Ígéretes természeti erőforrások a 2.090 millió tonna becsült kapacitású Szolnoki formáció, valamint a 424 millió tonna becsült kapacitású Újfalu formáció. A tényleges tárolói alkalmasság megállapításához és CCU/S ipari hasznosításhoz további geológiai kutatások, illetve technológiai ismeretszerzés és fejlesztés szükséges.

Magyarországon a kiürült szénhidrogénmezők és a sósvizes akviferek hasznosításán túl nem várható más geológiai tárolási megoldás elterjedése.²¹⁹ A hazai kitermelésre alkalmatlan széntelepek regionális felmérése megtörtént, azonban alacsony abszorpciós képességük és relatíve alacsony becsült kapacitásuk miatt adottságaik nem kedvezők a CO₂-tároláshoz. A bazaltos formációkban történő megkötés elterjedésének lehetőségét jelentősen korlátozza a technológia alacsony érettségi szintje és a működésével, alkalmazásával kapcsolatos tapasztalat hiánya.

A nagy kibocsátású erőművi, ipari egységek és a megfelelő kapacitással rendelkező tároló helyszínek távolsága általában meghaladja a 100 kilométert.²¹⁹ Ez elsősorban csővezetékes szállítási infrastruktúra kiépítését teszi szükségessé az egyes lokációk összekötésére.

A hazai kimerült szénhidrogénmezőkön kialakítható tárolók a kapacitásuk korlátozottsága miatt csak a közelükben található pontforrások néhány éves, esetleg egy évtizednyi befogott CO₂ mennyiségét képesek megkötni. A CCU/S ipar fejlődésének kezdeti szakaszaiban, amíg ezek a formációk töltik be az elsődleges szerepet a tárolásban, célszerű a sósvizes akviferek további feltárására fókuszálni. Ezen formációk bizonyos területeit érdemes további vizsgálatoknak alávetni, ezek azonosításához, a konkrét lokációk elemzéséhez, illetve kiválasztásához meghatározó fontosságú szempont a kibocsátási és tárolási pontok közötti távolság.



41. ábra Magyarországon a CO₂ földalatti tárolására alkalmas geológiai formációk földrajzi elhelyezkedése, [218] alapján saját szerkesztés.

7.1.4. Hasznosítás

Magyarországon a befogott szén-dioxid számos ágazatban hasznosítható, a jelenleg keresletet támasztó szektorok mellé a CCU/S ipar fejlődésével újabb piacok bekapcsolódása várható. Jelenleg a CO₂ felvevői között meghatározónak számít az élelmiszeripar és az italgyártás. Ezen szektorok piaca kis méretű és kevés növekedési lehetőséget rejt, azonban keresletét jelenleg bányászott CO₂ fedezi, melynek kiváltása egyértelmű környezeti előnyökkel jár.

Szintén jelentős felhasználó a műtrágyagyártás, mely az élelmezésben meghatározó szerepe és a termék potenciális piacmérete, export lehetőségei miatt bővülés, terjeszkedés esetén nagy CO₂-keresletet támaszthat. További piacot jelent a fokozott, másodlagos/harmadlagos olajkihozatal (EOR), melyhez a technológia, a szaktudás és meglévő tapasztalat is rendelkezésre áll a hazai olajiparban. A CCU/S ipar fejlődésével és a releváns technológiák, eljárások érettebbé válásával a vegyiparban és az építőanyag-gyártásban is várható a befogott CO₂-felhasználás elterjedése. Az alkoholok és karbonsavak előállításának eljárása magas technológiai érettségű, előbbi számos különböző alkalmazási lehetőséggel és felvevőpiaccal rendelkezik, utóbbi pedig elsősorban a hazai gyógyszergyártásban hasznosítható. A szintetikus üzemanyagok előállítása is jelentős CO₂-keresletet támaszthat, mivel egyes közlekedési ágazatokban – különösen a légi közlekedésben és a tengeri hajózásban – a dekarbonizáció vezető megoldását jelenthetik, valamint az eljárások technológiai érettsége közel van a kereskedelmi alkalmazhatósághoz. A jelenleg még jelentős CAPEX és OPEX igény miatt egyelőre nehéz a szintetikus üzemanyagok

gyártására életképes gazdasági megtérülésű projektet indítani, itt elsősorban a szabályozói környezet teremt piacot, illetve a EU-s és tagállami támogatások segíthetik a pilot projekteket. A polimergyártásban egyelőre korlátozza a CO₂ hasznosításának elterjedését a technológiák alacsonyabb érettségi szintje, azonban az előállított termékek hazai autóiipari és építőipari hasznosíthatósága, illetve jelentős piacmérete miatt a kereslet növekedése várható. Jelentős CO₂-keresletet támaszthat az építőanyagok gyártása is a releváns technológiák fejlődésével, elsősorban a cement és a szerves karbonátok terén, mivel az ágazatban kevés rendelkezésre álló alternatív megoldás létezik az alacsony kibocsátású termékek előállítására. A CCU/S ipar későbbi szakaszaiban a hazai mezőgazdaságban is megjelenhetnek CCU/S alkalmazások, elsősorban az üvegházi terméshozam növelésére, valamint biológiai úton fehérjék és cukrok előállítására. Ezen hasznosítási módok technológiai érettsége egyelőre alacsony, még nem érték el a demonstrációs fázist, azonban az eljárások fejlődésével hosszútávon jelentős CO₂-felvevőpiacot jelenthetnek.

A CCU/S alkalmazások hazai elterjedését átfogóan gátolja, hogy az ország területén jelentős nagyságú és tisztaságú, természetes eredetű CO₂-készletek találhatók. Ezen telepek viszonylag könnyen és alacsony költség mellett kitermelhetők, így egyelőre versenyképesebb megoldást nyújtanak a CCU/S technológiával szemben a CO₂-felhasználók számára. Jelenleg a szabályozási környezet is támogató a CO₂-bányászatra nézve, mivel nem tartozik az ETS hatálya alá, jóllehet egyértelműen kibocsátást eredményez.

7.2. Hazai potenciális CCU/S értéklánc ábra és potenciális szereplők az egyes értékláncelemek esetében

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) és a technológiai szolgáltatók lehetnek, mint a Linde és a Messer, a meglévő kompetenciáik, tőkeerejük és érintettségük alapján.

A MOL a CO₂-értéklánc összes szegmensében rendelkezik releváns érdekeltiséggel, és az egyetlen hazai vállalat, amely átfogó (teljes értékláncot lefedő) CCU/S tapasztalat birtokában van. A vegyipari és olajipari jelenléte révén egyszerre érintett a kibocsátásban és a felhasználásban, rendelkezik a csővezetékes szállításhoz és a föld alatti tároláshoz szükséges kompetenciával, technológiával, illetve kitermelési

tapasztalattal, továbbá geológiai ismeretekkel is rendelkezik számos, potenciálisan tárolóként hasznosítható, kimerült szénhidrogénmező esetén. Emellett vegyipari tevékenységéből kifolyólag a CO₂-leválasztás és -átalakítás műszaki megoldásainak kidolgozásában, adaptációjában és megvalósításában is szerepe lehet. A MOL a 2030-as stratégiájában célul tűzte ki a befogási kapacitás kiépítését saját kibocsátási pontjainál, illetve harmadik feles tárolási szolgáltatás kialakítását is.²²²

Az MVM a hazai energiatermelésben betöltött elsődleges szerepe, valamint földgázelosztási és -tárolási kompetenciájából és infrastruktúrájából kifolyólag lehet meghatározó a CCU/S iparban. Jelentős hazai fosszilis erőművi kapacitások tulajdonosaként érdekelt a befogási kapacitás kiépítésében, továbbá a földgázhoz kapcsolódó képességei előnyt jelentenek a CO₂-szállítási és -tárolási piacra történő belépéshez, mind az infrastruktúra-tervezés, -kiépítés és -működtetés terén. Az MVM a hazai villamosenergia- és földgáz szektor legmeghatározóbb vertikálisan integrált szereplője, ezért a CCU/S iparág villamosenergia-igényének és szükséges energiaellátási infrastruktúrájának kiépítésében, üzemeltetésében is lehet szerepe.

A vegyipari társaságok (pl. Nitrogénművek, BorsodChem vagy MOL Petrolkémia) jó adottságokkal rendelkeznek mind a befogás, mind a CO₂ helyben hasznosítása terén. Továbbá a vegyipari termékek esetében növekvő dekarbonizációs nyomás jelentkezik vevői oldalról (főleg az EU-s piacon). Ezen túlmenően előnyük, hogy számos esetben egész értéklánccokat tudnak felépíteni telephelyen és vállalkozáson belül, ami nagyban javítja ezen projektek gazdaságosságát. A hazai cementgyárak (DDC, Lafarge-Holcim) is potenciális szereplők, hiszen kibocsátásuk csökkentésére a CCU/S technológián kívül kevés életképes megoldás létezik jelenleg, és már több nemzetközi példa is fellelhető az iparágban.

A Linde és a Messer a hazai iparigáz-ellátási és CO₂-piac meghatározó vállalataiként számottevő szaktudással és tapasztalattal rendelkeznek a gázkezelés és gázszállítás terén. A CCU/S iparban jelentős szerepük lehet a CO₂ kezelésével és továbbításával, valamint befogásával kapcsolatos komplex műszaki megoldások tervezésében és kivitelezésében.

Magyarországon a CO₂-kibocsátás szempontjából meghatározó pontforrások az energiaszektorban, a vas- és acélgégyártásban, a cementgyártásban, a vegyiparban, a kőolajfinomításban, valamint a hidrogén-előállításban működnek.

A legnagyobb hazai erőművi kibocsátó a Mátrai Erőmű (MVM), a Gönyüi erőmű (Uniper), a Dunamenti Erőmű, a Csepeli erőmű (Alpiq), illetve a Budapesti Erőmű Zrt.

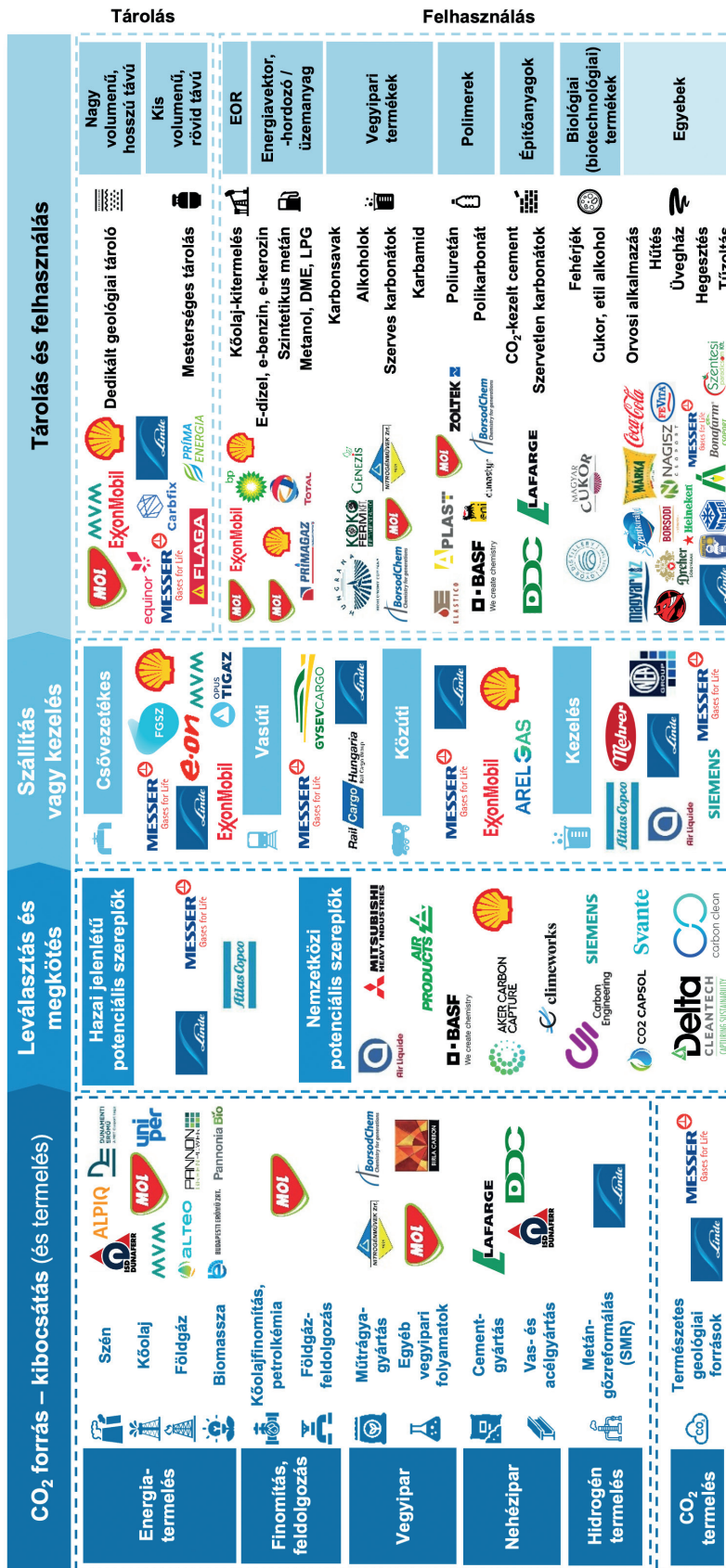
egységei. A műtrágyagyártás terén meghatározó szereplő a Nitrogénművek. A vegyipar legnagyobb CO₂-forrása a MOL Petrolkémia tiszaujvárosi üzeme, valamint a BorsodChem üzeme és ipari energiatermelő egységei. A vas- és acélgártásban meghatározó az ISD Dunafer. A cementgyártás legnagyobb CO₂-forrása a Duna-Dráva Cement és a LAFARGE. A kőolajfinomításban meghatározó a Dunai Finomító (MOL). A hidrogén-előállításban jelentős a Linde kazincbarcikai és a MOL százhalombattai üzeme.²²³ A legnagyobb hazai kibocsátók részletes bemutatását a Fehér Könyv 8. fejezete tartalmazza.

Magyarországon kevés piaci szereplő foglalkozik CO₂-leválasztási technológiák telepítésével és üzemeltetésével (42. ábra). A pontforrások kibocsátásának befogásához szükséges komplex műszaki megoldások kezdeti szállítói a nemzetközi gázipari cégek lehetnek, elsődlegesen a Linde, a Messer és az AirLiquide. A leválasztó berendezések gyártásában meghatározó szereplő a Mitsubishi és a Siemens, melyek beszállítóként és szakmai partnerként is megjelenhetnek a befogási projektek megvalósítása során. A CO₂-leválasztási technológiák és komplex műszaki megoldások európai piacán számos, hazai jelenléttel is rendelkező nemzetközi vegyipari, gáz- és olajipari szereplő is növeli

jelenlétét, többek között az AirLiquide, a BASF és a Shell. A nemzetközi együttműködések keresztül a hazai vállalatok hozzáférhetnek a magasabb technológiai érettségű leválasztási megoldásokhoz, és bővíthetik a releváns szakismeretüket, kompetenciáikat.

Magyarországon a szén-dioxid-kezelés, -szállítás és -tárolás megvalósításában számos szereplő rendelkezik a szükséges kompetenciákkal és technológiákkal. A CO₂-kezelés műszaki megoldásainak elsődleges szállítói a gázellátással és gázipari műszaki berendezésekkel foglalkozó vállalatok lehetnek. A csővezetékes szállításban a gázhálózatok üzemeltetői, elsősorban az FGSZ Földgázszállító (MOL), valamint az MVM, az E.ON és a TIGÁZ földgázelosztói vállalatai lehetnek meghatározók. A vasúti szállításban a Rail Cargo és a GYSEV CARGO, a közúti szállításban a Linde, a Messer, a MOL és a Shell lehet jelentős szereplő. A hazai tartós föld alatti CO₂-tárolás legnagyobb jelentőségű szereplője lehet a MOL, mivel rendelkezik a szükséges kompetenciával és technológiával, továbbá a hazai tároláshoz szükséges kimerült szénhidrogénmezők jelentős része esetén rendelkezik kitermelési tapasztalattal és geológiai ismeretekkel. Kiemelt szereplő lehet még az MVM, a rendelkezésre álló földgáztárolási kompetenciából és infrastruktúrából kifolyólag.





42. ábra A hazai CCUS értékánc főbb szereplőinek összefoglaló ábrája, saját szerkesztés.



8

HAZAI KIBOCSÁTÓK ÁTTEKINTÉSE, ELEMZÉSE

8. Hazai kibocsátók áttekintése, elemzése

8.1. Hazai CCU/S releváns szén-dioxid-kibocsátás áttekintése

Magyarország CO₂-kibocsátása a rendszerváltás előtti időszakban volt a legnagyobb. A gazdasági válság és az ipari termelés visszaesése miatt a kibocsátás jelentősen csökkent. A 2000-es évek elejétől ismét növekedés volt megfigyelhető, majd az utóbbi évek ismét csökkenő tendenciát mutat. A hazai CO₂-kibocsátás nagy része az erőművi foszszilis tüzelőanyagok égetése során keletkezik, az iparban a fémgyártás, a vegyipar és a cementgyártás a legnagyobb kibocsátók. A közlekedés, valamint az agrárszektorban a talajmegmunkálás, az állattartás és az öntözés is jelentős CO₂-kibocsátást eredményez.

8.1.1. Általános trend és ágazati megoszlás

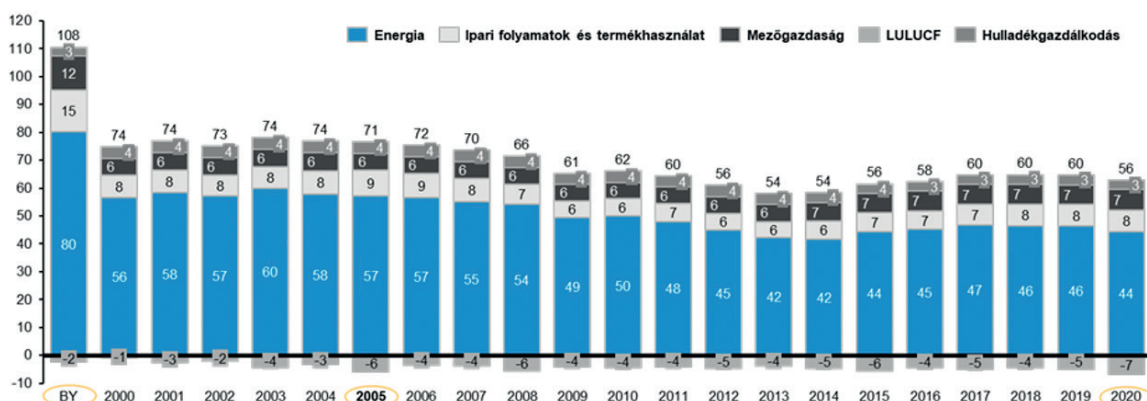
Magyarország helyzete az üvegházhatású gázok kibocsátása szempontjából Európán belül kedvező. Magyarországon a szén-dioxid-kibocsátás a 80-as évek közepe óta csökkent, azonban a további csökkentéshez jelentős beruházásokra, a földhasználat megváltoztatására, új technológiák bevezetésére, a fogyasztói magatartás alapvető megváltoztatására és az energiamix átalakítására van szükség (43. ábra). Magyarország 2020. évi üvegházhatásúgáz-kibocsátása

62,8 millió tonna CO₂ egyenérték volt.^{114,224,225} Ha figyelembe vesszük az erdeink által elnyelt szén-dioxidot is, a (nettó) kibocsátásunk 55,9 millió tonna CO₂ egyenérték. A Magyarországra vonatkozó 5-6 tonna közötti egy főre jutó éves kibocsátási érték nemzetközi összehasonlításban kedvező. Ez jórészt az energiatermelésen belül az atomenergia és a relatíve alacsony fajlagos kibocsátású földgáz dominanciájának köszönhető.

A bázisévhez (Basis Year, BY) (1985-87 átlaga) képest a hazai 2020-as kibocsátás 43%-kal kisebb volt. Ez a jelentős csökkenés részben a rendszerváltás (1989-90) következménye, amely a maga vonulatában a nemzetgazdaság kibocsátásának radikális visszaesését hozta. A termelés szinte minden gazdasági ágazatban csökkent (a termelőegység-bezárások miatt), beleértve az üvegházhatású gázok szempontjából fontos ágazatokat is, mint például az energia, az ipar és a mezőgazdaság.

2005 és 2014 között Magyarországon szinte folyamatos kibocsátáscsökkenés volt tapasztalható az energiaszektorban^{114,224,226}. A csökkenés kezdetben az ipari termelés – rendszerváltást követő – zuhanásával, azt követően az erőforrás-hatékonyság javulásával indokolható. A 27%-os csökkenés után azonban a csökkenő tendencia megállt, és a teljes kibocsátás 2014 és 2017 között 12%-kal nőtt, majd 2019-ig hasonló szinten maradt. Ezt követően, főként a COVID-19-nek köszönhetően 4%-os visszaesés volt tapasztalható 2020-ban.

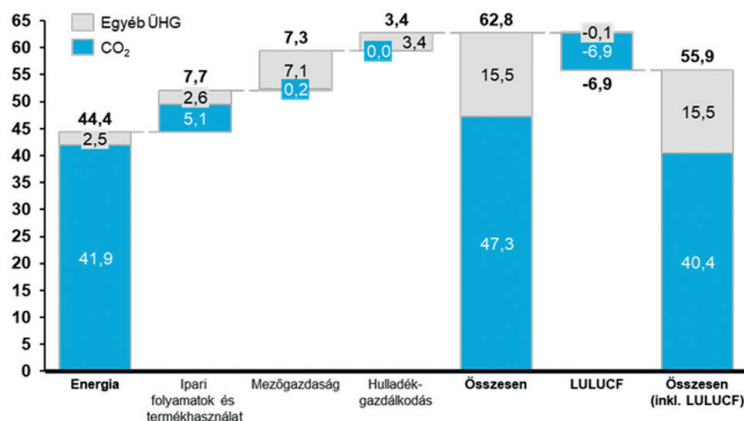
A legnagyobb kibocsátó ágazat messze az energiaszektor (beleértve a közlekedést és az ipar energiaellátását is),



43. ábra ÜHG-kibocsátás alakulása Magyarországon 1985-2020 (BY=1985-87 átlaga), [214] alapján saját szerkesztés.

amely a 2020-as teljes üvegházhatásúgáz-kibocsátáshoz 71%-kal járult hozzá (44. ábra). Az ipari folyamatok és termékhasználat, valamint a mezőgazdaság hasonló, egyenként 12%-os részesedéssel rendelkezett, a hulladékágazat pedig 5%-át tette ki a teljes hazai ÜHG-kibocsátásnak. CO₂-kibocsátás szempontból utóbbiak kevésbé relevánsak, hiszen ezeknél főként a metánkibocsátás a jelentős.

energia és hő előállításán történik kibocsátás. Az energiaforrás összetételét nézve a földgázfelhasználás dominál (62%), a folyékony tüzelőanyagok 23%-ot képviseltek, amelyek közül a gázolaj az egyik legfontosabb. A szilárd tüzelőanyagok, illetve egyéb fosszilis tüzelőanyagok aránya meglehetősen alacsony.

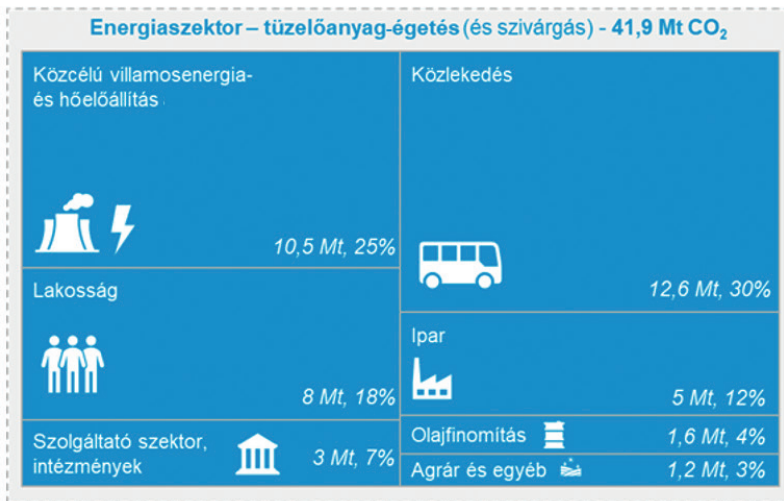


44. ábra Hazai ÜHG-k kibocsátásának megoszlása 2020 (Mt CO₂ eq és CO₂), [214] alapján saját szerkesztés.

8.1.2. CCU/S szempontból releváns kibocsátások (energia és ipar) elemzése

Az energiaszektor magába foglalja a tüzelőanyag-égetési folyamatokból származó kibocsátásokat, valamint az elsődleges energiaforrások feltárásából, szállításából, elosztásából és átalakításából származó, tüzelőanyaggal kapcsolatos diffúz kibocsátásokat.²²⁴ Az ipari folyamatok és termékhasználat ágazat az ipari termeléshez kapcsolódó nem tüzelési folyamatok által generált kibocsátásokat foglalja magába. Az energiaszektor (tüzelőanyag-égetés) legnagyobb kibocsátó ágazata a közlekedés, mely az összes tüzelőanyag-égetésből származó kibocsátás közel 30%-áért (12,6 Mt) felel (45. ábra). Ennek túlnyomó része a közúti közlekedésből származik, és 99%-ban folyékony üzemanyag elégetésével történik. Ezt követi a közcélú villamosenergia- és hőellátás 10,5 Mt CO₂-kibocsátással. Ebbe az ágazatba tartoznak a villamosenergia-termelő létesítmények és a távhőtermelő. Itt főként szilárd (lignit és biomassza) és gáznemű (főként földgáz) tüzelőanyag kerül elégetésre. Jelentős kibocsátó a lakossági és szolgáltató szektor. Ezek elsődleges kibocsátása a fűtési célú földgázfelhasználáshoz kapcsolódik. Fontos kibocsátó terület az ipar és olajfinomítás, ahol jellemzően az ipari folyamatokhoz szükséges

Szén-dioxid-befogás szempontból olyan ágazatok lehetnek relevánsak, ahol pontszerűen, nagy volumenben keletkezik kibocsátás. A közlekedés, az épületek és a lakosság kibocsátása jelentős mértékű, azonban számos kis kibocsátási ponton keresztül jut a légkörbe a szén-dioxid, így ezek befogása nem reális opció. Az energiaszektoron belül három terület van, ahol nagy volumenben, koncentráltan, kevés lokáción történik kibocsátás: közcélú villamosenergia- és hőtermelés, ipari energiatermelés és olajfinomítás energiaigénye. Ezen területek együttes éves CO₂-kibocsátása 17 millió tonna.

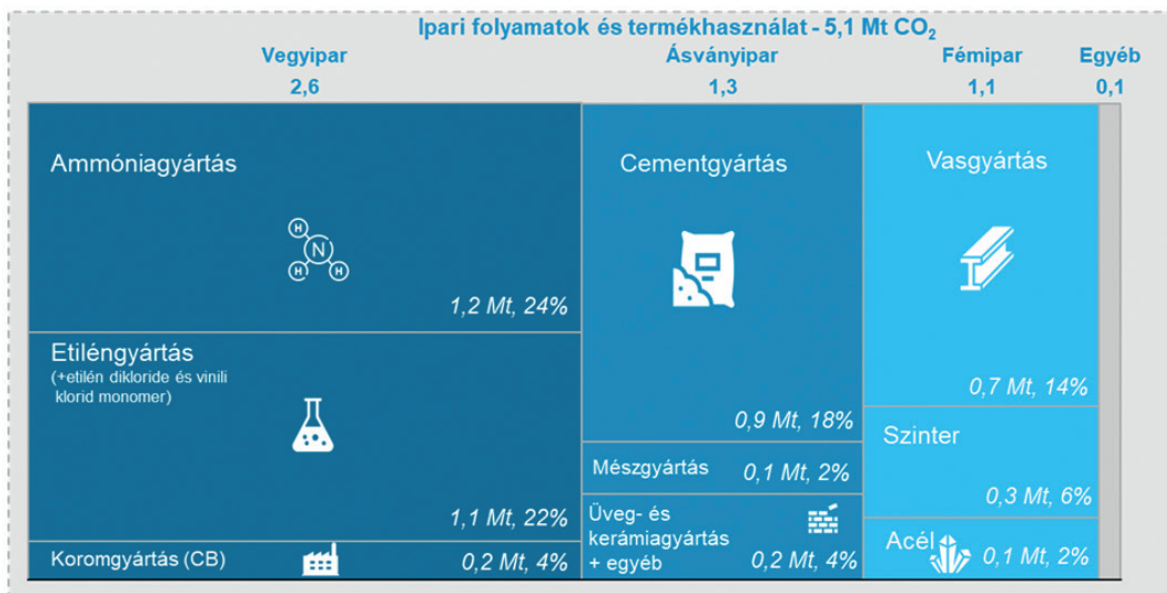


45. ábra Hazai energiához kapcsolódó (tüzelőanyag-égetés) folyamatok kibocsátásának megoszlása 2020-ban, [214] alapján saját szerkesztés.

Az energiaszektoron (tüzelőanyag-égetésen) túl az ipari folyamatokhoz és termékhasználathoz kapcsolódó kibocsátási folyamatok lehetnek relevánsak szén-dioxid-megkötés szempontjából, mert jelenleg nincs más olyan technológiai megoldás, amely képes lenne ezeket a kibocsátásokat érdemben csökkenteni. A teljes magyarországi ipari folyamatokhoz és termékhasználathoz kapcsolódó éves CO₂-kibocsátás 5,1 millió tonna (46. ábra). Ez a terület az ipari termeléshez kapcsolódó, nem tüzelési folyamatok által generált kibocsátásokat foglalja magába. Itt jellemzően valamilyen termék előállítása következtében létrejövő kémiai

reakciók mellékterméke a keletkező szén-dioxid. A leginkább érintett ágazatok a vegyipar (elsősorban ammónia- és etiléngyártás), ásványipar (főként cementgyártás) és fémipar (vas- és acélgyártás).

Az energiaszektor (tüzelőanyagok égetése) (17 Mt) és az ipari folyamatok (5 Mt) éves CO₂-kibocsátása hozzávetőlegesen évi 22 millió tonna.²²⁴ Ez a mennyiség lehet tágran értelmezve releváns a szén-dioxid befogása szempontjából. A Fehér Könyv további fejezetében ezen kibocsátási volumenhez legnagyobb mértékben hozzájáruló szereplők, létesítmények kerülnek elemzésre.

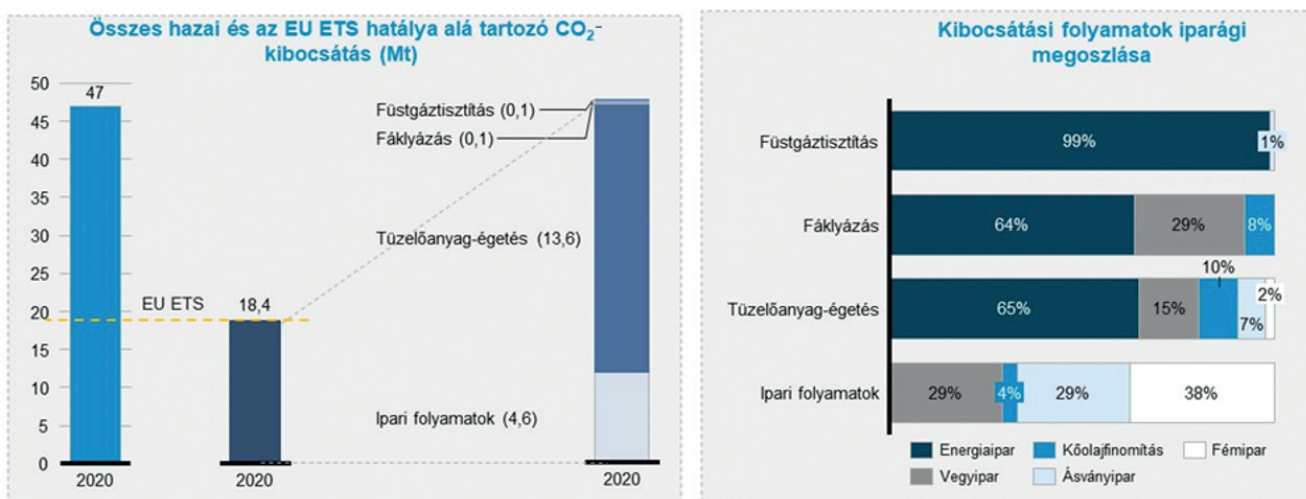


46. ábra Ipari folyamatok és termékhasználat hazai kibocsátásának megoszlása 2020-ban, [214] alapján saját szerkesztés.

8.1.3. Hazai ETS kibocsátások áttekintése (folyamatok, tevékenységek, tüzelőanyagok)

Fontos, hogy az ETS hatálya alá tartozó kibocsátás nem egyezik a teljes hazai kibocsátással. Magyarországon 2020-ban a teljes 47 millió tonna CO₂-kibocsátásból az EU ETS hatálya alá csupán 18,4 millió tonna CO₂ tartozott.²²³ A rendszer elsődlegesen az energiatermelőket és a nagy ipari létesítményeket célozza. Az ETS hatálya alá tartozó kibocsátások 75%-át az energiaellátásból és az ipari energiatermelés tüzelőanyag-égetéséből származó kibocsátás teszi ki (47. ábra). Az ipari folyamatok és termékhasználat pedig a hazai ETS kibocsátások 25%-áért felelős.

Tüzelőanyag-égetéshez kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátásban elsősorban az energiaellátási ágazat érintett, főként a villamosenergia- és hőtermelés. Az erőművek között a legnagyobb hazai kibocsátó évente több mint 3 Mt szén-dioxidot bocsát ki, jelentős források továbbá a gázerőművek, egyenként akár évi 200-900 ezer tonna közötti kibocsátással. Ezt követi a vegyipar (15%), kőolajfinomítás (10%), valamint az ásványipar (7%) és a fémipar (2%)^a. Az ipari folyamatok és termékhasználat EU ETS hatálya alá tartozó leginkább érintett ágazatok a fémipar (vas- és acélgégyártás), a vegyipar (elsősorban ammónia- és etiléngégyártás) és az ásványipar (főként cementgégyártás).



47. ábra Hazai EU ETS hatálya alá tartozó kibocsátás, [38,223,225] alapján saját szerkesztés.

^a Az IPCC (ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete) módszertani utasításai alapján a vasgégyártáshoz felhasznált redukálószer (szénkoks, szénelektroda és anódok) felhasználásából származó CO₂-kibocsátásokat a vas- és acélgégyártás ipari folyamatokból eredő technológiai kibocsátásaként számoljuk el. Ugyanígy tétel a kohógáz égetésének kibocsátása, amely az IPCC módszertana szerint nem számítandó, hanem a folyamatba bevitt tüzelő- és alapanyagok tökéletes oxidációjával kell számolni.

A tüzelőanyagok égetéséből származó ETS kibocsátások domináns forrásanyaga a földgáz, ezt követi a lignit, a fűtőgáz, majd a kokszermékek (48. ábra). A technológiai kibocsátás elsődleges forrásanyaga a kokszermékek, melynek fő oka, hogy a vasgyártáshoz felhasznált redukálószer (szénkocsz, szénelektroda és anódok) felhasználásából származó CO₂-kibocsátások technológiai kibocsátásként kerülnek elszámolásra. A kokszermékeket szorosan követi a földgáz, majd leginkább a cementgyártás során felhasznált nyersliszt. A füstgáztisztítás elsődleges forrásanyaga a mészkő; a fáklyázásból származó CO₂-kibocsátás pedig a kohógáz.²²³

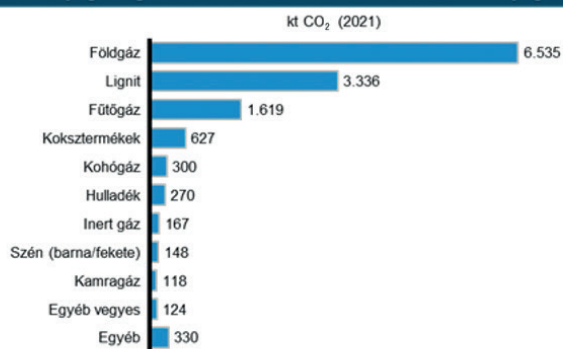
Bár az ETS nem fedi le a teljes hazai kibocsátást, kiegészítve a biofinomítói kibocsátással, CCU/S szempontból a rendszer ideális kiinduló pont, hiszen kifejezetten a nagy és koncentrált kibocsátó létesítményeket célozza. Az ETS érintettjei számára a CO₂-kibocsátás gazdasági terhet jelent, ezért kellően magas kvótaár mellett jelentős ösztönzője lehet a kibocsátáscsökkentési intézkedéseknek, köztük a CCU/S-nek is. Ráadásul vélelmezhető, hogy az ETS rendszer jövőbeni reformjai során újabb kibocsátók fognak bekerülni annak hatálya alá.

8.1.4. Iparági elemzés – az egyes hazai nagykibocsátó-ágazatok kibocsátása

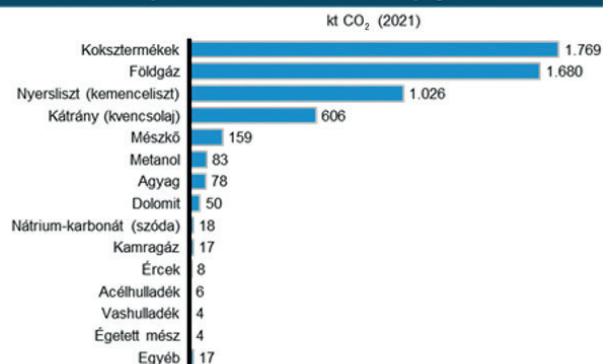
Számos különböző CO₂-forrás létezik mind az iparban, mind az energiaellátásban.²²⁷ Ezek eltérő pontokon és eltérő módon bocsátanak ki gázokat, jellemzően komplex ipari folyamatok mentén. Az energiaipar ágazatába tartoznak a távhő- és villamosenergia-termelő erőművek és fűtőművek, az olajfinomítók, a kocszoló-, valamint a brikettáló üzemek. A szektor kibocsátásának háromnegyedét a közcélú villamosenergia- és hőtermelés teszi ki. Az áramtermelés során fosszilis tüzelőanyagok (földgáz, szén, olaj, biomassza) elégetéséből származik a kibocsátás. Ez jellemzően a légkörbe jut, vagy részben hasznosításra kerül kapcsolt termeléssel. Az ipari termelés szén-dioxid-kibocsátásának jelentős része, átlagosan kb. 40%-a köthető a hőtermeléshez szükséges tüzelőanyag égetéséhez (ez lehet alacsony, közepes, illetve magas hőigényű művelet), ez az arány a vas- és acéliparban a legmagasabb. A különféle kémiai reakciók során szintén komoly mennyiségű CO₂ kerülhet a levegőbe (folyamati emisszió), a cementgyártásban különösen magas ez az arány. Ezen kibocsátás kezelését tudják támogatni a CCU/S megoldások.

Az alábbi térképeken a legnagyobb kibocsátással rendelkező ipari (49. ábra) és erőművi (50. ábra) kibocsátó társaságok földrajzi elhelyezkedése, a mellettük lévő táblázatban pedig a 2021-es CO₂-kibocsátásuk található:

Tüzelőanyagok égetéséből származó kibocsátások forrásanyaga



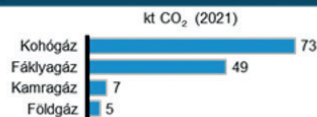
Folyamati kibocsátások forrásanyaga



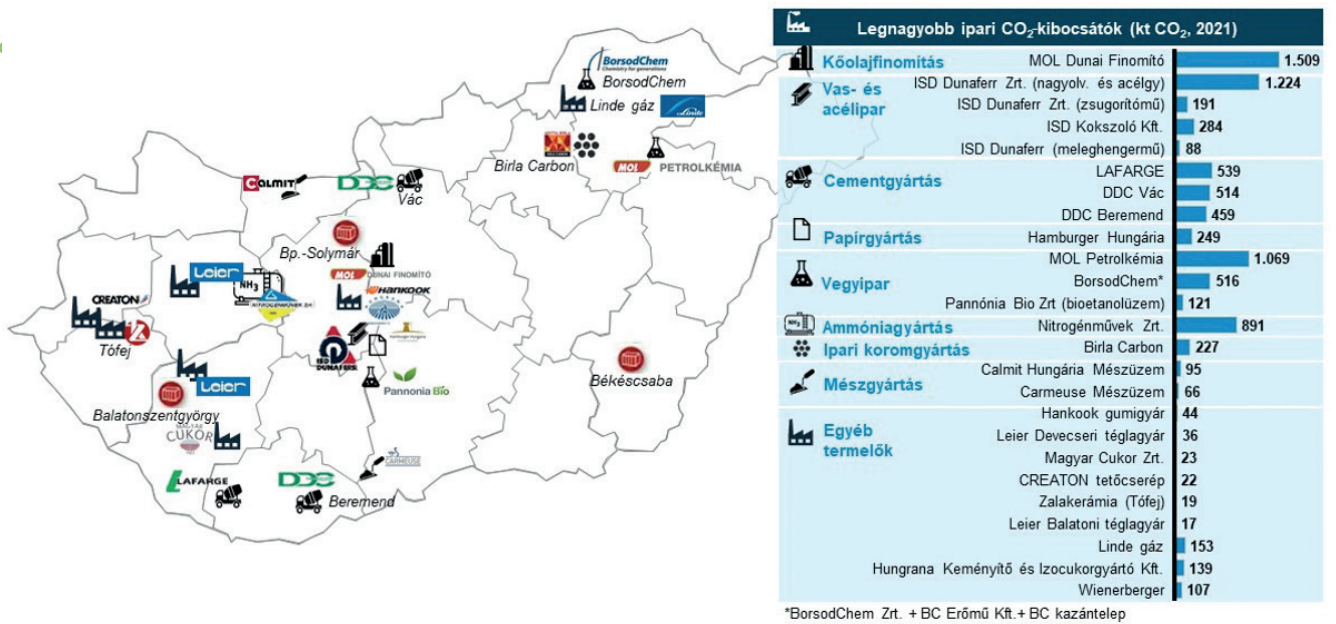
Füstgáztisztításból származó kibocsátások forrásanyaga



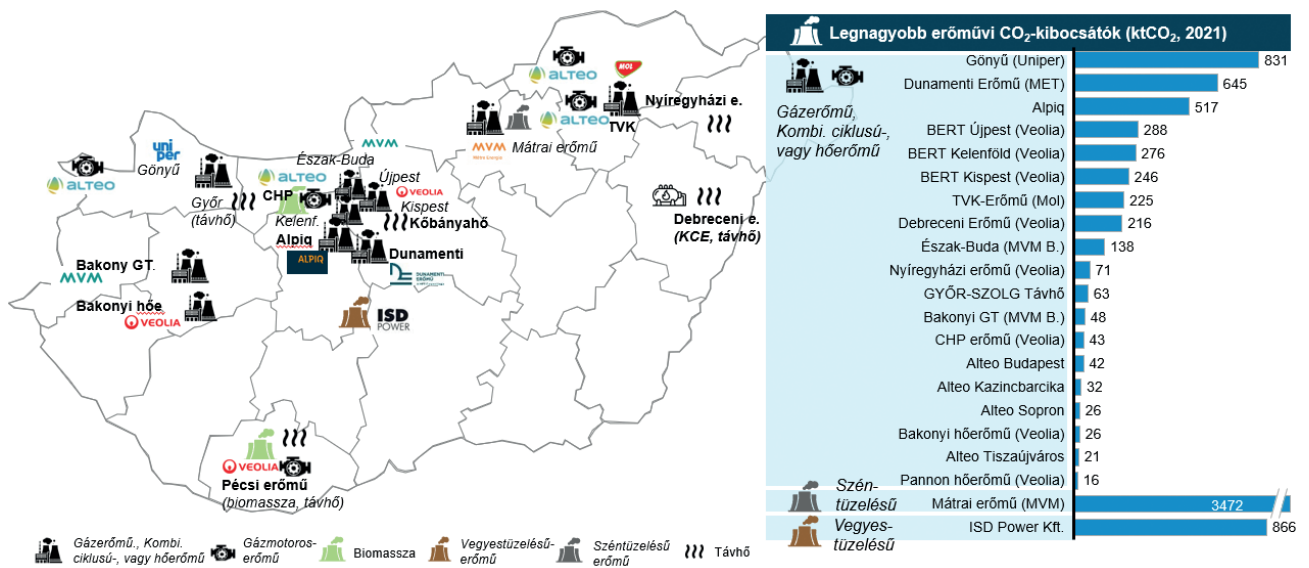
Fáklyázásból származó kibocsátások forrásanyaga



48. ábra Ágazati forrásanyagok megoszlása, [223,225] alapján saját szerkesztés.



49. ábra Magyarország legnagyobb ipari kibocsátói, [223,228] alapján saját szerkesztés.



50. ábra Magyarország legnagyobb erőművi kibocsátói, [223,228] alapján saját szerkesztés.

A termelés céljától függően lehet elsődlegesen villamosenergia-termelésre létesített, illetve elsődlegesen hőtermelésre létesített erőművekről beszélni.²²⁷ Az erőművek egy része - a kapcsolt erőművek – hőtermelésre és villamosenergia-előállításra is alkalmas. A kapcsolt erőművek és a kizárólag hőtermelésre alkalmas fűtőművek a távhőtermelésben és ipari létesítmények, gyárak hőigényeinek kiszolgálásában vesznek részt. Jelenleg a legjelentősebb

károsanyag-kibocsátást a gőz- és a kombinált ciklusú turbinák jelentik (51. ábra), a szilárd és gáznemű tüzelőanyagok közel egyenlő mértékben járulnak hozzá az erőművi kibocsátásokhoz (52. ábra).



51. ábra Hazai nagyerőművek CO₂-kibocsátása, [223,227] alapján saját szerkesztés



52. ábra Erőművek CO₂-kibocsátásáért felelős tüzelőanyagok, [223,225,227] alapján saját szerkesztés.

Gázerőművek

A gáztüzelésű erőművek ma már gázturbinás vagy gázmotoros erőműveket jelentenek. Ezek közül a hazai kombinált ciklusú gázturbinás erőművek (CCGT) az utóbbi években egyre növekvő szerepet kaptak, földgázt használnak üzemanyagként, és nagyobb hatásfokkal dolgoznak, mint a széntüzelésű erőművek. A CCGT erőmű gázturbinájából kilépő forró füstgázt hőhasznosító kazánba vezetik, az ott termelt gőzzel gőzturbinát hajtanak meg. A gázturbina, a hőhasznosító kazán, a gőzturbina és a turbinához kapcsolt generátor(ok) alkotják a CCGT névadó berendezéseit. A CCGT rendszerek nagyobb hatásfokkal működnek, mint a nyílt ciklusú gázturbinás erőmű rendszerek (Open Cycle Gas Turbine, OCGT), mivel az OCGT rendszerek csak a gázturbinákra épülnek. A felépítésükből következően a CCGT rendszerek kisebb fajlagos üzemanyag-fogyasztással (nagyobb hatásfokkal) és kisebb fajlagos szén-dioxid-kibocsátással dolgoznak.

Magyarországon jelenleg több CCGT és OCGT erőmű is működik. A nyílt ciklusú gázturbinás erőművek általában a gyors indítási és leállási idők miatt alkalmasak az energiaigények változásainak gyors kezelésére. Az OCGT erőművek kevésbé hatékonyak, mint a CCGT erőművek, és általában csak a csúcsidőszakokban működnek. Az OCGT erőművek üzemeltetése és fenntartása is magasabb költségekkel jár, mint a CCGT erőművéké, mivel a gyakori be- és kikapcsolás nagyobb igénybevételt jelent a berendezésekre. Összességében tehát Magyarországon a CCGT és OCGT erőművek a gázturbinás erőművek két jelentős típusát alkotják, amelyek hatékonyabbak és kisebb szén-dioxid-kibocsátással működnek, mint a hagyományos széntüzelésű erőművek. Ezen erőművek esetében a kibocsátás közel 100%-a jellemzően egy ponton kerül a légkörbe.

A gázerőművek közül a legnagyobb kapacitás, és ezáltal a legnagyobb kibocsátás is a Gönyű erőműnél jelentkezik, de ezen szempontokból jelentős még a Dunamenti, illetve az Alpiq Csepel erőmű is. A Budapesti Erőmű Zrt. kombinált ciklusú kapcsolt erőműveinek együttes éves kibocsátása meghaladja a 800 ezer tonnát. A centralizált, nagy gázerőművi egységeken túl számos kisebb kapacitású, gyorsindítású gázturbinás erőmű is jelen van a hazai erőművi portfólióban. Ezek jellemzően hálózati csomópontok közelében, földrajzilag egymástól viszonylag távol épültek meg, például Litéren, Lőrinciben, Ajkán, Sajószögeden, és jellemzően tartalék kapacitásként működnek.

A közeljövőben jelentősen bővül a hazai gáztüzelésű erőműpark: 2 db 500 MW és 1 db 650 MW kapacitású CCGT gázerőmű épül Tiszaújváros és a Mátrai erőmű területén. Ezzel a hazai fosszilisenergia-ipar legfontosabb szereplői a gázerőművek lesznek.

Fűtőművek és kapcsolt erőművek

A fűtőművek fosszilis tüzelőanyagokat égetnek és a keletkező hőenergiát hasznosítják lakossági távhő vagy ipari hő (vagy gőz) előállítására. Legelterjedtebbek a földgáz és biomasza tüzelőanyaggal működő fűtőművek, de üzemelnek szén-, olaj- és hulladéktüzelésű fűtőművek is. A különböző típusú fűtőművekben a berendezések eltérőek lehetnek attól függően, hogy milyen tüzelőanyagot használnak, és milyen folyamatokat alkalmaznak az elektromos áram előállításához. A fűtőművek és a hagyományos kapcsolt erőművek legfontosabb kibocsátó berendezései a kazánok.

Ebben a berendezésben történik az égetés és a keletkező hőenergia átadása a víznek a bennük található hőcserélőn keresztül.

A fűtőműveknek kibocsátási szempontból nagy előnyük az egyedi fűtési rendszerrel rendelkező épületekkel szemben, hogy a tüzelőanyagok elégetésekor keletkezett füstgáz nem elszórtan, hanem egy helyen, nagy volumenben és ellenőrzötten, szükség szerint tisztított módon kerül ki a környezetbe. Ez ideális feltételeket teremthet a fűtési célú energiateljesítmény kibocsátásának centralizált csökkentésére. A fűtőművek kapacitáskihasználtsága a fűtési szezonban magas, ezen kívül alacsony terhelésen működnek (jellemzően a használati melegvíz-igényeket elégítik ki).

A kapcsolt erőművek ugyanazon berendezéscsoportokban egyidejűleg állítanak elő villamos- és hőenergiát. A nem hagyományos kapcsolt erőművek esetén a tüzelőanyag általában gázturbinában vagy gázmotorban kerül elégetésre, a felszabaduló primer energia a technológiai folyamatnak megfelelő módon villamos- és hőenergia előállítására hasznosul. A kapcsolt erőművekben a gázturbina/gázmotor mellett általában hőtermelő kazánok is létesültek, amelyek főként földgázzal működve kooperálnak a hőt kapcsoltan termelő berendezésekkel. A kapcsolt erőművek villamosenergia-termelése nem kizárólag, de jellemzően a szabályozási piacon kerül értékesítésre, ami napon-héten belüli termelésingadozást eredményez. A fűtési célú termelés pedig éven belül mutat jelentős szezonalitást. A kapcsolt erőművek esetében a kibocsátások nagyobb része a gázturbina működéséből fakad, ehhez viszonyítva a kazánok éves szinten általában kisebb mennyiségért felelnek.

Jelentős méretű hazai kapcsolt erőmű az Alpiq Csepel erőműve és a Budapesti Erőmű Kelenföldi-, Kispesti- és Újpesti Erőműve. Az Alteo-Therm szintén földgáz alapú hő- és villamosenergiát biztosít számos telephelyen az országban. Nem földgáz alapú nagyobb fűtőműveknél, mint az Ajkai Fűtőmű elsősorban biomasszával (mezőgazdasági melléktermék segítségével) történik a hő és a használati melegvíz biztosítása.

Szén- és vegyestüzelésű erőművek

A széntüzelésű erőművek hosszú időn keresztül voltak Magyarország legfontosabb energiaforrásai, azonban jelentősen magasabb fajlagos CO₂-kibocsátással rendelkeznek, mint a gázerőművek, ezért ezek fokozatosan kivételre kerültek a hazai energiarendszerekből.^{223-225,227} Mára már csak a visontai lignittüzelésű erőmű működik, amely napi lignitfelhasználása 20-25 ezer tonna. Az erőművi blokkok kazánokból, turbógenerátor gépcsoportokból, hűtőrendszerekből és füstgáztisztító (karbamid-oldat

felhasználásával füstgáz kéntelenítés) berendezésekből állnak.

A Mátrai Erőmű az ország legnagyobb kibocsátója, a teljes hazai CO₂-kibocsátás közel 10%-áért felel, azonban az évtized második felére a széntüzelésű blokkok üzemeltetése befejeződik.

Az ISD POWER olyan ipari erőmű, melynek alapvető feladata az ISD Dunaferr Társaságcsoporthoz tartozó területén képződött technológiai gázok (kohógáz, kamragáz) maradéktalan elégetésével, valamint egyéb tüzelőanyagok (földgáz, fűtőolaj) felhasználásával történő hőtermelés (gőz, melegvíz), turbólevető-termelés, villamosenergia-termelés, valamint sótalánított és lágyvíz előállítása.

8.1.4.2. Vegyipar

A vegyipar az egyik legnagyobb szén-dioxid-kibocsátó iparágak közé tartozik, mivel a folyamatok során jelentős mennyiségű fosszilis tüzelőanyagot használnak fel, főként hőtermelésre. Az égetés mellett, egyes kémiai folyamatok szintén jelentős szén-dioxid-kibocsátással járnak.²²⁹ A vegyipari termékek előállításának meghatározó alapanyagai a gáznemű és cseppfolyós szénhidrogének. Ezek a legnagyobb tömegben előállított petrokémiai anyagok, intermedierek különféle termékek előállításához, közvetlen alkalmazásuk gyakorlatilag nincs. Ma az etilént világszerte csaknem kizárólag szénhidrogének vízgőz jelenlétében történő krakkolásával állítják elő, míg propilén esetében a finomítói eljárások is számottevőek.

A hazai vegyipar legnagyobb kibocsátó szereplője a MOL Petrokémia Tiszaújvárosban. A vállalat petrokémiai tevékenységének szén-dioxid-kibocsátása több mint 1 millió tonna. Továbbá kiemelt szereplő a vegyipari termékek gyártásában a BorsodChem, melynek üzeme és ipari energia-termelő egységeinek szén-dioxid-emissziója összesen évi 500 ezer tonna feletti.

Az **ammóniatermelés** szintén jelentős kibocsátási forrás.^{230,231} Világviszonylatban az ammónia túlnyomó részét műtrágya gyártására használják fel, melyre a kereslet még jelentősen növekedni fog a következő évtizedekben. Magyarországon az ammónia (NH₃) előállítása földgáz alapon történik. Az ammónia előállítása során a földgáz egyszerre szolgáltat alapanyagot és tüzelőanyagot, amelynek széntartalma szén-dioxid formájában szabadul fel. Az ammóniatermelésből technológiai kibocsátás is származik: az ammóniaüzemben az előállításhoz szükséges hidrogént a földgáz vízgőzös reformálásából nyerik, míg a nitrogént a felhasznált levegőből. Az üzemben az ammónia előállítására

és az ahhoz szükséges gőz előállítására földgázt használnak, melyből szintézisgázt állítanak elő. A szintézisgázból (CO és H₂) a hidrogén leválasztásra, és az ammóniaszintézis során további hasznosításra kerül, a CO pedig CO₂-dá oxidálódik. A keletkező szén-dioxid egy kis részét karbamidtermelésre használják fel, a maradékot pedig kiengedik a légkörbe. Az itt keletkező szén-dioxid-áram nagyon kedvező CO₂-megkötés szempontból, hiszen nagy, közel 100%-os tisztaságú. Az ammóniatermelés terén meghatározó szereplő a Nitrogénművek, évi közel 900 ezer tonna kibocsátásért felel, mely az egyik legnagyobb kibocsátást okozó üzem a hazai iparnak.

Koromgyártás során a korom a szénhidrogének oxigénhiányos égése vagy pirolízise által keletkezik magas hőmérsékleten.²³² Az ipari korom előállításának legerjedtebb módja a kemenceeljárás, amely a globális gyártókapacitások 95%-át teszi ki. A kemenceeljárás során egy zárt kemencében égő forró gázlángon földgázt vagy más szénhidrogénpermetet fújnak át, amelyet vízpermettel lehűtenek. A korom szűrőkön, ciklonokon át a silókba kerül. A kemencefekete előállítási folyamatát zárt kemencében, oxigénhiányos körülmények között végzik. Nyersanyagként olajat használnak, és éghető gázt adnak hozzá, hogy elérje a kemencében a kívánt hőmérsékletet. A kemencefekete gyártási folyamatának megváltoztatásával megkapható a szükséges pigmentfekete. A kibocsátások fő egységei a reaktorok, gázkazánok, kazánégők, combustorok és direkt fűtésű szárítók. A hazai ipari koromgyártó egység a MOL Petrolkémia termelési folyamataiból származó kvencsolajat hasznosítja. Az előállítás során leválasztott CO₂ nyersanyagként felhasználható a koromgyártásban.

8.1.4.3. Hidrogén-előállítás

A fosszilis alapú (szürke) hidrogént a metán gőzreformálása révén állítják elő úgynevezett SMR üzemekben.^{233,234} Az eljárás során szintézisgáz keletkezik (H₂-CO₂, CO), melynek tisztítása során a H₂ leválasztásra kerül további felhasználásra, a CO₂ pedig jellemzően a légkörbe jut. Az ilyen üzemek jellemzően nagyipari méretűek, és folyamatosan üzemelnek, valamint az üzemből távozó technológiai gáz nagy koncentrációban tartalmaz szén-dioxidot. Emiatt ez a technológia kedvező lehet szén-dioxid-megkötési szempontból.

8.1.4.4. Kőolajfinomítás

A kőolajfinomítás folyamata több ponton is bocsát ki CO₂-ot.^{235,236} Egyrészt jelentős mennyiségben állít elő és használ fel hidrogént, másrészt jelentős energia-, hő- és gőzigénye van, melyet fosszilis tüzelésű erőművekből nyer. Továbbá

jelentős kibocsátással jár a katalitikus krakkoló üzem működése is. A finomítók H₂-előállítása SMR üzemekben történik, mely ideális lehet a szén-dioxid-leválasztás szempontjából. A H₂-előállításon kívüli kibocsátások jellemzően alacsony nyomáson és koncentrációban tartalmaznak CO₂-ot. Valamint egy üzemben belül több ponton is történik kibocsátás, mely a finomítói szén-dioxid-megkötési projekteket komplexebbé és költségesebbé teszi. Magyarország és a régió egyik legmeghatározóbb finomítója a MOL szálhalombattai Dunai Finomítója, mely évi 1,5 millió tonna CO₂-kibocsátásért felelős.

8.1.4.5. Ásványipar

A **cementgyártás** során a szén-dioxid a klinkergyártási fázisban keletkezik: a kemencerendszerbe juttatott mészkő (CaCO₃) bomlása során (kalcináció) - amely kb. 900-1100 °C-on történik - CaO (kalcium-oxid) és CO₂ keletkezik.²³⁷⁻²³⁹ A nyers klinker előállítására száraz és nedves technológiát egyaránt lehet alkalmazni. A nedves technológiát a három magyarországi cementgyártóüzem közül egyik sem alkalmazza. Bár 2014 óta csak 3 cementgyár működik, a cementtermelés minden évben folyamatosan emelkedett. A keletkező füstgáz közepes minőségű: ~22% koncentrációban tartalmaz CO₂-ot és standard légköri nyomású. A hazai cementgyártás legnagyobb szereplői a Lafarge-Holcim királyegyházi cementgyára és a Duna-Dráva Cement váci és bere-mendi gyára. Ezek egyenként kb. 500 kt CO₂-kibocsátással rendelkeznek évente.

A **mészgyártás** alágazat magában foglalja a mészkő hevítésével történő égetett mész előállítását. A hőátadás során a következő reakció játszódik le: CaCO₃=CaO+CO₂. A mészgyártási folyamat nagy része folyamati kibocsátás. Magyarországon két vállalat állít elő meszet (Calmit és Carmeuse). Az előállított meszet elsősorban füstgáztisztításra használják.

A **kerámiagyártás** során finomra őrölt agyagból és ahhoz adagolt adalékanyagokból kerül formázásra a kívánt végeredmény (pl. téglá, cserép). Ezek után szárításra (100-150 °C-on), majd kiégetésre kerülnek nagy hőmérsékleten egy úgynevezett alagútkemencében. Az alagútkemencét általában földgázzal fűtik fel legalább 800 °C-ra, de akár 1050 °C-ra is. Ezek a gyárak fajlagosan nagy kibocsátással járnak, azonban logisztikai megfontolások miatt nem néhány centralizált nagyüzem működik, hanem több kisebb üzem található szerte az országban. Ezért ezen kisebb üzemek kibocsátása nem éri el azt a szintet, ami a szén-dioxid-leválasztást gazdaságossá tehetné.

Az **üvegyártás** esetében az üvegolvasztó kemencék felhevítéséhez (1000-1200 °C) használt földgáz elégetésből

származik szén-dioxid-kibocsátás, valamint az olvasztás során a felhasznált nátrium-karbonátból szabadul fel CO₂. A folyamati kibocsátás az üvegyártás kibocsátásának negyedét teszi ki. Magyarországon az üvegyárak kibocsátása összességében nem kiemelkedő (100 kt / év alatt).

Az **ásványgyapot-előállításból** származó technológiai kibocsátások csekélyek, de a gyártók 2008 óta jelentik CO₂-kibocsátásukat az EU ETS keretében. A kőzetgyapot (bazaltgyapot) előállításának legfőbb mozzanata az alapanyagként szolgáló ásványok olvasztása. Az olvasztás olvasztókemencékben történik, amelyek fűtése történhet koks- vagy gázégetéssel, de ismertek elektromos olvasztókemencék is. Az építőiparban használt szigetelőanyagok előállítása legnagyobb részben koks fűtőanyagú kemencék használatával történik. Alapanyagként számos ásvány használható, közülük legelterjedtebb a bazalt. A kőzetgyapot alapvető nyersanyaga a bazaltkő. Az előállítási folyamata a nyersanyagok megfelelő arányainak a kimérésével és egy speciális öntöttvas kemencében való elhelyezésével kezdődik.

8.1.4.6. Fémipar

A magyarországi (EU ETS) vas- és acélipar kibocsátása közel 2 Mt CO₂-kibocsátással jár. A vas legnagyobb részét széntüzelésű integrált kohó és oxigénbefúvásos konverter segítségével állítják elő.²⁴⁰ A konverter a kohóban redukálja a vasércet, ahol a szén redukív ágensként működik, majd a vasércet az oxigénbefúvásos konverterben 1200 °C körüli hőmérsékleten megolvasztják. A jelenlegi szén-dioxid-semleges energiaforrások segítségével nehéz elérni az előírt magas hőmérsékleteket. A gyártás során keletkező füstgáz általában elfáklýázzák vagy kiengedik a légkörbe (vagy részben helybeni áram-előállításra használják fel). A keletkező füstgáz alacsony koncentrációban tartalmaz CO₂-ot, és standard légköri nyomású.

A legnagyobb hazai kibocsátó iparág a fémipar, melynek döntő részéért a dunaujvárosi ISD Dunafer tagvállalatai felelnek, összesen 1,8 millió tonna CO₂-kibocsátással. A gyártás folyamati kibocsátása – a nagyolvasztó működtetése – ennek nagyon nagy részét teszi ki, több mint 500 ezer tonnát. A fémipari kibocsátáson felül az ISD Power ipari erőmű (ISD Dunafer leányvállalat) közel 0,9 millió tonnával főként a termelési folyamatokhoz szükséges energiatermelés okozta szén-dioxid-kibocsátásért felel, tüzelőanyagként főként kokszterméket és kohógázt használ. Az erőmű alapvető feladata a fémipari folyamatok során képződött ún. technológiai gázok maradéktalan elégetése, valamint az egyéb tüzelőanyagok felhasználásával hőtermelés és -szolgáltatás (gőz, melegvíz), turbólevegő-termelés és

-szolgáltatás, villamosenergia-termelés és -szolgáltatás, valamint sótalánított és lágyvíz előállítás.

8.1.4.7. Papírgyártás

A papírgyártási folyamat hőintenzív, a gyártási folyamat jelentős mennyiségű energiafogyasztással, sok esetben foszsilis tüzelőanyagok égetésével jár. A papíripar dekarbonizációja elsősorban alternatív tüzelőanyagok nagyobb fokú alkalmazása révén történik meg.

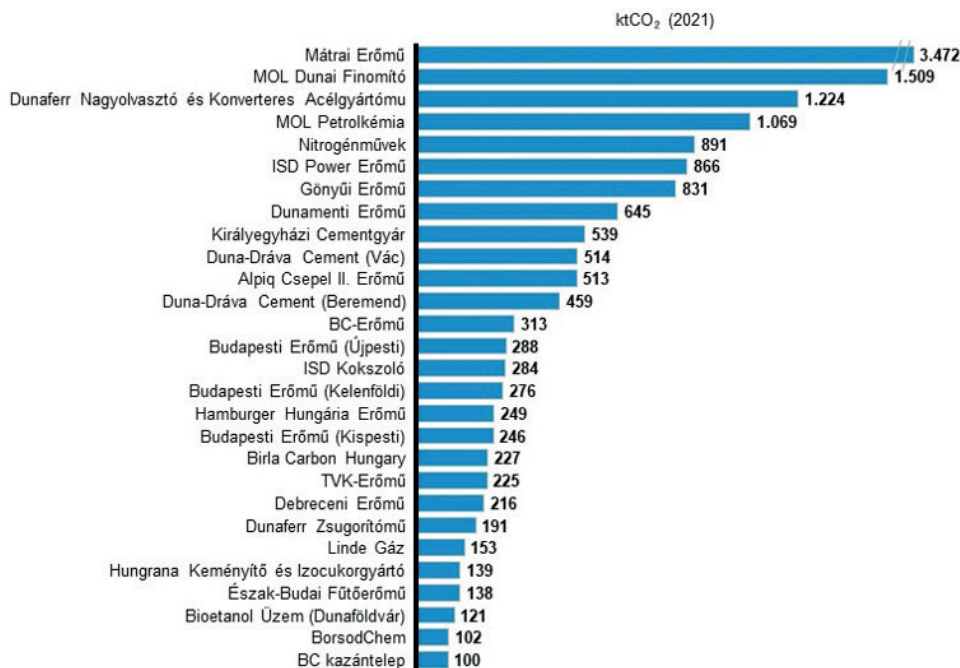
A Hamburger Hungária Kft. az ország egyik legnagyobb kibocsátással bíró magyarországi papírgyártó cége, amely papíralapanyagokat és hullámkartonokat állít elő.²⁴¹ A Hamburger Hungária Kft. vegyestüzelésű erőműve biztosítja a gyártás során a szükséges energiát. A kapcsolatos hő és villamosenergiát előállító erőmű szilárd tüzelőanyagokat, többek között a papírgyártás során keletkező hulladékokat, valamint biomasszát és szenet használ fel. Egyaránt termel a létesítmény hő- és villamos energiát olyan mennyiségben, ami a papírgyár működtetéséhez szükséges, valamint biztosítja a korábban főként lerakókba kerülő termelési hulladék hasznosítását. Ezen kívül a Hamburger Hungária Kft. két gázmotort üzemeltet a telephelyi szennyvíztisztítás során előállított biogázzal.

A hazai teljes kibocsátást összegezve (energia-termelők és ipari szereplők) Magyarországon a CO₂-kibocsátás szempontjából meghatározó pontforrások az energiatermelésben (erőművek), a vas- és acélgyártásban, a cementgyártásban, a vegyiparban, a kőolajfinomításban, valamint a hidrogén-előállításban vannak jelen. Az energiatermelésen kívül négy iparág felelős a teljes ipari kibocsátás közel feléért: vegyipar, ásványipar, fémipar, kőolajfinomítás. A 2021-es adatok alapján a TOP10 magyarországi kibocsátó együttesen a magyarországi ETS összkibocsátás több mint 60%-áért felel. Ezek a következők:

1. Mátrai Erőmű Zrt. Visontai Erőmű
2. MOL Nyrt. Dunai Finomító
3. Dunafer Nagyolvasztó
4. MOL Petrolkémia Zrt.
5. Nitrogénművek Zrt.
6. ISD POWER Kft. Erőmű
7. Gönyúi Kombinált Ciklusú Erőmű
8. Dunamenti Erőmű Zrt.
9. Királyegyházi Cementgyár
10. Duna-Dráva Cement Kft. (Vác)

A hazai ETS körébe tartozó több mint 170 üzemből az első hét adja az ETS kibocsátás több mint felét, eközben a száz legkisebb létesítmény kibocsátása együtt is csak a magyar ETS kibocsátás 5 százalékát fedti le.

A következő ábrán azok a létesítmények szerepelnek, melyek szén-dioxid-kibocsátása meghaladja az évi 100 ezer tonnát (53. ábra):



53. ábra Magyarország legnagyobb kibocsátói (100 kt CO₂ feletti kibocsátással), [228] alapján saját szerkesztés.

A fentebb bemutatott kibocsátók közül a legnagyobbakat részletesen elemezzük a következőkben CCU/S szempontjából. A kiválasztott példák (vas- és acél, olajfinomítás, hidrogén-előállítás, vegyipar, ammónia, cement, gázerőmű) egységes elemzési sablont alkalmaztunk az összehasonlíthatóság érdekében.

8.2. Hazai TOP kibocsátók elemzése

8.2.1. Módszertan, limitációk

A hazai szén-dioxid-kibocsátásra vonatkozó adatok közül számos információ elérhető a kibocsátott üvegházhatású gázok mennyiségéről vagy akár összetételéről szekunder forrásokból, köztük nyílt adatbázisokból, hazai és nemzetközi szervezetek jelentéseiből. Annak érdekében azonban, hogy a hazai kulcsszereplők CCU/S technológiához való viszonyulása, jövőbeli tervei és dekarbonizációs elképzelésük

megismerhetővé váljon, szükséges volt primer forrásból származó információk gyűjtése. Ennek céljából kérdőíves felmérést végeztünk a hazai CO₂ kibocsátók körében (I. számú melléklet).

A kérdőív alanyainak kiválasztásakor az Európai Unió által létrehozott, nyilvános ETS adatbázisban jegyzett kibocsátó vállalatokat vettük figyelembe a 2021-re elérhető adatok alapján. Ezen kibocsátásokat vállalatonként, illetve vállalat-

csoportonként összesítettük, majd sorbarendeztük. Az így kialakult hazai CO₂ kibocsátók TOP100-as listájából külön figyelmet szenteltünk a TOP20 kibocsátónak, hiszen (egy kivétellel) ezen szereplők CO₂-kibocsátása haladja meg az évenkénti 100 ezer tonnás szintet, ami a CO₂-leválasztás szempontjából már releváns méret. Továbbá

a TOP20 kibocsátó esetében a legnagyobb a kibocsátás részaránya a teljes kibocsátáshoz képest: a teljes, ETS alá eső kibocsátás csaknem 92%-át fedik le ezen szereplők, míg a fennmaradó csupán 8%-ért a másik 80 szereplő felelős.

A felmérés a vállalati kibocsátás, a törekvések és célkitűzések, a jövőbeli tervek, valamint a szabályozási környezet téma körét érintette. A kibocsátásokkal kapcsolatban konkrét műszaki adatokat kértünk be (ezek eredménye a 8.2.2-es fejezetben látható), a törekvések, célok, tervek kapcsán pedig a szereplők preferenciáját, véleményét mértük fel

(8.3-as fejezet). Ahhoz, hogy a lehető legkevesbé befolyásoljuk az alanyokat a válaszadásban, nyílt kérdéseket fogalmaztunk meg, ezen kívül pedig többszörös feleletválasztás és 5 fokú Likert-skála segítségével fejthették ki véleményüket. Minden kérdés esetében a válaszadás önkéntes volt, így lehetőség nyílt egyes kérdések kihagyására is. Ez elősegítette az esetleges adathibák elkerülését, ugyanakkor korlátokat szabott a több szereplő által megválaszolatlan kérdések értékelésénél (számszaki értékek nem mindenhol elérhetők). A válaszokat aggregáltan elemeztük, biztosítva a szereplők anonimitását.

A felmérés keretében készült kérdőívet minden TOP100-as szereplő részére megküldtük. A TOP20 kibocsátó esetében a kérdőíven túl mélyinterjú is lefolytatásra került. Az interjúk elkészítését az indokolta, hogy a CCU/S hazai alkalmazásában leginkább érdekelt szereplőkről részletesebb információkkal is rendelkezünk. Emellett a kérdőívben megjelenő adathibákat is tisztázni tudtuk. A kérdőív elemzésekor a fő fókusz a TOP20 kibocsátó válaszain volt, ugyanakkor a kisebb kibocsátók válaszait is figyelembe vettük. Az elemzésben használt nevezéktan a következőképpen alakult:

- TOP20: azon TOP20 hazai kibocsátó közé tartozó szereplők, akik kitöltötték a kérdőívet

- TOP100: azon TOP100 hazai kibocsátó közé tartozó szereplők, akik kitöltötték a kérdőívet
- TOP21-100: a TOP20 hazai kibocsátón felüli kisebb kibocsátók, akik kitöltötték a kérdőívet.

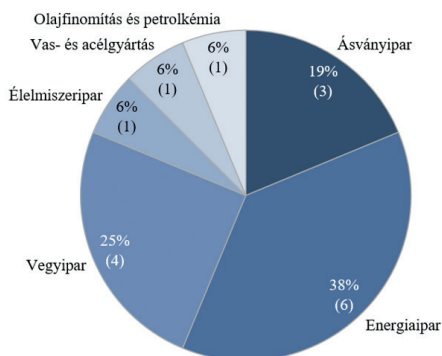
A kérdőív kitöltésének aránya a TOP20 szereplő körében 80%-os volt, ami a 2021-es adatok alapján a teljes hazai ETS alá tartozó CO₂-kibocsátás 86%-át fedi le (54. ábra). A TOP20 kibocsátóból a kérdőívet kitöltő szereplők mindegyikével készült mélyinterjú, így az interjúk tekintetében 100%-os részvételi arányt értünk el a kitöltők között.

A TOP20 hazai kibocsátó vállalat, illetve vállalatcsoport közül a válaszadók ipari tevékenységét tekintve az ásványipar, energiaipar, vegyipar, élelmiszeripar, vas- és acélgártás, valamint olajfinomítás és petrokémia képviseltette magát a felmérésben (55. ábra). A felmérés TOP20 kibocsátókra helyezett fókusza miatt a részletes elemzés kis mintára készült, így emiatt az iparági csoportosításnál valamelyik iparágnál csak 1-1 szereplő képviseltette magát.



54. ábra A felmérésben résztvevő vállalatok aránya, saját szerkesztés.

Felmérésben résztvevő vállalatok iparági megoszlása



55. ábra A felmérésben résztvevő TOP20-as vállalatok iparági megoszlása, saját szerkesztés.









A következőkben a hazai TOP kibocsátók elemzését két részben tesszük meg: az első szakaszban a kibocsátásokat elemezzük részleteiben, míg a másodikban a kibocsátás-csökkentési törekvéseket és CCU/S technológiák iránti viszonyulásukat mutatjuk be.

8.2.2. Kibocsátások értékelése CCU/S szempontból









Az alábbi táblázatban foglaltuk össze a TOP kibocsátók kibocsátásainak szén-dioxid-leválasztás szempontjából releváns adottságait (2. táblázat). A táblázatban szereplő kibocsátók összeállításánál ügyeltük arra, hogy minden releváns iparágból és technológiából kerüljön egy példa bemutatásra. Ahol több, közel azonos kibocsátó egység/technológia is fellelhető Magyarországon, ott csak egyet mutatunk be, de az elemzés megfeleltethető a nem feltüntetett szereplőkre is (pl. a három cementgyárból egyet mutatunk be). A táblázatban a szén-dioxid-leválasztásra elméleti költségszintet határozzunk meg. Itt fontos kiemelni, hogy a bemutatott költségek nemzetközi példák alapján kerültek meghatározásra iparágak, technológiák szerint. A konkrét berendezésre vonatkozóan nem készült számítás.



















2. táblázat - Hazai TOP kibocsátók elemzése CCU/S szempontból

Kibocsátás leírása	Szezonális	Kibocsátás CO ₂ -koncentrációja	Lehetséges Carbon Capture rendszerek	Leválasztás elméleti költségszintje	Saját CO ₂ -hasznosítás lehetősége	CCU/S potenciál értékelése
Nitrogénművek Zrt.; Vegyipar, Ammóniaüzem; ~890 kt CO ₂ -40% hőtermelési, -60% folyamati kibocsátás						
Ammóniagyártáshoz hidrogén előállítása földgáz vízgőzös bontásával (SMR technológia). A szintézisgáz tisztítása során CO ₂ lefűvátásra kerül. Egy része (46 kt) a karbamid előállításban hasznosítva, maradék pedig a légkörbe kerül. Fő berendezések: 1. Primer gázbontó (SMR) - 340 kt CO ₂ (alacsony CO ₂ -koncentráció) 2. Technológiai gázmosó rendszer - 510 kt CO ₂ (99,96%-os CO ₂ -koncentráció), Kazán üzemi kémény és egyéb (hőenergia az üzemek indításához) - 40 kt CO ₂	 NINCS folyamatos üzem	 MAGAS 99,96% a gázmosó- rendszerből	Jelenleg is rendelkezik 'Pre-combustion' technológiai gázmosó rendszerrel, ahol a CO ₂ leválasztásra kerül. Post-combustion technológia lehetséges az ezen túli kibocsátási pontokra (technológiai gázon kívüli SMR kibocsátás és egyéb hőtermelési folyamatok)	 ALACSONY 25-35 EUR / t CO ₂	 IGEN pl. karbamidhozam-növelés, melámingyártás, karbamid alapú ragasztók - egyéb új zöld vegyipari termékek	CCU/S szempontból összesében nagyon kedvező adottságokkal rendelkező szereplő
Lafarge Cement Magyarország Kft.; Építőipar, cementgyártás Cementgyár; 539 kt CO ₂ -33% hőtermelési, - 67% folyamati kibocsátás						
Cementklinkergyártás/égetés mészke és agyag keverékéből forgókemencében különböző tüzelőanyagok használatával: vashordozó, szén-petrolkoksz, földgáz, hulladék Berendezések: Cementklinker-kemence, cementmalom, gázgenerátor, gázkazánok. A kibocsátások majdnem 100%-a a klinkerkemencéből származik és egy ponton távozik a légkörbe	 CSEKÉLY vevő igényektől függ, de alapvetően folyamatos üzem	 KÖZEPES 22 %	Post-combustion (aminos rendszer); Oxy-fuel combustion (levegő helyett oxigén juttatása a kemencébe)	 MAGAS 80-150 EUR/t CO ₂	 IGEN Karbonáció során a befogott szén-dioxid felhasználása	CCU/S szempontból összesében közepes adottságokkal rendelkező szereplő. Költséges megkötés, azonban kevés alternatíva áll rendelkezésre dekarbonizációra.

Kibocsátás leírása	Szezonalitás	Kibocsátás CO ₂ -koncentrációja	Lehetséges Carbon Capture rendszerek	Leválasztás elméleti költségszintje	Saját CO ₂ -hasznosítás lehetősége	CCU/S potenciál értékelése
LINDE GÁZ Magyarország Zrt.: Hidrogén-előállítás, Kazincbarcikai HYCO 1-2-3; ~153 kt CO ₂ -30% hőtermelési, ~70% folyamati kibocsátás						
Folyamati kibocsátás: CO és H ₂ előállítása (szintézisgáz) vegyipari célokra (BorsodChem számára) Berendezések: HYCO üzemek – SMR rendszer	 CSEKÉLY vevői igényektől függ, de alapvetően folyamatos üzem	 MAGAS 98% a technológiai gáz esetében	Jelenleg is alkalmazott a CO ₂ lefűtatása, Pre-combustion gázmosó rendszer	 ALACSONY 30-40 EUR/t CO ₂	 IGEN Vegyipar (BC számára) CO ₂ és kék H ₂ biztosítása	CCU/S szempontból összességében kedvező adottságokkal rendelkező szereplő
MOL Nyrt.: Kőolajfinomítás, MOL Dunai Finomító; ~1 509 kt CO ₂ -63% hőtermelési, ~37% folyamati kibocsátás						
Kőolajfinomítás és az ehhez kapcsolódó folyamatok: 1. Hidrogén-előállítás – Hidrogén reformáló, SMR rendszer 2. Krakkoló üzem – Katalitikus krakk üzemű regenerátor, reformáló-4 üzemi regenerátor Egyéb olajfinomítási folyamatok, hőtermelés: 1. Kemencék, kazánok, véggázégetők, bitumen előmelegítők, kocszoló és üzemi csőkemencék; 2. Hőtermelő (kazántelep), diesel szivattyúk 3. Fáklyák	 CSEKÉLY folyamatos üzem	 MAGAS 60% a hidrogéngyártás esetében; ~450 kt CO ₂ /év ALACSONY ~10-12% a krakkolás esetében, ~10% alatti a kocszolás esetében, krakkoló és egyebek esetében: ~905 kt CO ₂ / év	Post-combustion Pre-combustion Oxy-combustion	H₂ esetében ALACSONY 30-40 EUR/t CO ₂ Egyéb folyamatok, hőtermelés esetében MAGAS 80-120 EUR/t CO ₂	 IGEN Szintetikus üzemanyag (elsősorban kerozin)	CCU/S szempontból összességében kedvező adottságokkal rendelkező szereplő Elsődlegesen a hidrogén-előállítás kibocsátásának befogadásában van potenciál. Jelentős volumenben lehet potenciális saját felhasználás.

Kibocsátás leírása	Szezonálitás	Kibocsátás CO ₂ -koncentrációja	Lehetséges Carbon Capture rendszerek	Leválasztás elméleti költségszintje	Saját CO ₂ -hasznosítás lehetősége	CCU/S potenciál értékelése
ISD Dunaferri Zrt.; Vas- és acélgégyártás, nagyolvasztó és konverteres acélgégyártómű; ~1 224 kt CO ₂ -85% hőtermelési, -15% folyamati kibocsátás						
Vas és acélgégyártás – Nagyolvasztó Berendezések: 1. Léghevítők, kis tüzelőberendezések, melyek főként kokszot használnak 2. Vas / acél nagyolvasztók, konverterek, melyek főként mészövet, acélhulladékot, sinter, égetett meszet használnak	 CSEKÉLY folyamatos üzem	 ALACSONY-KÖZEPES 15-35%	Több lehetőség is Post-combustion Pre-combustion Oxy-combustion	 MAGAS 100-170 EUR/t CO ₂	 IGEN A befogott CO ₂ -ből előállítható CO redukálószerként alkalmazható	CCU/S szempontból összességében kedvező adottságokkal rendelkező szereplő
MOL Petrolkémia Zrt.; Vegyipar, vegyipari üzem (olefingégyártás); ~1 069 kt CO ₂						
Ipari hőtermelés, Fáklyázás Berendezések: Gőzkrakkoló, katalizátor regeneráló kemence, C6 előmelegítő kemence, kazánok, bontókemencék, pirulizáló kemence, hulladékgázégető kemence, katalizátoraktíváló kemence, gépház, fáklyák	 CSEKÉLY folyamatos üzem	 VÁLTOZÓ 6% a gőzkrakkoló esetében	Post-combustion (abszorpciós vagy kriogén)	 KÖZEPES-MAGAS 100-140 EUR/t CO ₂	 IGEN A leválasztott CO ₂ helyettesítheti a hagyományos alapanyagokat (pl. olaj, földgáz), csökkentve a gyártási folyamat szénlábnymomat. Elsődleges felhasználási terület az olefingégyártás, poliuretán vagy egyéb műanyagok.	CCU/S szempontból összességében kedvező adottságokkal rendelkező szereplő Jelentős volumenben lehet potenciális saját felhasználás.

Kibocsátás leírása	Szezonális	Kibocsátás CO ₂ -koncentrációja	Lehetséges Carbon Capture rendszerek	Leválasztás elméleti költségszintje	Saját CO ₂ -hasznosítás lehetősége	CCU/S potenciál értékelése
Borsodchem Zrt; Vegyipar, erőművek és VCM üzem; ~520 kt CO ₂ -95% hőtermelési, -5% folyamati kibocsátás						
Vegyipari alapanyaggyártás és az ehhez kapcsolódó ipari energiatermelés Fő berendezések, létesítmények: 1. BC erőmű: földgázüzemelésű erőmű (413 kt) 2. VCM üzem: vinilklorid-előállítás a PVC gyártáshoz – diklór-etán hőbontása (67 kt) + ~20 kt folyamati kibocsátás	 CSEKÉLY folyamatos üzem	 ALACSONY 10%	Post-combustion	 MAGAS 100-140 EUR/t CO ₂	 IGEN Szén-monoxid-gyártás, metanolgyártás	CCU/S szempontból kedvező adottságokkal rendelkező szereplő Az erőművek és VCM üzem leválasztás szempontból kedvezőtlen tulajdonsággal rendelkezik, azonban a HyCO üzemekben keletkező CO ₂ ideális lehet. Jelentős volumenben lehet potenciálisan saját felhasználás.
Egyéb (TDI stb.)						
Mátrai Erőmű Zrt; Villamosenergia-termelés, Lignittüzelésű erőmű; ~3 472 kt CO ₂ -100% hőtermelési kibocsátás						
Lignit alapú közcélú villamosenergia-termelés Berendezések: Kazánok, gázturbinák hőhasznosító kazánnal, gőzkazán, gáztisztítás (tüzelés), füstgáz-kéntelenítés, karbamidoldat-felhasználás	 KÖZEPES alapvetően alaperőművi működés, azonban számos tényező befolyásolja a működést (pl. műszaki állapot, CO ₂ -ár)	 ALACSONY 5-10%	Post-combustion	 MAGAS 100-140 EUR/t CO ₂	 NEM erőművi hasznosítási lehetőség nincs	CCU/S szempontból érdekes terület, mert CCU/S révén hazai forrású tüzelőanyagból lehetne egyszerűen jelentősen csökkenteni a kibocsátást és növelni az ellátásbiztonságot. Azonban műszaki állapot és az erőművi CCU/S technológia jelenlegi érettsége miatt a közeljövőben leállításra kerül. Ezért CCU/S szempontból nincs fókuszban.

Kibocsátás leírása	Szezonalitás	Kibocsátás CO ₂ -koncentrációja	Lehetséges Carbon Capture rendszerek	Leválasztás elméleti költségszintje	Saját CO ₂ -hasznosítás lehetősége	CCU/S potenciál értékelése
Uniper Hungary Kft.: Villamosenergia-termelés, Gáztüzelésű erőmű; ~831 kt CO ₂ -100% hőtermelési kibocsátás						
Közcélú villamosenergia-termelés, Közcélú hőtermelés Berendezések: Kombinált ciklusú erőmű egység, segédgőzkazán, földgáz-előmelegítők, black-start dízelgenerátor, dízel meghajtású tűzvíz szivattyú	 CSEKÉLY magas kihasználtsággal működő erőmű	 ALACSONY 4%	Post-combustion technológia jöhet csak szóba	 MAGAS 100-140 EUR/t CO ₂	 NEM erőművi hasznosítás nem lehetséges	CCU/S szempontból összességében kedvezőtlen adottságokkal rendelkező szereplő
Alpiq Csepel: Villamosenergia- és hőtermelés, Kombinált ciklusú gázerőmű; ~513 kt CO ₂ -100% hőtermelési kibocsátás						
Kapcsolt energiatermelés. A villamos energia a szabályozási piacon kerül hasznosításra, a hőtermelő rendszer pedig a városi távfűtésben Berendezések: CCGT gázturbinák, forróvízkazánok, segédgőzkazánok (a kibocsátások 90%-a gázturbinából származik)	 JELENTŐS Hőtermelés a fűtési igényekhez, az áramtermelés a szabályozási igényekhez alkalmazkodik (MAVIR)	 ALACSONY 4%	Post-combustion technológia jöhet csak szóba	 MAGAS 100-140 EUR/t CO ₂	 NEM erőművi hasznosítás nem lehetséges	CCU/S szempontból összességében kedvezőtlen adottságokkal rendelkező szereplő

A CCU/S technológiák elterjedése szektoronként eltérő ütemben valósulhat meg, mivel a befogás költsége és technológiai nehézsége nagymértékben függ a kibocsátó pontforrások jellemzőitől. A hazai ammóniagyártás és vegyipar ideális ágazat a korai elterjedés szempontjából, mivel ezekre koncentrált, nagy kibocsátás jellemző, továbbá általában ezek az üzemek szén-dioxid-leválasztás szempontból kedvező adottságokkal (magas CO₂-koncentráció) rendelkeznek, illetve lehetőség van a helybeni hasznosításra, valamint a legtöbb esetben megvan a szükséges tudás és kompetencia is.

Jóllehet, kibocsátási adottságok szempontjából elmarad a fémipar és a cementgyártás a vegyipartól, azonban CCU/S szempontból fontos iparágak, hiszen ezekben a szektorokban a kibocsátás jelentős mértékű, az alternatív dekarbonizációs megoldások korlátozottak, a befogott CO₂ pedig felhasználható termék-előállítási folyamatokban. Az energiaszektor adottságai kevésbé kedvezők a CCU/S alkalmazások szempontjából, mert a leválasztás költséges, a befogott CO₂ pedig helyben nem hasznosítható. Ennek ellenére az elterjedés nem kizárható, mivel az energiaszektor a legnagyobb hazai kibocsátó ágazatok egyike, valamint az ellátásbiztonság fenntartása megköveteli a meglévő fosszilis erőművek egy részének üzemben tartását.

Magyarországon a szén-dioxid-leválasztási technológia a vegyiparban és a kőolajfinomításban már elterjedt, jól ismert megoldás különböző gázok leválasztására. Az egyes iparágakban eltérő leválasztási megoldások és technológiák lehetnek alkalmasak. A CO₂-leválasztási megoldások elterjedése megvalósulhat a nemzetközi technológiák hazai viszonyokra történő adaptálásával, valamint saját, új technológiák fejlesztésével. A globális CCU/S iparban jelenleg elérhető technológiákhoz a hazai jelenléttel rendelkező nemzetközi szereplőkön keresztül férhetnek hozzá az

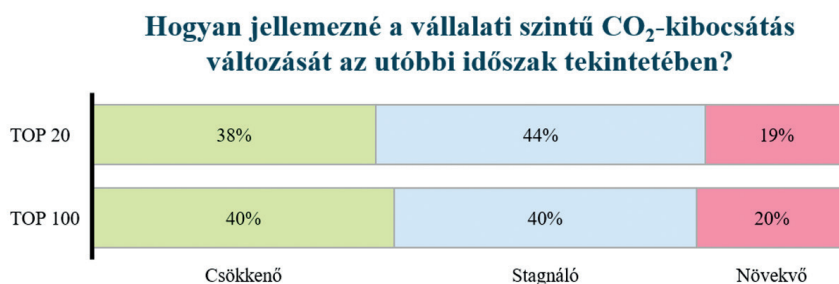
érintettek. Ezek a szereplők elsősorban a gáz-, olaj- és vegyiparban tevékenykedő, valamint a CO₂-leválasztási módszerekre specializálódott vállalatok, melyek több esetben már szabadalmaztatott technológiákkal, illetve modulárisan alkalmazható, telepíthető termékekkel rendelkeznek. A hazai gázipari és vegyipari szereplők jelenleg is alkalmaznak CO₂-leválasztási eljárásokat egyes folyamataikban, így ezen hazai vállalatokban a befogáshoz szükséges technológiai ismeretek és szaktudás rendelkezésre áll. A saját megoldások fejlesztésének fontos szereplői lehetnek továbbá a tudományos kutatóközpontok és K+F+I együttműködések. A hazai CCU/S szaktudás és technológiai ismeretek, lehetőségek bővítésének fontos eszköze a hazai kulcsszeplők együttműködése, továbbá az európai szintű együttműködésekben, nemzetközi projektekben való részvétel.

8.3. TOP kibocsátók kibocsátáscsökkentési törekvéseiről és CCU/S technológia iránti viszonyulásról szóló felmérés

A kibocsátási jellemzők elemzésén túl felmértük a TOP kibocsátók kibocsátáscsökkentési törekvéseit, és a CCU/S technológia iránti elképzeléseket, attitűdöt. A fő témakörök a következők voltak: kibocsátáscsökkentési törekvések és célkitűzések, CCU/S technológiával kapcsolatos attitűd és tervek, szabályozási akadályozók és szabályozási javaslatok megfogalmazása. A szabályozással kapcsolatos eredményeket a 11. fejezetben mutatjuk be.

Kibocsátások alakulása

A TOP20 kibocsátó esetében a kibocsátási trend többségében stagnáló vagy csökkenő. Az összes válaszadóra nézve a stagnáló és csökkenő tendencia ugyanolyan arányban (40-40%) volt megfigyelhető (56. ábra).



56. ábra A vállalati szintű CO₂-kibocsátás változásának jellemzése, saját szerkesztés.

A csökkenő trend a legtöbb esetben a csökkenő termelésnek köszönhető, amely részben a kereslet csökkenése, részben pedig az energiaválság eredménye. A kibocsátás csökkenésére továbbá hatással voltak az energiahatékonyság javítását célzó fejlesztések, valamint az energiafelhasználás optimalizálására irányuló törekvések is. Egyes esetekben alternatív tüzelőanyagokat is használatba vettek, kiváltva ezzel a fosszilis tüzelőanyagokat.

Kisebb arányban ugyan, de megfigyelhető volt a kibocsátás növekedése a válaszadó szereplőknél. A növekvő kibocsátás jellemzően a termelés növekedéséből fakadt, mely növekményt némely esetekben az energiahatékonysági beruházások sem tudták ellensúlyozni.

Kibocsátáscsökkentést motiváló tényezők

“Milyen releváns motivációkat azonosítottak a vállalat számára a CO₂-kibocsátás csökkentése kapcsán?”

A CO₂-kibocsátás csökkentése kapcsán a TOP20 kibocsátó közé tartozó válaszadók a motiváló tényezőket az alábbi sorrendbe állították fontosságuk szerint:

1. Gazdasági/pénzügyi ösztönző
2. Technológiai fejlesztések
3. Környezeti fenntarthatósági célok
4. Szabályozási előírások
5. Társadalmi/vevői elvárások
6. Foglalkoztatási szempontok

A felmérés alapján a gazdasági/pénzügyi ösztönzők motiválják leginkább a hazai kibocsátó szereplőket. Az ETS rendszer és a CO₂-kvóta magas ára jelentős pénzügyi terhet ró a TOP kibocsátókra, ezért a kibocsátáscsökkentési célok összefonódtak a gazdasági célok teljesülésével is. Minél magasabb a CO₂ ára, annál nagyobb a nyomás a társaságokon a kibocsátások csökkentésének kapcsán. Az alacsonyabb fajlagos kibocsátással rendelkező társaságok jelentős versenyelőnybe kerülhetnek a piacon. Ez a klasszikus market-pull motiváció.

A technológiai fejlesztések, környezeti és fenntarthatósági célok, valamint a szabályozási előírások - mint releváns motiváció - értékelése között kis különbség volt a TOP20 kibocsátó válaszai alapján. A technológiai fejlesztéseket fontos hajtóerőként jellemezték a kibocsátók, melyek lehetővé teszik a hatékonyabb és alacsonyabb kibocsátással való működést. Több vállalat is rendelkezik környezeti, fenntarthatósági céllal és stratégiával, mely jelentős kibocsátáscsökkentést irányoz elő a következő évekre. Ez a pont azt

erősíti meg, hogy a gazdasági szereplők jellemzően tisztában vannak az új technológiák nyújtotta lehetőségekkel (technology push), ami fontos hajtóereje lehet a zöld átmenetnek.

A szabályozási előírások összességében jelenleg kisebb mértékben motiválják a kibocsátókat a kibocsátáscsökkentésre (ETS rendszert nem ideértve). Fontos megjegyezni, hogy ez iparáganként eltérő lehet, illetve az egyre nagyobb klímavédelmi célok és kibocsátási normákat megszabó EU-s direktívák (pl. RED II - RFNBO²⁴², RED III) komoly változásokat hozhatnak ebben és a szabályozás, mint erős motiváló tényező léphet előre a közeljövőben.

A felsorolt tényezők közül a társadalmi/vevői elvárások bizonyultak az egyik legkevésbé releváns motiváló erőnek a TOP20 kibocsátó válaszai alapján. Bár a legtöbb vállalatnál még nem jelentkezett az előállított termékek karbonlábnyomának csökkentésére irányuló vevői elvárás, viszont egyes esetekben már most is erőteljes igényt fogalmaztak meg erre vonatkozóan. Jellemzően olyan iparágakban jelentkezik, mely fontos beszállítója olyan iparágaknak, ahol a végfelhasználói oldalról már erőteljesen megjelentek a fenntarthatósági elvárások (pl. autóipar, kozmetikumok, de akár már az építőiparban is). Ez egy olyan motiváló faktor, amelynek a jelentősége nagyon erősen iparágfüggő, és a jövőben erősödhet. A foglalkoztatási szempontok nem igazán relevánsak a TOP kibocsátóknak a kibocsátáscsökkentés szempontjából.

A kibocsátáscsökkentés korlátjai

“Mik a CO₂-kibocsátás csökkentésének legrelevánsabb korlátjai a vállalata számára?”

A motiváló tényezők mellett elengedhetetlen azon tényezők vizsgálata, amelyek korlátozzák a vállalatok CO₂-kibocsátásának csökkentését. A három válaszlehetőség közül az alábbi sorrend alakult ki:

1. Gazdasági/pénzügyi korlátok
2. Technológiai korlátok
3. Szabályozási korlátok

A válaszadók egyértelműen a gazdasági/pénzügyi korlátokat tartják a legfőbb akadályozó tényezőnek. A kibocsátáscsökkentési technológiák jelenleg a konvencionális technológiához képest jelentősen magasabb beruházási- és működési költségekkel rendelkeznek, mely alacsony megtérülésű projekteket, és ezáltal romló gazdasági teljesítményt eredményeznek. Továbbá fontos korlátozó tényezőként azonosították a felmérésben résztvevők a jelenleg elérhető kibocsátáscsökkentő technológiák fejlettségét,

képességét. A jelen felmérésben érintett ipari társaságok esetében a dekarbonizáció kapcsán a technológiai kihívás jelentős. Nagy volumenű, fosszilis alapú ipari termelés kibocsátásának csökkentésére ipari méretű, nagy hatékonyságú megoldásokra van szükség, melyek jelenleg még nem, vagy korlátozottan állnak rendelkezésre. Az elérhető új technológiák (technológiai érettségük miatt) hatékonysága még legtöbbször elmarad a konvencionális technológiától. A szabályozási tényezők átlagosan "elfogadhatóan kezelhetők", ugyanakkor a válaszadók több észrevételt is megfogalmaztak, melyek a fejezet későbbi részében kerülnek kifejtésre.

Kibocsátáscsökkentési célkitűzések

A TOP20 kibocsátó közé tartozó válaszadók némivel több mint fele, összesen 56%-a rendelkezik valamilyen meghatározott CO₂-kibocsátáscsökkentési céllal (57. ábra).

Az elsődleges célkitűzések döntő többsége 2030-ra vonatkozik, azonban egy-egy szereplőnek már 2024-re és 2028-ra is vannak teljesítendő vállalásaik. Mind a bázis év, mind pedig a kitűzött csökkentés mértéke széles skálán változik, jellemzően 20-50% közötti értékek szerepelnek a válaszok között. A hosszabbtávú célkitűzéssel is rendelkező válaszadók 2050-ig vetítik előre a vállalat jövőbeli terveit, ekkorra többségük szeretné elérni a karbonsemlegességet, vagy ahhoz közeli (95%) állapotot.

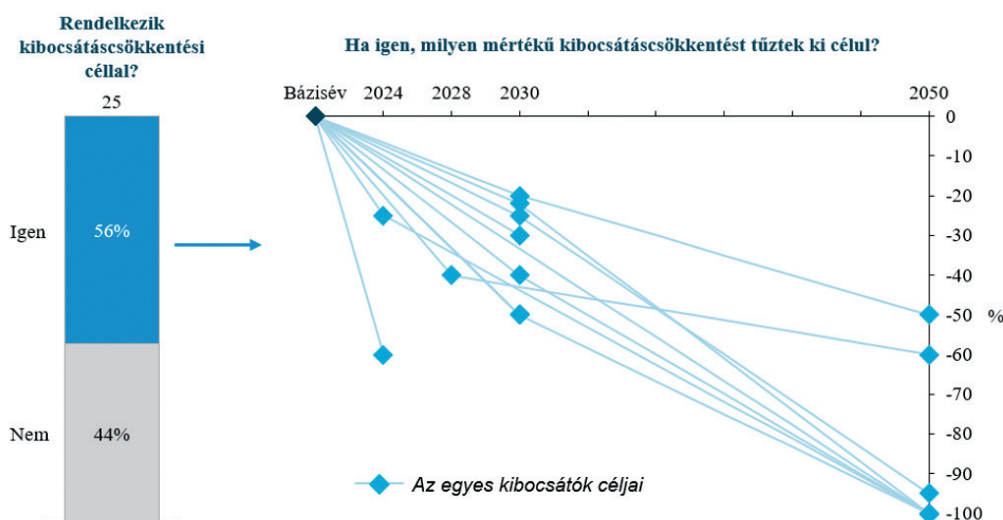
Mindezek mellett, a megkérdezett TOP20 közé tartozó vállalatok 50%-a rendelkezett fenntarthatósági jelentéssel, melyek nyilvánosan elérhetőek.

Jövőbeli elképzelések

A CO₂-kibocsátáscsökkentés elérésére a TOP20 hazai kibocsátó különféle megoldásokat kíván alkalmazni. Ezek közül a leggyakrabban előforduló módszer a megújuló energiák alkalmazása, melyet a hatékonyságnövelés és az új gyártási technológia vagy technológiaváltás követett (58. ábra). Szintén többen kívánják alkalmazni CO₂-kibocsátásuk csökkentésére az elektrolízis alapú zöld hidrogént.

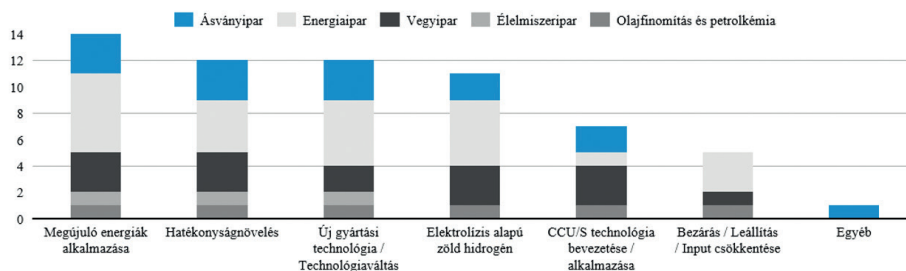
A CCU/S technológiát 7 szereplő jelölte meg, mint kívánt kibocsátáscsökkentési eszközt.

A termelés leállítás, mint kibocsátáscsökkentő lehetőség csupán néhány esetben fordul elő a tervekben. A felsorolt lehetőségeken túl egy ásványipari vállalat tervei között szerepelnek olyan egyéb megoldások is, mint a termékportfólió-váltás, az üzemanyagcellás szállítás, valamint a vasúti szállítás.



57. ábra A kibocsátók kibocsátáscsökkentési céljai, saját szerkesztés.

Milyen módon kívánja elérni a vállalat a CO₂-kibocsátáscsökkentési céljait?



58. ábra A kibocsátáscsökkentési célok elérésének módjai, saját szerkesztés.

Amennyiben a kérdésre adott válaszokat iparági bontásban vizsgáljuk megállapítható, hogy alapvetően kis eltérés figyelhető meg az adott válaszokban. Fontos különbség azonban, hogy a CCU/S technológia alkalmazása az energiaiparban kevésbé preferált megoldás, ugyanakkor a vegyiparban kiemelt jelentősége lehet.

A megkérdezettek CCU/S elképzelései

A válaszadók több mint felének (61%) nincs jelenleg futó CCU/S projektje, és nem is tervez a közeljövőben (59. ábra). Ezek a társaságok szinte kivétel nélkül a CCU/S technológia gyenge gazdasági mutatóival (negatív megtérülés, magas beruházásigény) és a technológia gyakorlati alkalmazhatóságának hiányával indokolták válaszukat.

A CCU/S-t nem tervező válaszadók jellemzően energiaipari cégek, melyek a gázerőművi szén-dioxid-leválasztás alacsony hatásfoka miatt nem terveznek a technológia alkalmazásával.

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 vállalatok vegyipari vagy ásványipari tevékenységet folytatnak. A tervezett projektek főként CCS, azaz szén-dioxid-letárolási megoldásokra irányulnak. A jelenleg futó projektek még csak megvalósíthatósági- és megtérülési tanulmányok, előzetes partneri tárgyalások, illetve előzetes tervezések szintjén léteznek. Tényleges szén-dioxid-hasznosítás egy vállalat esetében létezik, ahol a leválasztott szén-dioxid egy részéből karbamidot állítanak elő.

Azok a vállalkozások, amelyek folytatnak vagy terveznek CCU/S projektet, kivétel nélkül mind keresnek technológiai partnert. 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.

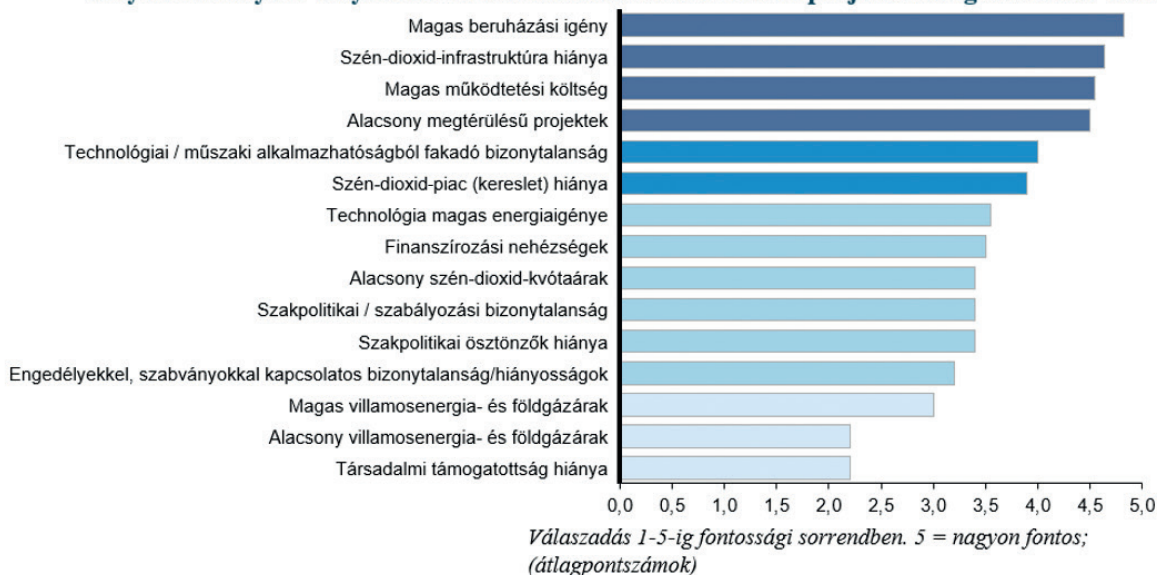
Felmérésre kerültek továbbá azok a tényezők, amik a megkérdezett kibocsátók szerint a CCU/S projektek megvalósulását akadályozzák (60. ábra).

Van-e a vállalatnak CCU/S technológiára vonatkozó folyamatban lévő projektje?



59. ábra CCU/S technológiára vonatkozó projektek a kibocsátók körében, saját szerkesztés.

Milyen akadályozó tényezőket lát vállalata számára a CCU/S projektek megvalósulása előtt?



60. ábra A CCU/S projektek megvalósulását akadályozó tényezők, saját szerkesztés.

A CCU/S projektek legnagyobb akadályozó tényezői között főként gazdasági elemek vannak: a technológia magas beruházási igénye, magas működtetési költsége és (ebből fakadón) alacsony megtérülése. Kiemelt probléma továbbá (2. helyen szerepel) a CO₂-infrastruktúra hiánya. Amíg nincs regionális alapon szerveződött CO₂-infrastruktúra (vagy erre vállalkozó szereplő), addig a kibocsátók nem tudnak a leválasztással foglalkozni, és mindaddig a CCU/S csak elméleti alternatíva marad.

Ezen túl jelentős akadályozó tényezőként azonosították a kibocsátók a technológia műszaki alkalmazhatóságából fakadó bizonytalanságot. Ez főként az alacsony számú megvalósított projekttel magyarázható (kevés a gyakorlati tapasztalat), illetve a technológia pilot méretben való alkalmazásának korlátaival. A CCS esetében gazdaságilag nagyvolumenű, nagy beruházásigényű megoldásokkal lehet számolni, ami miatt a technológia „kipróbálása” nagy működési kockázattal jár. Nehéz a technológia alkalmazhatóságának bizonyítása kis méretben a meglévő telephelyeknél. Tárolás esetében ez pedig hatványozottan igaz, hiszen minél nagyobb tároló kiépítése szükséges ahhoz, hogy a kezdeti beruházás megtérüljön. Szén-dioxid-hasznosítási (CCU) projektek esetében van lehetőség kis méretű pilot projektekkel tesztelni a technológiát, azonban sok esetben ennek is feltétele a leválasztás.

Fontos akadályozó tényező továbbá a szén-dioxid-kereslet (piac) hiánya. Jelenleg a szén-dioxidra, mint „káros anyagra” és elkerülendő kibocsátásra tekintenek a piaci szereplők.

Egyelőre nincs értéke ilyen volumenben a szén-dioxidnak, felvevő piaca limitált, kis léptékben léteznek csak hasznosító üzemek. Ezért a szén-dioxid-kibocsátás a kibocsátók számára, mint elkerülendő probléma van jelen, és kevésbé van értéke a piacon, amit monetizálni lehetne.

Ehhez kapcsolódóan a szén-dioxid-kvóta alacsony ára is akadályozza ezen projektek megvalósulását. A kibocsátók szerint nincs még azon a szinten, ami a CCU/S projekteket megtérülővé tenné. Az akadályozók közül ezt csak a 9. legfontosabb tényezőként jelölték meg a felhasználók, ami a jelenleg már igen magas CO₂-kvótaárakkal magyarázható.

További fontos akadályozó (3,4-es átlag pontszám az 5-ből) a szakpolitikai bizonytalanság és a szabályozási ösztönzők hiánya.

Egyrészt fennállnak konkrét jogszabályi akadályok a CCU/S projektek megvalósítása kapcsán (részletek a szabályozási javaslatokról szóló fejezetben), másrészt a hazai ipar- és energiapolitika CCU/S projektek iránti elköteleződésének hiánya miatt nem döntenek ilyen beruházások mellett a kibocsátók. Amíg nincs hosszútávon kiszámítható, támogató szabályozási környezet és ösztönzési rendszer ezen a területen, addig a kibocsátók nagy kockázatként fogják értékelni ezen projekteket.

9 HAZAI LEHETSÉGES CCU/S USECASE-EK



9. Hazai lehetséges CCU/S use case-ek

9.1. Lehetséges hazai use case-ek definiálása

A következőkben a CCU/S technológiák potenciális hazai alkalmazási lehetőségeire mutatunk példákat, az értéklánc különböző elemeire fókuszálva. Ezen use case-ek elsődleges célja, hogy szemléltessék a CCU/S technológiák hazai alkalmazási lehetőségeinek széleskörűségét, valamint gyakorlati példákat adjanak az egyes vállalatok és tevékenységük érintettségére, a potenciális partneri együttműködésekre és a kialakítható értéklánckokra. Jelen fejezetben gazdaságossági szempontból nem elemezzük az egyes CCU/S megoldásokat, csupán vizsgálandó koncepciókat mutatunk be.

Kibocsátói és felhasználói nézőpontból mutatunk be 7 esetet, melyek középpontjában a CO₂ befogása és hasznosítása áll. Ismertetünk 1 esetet CO₂-tárolási fókusszal, egy potenciális tároló formáció nézőpontjából. Továbbá körvonalazunk 2 kialakítható hazai CCU/S klasztert is. Mindegyik eset leírását értéklánc szemléletben készítettük el, így a CO₂ teljes életciklusát leképezik a keletkezéstől a felhasználásig és tárolásig.

9.1.1. Kibocsátói és felhasználói use case-ek

A kibocsátói és felhasználói use case-ek középpontjában a CO₂ befogása és helyi vagy partneri hasznosítása áll. A befogható CO₂-mennyiségek számításának alapját a kibocsátói kérdőívek és interjúk jelentik. A tárolói kapacitás minden esetben elméleti, az adatok forrása Szunyog 2012-es tanulmánya.²⁴³

A CO₂ befogását központba állító alkalmazási lehetőségek témái a CCGT alapú villamosenergia-termelés a Mátra Energia esetében, a cementklinkergyártás a Lafarge királyegyházi vagy a Duna-Dráva Cement beremendi 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.



9.1.1.1. Mátra Energia: Energiatermelés 500 MW CCGT erőművi blokkban

Usecase leírása			
Az MVM Mátra Energia 650 MW kapacitású földgáztüzelésű CCGT erőművet létesít a következő években. Az erőmű még hosszú ideig lesz része a hazai energiarendszernek. Kibocsátáscsökkentésre rövidtávon alternatív tüzelőanyag-bekeveréssel (hidrogén, biometán) van lehetőség, illetve szén-dioxid-leválasztás alkalmazásával. A usecase célja a létesítés alatt álló erőmű kibocsátásának leválasztása, majd a befogott CO ₂ tartós geológiai tárolása, illetve értékesítése vegyipari és építőipari felhasználók számára.			
Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
Mátra Energia	Energiaipar	Villamosenergia-termelés	Visonta
Kibocsátás			
CO ₂ forrása			
Földgázégetés kombinált ciklusú gázturbinás blokkban (CCGT)			
CO ₂ -kibocsátás	CO ₂ -koncentráció	Nyomás	
1.216 ezer tonna / év ; 1 pontforrás <ul style="list-style-type: none"> • fajlagos kibocsátás: 320 g/kWh • tervezett évi kapacitás 3,8 TWh 	5% alatti	Légköri nyomás	
Kibocsátás ingadozása			
Kis mértékű ingadozás előfordulhat az erőmű termelésében és kibocsátásában a villamosenergia-igény változékonysága miatt.			
Leválasztás			
Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség	
Post-combustion	85%	1.000 kt	
Ingadozás hatása a CO ₂ -leválasztásra, -szállításra			
Helyi átmeneti tároló és kisegítő kompresszor állomás kiépítése szükséges lehet.			
Tárolás			
Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság	
A pontforrás térségében található kimerült szénhidrogénmezős tároló kapacitások nem elegendők a várható CO ₂ -tárolási igények kielégítésére. Emiatt sósvizes akviferes tárolók kiépítése szükséges a régióban.			
Felhasználás			
Helyi hasznosítás			
A befogott CO ₂ az alaptevékenységben nem hasznosítható. A Mátrai Energia telephelyén átalakuló / létrejövő ipari ökoszisztéma potenciális felvevő lehet.			
Partneri hasznosítás			
Iparág	Partner	Távolság	Szállítás
Vegyipar	BorsodChem (Kazincbarcika)	kb. 120 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
	MOL Petrolkémia (Tiszaújváros)	kb. 100 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Építőipar	Duna-Dráva Cement (Vác)	kb. 100 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti

3. táblázat Az MVM Mátra Energia (Visonta) use case leírása, saját szerkesztés.

9.1.1.2. Lafarge / DDC: Cementklinkergyártás

Usecase leírása

A LAFARGE királyegyházi és a DDC beremendi gyára a hazai cementipar meghatározó szereplői. A cementgyártás jelentős folyamati kibocsátással jár, ezért az egyik legnehezebben dekarbonizálható iparág.

A use case célja a cementgyártás CCU/S alkalmazásán keresztüli dekarbonizációjának bemutatása. A példában a cementklinker-kemence kibocsátásának leválasztása, majd a befogott CO₂ helyi hasznosítása a cement-előállításban, illetve tartós geológiai tárolása kerül bemutatásra.

Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
Lafarge / Duna-Dráva Cement	Építőipar	Cementgyártás	Királyegyháza / Beremend

Kibocsátás

CO₂ forrása

Tüzelőanyag-égetés cementklinker-kemencében

Kibocsátás	Koncentráció	Nyomás
539 ezer tonna / év ; 1 pontforrás • cementklinker-kemence	22%	Légköri nyomás

Kibocsátás ingadozása

Nem várható ingadozás normál üzletmenet mellett.

Leválasztás

Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség
Post-combustion	75%	404 kt

Ingadozás hatása a CO₂-leválasztásra, -szállításra

Az ingadozásnak várhatóan nincs hatása az infrastruktúra tervezésére (méretezésére) és ütemezésére.

Tárolás

Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság
Görgeteg-Babócsa	3,39 Mt CO₂ (8-9 év kibocsátása)	70 km

Maximális helyi hasznosítás esetén évi kb. 25%-kal kevesebb CO₂ tárolására van szükség.

A pontforrások térségében található kimerült szénhidrogénmezős tároló kapacitások nem elegendők a közeli kibocsátók várható CO₂-tárolási igényének kielégítésére. Ehhez közép- és hosszútávon sós vizet akvíferes tárolók kiépítése szükséges a régióban, illetve határmenti együttműködésen keresztül elérhetővé válhatnak megfelelő tárolási kapacitások.

Felhasználás

Helyi hasznosítás

Termék	Kalkuláció	Mennyiség
CO ₂ -kezelt cement előállítása	0,4 tonna CO ₂ / 1 tonna cement	Befogható kibocsátás teljes hasznosításával 160 ezer tonna CO ₂ -kezelt cement előállítása lehetséges.

Gyár éves kapacitása 1,1 millió tonna cement, tehát a kibocsátás kis része hasznosítható helyben. Tárolás vagy más hasznosítás (pl. vegyipar) szükséges a teljes hasznosításhoz.

4. táblázat A LAFARGE (Királyegyháza) és a DDC (Beremend) use case leírása, saját szerkesztés.

9.1.1.3. ISD Dunaferr: Nagyolvasztó a dunaujvárosi vasgyárban

Usecase leírása			
A Dunaujvárosban működő ISD Dunaferr meghatározó szereplő a hazai vas- és acélgégyártásban. A usecase célja a vasgyártás nagyolvasztói kibocsátásának leválasztása, majd a befogott CO ₂ tartós geológiai tárolása, illetve értékesítése közeli felhasználók számára.			
Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
ISD Dunaferr	Vas- és acélgégyártás	Vasgyártás	Dunaujváros
Kibocsátás			
CO ₂ forrása			
Nyersvas-előállítás nagyolvasztóban			
CO ₂ -kibocsátás	CO ₂ -koncentráció	Nyomás	
Nagyolvasztó • 523 ezer tonna / év; 9 pontforrás További kibocsátások összesen • 421 ezer tonna / év; 23 pontforrás	Közepes (35% alatt)	Légköri nyomás	
Kibocsátás ingadozása			
Nem várható ingadozás normál üzletmenet mellett.			
Leválasztás			
Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség	
Post-combustion	75%	392 kt	
Ingadozás hatása a CO ₂ -leválasztásra, -szállításra			
Az ingadozásnak várhatóan nincs hatása az infrastruktúra tervezésére (méretezésére) és ütemezésére.			
Tárolás			
Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság	
Tázlár (elsődleges)	5,86 Mt CO ₂ (14-15 év kibocsátása)	80 km	
Endrőd (további lehetőség)	9,38 Mt CO ₂ (23-24 év kibocsátása)	180 km	
Felhasználás			
Helyi hasznosítás			
Szükséges kokszt mennyisége csökkenthető CO bevezetéssel, mely előállítható a CO ₂ -ból elektrolízissel vagy RWGS módszerrel. Ezek közepes érettségű technológiák, bevezetésük 2030 után várható.			
Partneri hasznosítás			
Iparág	Partner	Távolság	Szállítás
Műanyaggyártás	Dunastyr (Százhalombatta)	50 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Italgyártás	Márka (Felsőlajos)	80 km	Csővezetékes, közúti
	Szentkirályi (Szentkirály)	100 km	Csővezetékes, közúti
	Magyarvíz (Lajosmizse)	80 km	Csővezetékes, közúti
	Dreher (Budapest, X.)	80 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Élelmiszeripar	Fevita (Székesfehérvár)	50 km	Csővezetékes, közúti

5. táblázat Az ISD Dunaferr (Dunaujváros) use case leírása, saját szerkesztés.

9.1.1.4. MOL: Kőolajfinomítás a Dunai Finomítóban

Usecase leírása

A százhalombattai MOL Dunai Finomító a régió egyik legnagyobb kőolaj finomító üzeme. A usecase célja a finomításban használt hidrogén helyi előállításából származó CO₂ befogása, majd tartós geológiai tárolása, illetve helyi felhasználása szintetikus kerozin előállítására céljából.

Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
MOL	Vegyipar	Kőolajfinomítás	Százhalombatta

Kibocsátás

CO₂ forrása

Hidrogéngyártó egységek (2 db) kibocsátása (évi ~40 kt H₂ kapacitású)

CO ₂ -kibocsátás	CO ₂ -koncentráció	Nyomás
Hidrogén-előállítás: • 300 ezer tonna / év További kibocsátások összesen: • 1,25 millió tonna / év	Hidrogén előállítás: 60% Energetikai: 5-10%	Légköri nyomás

Kibocsátás ingadozása

Nem várható ingadozás normál üzletmenet mellett.

Leválasztás

Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség
Pre-combustion a szintézisgázon, CO ₂ PSA-val	75%	240 kt

Ingadozás hatása a CO₂-leválasztásra, -szállításra

Az ingadozásnak várhatóan nincs hatása az infrastruktúra tervezésére (méretezésére) és ütemezésére.

Tárolás

Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság
Tázlár	5,86 Mt CO ₂ (25-26 év kibocsátása)	120 km

Felhasználás

Helyi hasznosítás

Termék	Kalkuláció	Mennyiség
Szintetikus kerozin	2,85 tonna CO ₂ / 1 tonna e-kerozin	~52 ezer tonna (~405 ezer hordó) , a befogható kibocsátás teljes hasznosításával

Usecase leírása			
Partneri hasznosítás			
Iparág	Partner	Távolság	Szállítás
Műanyaggyártás	Dunastyr (Százhalombatta)	5 km	Csővezetékes, vasúti
	Lotte Chemical (Környe)	80 km	Csővezetékes
	Zoltek (Nyergesújfalú)	75 km	Csővezetékes, vasúti
Italgyártás	Coca-Cola (Dunaharaszti)	30 km	Csővezetékes, közúti
	Márka (Felsőlajos)	75 km	Csővezetékes, közúti
	Szentkirályi (Szentkirály)	117 km	Csővezetékes, közúti
	Magyarvíz (Lajosmizse)	80 km	Csővezetékes, közúti
	Dreher (Budapest, X.)	35 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Élelmiszeripar	Fevita (Székesfehérvár)	55 km	Csővezetékes, közúti

6. táblázat A MOL Dunai Finomító (Százhalombatta) use case leírása, saját szerkesztés.



9.1.1.5. MOL Petrolkémia: Olefingyártás a tiszaujvárosi vegyi üzemben

Usecase leírása

A Tiszaujvárosban működő MOL Petrolkémia a hazai vegyipar egyik legnagyobb hazai szereplője. A usecase célja az olefingyártás és egyéb petrolkémiai folyamatok során keletkező CO₂ részleges befogása, majd tartós geológiai tárolása, illetve helyi felhasználása az olefingyártásban vagy potenciálisan poliuretán előállításában új üzem létesítésével.

Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
MOL Petrolkémia	Vegyipar	Petrolkémia	Tiszaujváros

Kibocsátás

CO₂ forrása

Petrolkémiai tevékenység során keletkező CO₂ (elsősorban ipari hő- és energiatermelés, krakkolás, gáztisztítás)

Kibocsátás	Koncentráció	Nyomás
1.085 ezer tonna / év	Alacsony	Légköri nyomás

Kibocsátás ingadozása

Nem várható ingadozás normál üzletmenet mellett.

Leválasztás

Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség
Post-combustion Abszorpciós vagy kriogén	30%	300 kt

Ingadozás hatása a CO₂-leválasztásra, -szállításra

Az ingadozásnak várhatóan nincs hatása az infrastruktúra tervezésére (méretezésére) és ütemezésére.

Tárolás

Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság
Hosszúpályi	6,7 Mt CO₂ (22 év kibocsátása)	100 km

Felhasználás

Helyi hasznosítás

Termék	Kalkuláció	Mennyiség
Olefingyártás	3,2 tonna CO ₂ / 1 tonna olefin	~90 ezer tonna olefin , a befogható kibocsátás teljes hasznosításával
Szén-monoxid-gyártás	120 m ³ CO ₂ / 100 m ³ CO (20%-os becsült folyamatvesztés)	~125 millió m³ CO , a befogható kibocsátás (150 millió m ³ CO ₂) teljes hasznosításával
Metanolgyártás	1,343 tonna CO ₂ / 1 tonna metanol	~220 ezer tonna metanol , a befogható kibocsátás teljes hasznosításával

Usecase leírása			
Partneri hasznosítás			
Iparág	Cég, Helyszín	Távolság	Szállítás
Műanyaggyártás	Elastico (Miskolc)	40 km	Csővezetékes, közúti
	BorsodChem (Kazincbarcika)	55 km	Csővezetékes, vasúti
Italgyártás	Hell (Szikszó)	50 km	Csővezetékes, közúti
	Borsodi (Bőcs)	30 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Élelmiszeripar	Mirelite Mirsa (Miskolc)	40 km	Csővezetékes, közúti

7. táblázat A MOL Petrolkémia (Tiszaújváros) use case leírása, saját szerkesztés.



9.1.1.6. Nitrogénművek: Műtrágyagyártás során leválasztott CO₂ felhasználása

Usecase leírása

A Nitrogénművek jelentős regionális szereplő a műtrágyagyártásban, melynek folyamatai során az ammónia előállításakor nagy tisztaságú CO₂-áram keletkezik.

A usecase célja a CO₂ helyi hasznosítása a műtrágyagyártásban, valamint értékesítése italgyártók részére.

Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
Nitrogénművek	Vegyipar	Műtrágyagyártás	Pétfürdő

Kibocsátás

CO₂ forrása

SMR alapú földgáz bontás, melynek során a keletkező CO₂ leválasztásra kerül

Kibocsátás	Koncentráció	Nyomás
Ammóniagyártás, technológiai gázmosó • 510 ezer tonna / év; 2 pontforrás (ebből 45 kt hasznosításra kerül a karbamidgyártás során) További kibocsátások • 340 ezer tonna / év; 1 pontforrás	99,96%	Magas

Kibocsátás ingadozása

Nem várható ingadozás normál üzletmenet mellett.

Leválasztás

Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség
A szintézisgázból a CO ₂ leválasztása a technológiai gázmosóban történik.	~100%	450 kt (Meglévő helyi hasznosítás nélkül)

Ingadozás hatása a CO₂-leválasztásra, -szállításra

Az ingadozásnak várhatóan nincs hatása az infrastruktúra tervezésére (méretezésére) és ütemezésére.

Tárolás

Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság
Tázlár (elsődleges)	5,86 Mt CO₂ (13 év kibocsátása)	160 km

Az üzemben leválasztott CO₂ magas tisztasága miatt a tárolásnál célszerűbb megoldás a hasznosítás.

Felhasználás

Helyi hasznosítás

Termék	Kalkuláció	Mennyiség
Karbamid alapú ragasztók	0,7 tonna CO ₂ / 1 tonna karbamid	Befogható kibocsátás teljes hasznosításával ~616 ezer tonna karbamid előállítása lehetséges.
Karbamid alapú ragasztók, gyanták	A műtrágyagyártásban nem hasznosított karbamid felhasználható ragasztók, gyanták előállításához	

Usecase leírása

Partneri hasznosítás

Iparág	Cég, Helyszín	Távolság	Szállítás
Gázgyártás	Messer (Dunaföldvár)	105 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
	Linde (Répcelak)	125 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Italgyártás	Coca-Cola (Dunaharaszti)	110 km	Csővezetékes, közúti
	Dreher (Budapest, X.)	105 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Élelmiszeripar	Fevita (Széhesfehérvár)	30 km	Csővezetékes, közúti
Műanyaggyártás	Dunastyr (Százhalombatta)	90 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
	Lotte Chemical (Környe)	70 km	Csővezetékes, közúti
	Zoltek (Nyergesújfalú)	110 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti

A befogott CO₂ felhasználható vörösiszap ártalmatlanítására is, melynek eredményeként a létrejövő karbonátokban a CO₂ tartósan megkötődik (a technológia alacsony érettségű, TRL 3).¹⁶⁹ A nagy hazai vörösiszap-tározók (Ajka, Almásfüzitő, Neszmély) az üzem 50-100 km-es körzetében találhatóak.

A Nitrogénművek tevékenysége során befogható, nagy tisztaságú CO₂ képes a bányászott forrásból származó CO₂ kiváltására az italgyártásban és az élelmiszeriparban, továbbá hasznosítható az üvegházi termesztésben is. Központi kereskedelmi CO₂ elosztó/hub létrehozására ideális lehet.

8. táblázat A Nitrogénművek (Pétfürdő) use case leírása, saját szerkesztés.



9.1.1.7. BorsodChem: SMR üzem működése során leválasztott CO₂ helyi hasznosítása

Usecase leírása

A BorsodChem a hazai és regionális vegyipari alapanyaggyártás egyik legmeghatározóbb szereplője. A dekarbonizációs lehetőségek közül a CCU/S biztosíthat nagymértékű kibocsátáscsökkentést már rövidtávon is. A bemutatott példában a gőz-metán reformálóban keletkező CO₂ kerül befogásra és helyi hasznosításra vegyipari termékek előállítására (pl. szén-monoxid, metanol), valamint értékesítésre közeli felhasználók részére.

Társaság	Iparág	Tevékenység	Helyszín
BorsodChem	Vegyipar	Vegyipari termékek gyártása	Kazincbarcika

Kibocsátás

CO₂ forrása

SMR üzem működése, melynek során a keletkező CO₂ abszorpciós eljárással leválasztásra kerül

Kibocsátás	Koncentráció	Nyomás
200 ezer tonna / év	99%	Légköri nyomás

Kibocsátás ingadozása

Nem várható ingadozás normál üzletmenet mellett.

Leválasztás

Leválasztási technológia	Befogási arány	Befogható mennyiség
Pre-combustion Abszorpciós eljárás	~95% (szintézisgázból leválasztott CO ₂)	150 kt

Ingadozás hatása a CO₂-leválasztásra, -szállításra

Az ingadozásnak várhatóan nincs hatása az infrastruktúra tervezésére (méretezésére) és ütemezésére.

Tárolás

Tároló	Kapacitás, rendelkezésre álló évek	Távolság
Kunmadaras	8,7 Mt CO₂ (58 év kibocsátása)	140 km

Felhasználás

Helyi hasznosítás

Termék	Kalkuláció	Mennyiség
Szén-monoxid-gyártás	120 m ³ CO ₂ / 100 m ³ CO (20%-os becsült folyamati vesztés)	~62,5 millió m³ CO , a befogható kibocsátás (75 millió m ³ CO ₂) teljes hasznosításával
Metanolgyártás	1,343 tonna CO ₂ / 1 tonna metanol	~100 ezer tonna metanol , a befogható kibocsátás teljes hasznosításával

Évi 100 millió m³ szén-monoxid-előállításához további 90 ezer tonna CO₂ megkötése szükséges.

Egyéb helyi hasznosítási lehetőségek: anilin és formalingyártás, számos további vegyi anyag előállítása.

Usecase leírása			
Partneri hasznosítás			
Iparág	Cég, Helyszín	Távolság	Szállítás
Gázgyártás	Linde (Kazincbarcika)	1 km	Telephelyi szintű helyi szállítás
Vegyipar	MOL Petrolkémia (Tiszaújváros)	60 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Műanyaggyártás	Elastico (Miskolc)	20 km	Csővezetékes, közúti
Italgyártás	Hell (Szikszó)	35 km	Csővezetékes, közúti
	Borsodi (Bócs)	45 km	Csővezetékes, közúti vagy vasúti
Élelmiszeripar	Mirelite Mirsa (Miskolc)	20 km	Csővezetékes, közúti

9. táblázat A BorsodChem (Kazincbarcika) use case leírása, saját szerkesztés.

9.1.2. Tárolói use case

A tárolói use case középpontjában a CO₂ geológiai tárolása, a potenciális kapcsolódó kibocsátók azonosítása áll. A tárolói kapacitás elméleti, az adat forrása Szunyog 2012-es tanulmánya.²⁴³ A kibocsátók befogható CO₂-mennyisége a technológiai adottságokon alapuló becslés.

A CO₂-tárolói eset témája a Tázlár térségében található kimerült szénhidrogénmező hasznosítása.

9.1.2.1. Tároló kialakítása a Kisújszállás Ny kimerült szénhidrogénmezőben

Usecase leírása	
Tartós földalatti CO ₂ -tároló kiépítése és üzemeltetése a Kisújszállás Ny leművelt szénhidrogén mezőn, tárolási szolgáltatás nyújtása harmadik fél számára vagy saját igény kielégítésére.	
Tároló jellemzői	
Hely	Formáció
Kisújszállás	Kimerült szénhidrogén (földgáz) mező
Kapacitás	
13,75 Mt (elméleti)	A gyakorlati hasznosítható kapacitás megállapításához további elemzés szükséges.
Sajtolhatóság	
A sajtolhatóság meghatározása további méréseket, elemzést igényel.	
Meglévő infrastruktúra	
Tároló létesítéséhez új sajtoló kutak kiépítése szükséges , a meglévő kutak nem hasznosíthatók a CO ₂ kezelésében. Meglévő földgázvezeték köti össze a tárolói formációt a MOL Petrolkémia tiszaújvárosi üzemével, mely rekonstrukcióval CO₂ szállítására alkalmassá tehető .	

Usecase leírása		
Közeli kibocsátók		
CO ₂ -forrás	Tevékenység	Befogható éves kibocsátás
MVM Mátra Energia (Visonta)	CCGT erőmű	544 kt/év
MOL Petrolkémia (Tiszaújváros)	Petrolkémia	500 kt/év
Birla Carbon (Tiszaújváros)	Koromgyártás	230 kt/év
BorsodChem (Kazincbarcika)	Vegyipar	275 kt/év
ISD Dunaferr (Dunaújváros)	Vasgyártás	472 kt/év
Hamburger Hungária (Dunaújváros)	Papírgyártás	125 kt/év
Wienerberger (Békéscsaba)	Téglagyártás	50 kt/év

A befogható éves kibocsátás a CCGT erőművi villamosenergia-termelés és a koromgyártás esetében a teljes CO₂-kibocsátás 85%-a, a többi tevékenység esetében 50%-a, melyek a technológiai adottságokból származó közelítő becslések.

Szállítás		
CO ₂ -forrás	Távolság	Csővezeték kapacitás
MVM Energia (Visonta)	110 km	130 m ³ /óra
MOL Petrolkémia (Tiszaújváros)	100-150 km	120 m ³ /óra
Birla Carbon (Tiszaújváros)	100-150 km	55 m ³ /óra
BorsodChem (Kazincbarcika)	150-200 km	65 m ³ /óra
ISD Dunaferr (Dunaújváros)	150-200 km	110 m ³ /óra
Hamburger Hungária (Dunaújváros)	150-200 km	30 m ³ /óra
Wienerberger (Békéscsaba)	100 km alatt	15 m ³ /óra

Közös tiszaújvárosi vezetéken keresztül kapcsolódhat a tárolóhoz a **MOL Petrolkémia és a Birla Carbon**. Ehhez a **BorsodChem** a kazincbarcikai **csatlakozó vezetékkel kapcsolódhat**.

Közös dunaújvárosi vezetéken keresztül kapcsolódhat a tárolóhoz az **ISD Dunaferr és a Hamburger Hungária**.

Üzemeltető partnerek	
Érintett	Szerep, hozzájárulás
MOL Csoport	Tároló formációval kapcsolatos meglévő kitermelési tapasztalat és geológiai ismeretek. Továbbá a vállalatcsoporton belül megtalálható a tárolót igénybe vevő kibocsátó, illetve a szállítási infrastruktúrát kiépítő és üzemeltető vállalat.
MVM	Részvétel a szállítási infrastruktúra kiépítésében és üzemeltetésében, valamint tárolói szolgáltatást igénybe vevő kibocsátó.
BorsodChem, ISD Dunaferr	Nagy kibocsátással rendelkező potenciális partnerek.
Linde, Messer	Szén-dioxid-leválasztás, -kezelés technológiai szolgáltatója.

10. táblázat A Kisújszállás Ny leművelt szénhidrogénmező tárolói use case leírása, saját szerkesztés.

9.1.3. CCU/S klaszter use case-ek

A klaszter use case-ek középpontjában földrajzi közelségen alapuló, értéklánc menti CCU/S együttműködések állnak. A kibocsátók befogható CO₂-mennyisége a technológiai adottságokon alapuló becslés. A tárolói kapacitás elméleti, az adat forrása Szunyog 2012-es tanulmánya.²⁴³ A klaszter koordinátor szereplői várhatóan az érintett legnagyobb kibocsátók, a potenciális CO₂-infrastruktúra üzemeltetők, a technológiai szolgáltatók közül kerülnek ki.

A hazai lehetséges CCU/S klaszterek bemutatása céljából körvonaloztuk 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.

9.1.3.1. Észak-Magyarországi CCU/S Klaszter

Usecase leírása		
A CCU/S business case-ek megtérülését, a kockázatok mérséklését, megosztását segítheti, ha az egymáshoz közel elhelyezkedő kibocsátók és kulcsszereplők együttműködnek. A legnagyobb potenciállal bíró hazai CCU/S hub Északkelet Magyarországon, Tiszaújváros és Kazincbarcika mentén lehet.		
Klaszter neve	Kibocsátói régió	Tárolói régió
Észak-Magyarországi CCU/S Klaszter	Észak-Magyarország (Mátra és Miskolc környéke)	Közép-Alföld
Koordinátor szereplők		
MOL Csoport		
MVM Mátra Energia		
Usecase leírása		
Főbb Kibocsátók		
Főbb érintett kibocsátók		
Cég, Helyszín	Tevékenység	Befogható éves kibocsátás
Mátra Energia, Tiszaújváros	CCGT erőmű	544 kt
MOL Petrolkémia, Tiszaújváros	Vegyipari termelés	500 kt
Birla Carbon, Tiszaújváros	Koromgyártás	230 kt
BorsodChem, Kazincbarcika	Vegyipari termelés	275 kt
Linde, Kazincbarcika	Hidrogén-előállítás	130 kt
További potencióális csatlakozó kibocsátók		
Cég, Helyszín	Tevékenység	Befogható éves kibocsátás
Alteo, Tiszaújváros	Távhő	18 kt
Alteo, Kazincbarcika	Távhő	27 kt
CATL, Debrecen	Akkumulátor gyártás	245 kt

Usecase leírása

A befogható éves kibocsátás a CCGT erőművi villamosenergia-termelés, a koromgyártás, a hőtermelés és akkumulátorgyártás esetében a teljes CO₂-kibocsátás 85%-a, a többi tevékenység esetében 50%-a, melyek a technológiai adottságokból származó közelítő becslések.

Potencionális felhasználók

Felhasználó	Iparág	Felhasználásban rejlő lehetőség
BorsodChem, Kazincbarcika	Vegyipar	Nagy CO ₂ -felhasználási potenciál a vegyiparban a helyi hasznosításon és a partneri együttműködések keresztül
MOL Petrolkémia, Tiszaújváros	Vegyipar	
Borsodi, Bócs	Italgyártás	Mérsékelt mennyiségű CO ₂ -igény számos vállalatnál keletkezik
Hell, Szikszó	Italgyártás	
Mirelite Mirsa, Miskolc	Élelmiszeripar	
Linde, Kazincbarcika	Gázgyártás	Kis és közepes felhasználók számára történő értékesítés országos szinten és helyi hasznosítási lehetőségek

Főbb tároló helyszínek

Formáció jellege	Tároló hele	Kapacitás
Kimerült szénhidrogénmezők	Kisújszállás	13,75 Mt
	Endrőd	9,38 Mt
	Hosszúpályi	6,7 Mt
	Kunmadaras	8,7 Mt
Sósvizes akvifer	Szolnoki formáció (pontos helyszín meghatározása további vizsgálatokat igényel)	

Szállítási infrastruktúra

Csővezeték-gerinchálózat

Nyomvonal	Távolság	Kapacitás
Tiszaújváros – Tárolói régió	100-150 km	390 m ³ /óra

Meglévő földgáz vezeték köti össze a tárolói formációt a MOL Petrolkémia tiszaújvárosi üzemével, mely rekonstrukcióval CO₂ szállítására alkalmassá tehető.

Csatlakozó vezetékek

Nyomvonal	Távolság	Kapacitás
Visonta – Tiszaújváros	~100 km	130 m ³ /óra
Kazincbarcika – Tiszaújváros	~60 km	100 m ³ /óra

Közúti és vasúti szállítás

A közúti szállítás lehetősége minden esetben fennáll a kibocsátók és a potenciális felhasználók között. A vasúti szállítás a kisebb felhasználók esetében csak kevés esetben érhető el.

Közúti szállítás kialakítása célszerű a kibocsátóktól az italgyártó és élelmiszeripari felhasználók felé. A vasúti szállítás elsősorban a közepes CO₂-igénnyel rendelkező vegyipari és a gázgyártásban tevékenykedő felhasználók irányába alkalmazható.

11. táblázat Az Észak-Magyarországi CCU/S Klaszter use case leírása, saját szerkesztés.

9.1.3.2. Dunamenti CCU/S Klaszter

Usecase leírása

A CCU/S business case-ek megtérülését, a kockázatok mérséklését, megosztását segítheti, ha az egymáshoz közel elhelyezkedő kibocsátók és kulcsszereplők együttműködnek. Nagy potenciállal bíró hazai CCU/S hub a Duna mentén lehet, Budapest és Dunaújváros környezetében, illetve a Dél-Dunántúli régióban.

Klaszter neve	Kibocsátói régió	Tárolói régió
Dunamenti CCU/S Klaszter	Budapest és Dunaújváros környéke Dél-Dunántúl (Pécsi régió)	Tázlár

Koordinátor szereplők

MOL Csoport

További potenciális koordinátor szereplők:
ISD Dunaferr, Lafarge, Duna-Dráva Cement, MET Csoport, Linde

Megjegyzés

A Dunamenti Klaszter jelentős földrajzi kiterjedtsége miatt két külön klaszterre is felosztható, az északi (Budapest és Dunaújváros környéke) és a déli (Pécs környéke) régióra. Ez esetben a déli régió CO₂-tárolási igényeinek kielégítése, partneri hasznosítási lehetőségeinek bővítése elképzelhető határmenti együttműködés keretében is.

Főbb Kibocsátók

Főbb érintett kibocsátók

Cég, Helyszín	Tevékenység	Befogható éves kibocsátás
Dunamenti Erőmű, Százhalombatta	Villamosenergia-termelés	548 kt
MOL Dunai Finomító, Százhalombatta	Kőolajfinomítás	755 kt
ISD Dunaferr, Dunaújváros	Vas- és acélgyártás	472 kt
Lafarge, Királyegyháza	Cementgyártás	270 kt
Duna-Dráva Cement, Beremend	Cementgyártás	230 kt

További potencionális kibocsátók

Cég, Helyszín	Tevékenység	Befogható éves kibocsátás
Duna-Dráva Cement, Vác	Cementgyártás	257 kt
Hamburger Hungária, Dunaújváros	Papírgyártás	125 kt
Hankook, Dunaújváros	Gumigyártás	22 kt
Pannónia Bio, Dunaföldvár	Bioetanol gyártás	60 kt
Nitrogénművek, Pétfürdő	Ammóniagyártás	767 kt
Hungrana, Szabadegyháza	Keményítő gyártás	75 kt
Carmeuse, Beremend	Mészgyártás	33 kt
Magyar Cukor, Kaposvár	Cukorgyártás	12 kt
Leier, Pécs	Tégla gyártás	18 kt
Pécsi Hőerőmű, Pécs	Távhő	22 kt
Fővárosi erőművek, Budapest	Távhő	637 kt

A befogható éves kibocsátás a gázerőművi villamosenergia-termelés, a hőtermelés és az ammóniagyártás esetében a teljes CO₂-kibocsátás 85%-a, a többi tevékenység esetében 50%-a, melyek a technológiai adottságokból származó közelítő becslések.

Usecase leírása		
Potencionális felhasználók		
Felhasználó	Iparág	Felhasználásban rejlő lehetőség
Lafarge, Királyegyháza	Építőipar	Nagy CO ₂ -felhasználási potenciál a cementgyártásban saját hasznosításon és partneri együttműködésekén keresztül
DDC, Beremend		
Dunasty, Százhalombatta	Műanyaggyártás	Mérsékelt CO ₂ -felhasználási potenciál a műanyaggyártásban partneri együttműködésekén keresztül
Zoltek, Nyergesújfalu		
LOTTE, Környe		
Coca-Cola, Dunaharaszti	Italgyártás	Számos mérsékelt mennyiségű CO ₂ -igénnyel rendelkező felhasználó az italgyártásban és élelmiszeriparban
Márka, Felsőlajos		
Magyarvíz, Lajosmizse		
Szentkirályi, Szentkirály		
Dreher, Budapest X.		
Fevita, Székesfehérvár	Élelmiszeripar	További kis és közepes felhasználók számára történő értékesítés országos szinten és helyi hasznosítási lehetőségek a gázgyártás és -kereskedelemben
Linde, Répcelak	Gázgyártás	
Messer, Dunaföldvár		

Főbb tároló helyszínek		
Formáció jellege	Tároló helye	Kapacitás
Kimerült szénhidrogén mezők	Tázlár	5,86 Mt
	Görgeteg-Babócsa	3,39 Mt
Sósvízes akvifer	Újfalu formáció (pontos helyszín meghatározása további vizsgálatokat igényel)	

Határmenti együttműködésén keresztül további megfelelő tárolási kapacitások válhatnak elérhetővé, elsősorban a dél-dunántúli kibocsátók számára.

Szállítási infrastruktúra		
Csővezeték-gerinchálózat		
Nyomvonal	Távolság	Kapacitás
Százhalombatta – Tázlár (érintve: Dunaújvárost)	~120 km	410 m ³ /óra
Beremend, Királyegyháza – Pécs – Tázlár	30 + 50 + 160 km	55 – 60 – 120 m ³ /óra

A Százhalombatta és Tázlár közötti szakaszon nagynyomású földgázz szállító vezeték található Kecskemét érintésével, melynek nyomvonala potenciálisan hasznosítható a CO₂-vezeték lefektetése során.

A Pécs és Tázlár közötti szakaszon nagynyomású földgázz szállító vezeték található, melynek nyomvonala potenciálisan hasznosítható a CO₂-vezeték lefektetése során. Ehhez a vezetékhez az egyes pontforrások a Beremend-Pécs és a Királyegyháza-Pécs között kialakítható vezetékeken keresztül kapcsolódhatnak.

Usecase leírása		
Potenciális csatlakozó vezetékek		
Nyomvonal	Távolság	Kapacitás
Pétfürdő – Dunaújváros	60 km	180 m ³ /óra
Közúti és vasúti szállítás		

A közúti szállítás lehetősége minden esetben fennáll a kibocsátók és a potenciális felhasználók között. A vasúti szállítás a kisebb felhasználók esetében csak kevés esetben érhető el.

Közúti szállítás kialakítása célszerű a kibocsátóktól az italgártó és élelmiszeripari felhasználók felé. A vasúti szállítás elsősorban a közepes CO₂-igénnyel rendelkező műanyaggyártó és a gázgyártásban tevékenykedő felhasználók irányába alkalmazható.

12. táblázat A Dunamenti CCU/S Klaszter use case leírása, saját szerkesztés.

9.2. Üzleti modell / monetizációs lehetőségek

9.2.1. CCU/S üzleti modellek jellemzői

A sikeres CCU/S projektek indításához és megvalósításához olyan üzleti modellekre van szükség, melyek biztosítják a finanszírozási forrást és a kiszámítható bevételáramot, gondoskodnak a kockázatok szereplők közötti megosztásáról és elfogadható szinten tartásáról teljes társadalmi elfogadottság mellett, valamint figyelembe veszik a CO₂-értékláncban elfoglalt pozíciót és a tevékenységhez szükséges partnerkapcsolatokat. 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. Ez a rendszerszintű üzleti modell a CCU/S értéklánc egészében meghatározza az állami és a piaci szereplők feladatait és felelősségeit, közöttük a kockázatok elosztását, továbbá gazdasági ösztönzőket, potenciális bevételáramokat és a megtérülést támogató pénzügyi mechanizmusokat vezet be.²⁴⁴

A CCU/S ipar fejlődését eredményesen támogató rendszerszintű modellek biztosítják a megtérülést, tisztázzák és elosztják a kockázatokat a tulajdonjogok és kötelezettségek meghatározásán keresztül, egyúttal védik a szereplőket az értékláncon átgúrózó kockázatok hatásaitól. Továbbá képesek piaci finanszírozást bevonni a szegmensbe, illetve lehetővé teszik első generációs és érettebb projektek elindítását is. A keretrendszernek mindezekon felül összhangot

kell teremtenie az egyéb ágazati és dekarbonizációs politikákkal, valamint nem ösztönözhet a tevékenység határon kívül helyezésére. Nem létezik mindenkire egyaránt érvényes megközelítés, emiatt a CCU/S rendszerszintű modellnek igazodnia kell a nemzeti adottságokhoz.^{245,246}

A CCU/S rendszerszintű modellnek figyelembe kell vennie, hogy a szén-dioxid befogásának, illetve a szállításának, tárolásának technikai és gazdasági jellemzői különböznek. A befogási tevékenység esetén figyelembe kell venni a kibocsátási pontok sokszínűségét és egyedi adottságaik változatosságát, valamint versenyképessé kell tenni a CCU/S technológiát az alternatív dekarbonizációs megoldások mellett. A szállítási és a tárolási tevékenység esetén fontos szempont, hogy ezek – a közművekhez hasonlóan – jól szabályozhatók, továbbá csökkenthetők a költségek és kockázatok a közösen hasznosított, megosztott infrastruktúrák létesítésének ösztönzésével. A helyi hasznosítás esetét leszámítva a CO₂ leválasztását mindig követi a szállítás, majd a tárolás vagy felhasználás, így a rendszerszintű modellnek figyelembe kell vennie ezen tevékenységek összefüggéseit és egymásra épülését is.^{247,248}

Az egyes CCU/S szereplők a saját szervezeti és működési modelljük kialakítása során figyelembe veszik a rendszerszintű üzleti modell által kialakított szabályozói környezetet és gazdasági ösztönzőket, valamint az értékláncban elfoglalt pozíciójukat, a rendelkezésre álló technológiákat, illetve a piaci feltételeket és lehetőségeket. A szervezeti üzleti modellek kritikus eleme a pénzügyi (bevételi) modell, mely meghatározó az eredményesség és a megtérülés szempontjából, illetve kihat a többi komponensre is (61. ábra).



61. ábra A rendszerszintű modell és szervezeti üzleti modellek elemei, ^[249] alapján saját szerkesztés.

9.2.2. Bevételi modellek CCU/S projektek számára

A CCU/S projektek eredményessége elsősorban azon múlik, hogy létezik-e hosszútávú és stabil bevételi forrás, mely képes a beruházás megtérülését biztosítani.²⁴⁷ A piaci szereplők számára a CCU/S alkalmazások kockázatai akkor vállalhatók, ha biztosított az egyértelmű és kiszámítható bevételáram. Ennek hiánya elemi akadályt jelent a CO₂-befogás, -hasznosítás és -tárolás elterjedésére nézve. Az állam támogató jogszabályi keretrendszer és pénzügyi ösztönzők megalkotásával meghatározó hatást gyakorolhat a lehetséges bevételi forrásokra.

A magyar kormány vállalta a Zöld Államkötvény kibocsátását. A Zöld Államkötvény egyfajta állampapír, amely a magyar adósságfinanszírozást szolgálja csakúgy, mint bármely államkötvény, azzal a megkötéssel, hogy az ebből befolyó összeget csak klímavédelmi szempontból közvetlenül vagy közvetetten előnyös beruházásokhoz lehet felhasználni, és annak hatását évente hatásvizsgálattal kell bizonyítani. A Zöld Magyar Államkötvény kibocsátásából befolyó összeg a központi költségvetés hiányának részbeni finanszírozását, valamint az államháztartás központi

alrendszere adósságának megújítását szolgálja akként, hogy a befolyó összeget a kibocsátó Magyarország központi költségvetésében található olyan kiadások finanszírozására vagy újra-finanszírozására szándékozik felhasználni, amelyek előmozdítják az alacsony szén-dioxid-kibocsátású, az éghajlatváltozás hatásaival szemben ellenállóképes és környezetileg fenntartható gazdaságra való áttérést a szuverén Zöld Kötvény Keretprogramjával összhangban²⁵⁰. A zöld kötvények birtoklásával járó bevételekre adókedvezmények vonatkoznak. Ezen állampapírok jellemzően hosszú (5-7-10-15-30 éves) lejáratú időkkel rendelkeznek, így az alapvetően környezettudatos befektetési attitűdön túl az előrelátó, hosszútávra tervező befektetők számára az adókedvezmények még inkább vonzó lehetőséggé tehetik őket.

9.2.2.1. Különbözeti szerződés

A különbözeti szerződés (Contract for Difference, CfD) a dekarbonizációs technológiák támogatásának széleskörben alkalmazott eszköze, mely elsősorban az új megoldások elterjedésének kezdeti szakaszában eredményes.^{18,137,245,247} A keretében a befogott szén-dioxid átvételére célárat határoz meg az állam, és amennyiben a piaci ár ez alatt marad, a különbséget megtéríti a kibocsátó számára támogatás formájában. Viszont, ha a piaci ár meghaladja a

célárat, a kibocsátónak vissza kell fizetnie a többletbevételt. A különbözeti szerződés kiszámítható és biztos bevételi forrást jelent a CCU/S projekt megvalósítójának, így a megtérülés kockázatát jelentősen csökkenti. További előnye, hogy mindezt relatíve kevés adminisztrációs igény mellett képes elérni (pl. az elismert eszközérték alapú megközelítéshez képest). A CO₂-célár vonatkozhat a kibocsátás vagy az előállított termék mennyiségi egységére, továbbá meghatározható közvetlen fizetendő ár vagy a piaci ár feletti prémium formájában is. A CO₂-gazdaság bővülésével akár befogási projektenként egyedi célár is meghatározható, például aukciós eljárások alkalmazásával. Az Egyesült Királyságban bevezetésre kerülő CO₂-leválasztási rendszer-szerű CCU/S üzleti modellek a különbözeti szerződés eszközt alkalmazzák.

9.2.2.2. Adókedvezmény, adójóváírás

A CCU/S megoldások alkalmazása után igénybe vehető adókedvezmények csökkentik az érintett vállalatok kötelezettségeit, ily módon az elkerült adóteher formájában bevételáram jelentkezik.^{18,137,247,249} Közismert és elterjedt, gyakran és számos különböző célból alkalmazott támogatási forma. A jóváírás mértéke a befogott CO₂ mennyiségével lehet arányos. Az adókedvezmények rendszerét az állam nagy mértékben képes a CCU/S szektorhoz kapcsolódó fejlesztési céljaihoz igazítani. Eltérő jóváírási mechanizmus alakítható ki a geológiai formációkban tartósan eltárolt és a különböző módokon hasznosított szén-dioxidra. Továbbá különbség tehető a kibocsátó szektorok, illetve tevékenységek között, figyelembe véve a CO₂ leválasztásának eltérő technológiai megoldásait és költségeit. Az adókedvezmények hátránya, hogy csak évente folyósított támogatást jelentenek, ezért a szereplők kihívásokkal szembesülhetnek a CCU/S tevékenység évközi finanszírozása során. Adójóváíráson alapuló támogatási rendszert vezetett be az Egyesült Államok (45Q és 48A).

9.2.2.3. Karbonadó

A karbonadó a CO₂-kibocsátásra kivetett adó, mely beépül az előállított termék vagy a nyújtott szolgáltatás árába.^{18,247} Ily módon segíti az alacsonyabb karbonintenzitású termékek versenyképességét, és bővíti piacukat a magas kibocsátással járó helyettesítőkkal szemben. Továbbá növeli a kibocsátáscsökkentő intézkedések megtérülését, ösztönözve ezzel a vállalatokat a dekarbonizációs projektek megvalósítására. A CCU/S technológiát alkalmazók számára a bevételáram jelentkezik az elkerült kibocsátás miatti csökkentett adóteher formájában, illetve a bővülő piacon eladott

többlettermékek árbevételeként. A karbonadó kivethető abszolút módon, a kibocsátott CO₂ mennyiségi egységére vetítve, vagy egy meghatározott referenciához viszonyítva, az előállított termék karbonintenzitása alapján. Az eszköz alkalmazása nem igényel az állam részéről pénzügyi támogatást. Mivel az adó beépül az árba, a kibocsátás költségét a felhasználó fizeti meg. A karbonadó hatékony bevezetéséhez nemzetközi szinten összehangolt szabályozás vagy támogató vámintézkedések szükségesek. Ennek hiányában a hatálya alatt álló vállalatok hátrányba kerülnek a globális versenytársakkal szemben, valamint a tevékenységüket és kibocsátásukat más régiókba telepíthetik át. Jelenleg a karbonadó a CCU/S fejlesztések fő hajtóereje Norvégiában.

9.2.2.4. CCS karbonkreditek

A CCS karbonkreditre épülő rendszerben a leválasztási technológiát alkalmazó vállalatok az elkerült CO₂-kibocsátás mennyisége alapján karbonkrediteket kapnak.^{247,249} Emellett a szabályozó kötelező kibocsátáscsökkentési kvótát határozza meg a szereplők számára, melynek teljesítésére felhasználhatók a karbonkreditek. A kibocsátó a kvótától való elmaradás esetén a különbözetet köteles meghatározott áron megtéríteni. A CCS karbonkreditek szabadon kereskedhetővé is tehetőek, ekkor árukat elsősorban a piac határozza meg. Ebben az esetben az alacsonyabb fajlagos leválasztási költséggel rendelkező szereplőket a mechanizmus ösztönzi a számukra előírt kvótánál nagyobb kibocsátáscsökkentés elérésére, mert az így megszerzett többlet krediteket értékesíthetik más vállalatoknak. A magasabb fajlagos befogási költségű kibocsátók pedig választhatják a karbonkreditek megvásárlását, saját CCU/S beruházás megvalósítása helyett. A szereplők számára a bevételáram tehát származhat a kreditek eladásából, illetve jelentkezik a vásárlással vagy beruházással járó elkerült kvóta költség formájában. A CCS karbonkredit alapú megoldás lehetővé teszi, hogy a CO₂-leválasztási technológiák az elérhető finanszírozás hatékony felhasználásával terjedjenek, mivel elsőként a legkisebb költséggel járó beruházások valósulnak meg. Az állam a mechanizmus eredményes működése érdekében meghatározhat minimum és maximum kreditárat, továbbá újabb beruházások ösztönzése céljából növelheti a kvóta mértékét, illetve iparáganként, tevékenységenként eltérően állapíthatja meg azt. Jelenleg a CCS karbonkredit alapú mechanizmus csak javaslati szinten létezik, de hosszú ideje működnek más kredit alapú rendszerek, melyek tapasztalatai felhasználhatók a bevezetéshez.

Jelenleg az Európai Unióban a karbonkredit-rendszer nem ösztönzi a CCU/S megoldások elterjedését. Az ETS kizárólag a leválasztott CO₂ geológiai tárolását ismeri el kibocsátáscsökkentésként, illetve ehhez feltételként tűzi ki a csővezetékes szállítás alkalmazását is. Tehát a CCU/S technológiát bevezető vállalat nem ismertetheti el a befogott kibocsátását, amennyiben a CO₂ hasznosításra kerül. Ez magában foglalja a tartós (legalább évezredes) tárolást eredményező hasznosítási megoldásokat is, pl. a fokozott olajkihozatalt vagy a mineralizációval történő építőanyag-gyártást. Emiatt a CCU/S technológia elterjedését elsősorban a geológiai tárolás költsége határozza meg, ezáltal más, alacsonyabb költséggel és számottevő környezeti előnyökkel járó megoldások a háttérbe szorulnak. További hátrányt jelent a CO₂-leválasztás elterjedésében, hogy az ETS hatálya nem terjed ki minden kibocsátással járó ipari tevékenységre, pl. a biomassa alapú energiatermelésre, tehát ezen vállalatok esetében nem ösztönöz a CCU/S technológiák bevezetésére. Az Európai Unió CCU/S iparának fejlődése szempontjából kritikus az ETS szabályozás jövőbeni alakulása.

9.2.2.5. Kibocsátási teljesítménynorma alapú karbonkredit

A kibocsátási teljesítménynormára (Emission Performance Standard, EPS) épülő karbonkredit-rendszerben a kibocsátók EPS karbonkrediteket kapnak, amennyiben az előállított termék karbonintenzitása alacsonyabb egy előírt normához képest.²⁴⁷ Továbbá a szabályozó kötelező karbonintenzitás-csökkentési kvótát állapít meg a kibocsátók számára, valamint meghatározza a normaként alkalmazott referencia terméket. A szereplők a CCU/S alkalmazásával megszerzett karbonkrediteket felhasználhatják a kvóta teljesítésére, elmaradás esetén pedig a különbözetet kötelesek megtéríteni. Az EPS karbonkrediteket esetén is bevezethető a szabad kereskedés lehetősége, így a bevételáram származhat a többlet kreditek eladásából, illetve jelentkezhet a vásárlással vagy beruházással elkerült kvóta költség formájában. A kibocsátási teljesítménynorma alkalmazása esetén termék szinten szükséges meghatározni a kvótákat. Jelenleg az EPS karbonkredit alapú mechanizmus csak javaslati szinten létezik.

9.2.2.6. Elismert eszközérték

Az elismert eszközérték alapú modellben (Regulated Asset Base, RAB) a CCU/S projekt megvalósítója az infrastruktúra létesítéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódó költségeket

a felhasználóra hárítja a szabályozó által meghatározott tarifák és díjak formájában. Ez esetben a CCU/S tevékenység engedélyköteles, szabályozott módon folytatható. Az elismert eszközérték alapú modell a közműhálózatok esetén elterjedt. A tarifákat a szabályozó által kijelölt független hivatal állapítja meg meghatározott módszertan szerint, a költségtényadatokra támaszkodva. Elismerhető a tarifákban a tőke megtérülése, a működési és a leszerelési költségek, az amortizáció, továbbá figyelembe vehetők egyéb pénzügyi, adózási, beruházási elemek is. A CCU/S projekt indításához szükséges tőkebefektetés kockázata csökkenthető az elismert eszközérték alapú modellel, továbbá keresletcsökkenés, kapacitás-kihasználatlanság esetén az állam garanciát vállalhat a hiányzó bevétel megtérítésére. Az alacsony kereslet miatti kockázat elsősorban a CCU/S ipar kialakuló szakaszában jelentős. Az Egyesült Királyságban bevezetésre kerülő, CO₂-szállításra és -tárolásra vonatkozó rendszerszintű üzleti modell az elismert eszközérték alapú megoldásra épül.^{18,137,245,247}

9.2.2.7. „Költség plusz” támogatás

A „költség plusz” modellben a CCU/S projekt megvalósítója közvetlen állami támogatást kap, mely fedezi a jogosan felmerülő költségeket és a beruházások megállapodás szerinti megtérülését.^{18,247} Az így szerzett bevételáramnak köszönhetően a vállalat nem visel kockázatot és költséget, ezt az állam átvállalja tőle. Emiatt jelentős ösztönzést jelent a CCU/S alkalmazások létesítésére, és növeli a projektek életképességét. A mindenre kiterjedő támogatás azonban átfogóan nem ösztönzi a dekarbonizáció költségének csökkenését, ehhez további intézkedések, a támogatási modell bővítése szükséges. Továbbá kiemelkedő pénzügyi terhet jelent az állam számára, és más finanszírozási mechanizmusokkal összehasonlítva megkérdőjelezhető a „költség plusz” megoldás hatékonysága. A támogatás úgy is kialakítható, hogy a jogosan felmerülő költségeknek csak egy bizonyos, előre meghatározott részét fedezi. A Hollandiában működő, nagyszabású Porthos CCU/S projekt alkalmazza a „költség plusz” mechanizmust a CO₂-kibocsátók kompenzálására.

9.2.2.8. Alacsony karbonintenzitású termék értékesítése

Az alternatívákhoz képest alacsonyabb CO₂-kibocsátással előállított termékekért a felhasználók magasabb árat, „zöld prémiumot” hajlandók fizetni.^{18,247} A vállalat a karbonintenzitás-csökkentése miatti beruházási és működési költségeket a magasabb kínálati árral ismertetheti el. Ebből kifolyólag a kibocsátás költségét a felhasználó fizeti meg. Az értékesítéssel elért bevételáram stabilitása, illetve

kiszámíthatósága nagy mértékben függ az alacsony kibocsátású termék piacának fejlettségétől és a vásárlók által megfizetett zöld prémium mértékétől. Az állam több eszközzel támogathatja és fejlesztheti az alacsony karbonintenzitású termékek piacait, ezzel teremtve kiszámíthatóbb bevételi forrást és csökkentve a CCU/S projektek pénzügyi kockázatát. A zöld tanúsítványok és zöld termékcímkék bevezetése megismerteti a felhasználókat az alacsony kibocsátású termékekkel és ösztönzi őket a vásárlásukra. Szabályozási eszközökkel kötelezővé tehető a végtermékek előállításában az alacsony karbonintenzitású termékek használatának arányát, ezzel növelve a feléjük támasztott keresletet. Továbbá az állam maga is jelentős erővel rendelkező vásárlóként léphet fel a piacon. A termékértékesítésen alapuló bevételi modell olyan piaci megoldás, mely a CCU/S szegmens fejlődésével, hosszútávon állami beavatkozás nélkül is sikeres projektek indítását teheti lehetővé. Piacfejlesztő intézkedéseket vezetett be Hollandia az építőiparban az alacsony karbonintenzitású alapanyagok támogatására.

9.2.2.9. Szén-dioxid hasznosítása vagy piaci értékesítése

A CO₂ számos ipari folyamatban hasznosítható, ezáltal önmagában is rendelkezik gazdasági értékkel.²⁴⁹ A kibocsátó bevételi forráshoz juthat a befogott CO₂ értékesítésével, vagy lehetőség szerint alapanyagként hasznosíthatja azt saját további tevékenységeiben, ezzel elkerülve a beszállítótól való beszerzés költségeit. Ez abban az esetben jelent stabil bevételáramot, ha a befogás költsége nem haladja meg az alternatív előállítási forrásokból vagy kitermelésből származó CO₂ árát. Máskülönben a CCU/S projekt megtérüléséhez elengedhetetlen a további állami támogatás. Az

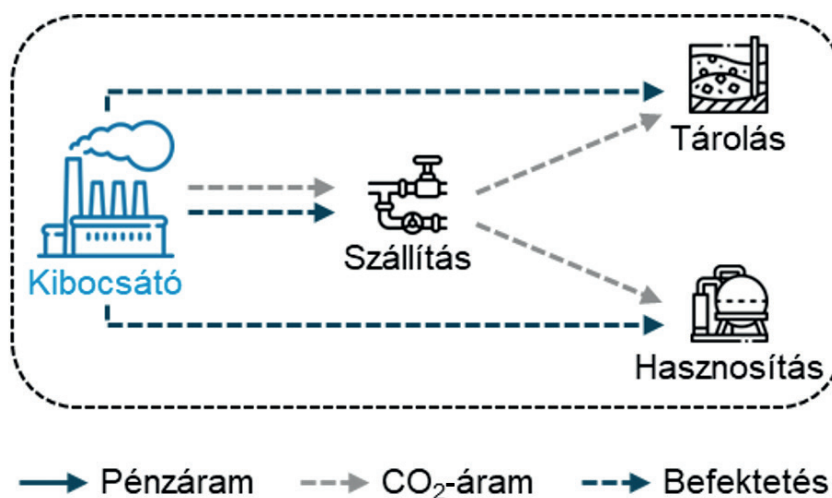
értékesítésen és felhasználáson alapuló bevételi modell teljesen piaci megoldás, mely a CCU/S szegmens fejlődésével, hosszútávon állami beavatkozás nélkül is sikeres projektek indítását teheti lehetővé. Jelenleg a CO₂ felhasználási módjai közül a fokozott olajkitermelés képes stabil bevételi forrást és megtérülést biztosítani CCU/S projektek számára.

9.2.3. Integrált üzleti modellek a CCU/S értéklánc mentén

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 modellek kialakítása során figyelembe kell venni a vállalat CCU/S szektorhoz kapcsolódó céljait és lehetőségeit, az alaptevékenységét, a meglévő és megszerzhető kompetenciáit, valamint a piaci és szabályozói környezetet. Az integrált CCU/S üzleti modellek meghatározzák a projekt értékláncban elfoglalt pozícióját, a felelőségek és a kockázatok megosztását az érintettek között, valamint a lehetséges bevételáramokat és a fő költségelemeket.

9.2.3.1. Vertikális integráció

Vertikális integráció esetén a kibocsátó kiterjeszti a tevékenységét a teljes CCU/S értéklánc mentén, és elvégzi a CO₂ leválasztását, valamint üzemelteti a szállítási infrastruktúrát, a felhasználási és a tárolási helyeket (62. ábra).^{137,247} A modell megvalósítása jelentős tőkeerőt és technikai képességeket igényel. A vállalatnál jelentkeznek a CO₂ befogásával, szállításával és tárolásával kapcsolatos beruházási és



62. ábra A vertikális integráció üzleti modell, ^[249] alapján saját szerkesztés.

üzemeltetési költségek, valamint a teljes értéklánc koordinációs költségei. A bevétel forrása lehet az elkerült kvóta költség, a szén-dioxid, az alacsony karbonintenzitású termékek vagy a többlet karbonkreditek értékesítése, valamint állami támogatás. Az értéklánc elemek teljes integrációjából kifolyólag a vállalat alacsonyabb tranzakciós költséggel valósíthatja meg CCU/S tevékenységét, illetve teljeskörű irányítással és felügyelettel rendelkezik, viszont a kockázatok megosztására korlátozottak a lehetőségei. A vertikális integrációra épülő üzleti modell elsősorban a nagy ipari és energetikai vállalatok, illetve állami nagyvállalatok számára lehet megfelelő választás.

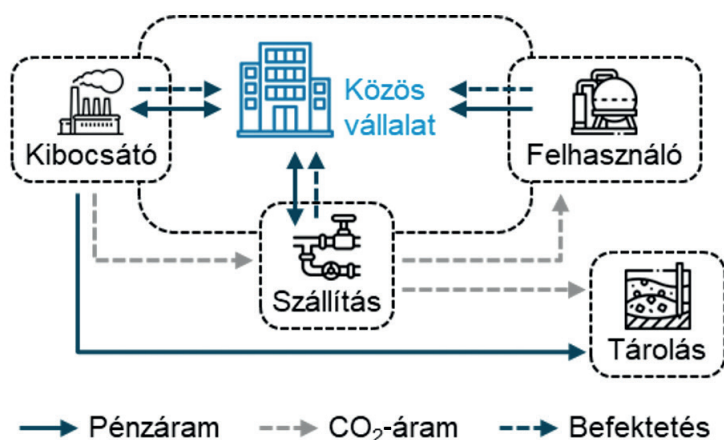
9.2.3.2. Közös vállalat

Közös CCU/S vállalat létrehozásával az értéklánc szereplői megoszthatják egymás között a tevékenység költségeit és kockázatait.^{137,247} Jellemzően a CO₂ kibocsátásban, a felhasználásban és a szállításában érintett szereplők alapítanak közös vállalkozást, melynek tipikus tulajdonosi szerkezete 40%-30%-30% szerint alakul. A kibocsátó a befogott szén-dioxidot értékesíti a felhasználó részére, vagy akár dönthetnek a CO₂ egészének vagy egy részének tartós tárolása mellett is. A kibocsátót a leválasztás, a szállítót az infrastruktúra költségei terhelik, a felhasználó pedig megfizeti a CO₂ beszerzési költségét. A bevételáram forrása a kibocsátónál a befogott CO₂ átadása és az elkerült kvóta költség, a felhasználónál az előállított termékek értékesítése, a szállítónál pedig az infrastruktúra használat díja. A közös vállalaton keresztül a szereplők korlátozott kockázatvállalás és a költségek megosztása mellett, illetve alacsonyabb koordinációs költséggel végezhetnek a teljes a CCU/S értékláncon átívelő tevékenységet (63. ábra). A szoros együttműködés miatt viszont felléphetnek koordinációs nehézségek,

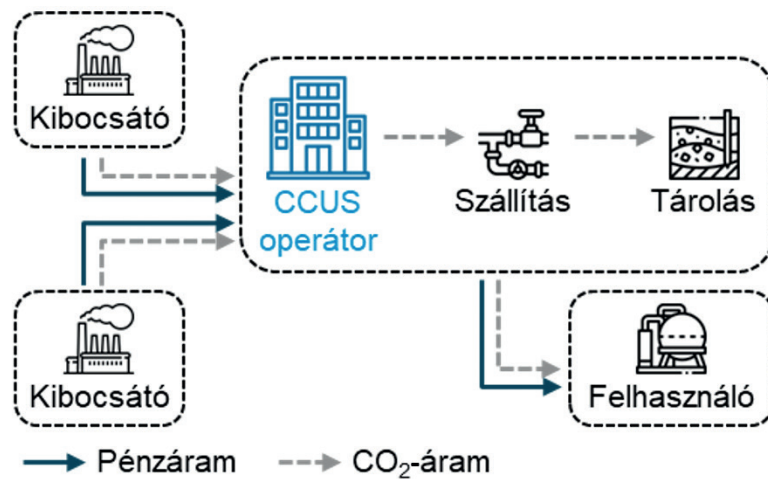
valamint az egyik szereplő kiválása akár a teljes tevékenység megszűnéséhez is vezethet. A közös CCU/S vállalat alapítása a közepes és nagy kibocsátók, illetve felhasználók számára lehet előnyös üzleti modell.

9.2.3.3. CCU/S operátor

A CCU/S operátor közvetlenül veszi át a szén-dioxidot a kibocsátótól, és akár a teljes értéklánc mentén szerepet vállalva gondoskodik a CO₂ befogásáról, szállításáról és tárolásáról vagy a felhasználók részére történő értékesítéséről (64. ábra).^{137,247} Ily módon a kibocsátó számára a CCU/S tevékenység egésze kiszervezhető. Az operátor több kibocsátóval is megállapodhat a CO₂ átvételéről, továbbá akár a teljes CCU/S értéklánc mentén jelen lehet és specializálódhat (hasonlóan a vertikális integrációhoz). A kibocsátó bevételárama az elkerült kvóta költségből vagy az előállított alacsony karbonintenzitású termékek értékesítéséből származik, költsége pedig az operátornak fizetett átvételi díj. Az operátort terheli a leválasztás, a szállítás és a tárolás beruházási és üzemeltetési költsége, bevételi forrását a kibocsátó által fizetett átvételi díj és a CO₂ értékesítése adja. Mindkét fél számára nyújthat az állam támogatást a befogott és a tárolt CO₂ mennyisége alapján. A modell a kibocsátó részéről nem igényel tőkebefektetést vagy szaktudást. A CCU/S operátor vállalat kiépítéséhez jelentős tőkeerőre és CO₂-kompetenciákra van szükség, ebből kifolyólag elsősorban a gáz- vagy olajipari nagyvállalatok számára jelenthet alkalmazható üzleti modellt.



63. ábra A közös vállalat üzleti modell, ^[249] alapján saját szerkesztés.

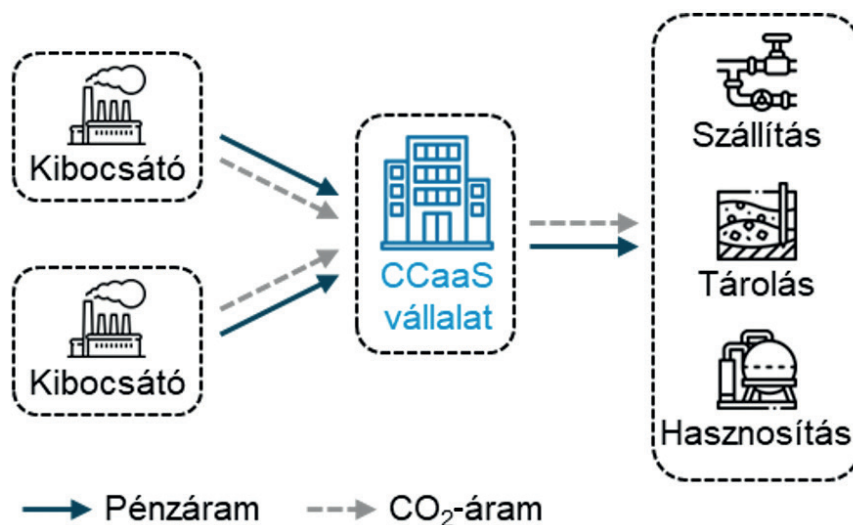


64. ábra A CCUS operátor üzleti modell, ^[249] alapján saját szerkesztés.

9.2.3.4. Carbon Capture as a Service

A CO₂-leválasztás nyújtható szolgáltatás formájában (Carbon Capture as a Service, CCaaS), melynek keretében a befogási szolgáltató vállalat a kibocsátó telephelyén telepíti és üzemelteti a szükséges infrastruktúrát, valamint összeköti a kibocsátót a szállítást és a tárolást végző szereplőkkel (65. ábra).²⁴⁵ A CCaaS vállalat rendelkezik a leválasztáshoz szükséges szaktudással és technológiával, valamint felel a CO₂ befogásáért és szállítási infrastruktúrába juttatásáért. A két fél közötti együttműködés egyedi lehet, melynek részleteit a szolgáltatási szerződés határozza meg. A kibocsátó a befogásért szolgáltatási díjat fizet, bevétele pedig az elkerült kvóta költségéből és az előállított alacsony

karbonintenzitású termékek vagy a CO₂ értékesítéséből származhat. A szolgáltató költségei a leválasztási infrastruktúra létesítéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódnak, bevételi forrása a szolgáltatási díj. Mindkét szereplő számára nyújthat az állam támogatást a befogott CO₂ mennyisége alapján. A szállítási, tárolási tevékenységet harmadik fél végzi, részükre a kibocsátó vagy a szolgáltató infrastruktúra használati díjat fizet. A modell a CCaaS vállalat számára lehetővé teszi a szabványosított és modulárisan alkalmazható leválasztási megoldások kifejlesztését, illetve alkalmazását, így növelve saját hatékonyságát. A kibocsátó számára egyszerű pénzügyi konstrukciót jelent, melyhez a részéről nincs szükség tőkebefektetésre és szaktudásra. A befogási szolgáltatás igénybevétele elsősorban a kis és közepes kibocsátók számára célszerű, a nagyobb CO₂-pontforrások esetén



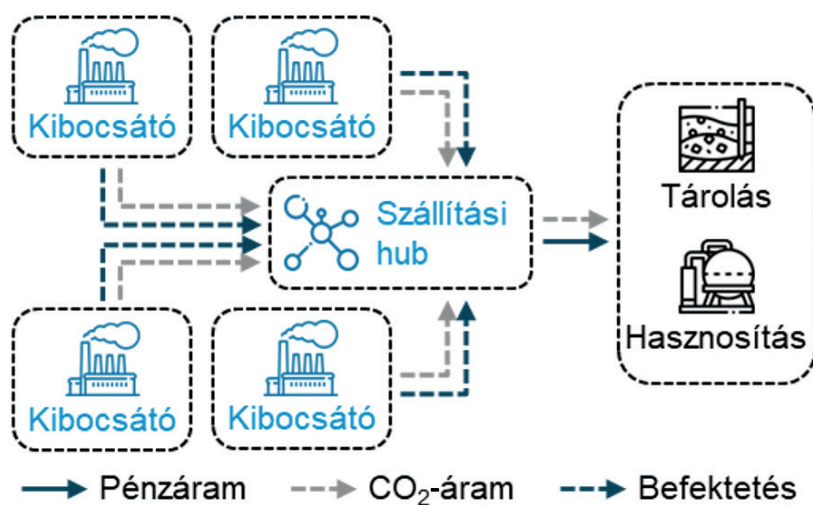
65. ábra A CCaaS üzleti modell, ^[249] alapján saját szerkesztés.

egyedi, személyre szabott megoldás lehet előnyös választás. A CCaaS vállalat szerepét elsősorban a leválasztásra specializálódó technológiai vállalatok tölthetik be, számukra megfelelő üzleti modellt jelenthet.

9.2.3.5. CCU/S klaszter

CCU/S klasztert alakíthatnak ki közös projektek megvalósításával az egymáshoz közeli elhelyezkedésű kibocsátók.^{137,249} A vállalatok a CO₂ leválasztását egyedileg végzik, azonban a szállításához és akár a tárolásához is közös infrastruktúrát építenek ki, melyet együtt hasznosítanak (66. ábra). A kisebb kibocsátók számára alternatív lehetőség, hogy kapcsolatot építenek ki egy már meglévő, nagy kapacitású CO₂-szállítási rendszerhez. A klaszterek kialakítása és bővítése során kiemelten fontos a kibocsátók együttműködése a tervezés és megvalósítás során, hogy a szállítási infrastruktúra képes legyen a különböző volumenű, eltérő szezonalitást, ingadozást mutató CO₂-áramok továbbítására, továbbá, hogy a tárolói helyszínek kapacitását optimálisan

tudják feltölteni. A klaszterek kialakítása költséghatékonyabbá teszi a CCU/S alkalmazását a kisebb kibocsátók számára is. Az infrastruktúra létesítéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódó költségeket a szereplők megosztják egymás között, ily módon számukra is megtérülővé válhat a leválasztási projektek megvalósítása. A bevételáramot az elkerült kvóta költsége, az előállított alacsony karbonintenzitású termékek vagy a CO₂ értékesítése jelenti, valamint a tevékenységhez az állam is nyújthat támogatást a befogott mennyiség alapján. A klaszterek szerepe számottevő lehet a CCU/S alkalmazások elterjedésében. Előnyös üzleti modellt jelent az egy térségben elhelyezkedő, kis és közepes kibocsátók számára, melyhez akár a nagy pontforrások is csatlakozhatnak a nagy kapacitású központi infrastruktúra biztosítójaként és az együttműködés koordinátoraként.



66. ábra A CCU/S klaszter üzleti modell, [249] alapján saját szerkesztés.



10 CCU/S MEGOLDÁSOK BUSINESS CASE KALKULÁCIÓI

10. CCU/S megoldások business case kalkulációi

Jelen fejezet a CCU/S modellek üzleti paramétereit vizsgálja és több nemzetközi szakirodalom által feldolgozott üzleti esetet mutat be. A fejezet célja, hogy magasszintű áttekintést adjon az egyes technológiák, megoldások beruházási és működtetési igényéről, valamint megtérülési képességéről.

Fontos hangsúlyozni, hogy az egyes CCU/S projektek jelentősen eltérőek lehetnek műszaki és gazdasági eredmények tekintetében. A bizonytalanság oka az egyes kibocsátó források és az egyes leválasztó technológiák egyedisége, az eltérő alkalmazott premisszák és a kevés működő projekt miatt rendelkezésre álló empirikus adatok, tanulmányok szűkössége. A CCU/S szakirodalom is nagyon széles spektrumban közöl műszaki- és költségadatokat.²⁵¹

A következőkben bemutatott példák célja a CCU/S projektek költségstruktúrájának, üzleti felépítésének bemutatása. Az egyes számított költségadatok jelentős bizonytalanságot hordozhatnak és technológiától függően jelentős eltérést mutathatnak egyes egyedi esetekben.

A legfontosabb műszaki és gazdasági paraméterek a CCU/S értéklánc mentén (leválasztástól a hasznosításig) kerülnek bemutatásra. Az első szakaszban bemutatjuk a leválasztás költségének szerkezetét a különböző iparági kibocsátások és leválasztási megoldások esetében. A leválasztás költségét főként a leválasztó berendezés beruházási és működtetési igénye határozza meg. A leválasztott CO₂-ot a felhasználási/tárolási pontig el kell juttatni, ezért a szállítási módot és távolságot is meg kell határozni, melynek eltérő költségvonzata lehet. A tárolás költsége nagyban függ az adott geológiai tároló adottságaitól (méret, geológiai tulajdonságok). A hasznosítás költsége attól függ, hogy milyen új beruházást igényel a termék előállítása és milyen működtetési költségekkel jár. A bevételi lehetőségek eltérnek. Alapvetően minden esetben a CO₂ költség (ETS esetében) megtakarítása jelent költségcsökkentést („bevétele”). Tárolás esetében nincs konkrét bevétele a megoldásnak. Hasznosítás esetében pedig a leválasztott CO₂-ból előállított terméket lehet értékesíteni. Fontos bevételi elem, hogy CCU/S alkalmazása révén alacsonyabb kibocsátású termék állítható elő, mely akár „felárral” is értékesíthető egyes piacokon.

10.1. Carbon capture – Szén-dioxid-befogási technológiák üzleti kalkulációja

Az szén-dioxid-befogás (CC) számos iparágban alkalmazható, más-más technológiai és gazdasági paraméterek mellett. Az alkalmazható CC technológiát elsősorban az adott iparág, illetve a kapcsolódó tevékenység során előállított termék és az alkalmazott termelési technológia határozza meg. A költségtényezőket a technológián felül befolyásolja a termelési egység tervezett élettartama, a termelés és az ezzel járó kibocsátás volumene, a kibocsátás koncentrációja, valamint az ezekből fakadóan megköthető CO₂ mennyisége. Ezentúl fontos a megkötés energiaigénye, forrása és ára, valamint az egyéb munkaerőigény és adminisztratív költségek. További költségtényezőként azonosítható a teljes projektköltségen felül a beruházás tőkeköltsége, mely magas inflációs- és kamatkörnyezetben jelentős hatással bír.

A CC projektek átlagos építési és integrációs ideje 3 év, melyen belül a CAPEX igény tényleges megoszlása eltérő. Az egyes elérhető tanulmányok specifikusak az adott termelő egység függvényében, technológiánként is igen eltérőek lehetnek, így általános értelmezésük, illetve implementálásuk konkrét projekt kapcsán különös körültekintést igényel. A következőkben szén-dioxid-leválasztási példákat foglalunk össze nemzetközi szakirodalmi tanulmányokból három különböző iparágban: hidrogén-előállítás, cementgyártás és földgázalapú villamosenergia-termelés. Az ismertetett nemzetközi üzleti példák célja bemutatni, hogy milyen beruházási és működtetési költségek merülnek fel a szén-dioxid-leválasztási projektek során, és ennek milyen hatása van az előállított termék egységárára és a leválasztás költségére. Mindhárom bemutatott példa esetében azzal a feltételezéssel élünk, hogy a leválasztott szén-dioxid szállításra és tárolásra kerül külső fél által.

10.1.1. Hidrogén-előállítás

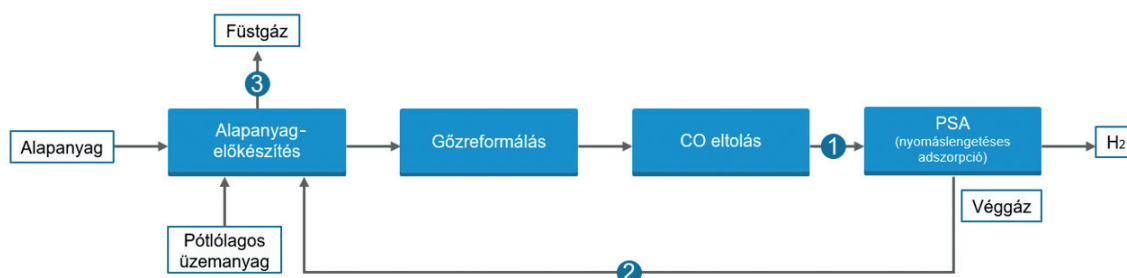
A hidrogén-előállítás piacvezető technológiája a metán (földgáz) gőzreformálása (SMR), mely elsősorban a vegyiparban és ammónia-előállításban használatos. A konvencionális hidrogén-előállítás jelentős kibocsátással jár, 1 kg hidrogén előállítása 8-10 kg CO₂-kibocsátással jár. Magyarországon kb. évi 150 kt hidrogén kerül előállításra ilyen üzemekben, melyek együttes kibocsátása meghaladja az 1 Mt CO₂-kibocsátást évente, ezért a hazai CCU/S iparág fontos célterülete lehet. A hidrogénelőállító SMR üzem jellemzően 4 blokkból áll: alapanyag előkészítés, reformálás, CO eltolás és PSA (nyomáslengetéses adszorpció) (67. ábra). Alapértelmezett esetben a CO₂-kibocsátás egy ponton, a

reformáló füstgázán keresztül távozik a légkörbe, mely a reformálás és a víz-gőz eltolási reakció során keletkezik; illetve a PSA vég-gáza és a földgáz, üzemanyagként való elégetése során az SMR kemencében. Ugyanakkor egy SMR üzemben több ponton is lehetséges a szén-dioxid-leválasztás:

- 1) szintézisgázból;
- 2) PSA véggázból;
- 3) az SMR füstgázából.

során a legfontosabb különbség az egyes megoldások energiaigénye. Pre-combustion megoldások esetében a földgáz-felhasználás (mint üzemanyag) kis mértékben, a post-combustion megoldás esetében pedig nagyobb mértékben (+10%) nő a szén-dioxid-leválasztó üzem megnövekedett gőzigénye miatt.

Fontos energetikai különbség továbbá a megnövekedett villamosenergia-igény. A vizsgált hidrogénelőállító üzem egy kombinált erőművi egységgel rendelkezik (bruttó 11



67. ábra SMR üzem egyszerűsített működési folyamata, [252] alapján saját szerkesztés.

A következőkben ezt a három esetet hasonlítjuk össze egy nemzetközi tanulmány alapján (13. táblázat).²⁵² A vizsgált esetek hidrogéntermelő kapacitása egyforma, 100 ezer Nm³/h. Két esetben (CC1 és CC2) pre-combustion szén-dioxid-leválasztás történik, ezek kibocsátáscsökkentési aránya 52-54%, míg a harmadik esetben (CC3) post-combustion leválasztás az SMR füstgázából, mely 89%-os kibocsátáscsökkentésre is képes. Az egyes esetek vizsgálata

MW kapacitás), mely az hidrogénelőállító egységek hőjét hasznosítja és a helyben fel nem használt villamos energiát a közcélú hálózatba táplálja. A szén-dioxid-leválasztóval rendelkező modellek esetében a leválasztás céljából megnövekedett energiaigény miatt a kombinált erőmű csak kismértékben képes a közcélú hálózatba táplálni, sőt egyes esetekben még további villamosenergia-igény is jelentkezik (CC2). Jelentős villamosenergia-igénye van a carbon capture üzemnek, illetve a CO₂-kompresszorállomásnak. Ez főként a post-combustion megoldás esetében kiemelkedő. Az adatokat az alábbi táblázat foglalja össze.



A modell legfontosabb műszaki és energetikai adatai:

	Mértékegység	Alapeset: SMR CO₂- leválasztás nélkül	Carbon Capture 1: SMR szintézisgáz CO₂-leválasztás	Carbon Capture 2: SMR PSA véggáz CO₂-leválasztás	Carbon Capture 3: SMR füstgáz CO₂- leválasztás
Leírás		Konvencionális hidrogén-előállítás	Pre-combustion (MDEA) carbon capture a szintézisgázból	Pre-combustion (MDEA) carbon capture a PSA véggázból	Post-combustion (MEA) carbon capture SMR füstgázból
Műszaki adatok					
Kapacitás	Nm ³ /h H ₂	100.000	100.000	100.000	100.000
CO ₂ -kibocsátás	kg/Nm ³ H ₂	0,8091	0,3704	0,3870	0,0888
Kibocsátás-csökkentés (alapesethez viszonyítva)	%	-	54,2%	52,2%	89%
Földgázfelhasználás (alapanyagként + üzemanyagként)	t/h	26,2	30,6	31,8	33,6
Villamosenergia-mérleg					
Kombinált erőmű bruttó kapacitása (SMR hulladék hő hasznosítása villamos energia előállításra)	MW	11,5	6,7	6,9	11,7
Erőmű saját fogyasztás	MW	0,366	0,377	0,397	1,677
H ₂ -előállító üzem	MW	1,21	1,25	1,26	1,31
Carbon capture üzem	MW	-	0,57	3,44	2,00
CO ₂ -kompresszor	MW	-	3,00	2,87	6,28
Közcélú hálózatra kiadható energia (vagy import igény)	MW	+9,92	+1,49	-1,07	+0,43

13. táblázat SMR CC esetek műszaki adatainak összefoglalója, [252] alapján saját szerkesztés.

A következőkben a legfontosabb gazdasági adatokat tekintjük át (14. táblázat). Az egyes esetek beruházási értékeit figyelembe véve elmondható, hogy a szén-dioxid-leválasztással felszerelt üzemek jelentősen tőkeigényesebbek. Minél magasabb a leválasztási ráta, annál több beruházást igényel. Az 52-54% körüli leválasztási rátával rendelkező

pre-combustion üzemek (CC1 és CC2) 18-32%-kal, míg a közel 90%-os leválasztási rátával rendelkező post-combustion üzem +50%-kal költségesebb. A szén-dioxid-leválasztás miatt történő beruházások közül a CC üzem és a CO₂-kompresszor értéke jelentős.

	Mértékegység	Alapeset: SMR CO ₂ -leválasztás nélkül	Carbon Capture 1: SMR szintézisgáz CO ₂ -leválasztás	Carbon Capture 2: SMR PSA véggáz CO ₂ -leválasztás	Carbon Capture 3: SMR füstgáz CO ₂ -leválasztás
Gazdasági adatok					
Beruházási igény	mEUR	171	202	226	305
H ₂ -előállító üzem	mEUR	98	98	98	98
Erőmű	mEUR	21	13	10	16
Carbon capture üzem	mEUR	-	22	47	96
CO ₂ -kompresszor	mEUR	-	16	17	27
Egyéb (energia infra és BoP)	mEUR	52	52	54	68
Működési költségek	mEUR/ év	79	82,5	83,8	90
Fix OPEX	mEUR/év	7,5	8,7	9,4	11,5
Változó OPEX	mEUR/év	71,5	73,8	74,4	78,5
Hidrogén egységköltség növekedése	%	-	+20%	+30%	+50%
Szén-dioxid-leválasztás költsége	EUR/ tCO₂	-	47,1	66,3	69,8
Szén-dioxid-szállítás és -tárolás	EUR/ tCO₂	-	15,4	15,4	15,4

14. táblázat SMR CC esetek gazdasági adatainak összefoglalója, [252] alapján saját szerkesztés.

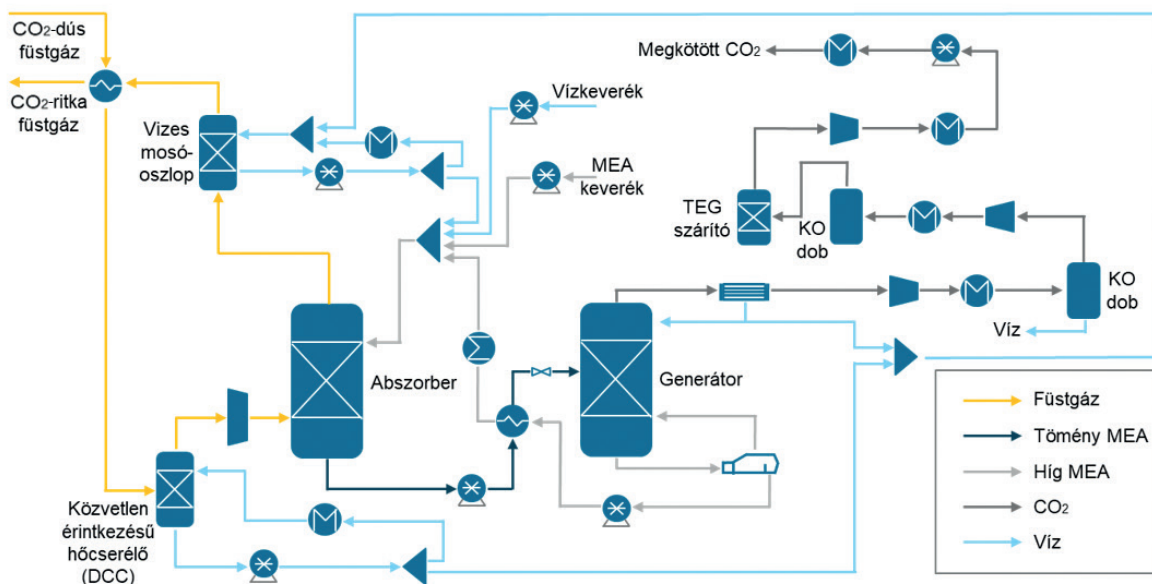
A működési költségek mérsékelten növekednek. Főleg a változó OPEX, ezen belül leginkább az üzem (energetikai célú) földgázfelhasználása nőtt meg.

A szén-dioxid-leválasztás egységköltsége ezen adatok alapján 47-70 EUR/t CO₂ között mozog megoldástól függően. A magasabb leválasztási arány (89%; CC3) nagyobb költséggel is jár. A tanulmány csak a szén-dioxid-leválasztást modellezi, azonban a teljeskörűség miatt feltüntetésre került a szén-dioxid-szállítás és -tárolás egységköltsége is, mely további 10 EUR/t CO₂-dal (Isd. tárolási üzleti eset bemutatása) növeli a teljes költséget. A termelt hidrogén egységköltsége 20-50%-kal növekedett az alapesethez képest.

10.1.2. Cementgyártás

A kémiai abszorpció eljárások közül a MEA (monoetanolamin) CO₂-leválasztás a fosszilis energiatermelésből, valamint ipari folyamatokból, többek között a cementégetőkből származó szén-dioxid-kibocsátás leválasztására általánosan használt post-combustion technológia. Az ebben a tanulmányban alkalmazott MEA leválasztási eljárást az alábbi folyamatábra mutatja be (68. ábra)²⁵³:

A CO₂-ban gazdag füstgázt először a CO₂-ban szegény füstgázzal hűtik egy gáz/gáz hőcserélőben, majd egy közvetlen érintkezésű hőcserélőben (DCC) tovább hűtik. A CO₂-ban gazdag füstgázban lévő vízgőz nagy része a DCC-ből távozik. A füstgázt ezután kompresszálják, majd az abszorberbe táplálják, ahol a CO₂-ot a MEA oldószer elnyeli. A CO₂-ban szegény füstgáz az abszorber tetejéről egy vizes gázmosó oszlopba kerül, ahol a MEA-t visszanyerik. A füstgázt ezután körülbelül 72 °C-ra melegítik fel a CO₂-ban gazdag füstgázzal, mielőtt a légkörbe engednék. A fűtés a kéményből származó füstgáz terjedésének és elosztásának biztosításához szükséges. Az abszorber alján található CO₂-ban dús MEA oldószer szivattyúzzák és melegítik a CO₂-ban szegény MEA oldószerrel ellenáramban hővisszanyerés céljából, mielőtt visszakerülne a regenerátorba. A felszabaduló CO₂-ot a regenerátor tetejéről nyerik vissza, és három kompressziós fokozatban, köztes hűtéssel és egy utóhűtővel ellátott szivattyúval kompresszálják a célnyomásra. A CO₂-ban lévő vízgőz legnagyobb része a kiütődobban (KO dob) kondenzálódik. Egy másik KO dob és egy TEG szárító használható a víz további eltávolítására, hogy megfeleljen a megkötött CO₂ víztartalom-specifikációjának. Az újraforralóból származó, CO₂-ban szegény MEA oldószer az abszorberbe



68. ábra A MEA alapú kémiai abszorpció post-combustion technológia, [253] alapján saját szerkesztés.

juttatják, miután szivattyúzzák, lehűtik és összekeverik a következő három árammal: pótvíz, pót-MEA, valamint a víz és MEA keveréke, amelyet a vizes gázmosó oszlop aljáról nyernek ki. Egy szivattyút, illetve egy vízűtőt használnak a víz nyomás alá helyezésére és hűtésére mind a DCC, mind a vizes gázmosó oszlop aljáról. A DCC-ben és a regenerátor kondenzátorában lecsapódott víz szintén visszakerül a vizes gázmosó oszlopba.

A következő tanulmány egy cementüzem klinkerkemencéjére kialakított szén-dioxid-leválasztásos projektet mutat be: a kemence teljes kapacitása évi kb. 1 millió tonna klinker, mely körülbelül 550 kt CO₂-kibocsátással jár (15. táblázat).²⁵³ Ez megközelítőleg 20%-os koncentráció mellett közel 90%-os rátával köthető meg MEA technológiával. A

tanulmány 2014-es adatokat használ egy konkrét cementgyár esetében, ezért egyes adatok - pl. energiaár, munkabér - a 2023-as magyarországi viszonyok szerint kerültek korrekcióra azon költségtényezők esetében, melyek az alapeset és a CC eset közti különbséget szignifikánsan befolyásolják, míg más - elsősorban beruházási és általános operatív - költségadatokat az EU-s inflációs rátával kerültek korrigálásra. Ezen költségtényezők rendre egy, illetve kettő csillaggal kerültek megjelölésre a 16. táblázatban.

A vizsgált cementüzem esetében 90%-os CO₂-megkötési ráta realizálható, mely jelentős energiaigénnyel jár: kb. 0,45 MJ/kg CO₂ fajlagos villamosenergia- és 3,8 MJ/kg CO₂ hőenergia többlet felhasználást eredményez. A villamosenergia-igény legnagyobb tényezője a CO₂-kompresszió.

Leírás	Mértékegység	Alapeset (konvencionális cementgyártás)	CC eset (cementgyártás CO ₂ - leválasztással)
Műszaki adatok			
Klinkerkapacitás, éves	ezer t	1000	1000
Cement-előállítás, éves	ezer t	1357	1357
Üzem élettartama	év	25	25
Építés, üzembe helyezés időtartama	év	2	3
CO₂-kibocsátási tényezők			
Fajlagos CO ₂ -kibocsátás	t CO ₂ /t cement	0,622	0,0622
Direkt CO ₂ -kibocsátás	ezer t	846	84,6
CO₂-megkötési ráta	%	0%	90%
CC villamosenergia-igénye	MJ/kg CO ₂	-	0,45
ebből kompresszor	MJ/kg CO ₂	-	0,31
ebből kiegészítő villamos energia	MJ/kg CO ₂	-	0,14
CC teljes hőenergia igénye	MJ/kg CO ₂	-	3,8

15. táblázat Cementgyári CC eset műszaki adatai, [253] alapján saját szerkesztés.

Gazdasági adatok

Premisszák

Nyersliszt ára**	EUR/t klinker	6,10	6,10
Tüzelőanyag (szén) ára**	EUR/MWh	13,2	13,2
Földgáz ára*	EUR/MWh	-	60
Villamos energia ára*	EUR/MWh	80	80
Víz (hűtéshez) ára*	EUR/m ³	-	0,63
Infláció, éves**	%	2,2%	2,2%
Karbantartási költségek, éves	TPC %-a	2,5	2,5
Munkabér/fő/év*	ezer EUR/év	25	25
Operatív munkaerő	fő	100	140
CO ₂ -szállítás és -tárolás költsége*	EUR/t CO ₂	-	10
Diszkontált CF ráta	%	8	8

16. táblázat Cementgyári CC eset gazdasági premisszái, [253] alapján saját szerkesztés.

A leválasztó technológia beruházásigénye magas, egy konvencionális cementgyár értékének több mint fele (53%) is lehet (17. táblázat). A fajlagos működési költségeket pedig több mint másfélszeresével növeli a magas energiaigény.

Beruházási költségek (CAPEX)

Teljes üzemköltség (TPC)**	millió EUR	247	377
Működési költségek (OPEX, O&M)			
Nyersanyag input (raw meal)**	EUR/t cement	4,49	4,49
Tüzelőanyag (szén)**	EUR/t cement	8,44	8,44
Villamos energia*	EUR/t cement	7,77	13,34
Hőenergia, gőz*	EUR/t cement	-	39,42
Víz (hűtéshez)*	EUR/t cement	-	0,79
Üzemeltetés, karbantartás, adminisztráció, support*	EUR/t cement	6,58	9,75
Egyéb költségek**	EUR/t cement	4,73	8,59
Fajlagos működési költség	EUR/t cement	32,0	84,8
CO₂-szállítás és -tárolás költsége	EUR/t cement	-	5,6

*: releváns benchmark alapján – nem inflációs korrekció

** : csak inflációval korrigált

17. táblázat Cementgyári CC eset gazdasági adatai, [253] alapján saját szerkesztés.

A folyamat nagy energiaszükségletéből kifolyólag komoly költségtételt jelent a villamos- és hőenergia költsége, különös tekintettel arra az esetre, ha a hulladék hő hasznosítására nincs lehetőség. A tanulmányban a CC folyamatához szükséges hőenergia nagyrészt földgázkazán által biztosított, azonban a teljes igény kb. 7%-ának a cementgyártás hulladék hőjével történő fedezésével is számolnak. Az energia árának csökkenése, illetve az olcsóbb hulladék hő magasabb arányú - pl. a tanulmány egyik scenáriója szerinti 30%-os – hasznosításával jelentősen csökkenthetők a fajlagos költségek.

A cement egységköltsége az alapesethez - kb. 50,3 EUR/t-hoz viszonyítva leválasztással és megkötéssel 126%-kal - 113,6 EUR/t -, szállítással és tárolással 137%-kal -119,2 EUR/t értékre növekszik (18. táblázat). A CO₂-megkötés teljes fajlagos költsége 113,1 EUR/t CO₂, illetve 123,1 EUR/t CO₂ körül alakul.

Ez magas CO₂-kvótaár mellett mutathat megfelelő üzleti megtérülést a termék értékesítésével realizálható zöld prémium mellett, különösen abban az esetben, ha a megkötött szén-dioxid egy része betonérlelésre/-kezelésre kerül hasznosításra, növelve ezzel az előállított beton ellenállóságát, tartósságát, valamint csökkentve gyártási idejét és fajlagos karbonlábnyomát.

Egy másik, 2023-ban publikált, 2018-as adatokat feldolgozó tanulmány egy konkrét híd teljes karbonlábnyomának számítása kapcsán vizsgálta a CCU/S hatását.²⁵⁴ A híd anyagszükségeit tekintve jelentős a cement és az acél, így ezeket kiemelten kezelte a tanulmány, az egyéb tényezők – pl. folyamati károsanyag-kibocsátások - változatlansága mellett. A tanulmány korábbi, elismert tanulmányok adatait vette számításba a CC költségének meghatározásához, hogy a gerendahidak esetében reprezentatív számításokat tudjon bemutatni. A cement-, illetve az acélglyártás során oxy-fuel, illetve post-combustion technológiát alkalmaztak, egyéb károsanyag-kibocsátáscsökkentési megoldást – pl. koks kiváltása megújuló hidrogénnel – nem eszközöltek.

EREDMÉNYEK			
CO ₂ -megkötés mennyisége, éves	kt CO ₂	-	761,
CO₂-megkötés költsége	EUR/t CO₂	-	113,1
CO₂-megkötés költsége szállítással és tárolással	EUR/t CO₂	-	123,1
Cement költsége	EUR/t cement	50,3	113,6
Cement költsége CO ₂ -szállítással és -tárolással	EUR/t cement	50,3	119,2

18. táblázat Cementgyári CC eset gazdasági eredményei, [253] alapján saját szerkesztés.

A cementgyártás tekintetében 90%-os megkötési ráta mellett a vizsgált híd esetében 60%-os volt a fajlagos költségnövekmény, bár a tanulmány megjegyzi, hogy ez az iparágon belül potenciálisan 65-95% közé tehető más projektekben az alkalmazott technológia és körülmények függvényében (19. táblázat).²⁵⁴ Az acél esetében 47%-os kibocsátáscsökkentés 13%-os költségnövekménnyel volt elérhető.

Tekintve, hogy a cement és az acél a CC technológia alkalmazása előtt a híd építési kibocsátásainak 81,5%-át, míg költségeinek mindössze 10,3%-át jelentette, a teljes híd tekintetében realizált 51%-os CO₂-kibocsátáscsökkenés mindössze 1%-os költségnövekménnyel volt elérhető.

A tanulmány – hivatkozva más, pl. az acél autóiparban betöltött hasonló hatásait vizsgáló kutatásokra – konklúziója szerint bár az egyes magas karbonintenzitású nyersanyagok kapcsán alkalmazott CC technológia az adott inputanyag fajlagos költségeit jelentősen növeli, az egyes komplex végtermékek szempontjából nézve a CO₂-kibocsátás fajlagos csökkentése relatíve alacsony költségvonzzal jár.²⁵⁴

10.1.3. Földgáz alapú villamosenergia-termelő CCGT erőmű

A CCGT erőműben a földgázt gázturbinában égetik el a villamos energia előállítására céljából. A gázturбина hulladék hőjét gőz előállítására használják, amely egy gőzturbinát hajt meg további villamos energia előállítására. A CCGT erőmű egy gázturbinából, egy hővisszanyerő gőzfejlesztőből (Heat Recovery Steam Generator, HRSG) és egy gőzturbinából áll. Ebben a konfigurációban a gázturбина füstgázát a HRSG-n keresztül vezetik, ahol gőz előállítása érdekében vizet melegít fel. A gőzt ezután a gőzturbinában villamos energia előállítására használják fel.

Az égetés utáni szén-dioxid-leválasztási technológia a füstgázból a HRSG-n áthaladó CO₂-kibocsátás leválasztását jelenti. Ez jellemzően amin alapú oldószerrel történik, amely abszorbeálja a CO₂-ot. Az oldatot ezután felmelegítik, hogy a CO₂ felszabaduljon, amely komprimálható és szállítható tárolás vagy felhasználás céljából.

A következőkben két erőmű példáján keresztül kerül bemutatásra a CCGT-n történő carbon capture, egy nemzetközi tanulmány alapján.^{255,256}

1. BASE CCGT: egy 2009-es, F-osztályú, egytengelyes, 50 Hz-es 420 MWe kapacitású CCGT (58% hatásfok), melyre CO₂-leválasztó üzem és kompressziós sziget kerül integrálásra. A konstrukcióban nagyon kevés integrációt terveznek, és az erőmű koncepciója egy BASE korai kereskedelmi célú leválasztó erőműre vonatkozik.

2. OPTI CCGT: korszerű, hatékonyabb azonos méretű CCGT (60% hatásfok).

EREDMÉNYEK			
Leírás	Cement	Acél	Gerendahíd
Mennyiség (kt)	76,5	24,2	n.a.
CO ₂ -megkötés aránya (%)	90	47	51
CO ₂ -megkötésből eredő költségnövekmény (%)	60	13	1
Fajlagos költségarány (%)	8	3	100

19. táblázat Cementgyári CC eset – egységköltségek változása, [253] alapján saját szerkesztés.

A két típusú erőművet szén-dioxid-leválasztás szempontjából hasonlítjuk össze (20. táblázat).

Mindkét esetben csökken a nettó termelőkapacitás a CC technológia implementációjával 17, illetve 13%-kal, az erőművek nettó hatékonysága pedig 10, illetve 8 százalékponttal romlik. A CC esetekben a megtermelt energia csökkenéséből fakadóan az egy MWh-ra jutó fajlagos CO₂-kibocsátás is nő.

A teljes beruházási költség a korábbi technológia esetében kb. 310 millió EUR, míg a fejlettebb CCGT esetében ennek kb. kétharmada, 220 millió EUR (21. táblázat).

A fix és a változó üzemeltetési és karbantartási költségek is jelentősen megnövekednek a CC által – a tanulmány becslése szerint kb. duplájára nőnek – a leválasztó üzem karbantartásából és a további munkaerőköltségekből, illetve a vegyianyag-költségekből, a hűtővízdíjból, valamint a hulladékártalmatlanításból fakadóan. A megkötési és leválasztási technológia fejlődésével a fix üzemeltetési és karbantartási költségek várhatóan csökkennek.

Leírás	Mértékegység	Alapeset 1. BASE CCGT	Carbon Capture 1. BASE CCGT	Alapeset 2. OPTI CCGT	Carbon Capture 2. OPTI CCGT
Műszaki adatok					
Nettó villamosenergia-termelő kapacitás	MWe	420	350	420	364
Üzemterhelési tényező	h/év	7.500	7.500	7.500	7.500
Erőmű élettartama	év	25	25	25	25
Nettó hatékonyság	% LHV	58%	48%	60%	52%
CO₂-kibocsátási tényezők					
Tüzelőanyag alapú fajlagos CO ₂ -kibocsátás	t/MWh	0,347	0,419	0,335	0,387
CO ₂ -megkötési ráta	%	-	86	-	86
Fajlagos megkötött CO ₂	t/MWh	-	0,360	-	0,332

20. táblázat Gázerőművi CC eset műszaki adatai, [255,256] alapján saját szerkesztés.

Gazdasági adatok

Beruházási költségek (CAPEX)

EPC költség	millió EUR	300	582	300	500
Fajlagos EPC	EUR/kW	714	1.662	714	1.374
Tőkeköltség	% EPC	10%	10%	10%	10%
Teljes CAPEX	millió EUR	330	640	330	550
Fajlagos CAPEX	EUR/MWh	9,8	22,7	9,8	18,8

Működési költségek (O&M)

Fix O&M	millió EUR/év	9	17,5	9	15
Változó O&M	EUR/MWh	2	4	1,4	2,8
Fajlagos O&M	EUR/MWh	5,8	12,6	5,1	9,8

21. táblázat Gázerőművi CC eset gazdasági adatai, [255,256] alapján saját szerkesztés.

Tekintve, hogy a CCU/S jelentős energiaszükséglettel bír, ez a költségstruktúrában is szignifikánsan megjelenik. Emiatt a következőkben három különböző scenárió kerül bemutatásra, alacsony (40 EUR/MWh), közepes (60 EUR/

MWh), illetve magas (80 EUR/MWh) földgáz árak mellett (22. táblázat).

A CO₂ szállításának és tárolásának költsége minden esetben 10 EUR/t CO₂-nak tekintett.

Eredmény a tüzelőanyag költségének függvényében

1. scenárió - 40 EUR/MWh földgáz ár

Fajlagos tüzelőanyag költség	EUR/MWh	77,5	93,6	74,9	86,4
Termelt villamos energia fajlagos ára	EUR/MWh	93,1	128,9	89,8	115,0
CO₂-megkötés költsége szállítással és tárolással	EUR/t CO₂	-	109,4	-	85,9

2. scenárió - 60 EUR/MWh földgáz ár

Fajlagos tüzelőanyag költség	EUR/MWh	119,8	144,7	115,8	133,5
Termelt villamos energia fajlagos ára	EUR/MWh	135,4	180,0	130,7	162,1
CO₂-megkötés költsége szállítással és tárolással	EUR/t CO₂	-	133,8	-	104,8

3. scenárió - 80 EUR/MWh földgáz ár

Fajlagos tüzelőanyag költség	EUR/MWh	162,0	195,7	156,6	180,7
Termelt villamos energia fajlagos ára	EUR/MWh	177,6	231,0	171,5	209,3
CO₂-megkötés költsége szállítással és tárolással	EUR/t CO₂	-	158,2	-	123,7

22. táblázat Gázerőművi CC eset eredményei, [255,256] alapján saját szerkesztés.

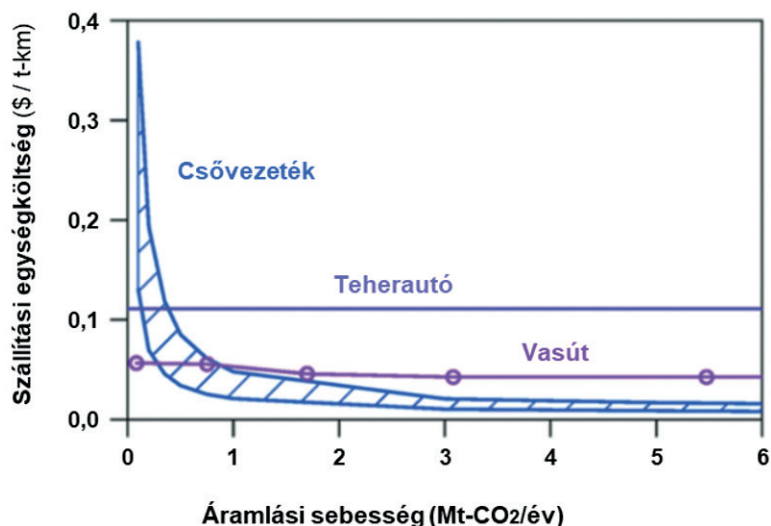
A legjelentősebb változó költségtétel a felhasznált energia(-hordozó) ára, amely a földgáz esetében jelenleg 60 EUR/MWh körül mozog, melyhez a fenti közül a 2. scenárió áll közel. Emiatt jelenleg Magyarországon a közeljövőben a közepes, illetve a magas energiaárat tartalmazó scenáriók lehetnek relevánsak (a következő évi határidős villamosenergia-árak alapján - HUDEX).

Ezek a BASE esetében 33, illetve 30%-os fajlagos energiatermelési költség növekedést jelentenek, míg az OPTI kapcsán ezek 24, illetve 22%-kal, jelentősen kisebb mértékben növekszenek. Összességében tehát megállapítható, hogy fejlettebb, hatékonyabb termelési technológia esetén nem csak a megtermelt villamos energia, de a CCU/S költsége is fajlagosan kisebb. A CO₂-megkötés fajlagos költsége szállítással és tárolással a korábbi technológia esetében a

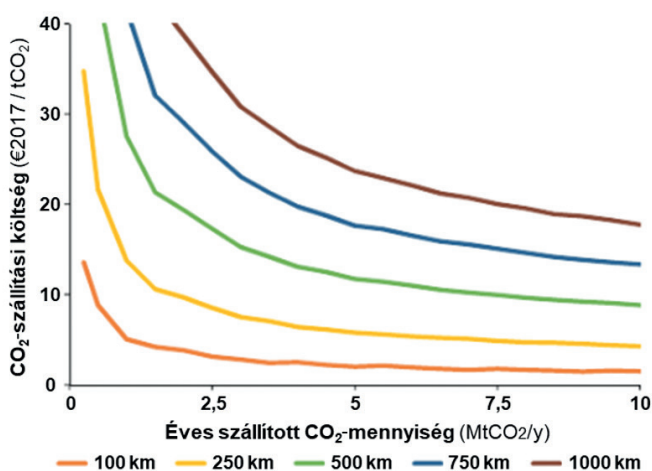
110-160 EUR/t CO₂, míg a fejlettebb CCGT esetében a 86-124 EUR/ t CO₂ intervallumra tehető a felhasznált energiahordozó árának függvényében.

10.2. Szén-dioxid-szállítás üzleti kalkulációja

A hazai CCU/S adottságokat figyelembe véve a nagy forgalmú szállítási útvonalak éves mennyisége várhatóan 2 millió tonna alatt, a kisebb forgalmú útvonalak mennyisége 0,1-0,5 millió tonna között alakul. Ebben a tartományban a CO₂ gazdaságos szállítása történhet csővezetéken, vasúton vagy közúton (69. ábra). Mindhárom megoldás esetén a továbbított mennyiség és a távolság a meghatározó a szállítási költsége szempontjából. Csővezeték esetén a fajlagos szállítási költség mérsékelhető a távolság csökkentésével, illetve



69. ábra Különböző szállítási módok fajlagos költsége (USD/tonna-km), [257] alapján saját szerkesztés.



70. ábra Csővezetékes szállítás fajlagos költsége a távolság függvényében (EUR/tonna), [258] alapján saját szerkesztés.

a volumen növelésével, mely esetben jelentős méretgazdaságossági potenciál aknázható ki (70. ábra). Vasúti és közúti szállítás esetében a fajlagos költség nagyobb volumenek mellett csak a távolságtól függ számottevően.

Magyarországon a nagy volumenű szén-dioxid továbbításának meghatározó módja a csővezetékes szállítás lehet, emiatt ezt mutatjuk be részletesen. A csővezetékes szállítás beruházási és működési költségeit a Zero Emissions Platform (ZEP) átfogóan elemezte és modellezte, módszer-tanát és eredményeit 2011-ben tette közzé.²⁵⁹ A ZEP tanulmány eredményeit a napjainkban megjelenő CCU/S tanulmányok is hivatkozási alapként tekintik. A tanulmányban

vizsgált forgatókönyvek közül az évi 2,5 millió tonna kapacitású, 180 km távolságú, szárazföldi csővezetékes szállítás közelíti legjobban a hazai viszonyokat, mely esetben a szállítás fajlagos költségére 5,4 euró/tonna adódott. Magyarországon a várhatóan kisebb szállítási volumenek miatt a csővezetékes CO₂-szállítás ennél magasabb fajlagos költség mellett valósítható meg. A költségek pontosabb meghatározásához a szállítási útvonal, a tervezett mennyiségek és az élettartam ismerete szükséges.

A ZEP előzetes feltételezései, input paraméterei és ezek hazai szempontú értékelése a következő (23. táblázat):

		Hazai összehasonlítás	Értékelés
Projekt jellemzők			
Projekt élettartam	40 év	Csak sósvízes akvíferes tárolás esetén várható.	
Megtérülés (WACC)	8%	Kezdeti projektek esetén magasabb az elvárt megtérülés.	
Input paraméterek			
Távolság	180 km	Nagy kapacitású vezetékek távolsága 100-200 km között várható (lsd. 9. fejezet).	Nincs számottevő hatása a fajlagos költségre
CO ₂ mennyisége	2,5 Mt/év	Nagy mennyiséget továbbító vezetékek éves forgalma 2 Mt alatt várható (ld. 9. fejezet).	Magasabb fajlagos költség várható (magasabb CAPEX)
CO ₂ mennyisége az élettartam alatt	100 Mt	Csak sósvízes akvíferes tárolás esetén érhető el, a kimerült szénhidrogénmezők lehetséges tárolási kapacitása ennél jóval kevesebb.	Magasabb fajlagos költség várható kimerült szénhidrogénmezős tárolás esetén
Csővezeték átmérő	~30,5 cm (12 inch)		
Villamos energia ára (főként a kompresszorok fogyasztása)	0,11 EUR/kWh		Magasabb villamos energia ár kis mértékben növeli a fajlagos költséget (magasabb OPEX)
További feltételezések			
A csővezeték belépési pontjára a CO ₂ -szállításra alkalmas állapotban (tisztaság, nyomás, hőmérséklet) érkezik, nincs szükség kezelésre.			
A csővezeték kilépési pontja a sajtoló kútnál található szelep és mérőállomás, mely a kapcsolódási pontot jelenti a tárolási infrastruktúrához.			
A sajtoló kúthoz CO ₂ 60 barg nyomáson (környezeti nyomáshoz viszonyított nyomás), 10 C° hőmérsékleten (várható talajmenti hőmérséklet) érkezik meg.			
A csővezeték nyomvonalra sík terepen vezet, egyszerű talajviszonyok mellett, különleges struktúrák nélkül (pl. mikroalagút, áttereszek).			

A beérkező CO₂-áram az év folyamán egyenletes, évi 7.500 órán keresztül, 333 tonna/óra.

23. táblázat CO₂-szállítási projekt feltételei, kiinduló adatai, ^[259] alapján saját szerkesztés.

A ZEP számításának eredménye a következő (24. táblázat):

Költség típus	Költség		Megjegyzés, értékelés
Költségek			
CAPEX	147,6 millió	EUR	Működés indulásakor, jelenértéken
Évesített CAPEX	12,38 millió	EUR/év	
OPEX	1,1 millió	EUR/év	6.000 EUR/km; elsősorban villamos energia
Éves költség	13,46 millió	EUR/év	
Fajlagos költségek			
Fajlagos költség (mennyiség)	5,38	EUR/tonna	Teljes élettartam (40 év) alatti mennyiségre (100 Mt) vetítve
Fajlagos költség (távolság)	74,76 ezer	EUR/km/év	

24. táblázat CO₂-szállítási projekt gazdasági adatai, [259] alapján saját szerkesztés.

A CO₂ csővezetékes szállításának fő költségtényezői a következők: megvalósíthatósági tanulmányok és útvonal kiválasztása, üzleti tervezés, mérnöki tervezés (Front-End Engineering Design), engedélyeztetés és jóváhagyások megszerzése, beruházási és finanszírozási költség, részletes tervezés és kivitelezés, üzemeltetés, leszerelés.²⁶⁰ A CCU/S szegmensben tevékenykedő piaci szereplők adózás utáni nyereség elvárása várhatóan a befektetett tőke 8%-a (korábbi tanulmányok alapján 6-10% közötti sávba tehető). A CCU/S ipar korai szakaszában a magasabb kockázatból kifolyólag a hozamelvárások valószínűleg magasabbak.

A csővezetékes szállítás összköltségén belül jelentős részarányt képviselnek a beruházáshoz kapcsolódó költségek (CAPEX). Emiatt a fajlagos szállítási költség csökkentése elsősorban a teljes élettartam alatti volumen növelésével érhető el. A gazdaságos CO₂-szállítás feltételei Magyarországon a CCU/S klaszterek kialakítása és közös szállítási infrastruktúra létesítése, valamint sósvizes akviferes tárolók kiépítése, célszerűen a leművelt szénhidrogénmezőkön létrehozott tárolók közelében, melyhez az ország geológiai adottságai kedvezők. A csővezetékes szállítás összköltségén belül alacsony a működési költségek (OPEX) aránya, emiatt a villamos energia

árának változása nem befolyásolja érdemben a fajlagos költséget.

10.3. Szén-dioxid-tárolás üzleti kalkulációja

A CO₂ földalatti tárolásának beruházási és működési költségeit a Zero Emissions Platform átfogóan elemezte és modellezte, módszertanát és eredményeit 2013-ban tette közzé.²⁶¹ A ZEP tanulmány eredményeit a napjainkban megjelenő CCU/S tanulmányok is hivatkozási alapként tekintik. A tanulmányban vizsgált forgatókönyvek közül a szárazföldi, hasznosítható felhagyott kutak nélküli kimerült szénhidrogénmezős, illetve a sósvizes akviferes tárolás közelíti legjobban a hazai viszonyokat. Előbbi esetben a tárolás fajlagos költségére 1-10 euró/tonna, utóbbi esetben 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 sósvizes akviferek esetében viszont elérhető ez a tartomány. A költségek pontosabb meghatározásához a tárolói formáció geológiai jellemzőinek, kapacitásának és sajtolhatóságának, a lezárás utáni kötelezettségek, a működési élettartam ismerete szükséges.

A ZEP előzetes feltételezései, input paraméterei a következők (25. táblázat):

Költség típus	Költség (forgatókönyvenként)			
		Alacsony	Bázis	Magas
Projekt jellemzők				
Működési élettartam	év	40	40	40
Lezárás utáni megfigyelés	év	20	20	20
Hozamelvárás (WACC)	%	6	8	10
Tárolói paraméterek				
Tárolói kapacitás	Mt	200	66	40
Tároló helyszínek száma	db	1	3	5
CO ₂ -tárolás éves mennyisége	Mt/év/tároló	5	1,65	1
CO ₂ -tárolás teljes mennyisége	Mt	200	200	200
Tárolói mélység	m	1.000	2.000	3.000
Sajtolhatóság	Mt/év/kút	2,5	0,8	0,2
Sajtoló kutak	db	3	9	30
Monitoring kutak	db	1	1	2
Projektszakaszokhoz kapcsolódó paraméterek				
Sajtolási tesztek	EUR/projekt	1 millió	3 millió	5 millió
Engedélyeztetés	EUR/projekt	1 millió EUR		
Kút létesítés CAPEX	Iparági tapasztalat %-ában	50%	100%	150%
Sajtolás OPEX	CAPEX %-a	Kapcsolódó CAPEX 4%-a		
Felszíni infrastruktúra OPEX	CAPEX %-a	Kapcsolódó CAPEX 4%-a		
Monitoring OPEX	CAPEX %-a	Monitoring CAPEX 15%-a		
Lezárás költsége	CAPEX %-a	Kapcsolódó CAPEX 15%-a		
Sajtolás OPEX	CAPEX %-a	Kapcsolódó CAPEX 4%-a		
Pénzügyi biztosítékok, kötelezettségek	EUR/tonna	0,2	1	2
További feltételezések				
Jól megalapozott tároló jellemzés áll rendelkezésre a leművelt szénhidrogénmezőkről, emiatt nincs szükség szeizmikus mérésre, feltáró kutakra.				
Tárolói jellemzéshez a sósvizes akviferek esetében 2-7 feltáró kút, valamint egy szeizmikus mérés szükséges. A kutak harmada később hasznosítható sajtolási vagy monitoring célból.				
Felszíni infrastruktúra kimerült szénhidrogénmező esetén rendelkezésre áll, csak felújításra van szükség, sósvizes akvifer esetén teljes kiépítés szükséges.				
Tapasztalatszerzésből fakadó költségmegtakarítás a gáz- és olajipari tapasztalatok alapján az OPEX 3%-a, melyet kis jelentőségéből fakadóan a számítás nem vesz figyelembe.				
A sajtoló kúthoz a CO ₂ besajtolásra alkalmas állapotban (tisztaság, nyomás, hőmérséklet) érkezik, nincs szükség kezelésre.				
A lezáráshoz és a lezárást követő megfigyeléshez kapcsolódó költségek a CAPEX részeként kerültek kimutatásra.				
A lezárást követő megfigyelés időszakában felmerülő költségek hozzájárulása a tárolási költségekhez csekély, ezek diszkontálására nem éves alapon, hanem összegzés után került sor.				

25. táblázat CO₂-tárolás üzleti kalkulációjának kiinduló adatai, ^[261] alapján saját szerkesztés.

A ZEP számításának eredménye a következő a felhagyott kút nélküli kimerült szénhidrogénmezők esetén (26. táblázat):

Költség típus	Költség			
Projekt paraméterek				
Tárolt CO ₂ mennyisége	Mt	200	66	40
Működési élettartam	év	40	40	40
CO ₂ éves mennyisége	Mt/év	5	1,65	1
Költségek				
CAPEX	EUR	48 millió	48 millió	68 millió
Évesített CAPEX	EUR/év	4 millió	4 millió	6 millió
OPEX	EUR/év	2 millió	3 millió	4 millió
Fajlagos költségek				
Fajlagos évesített CAPEX	EUR/tonna	1	2	6
Fajlagos OPEX	EUR/tonna	<1	2	4
Fajlagos költség	EUR/tonna	1	4	10

26. táblázat CO₂-tárolás üzleti kalkulációjának gazdasági eredményei, [261] alapján saját szerkesztés.

A ZEP számításának eredménye a következő a sósvizes akviferek esetén (27. táblázat):

Költség típus	Költség			
Projekt paraméterek				
Tárolt CO ₂ mennyisége	Mt	200	66	40
Működési élettartam	év	40	40	40
CO ₂ éves mennyisége	Mt/év	5	1,65	1
Költségek				
CAPEX	EUR	70 millió	70 millió	89 millió
Évesített CAPEX	EUR/év	6 millió	6 millió	7 millió
OPEX	EUR/év	2 millió	3 millió	4 millió
Fajlagos költségek				
Fajlagos évesített CAPEX	EUR/tonna	1	4	7
Fajlagos OPEX	EUR/tonna	<1	2	4
Fajlagos költség	EUR/tonna	2	5	12

27. táblázat CO₂-tárolás (akvifer) üzleti kalkulációjának gazdasági eredményei, [261] alapján saját szerkesztés.

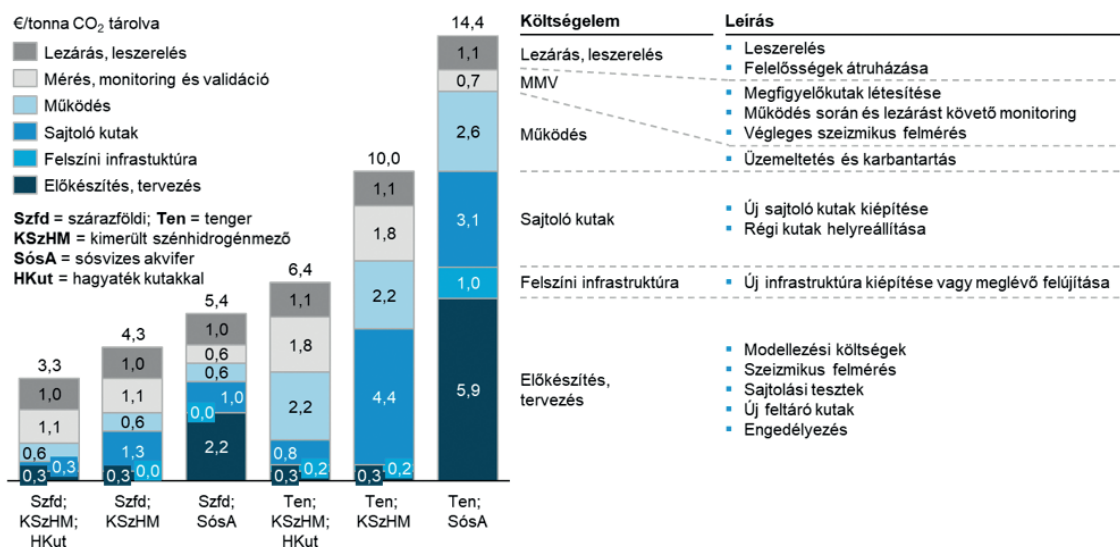
A CO₂ geológiai tárolásának fő költségtényezői az egyes projekt szakaszokban a következők (71. ábra)²⁶⁰:

- Finanszírozási döntést megelőzően: terület hozzáférési engedélyezés feltáráshoz, területfeltárás és -értékelés, telephelyjellemzés, mérnöki tervezés (Front-End Engineering Design), tároló engedélyeztetés
- Létesítés során: kutak és felszíni infrastruktúra kialakítása, finanszírozási költség, részletes tervezés és kivitelezés, monitoring alapállapot (baseline) felmérése
- Működés során: üzemeltetés (beleértve a monitoring tevékenységet), pénzügyi biztosítékok az üzemeltetési időszak során (beleértve a kockázatok és korrekciós intézkedések, valamint a leszerelési költségek fedezetét)
- Lezárás során és azt követően: leszerelés, lezárást követő monitoring és pénzügyi biztosítékok, helyszín átruházásakor felmerülő költségek
- Tárolásra vonatkozó különleges kockázati biztosítások és kötelezettségek

A CCU/S szegmensben tevékenykedő piaci szereplők adózás utáni nyereség elvárása várhatóan a befektetett tőke 8%-a (korábbi tanulmányok alapján 6-10% közötti sávba tehető).²⁶⁰ A CCU/S ipar korai szakaszában a magasabb kockázatból kifolyólag a hozamvárások valószínűleg magasabbak.

A szárazföldi tárolás fajlagos költségére legnagyobb hatással lévő tényezők a tárolói formáció kapacitása és sajtolhatósága, valamint a lezárás utáni kötelezettségek mértéke. A hazai kimerült szénhidrogénmezők relatíve kis CO₂-tárolói kapacitással rendelkeznek (többnyire 10 millió tonna alatt), ebből kifolyólag a fajlagos tárolói költség várhatóan meghaladja a tanulmányban ismertetett 10 euró/tonna értéket még a legkedvezőbb geológiai jellemzőkkel rendelkező formációk esetében is. A hazai sósvizes akvíferes formációkban a jelenlegi elméleti kapacitás becslések alapján potenciálisan kiépíthetők nagy kapacitású tárolók (akár 200 millió tonna is), melyekkel elérhető lehet a tanulmányban ismertetett 2-12 euró/tonna fajlagos tárolási költség. Azonban várhatóan közepes méretű tárolók (60-80 millió tonna) építhetők ki és működtethetők gazdaságosan, mivel a hazai CO₂-pontforrások elhelyezkedéséből és leválasztható kibocsátásából kifolyólag az éves tárolási mennyiség 2 millió tonna alatt várható.

A ZEP tanulmányai alapján Magyarországon várhatóan a szén-dioxid-szállítás költsége a jellemzőnek tekinthető 180 kilométeres távolságon 5,4 euró/tonna felett, a tárolás költsége kimerült szénhidrogénmezőkben 10 euró/tonna felett, míg sósvizes akvíferekben akár 2-12 euró/tonna között alakulhat.



71. ábra A ZEP tanulmány eredményeinek összefoglalása és a fő költségelemek áttekintése (bázis forgatókönyv fajlagos költsége, különböző tárolói megoldások esetén), [260] alapján saját szerkesztés.

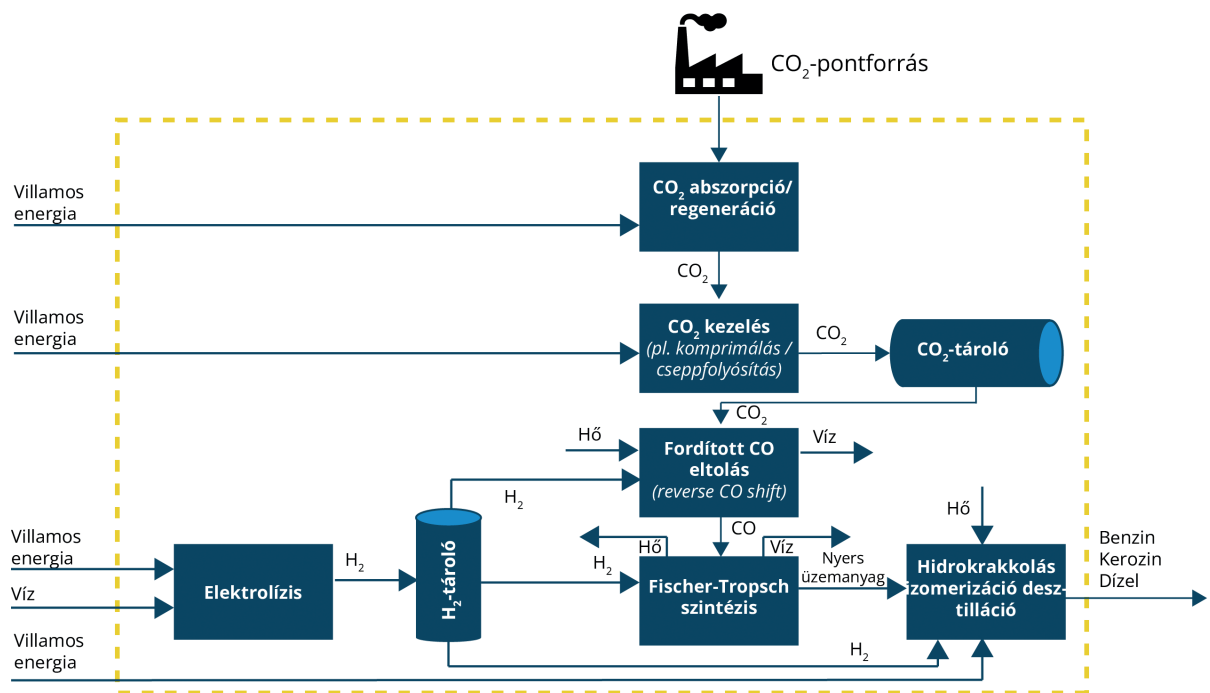
10.4. Carbon capture and utilization – Szén-dioxid-hasznosítási technológiák üzleti kalkulációja

A következőkben két szén-dioxid-hasznosítási megoldás üzleti elemzését mutatjuk be: szintetikuserozin-gyártás és CO₂ alapú polioldék-előállítás.

10.4.1. Szintetikuserozin-előállítás

A szintetikus kerozin, mint CCU termék azért lehet nagy jelentőségű, mert nagymértékben képes a légi közlekedés, mint az egyik legnagyobb és legnehezebben dekarbonizálható mobilitási szektor kibocsátásának csökkentésére. Emellett az EU Fit-for 55 csomag fontos része a fenntartható légiközlekedési üzemanyagok alkalmazásának kötelezése a légitársaságok számára. A fenntartható üzemanyagok alkalmazására vonatkozó kötelezésen belül kisebb részt

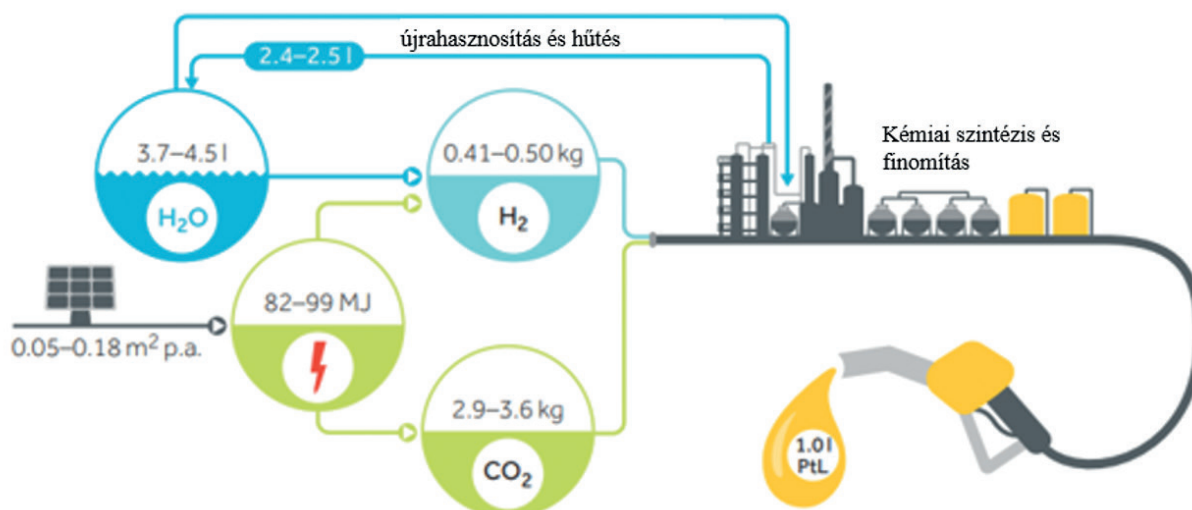
képviselenek a szintetikus üzemanyagok. A tervek szerint a légi közlekedésben felhasznált üzemanyagok egy részének szintetikusnak kell lennie a következők szerint: 2030-ra 0,7%; 2040-re 8%; 2050-re pedig 28%, a korábban említett RED III. pedig még ambíciózusabb célszámokat fogalmaz meg.²⁶² A szintetikus kerozin előállításához alapanyagként zöld hidrogénre és befogott szén-dioxidra van szükség. Első lépésként a szén-dioxidot szén-monoxiddá szükséges redukálni, majd a hidrogénnel való reagálása Fischer-Tropsch szintézis útján történik (alternatív esetben lehetséges metanol-szintézis révén is), melynek eredményeként előáll a szintetikus üzemanyag. Az egyik lehetséges előállítási módszer egyszerűsített értékláncát a következő ábra szemlélteti (72. ábra):



72. ábra Szintetikusüzemanyag-gyártás Fischer-Tropsch eljárással, elektrolízissel, [263] alapján saját szerkesztés.

Szintetikus kerozin előállításához nagy volumenben van szükség hidrogénre és szén-dioxidra: 1 liter szintetikus üzemanyaghoz 2,9-3,6 kg szén-dioxidra és 0,41-0,50 kg hidrogénre van szükség (73. ábra). A karbonmentes (zöld) hidrogén előállítása és szén-dioxid-befogása jelentős megújuló villamosenergia-igényt támaszt a teljes folyamat során. A szén-dioxid redukciója és a Fischer-Tropsch szintézis is további energiaigényt jelent a folyamatban.

felelős infrastruktúra, az elektrolízálók (~18 MW) teszik ki. A modell szerint az elektrolízálók közcélú hálózati csatlakozással rendelkeznek és magas kihasználtsággal, folyamatos üzem mellett működnek (8.000 h). Ha csak közvetlen időjárásfüggő megújuló termelőhöz kapcsolódnának, akkor további jelentős mennyiségű (akár 5-6x több) elektrolízáló kapacításra lenne szükség.



73. ábra Szintetikusüzemanyag-előállítás input igénye, [264] alapján saját szerkesztés.

A Fischer-Tropsch technológia kiforrott, gyakori az alkalmazása, jelentős fejlődés nem várható a közeljövőben. Az üzem magas kihasználtsággal és alacsony határfokkal (ált. 30-60%) működik.²⁶⁵ Az alábbi táblázatban egy kiválasztott nemzetközi példa legfőbb üzleti és működési adatai kerültek modellezésre.²⁶³ A bemutatott példa üzem 25 MW kapacitású, mely egy nagyméretű pilotnak felel meg (az első nem laborméretű szintetikus kerozin előállító üzem²⁶⁶ Németországban található és napi 1 tonna üzemanyag előállítására képes). Az üzem magas kihasználtság mellett (90+%) évi 5,7 kt kerozint képes előállítani. Ehhez évente közel 18 kt CO₂ és 2,88 kt H₂ szükséges. A teljes beruházás 32 mEUR, melynek legnagyobb részét a hidrogén-előállításért

A bemutatott szintetikus kerozin-gyár működési költsége jelentős. A teljes beruházási költség közel felét is kiteheti évente. A modellben a villamos energiát és a szén-dioxidot kívülről szerzi be az üzemegység, így ezek működési költségként jelentkeznek. A legnagyobb költségtényező (~80%) a villamosenergia-költség, mely túlnyomó többségben a hidrogén-előállításához kerül felhasználásra. Fontos költségtétel továbbá a szén-dioxid-, illetve az éves üzemeltetés és karbantartás (O&M) költsége.

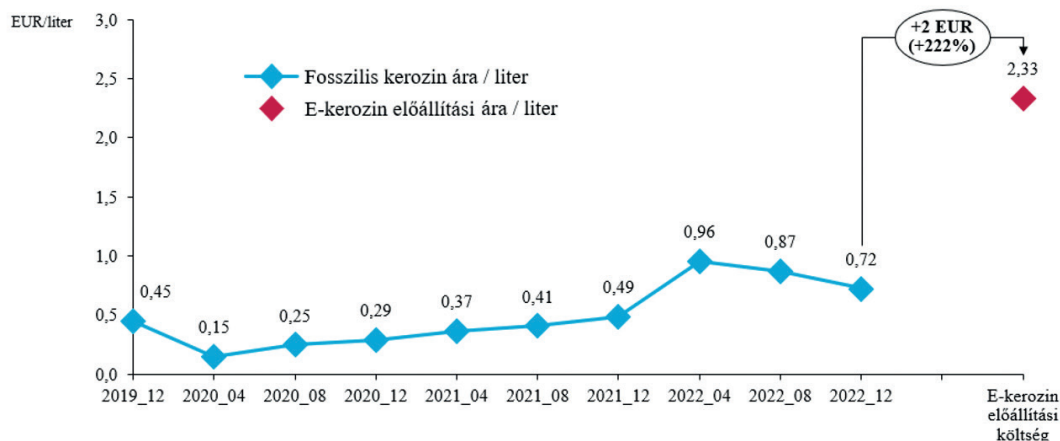
A modell kulcs adatai (28. táblázat):

Szintetikusüzemanyag-előállító üzem (Fischer-Tropsch eljárás)		
Műszaki adatok	Mértékegység	Érték
Kapacitás		
(villamosenergia input)	MW	25 MW
Kapacitás		
(szint. üzemanyag output)	MW	9 MW
Hatásfok	%	36%
Kihasználtság	%	91% (8.000 h/év)
Termelés mennyisége	tonna kerozin / év	5.760 t
Felhasznált CO ₂	tonna/év	17.856 t
Felhasznált H ₂	tonna/év	2.880 t
Elektrolizálás energiaigénye	kWh/kgH ₂	50
FT üzem egyéb energiaigénye	kWh _{áram} /kWh _{kerozin}	0,22
Beruházási igény	mEUR	32 mEUR
Elektrolizáló (18 MW PEM)	mEUR	18 mEUR
Hidrogéntároló	mEUR	6 mEUR
Fischer-Tropsch szintézis és finomítás	mEUR	8 mEUR
Működési költségek	mEUR/év	15,5 mEUR/év
CO ₂ ára	EUR/t	100 EUR
CO ₂ -költség	mEUR	1,8 mEUR
Villamosenergia-ár	EUR/MWh	80 EUR
Villamosenergia-költség	mEUR	12,7 mEUR
O&M egységár	CAPEX %-a	3%
Éves O&M költség	mEUR/év	1 mEUR
Élettartam	év	25 év
Előállítási egységköltség	EUR/MJ	0,06 EUR/MJ
	EUR/liter	2,33 EUR/liter

28. táblázat Szintetikuskerozin-előállítás modellezésének kulcs adatai, [263] alapján saját szerkesztés.

A fent bemutatott adatok alapján a kerozin számított egységára 2,33 EUR/liter. Az alábbi diagram szemlélteti ezt

az előállítási árat a konvencionális (fosszilis) kerozin piaci árához viszonyítva (74. ábra).



74. ábra Modellezett szintetikus kerozin előállítási ára és a kerozin piaci árának alakulása, [267] alapján saját szerkesztés.

A szintetikus kerozin előállítási ára jóval meghaladja a konvencionális kerozin árát. Még az elmúlt időszak (2022-es év) extrém magas árszintjéhez viszonyítva is 3-szor drágább, mint a fosszilis kerozin. A COVID előtti időszak árszínvonalának pedig az ötszöröse. Ennek ellenére a szintetikus kerozin piaca releváns terület lehet, mert jelenleg nincs érdemi dekarbonizációs alternatíva a légi közlekedésben. Mivel a fő költségtényező a zöld hidrogén, ezért a hidrogén-előállítás költségének csökkenése révén csökkenhet a szintetikus kerozin előállítási ára hosszútávon.

A szintetikus üzemanyagok előállítási lehetőségeit Magyarországon vizsgálja a Széchenyi István Egyetem, az Audi Hungária és a Szegedi Tudományegyetem alkotta konzorcium, és hamarosan elkészül az az innovációs teszttálmás, amelyen ez a technológiai folyamat tesztelhető.

10.4.2. Poliol-előállítás

A poliol alapanyaga a poliuretánnak, mely számos iparág (építőipar, autóipar, bútorgyártás hőszigetelés) fontos alkotóeleme. A poliol iránti kereslet folyamatosan nőtt az elmúlt években és további növekedés várható. Globális szinten évi 10 Mt/év került előállításra.²⁶⁸

A poliolygyártásban külső forrásból származó CO₂ is használható. A konvencionális poliolygyártási folyamat kiinduló anyagai a propilén-oxid (PO), glicerin (G) és monopropilén glikol (MPG). A reakció 135 °C-on és 3 bar-on történik. A CO₂ alapú poliolygyártás folyamata hasonló lépéseket követ, de a legfontosabb különbség az, hogy a propilén-oxid (PO)

egy része kiváltható CO₂-dal. A reakció a konvencionálishoz képest magasabb nyomáson (20 bar) történik. Az előállított poliol ideális CO₂ tartalma 20 tömegszázalék lehet. Ezen felüli CO₂ arány minőségromlást okozhat, hiszen a magas CO₂-tartalom megnöveli a poliol viszkozitását, mely már nem alkalmas flexibilis poliuretánhab-gyártáshoz.¹⁹⁴

A következőkben egy CO₂ alapú poliolygyártás modellezett esettanulmányát mutatjuk be.²⁶⁹ A feldolgozott eset a konvencionális poliolygyártást hasonlítja össze a CO₂ alapúval. A modellben a kiinduló eset egy finomító, ahol nafta alapú reformáló (hidrogénelőállító) és konvencionális poliolygyártó üzem található. A CCU/S esetben a hidrogén-előállító szén-dioxid-leválasztóval telepítik, és a leválasztott CO₂ nagyobb részben szállításra és tárolásra, kisebb részben pedig a poliolygyártásban kerül hasznosításra. Az eset azért kalkulál szén-dioxid-tárolással is, mert a példában alkalmazott kereskedelmi méretű poliol üzem (250 kt/év) egy nagyobb méretű reformáló (77 kt/év) üzem kibocsátásának csak 10%-át képes hasznosítani. A szén-dioxid-leválasztás „leskálázása”, azaz kisebb méretben való kivitelezése jelentősen rontja az üzem gazdaságos működési képességét.

A modell legfontosabb adatai (29. táblázat):

Poliolgyártás (konvencionális és CO₂ alapú módszer összehasonlítása)			
Műszaki adatok	Mértékegység	Konvencionális poliolgyártás	CCU/S alapú poliolgyártás
Leírás		Finomítói hidrogéngyártás (nafta reformálása) és konvencionális poliolszintézis	Szén-dioxid-leválasztás (WGS és kémiai abszorpció) és a leválasztott CO ₂ tárolása (90%) és hasznosítása (10%) a poliolszintézisben
Kapacitás	kt/év	77 kt H ₂ / év 250 kt poliol / év	77 kt H ₂ / év 250 kt poliol / év
CO ₂ -emisszió	kt/év	890	271
CO ₂ -tárolás	kt/év	-	495
CO ₂ -hasznosítás	kt/év	-	58
Leválasztott CO ₂	kt/év	0	552
Alapanyag és energiafogyasztás			
Nafta felhasználás	kt/év	70	60
PO (propilén-oxid)	kt/év	243	202
Primerenergia-felhasználás	GWh	125	623
Hűtővíz	kt/év	11.251	24.364
Villamosenergia-kapacitás	kW	1.920	7.576
Beruházási igény	mEUR	155	383
Hidrogén-előállító			
(konvencionális és carbon capture-rel)	mEUR	135	156
CO ₂ -szállítás és -tárolás	mEUR	-	206
Poliolszintézis (konvencionális és CO ₂ alapú)	mEUR	20	21
Működési költségek	mEUR/év	423,2	375,5
Nafta-előállítás és -szállítás	mEUR/év	33,7	28,7
Hidrogén előállító	mEUR/év	2,6	9,6
CO ₂ -szállítás és -tárolás	mEUR/év	-	2,7
Poliolszintézis (konvencionális és CO ₂ alapú)	mEUR/év	1,1	1,3
Vegyí alapanyagok	mEUR/év	384,4	332,0
Poliol-előállítás egységköltsége	EUR/kg_{poliol}	1,4	1,2

29. táblázat Poliolyártási CCU üzleti eset adatainak összefoglalója, [269] alapján saját szerkesztés.

A CCU/S alapú esetben jelentősen csökken az egységek kibocsátása, összességében 65%-kal. A fennmaradó 35% kibocsátásért a reformer kemence felel. A CCU/S forgatókönyv előnye, hogy kevesebb alapanyag-felhasználással jár, mint a konvencionális előállítási folyamat. 14%-kal kevesebb nafta szükséges, hiszen a CO₂-leválasztási folyamat során keletkező hő hasznosítható a reformer kemencében. Továbbá a leválasztott CO₂ a szükséges propilén-oxid 17%-át ki tudja váltani. A carbon capture és CO₂-kompresszor üzem miatt jelentősen megnő a víz- és villamosenergia-igény. A vízhasználat kétszeresére, a szükséges áramkapacitás-igény pedig közel négyszeresére nő.

A CCU/S forgatókönyv kialakítása jelentős beruházást igényel (+228 mEUR), melynek fő okozója a CO₂-tároláshoz és -szállításához kapcsolódik. A szén-dioxid-leválasztó üzem kismértékben, 15%-kal igényel több beruházást, míg a CO₂ alapú poliolgyártáshoz kapcsolódó beruházás csak 5%-kal költségesebb, mint a hagyományos.

A működési költségek legnagyobb tétele a poliolgyártáshoz használt alapanyagok (nafta és főként PO) költsége. A CO₂ alapú gyártásban a nafta költsége 15%-kal alacsonyabb (a fent kifejtett okok miatt). Ez képes részben a CO₂-szállítás és -tárolás OPEX-ét ellensúlyozni. A PO részbeni helyettesítése CO₂-dal pedig a szükséges alapanyagköltséget csökkenti 17%-kal. A carbon capture-rel felszerelt H₂ üzem működési költsége megnőtt, mely a capture és az azt követő kompresszió energiaigényével magyarázható. Összeségében a működési költségek 14%-kal csökkentek a hagyományos

megoldáshoz képest. A megnövekedett beruházási igény és a lecsökkent működési költségek eredőjeként a poliol-előállítás egységköltsége 14%-kal lett kedvezőbb (1,2 EUR/kg), mint a hagyományos előállítási mód szerint (1,4 EUR/kg).

A bemutatott üzleti eset rávilágít, hogy érdemes a szén-dioxidra, mint lehetséges erőforrásra tekinteni, és fontos a tárolás mellett a hasznosítási lehetőségek, illetve más egyéb folyamatok szinergiák kiaknázása is. Komplex megközelítésre van szükség, hiszen a CCU/S értékláncok is összetettek és gondos összehangolást igényelnek. Az ipari létesítményeknél gazdaságosan történő CO₂-leválasztás mennyisége jelentősen eltérhet a potenciális hasznosítási megoldás ideális kapacitásától. Építeni kell a meglévő infrastruktúrára, minél több szinergia kiaknázása szükséges ahhoz, hogy a teljes CCU/S értéklánc gazdasági és technológiai optimuma megvalósuljon. Az egyes ipari létesítményeknél elérhető CO₂ mennyisége és a lokális felhasználás mennyiségének eltérése rávilágít továbbá arra is, hogy szükség van nemzetközi CO₂-szállítási infrastruktúrára is, mely biztosítja a „fenntartható” szén-dioxid-kereslet és -kínálat közti kapcsolatot.



11 ÖSSZEFOGLALÁS



11. Összefoglalás

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.

11.1. 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.

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 üzemelhessenek 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. 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.

11.2. Szakpolitikai háttér

A CCU/S alkalmazások szakpolitikai és szabályozási háttere jelenleg kialakítás alatt áll, azonban az Európai Unió szabályozási javaslatai, továbbá programjai ezekre a technológiákra is tartalmaznak rendelkezéseket. A CCU/S témája megjelenik például a Megújuló Energia Irányelvben, a Kibocsátáskereskedelmi Rendszer felülvizsgálatában, valamint a REPowerEU tervben is. A Net-Zero Industry Act 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 karbonsemlegességi 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. 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. Ezek közül a CCS-t és a CCU-t is támogató jelentősebb finanszírozási eszközök az Innovációs Alap és a Horizont Európa.

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. 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 megjelenésével; valamint a Nemzeti

Hidrogénstratégiában, amely 2050-ig tekint meghatározóként a CO₂-leválasztással előállított kék hidrogén szerepére. 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.

11.3. CCU/S technológiák áttekintése

Szén-dioxid-leválasztás

A CO₂-leválasztás történhet nagy kibocsátású pontforrásokból, valamint közvetlenül a légkörből is (9. ábra). A leválasztás annál egyszerűbb és olcsóbb, minél nagyobb a kibocsátott gáz CO₂-koncentrációja és nyomása.

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. A jelenlegi 420 ppm-es légköri CO₂-koncentráció környezeti szempontból káros a növekvő üvegházhatás

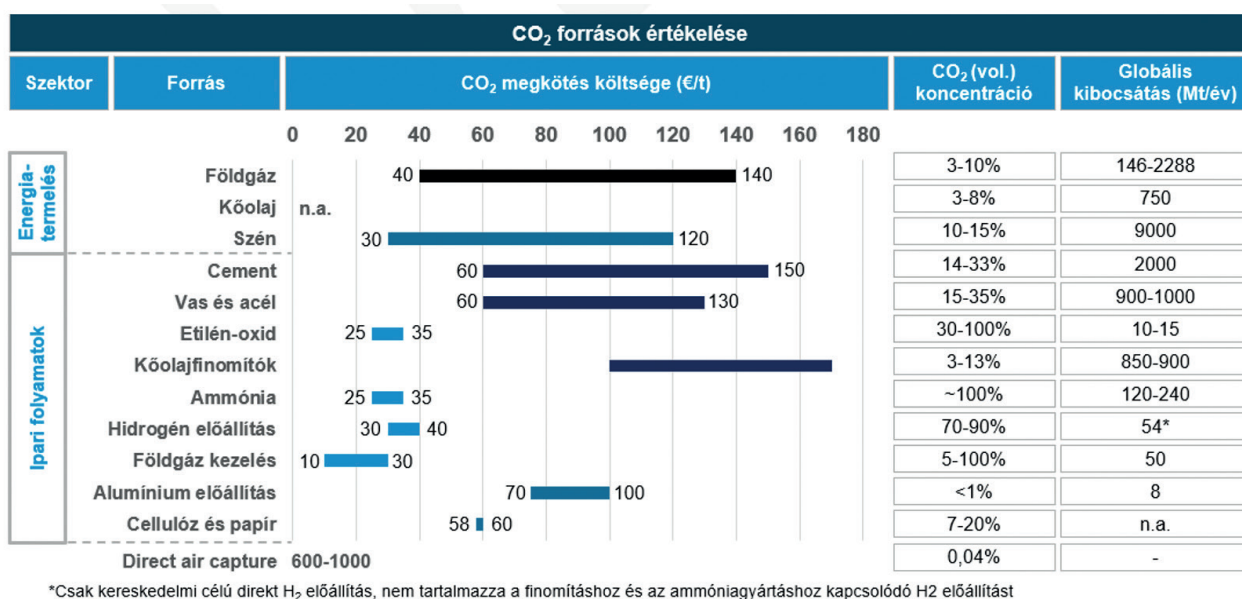
miatt, azonban műszaki oldalról túl kicsi a befogási technológiák hatékony alkalmazásához.

A CO₂ befogásához számos technológiai módszer áll rendelkezésre, melyek közül kiválasztható az adott ipari folyamathoz műszaki és gazdasági szempontból leginkább előnyös megoldás (20. ábra). 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. Negyedikként említhető a levegőből történő közvetlen befogás (DAC) feltörekvő technológiája.

A pre conversion módszer esetében a CO₂ befogására metángáz-reformálásos vagy szénelgázosításos folyamatok közben kerül sor. 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. 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. Energiahatékony megoldás, ami csak bizonyos folyamatokban alkalmazható, és magas beruházási költségek mellett alakítható ki. Teret ad innovációs és szinergialehetőségek kiaknázására az elektrolízis-alapú



9. ábra CO₂-források értékelése, [14,130] alapján saját szerkesztés.

hidrogén-előállítás során melléktermékként előálló oxigén hasznosításával.

A szén-dioxid-befogási módszerekhez szorosan kapcsolódnak a szeparációs, avagy elválasztási eljárások, mellyel 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. A fizikai abszorpció érett technológia, ipari méretben és nagy CO₂-koncentráció esetén alkalmazható.

Az adszorpció kis méretben is alkalmazható és alacsony energiaigényű. 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 erőművekben, illetve szintézisgáz-előállítás során. 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.

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. A csővezetékes, valamint a vízi szállítás a legköltséghatékonyabb megoldás a CO₂ nagy távolságokra és nagy mennyiségekben történő szállításához. 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. Ezeneken felül a komplex szállítási megoldások, például a kereslet összehasonlításán 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 megteremti

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
	<ul style="list-style-type: none"> Meglévő üzemek felújítására alkalmas lehet – megőrizhető a meglévő infrastruktúra, legtöbb meglévő szén-erőművön jól alkalmazható Még jelentős fejlődés várható ezen a területen 			<ul style="list-style-type: none"> Magas nyomás és CO₂ koncentráció -> alacsonyabb ktgk 			<ul style="list-style-type: none"> Nagyon magas CO₂ koncentráció a füstgásban 	<ul style="list-style-type: none"> Magas O₂ - és hőigény, ami jelentősen növeli az energiaigényt és a költségeket
	<ul style="list-style-type: none"> Alacsony nyomás és CO₂ koncentráció a füstgásban -> nagy teljesítmény, energiaigény és ktg a CO₂ megkötése Keletkező CO₂ alacsonyabb nyomáson – további kompresszió kell 			<ul style="list-style-type: none"> Komplex megoldás: nem elég a füstgázt befogni, olyan folyamat szükséges, ahol a tüzelőanyag előkezelése történik (pl. SMR, elgázosító) 				
CO ₂ leválasztó technológia	Abszorpció	Adszorpció	Membránszsep.	Abszorpció	Adszorpció	Membránszsep.	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	
	<ul style="list-style-type: none"> Alacsony koncentrációjú CO₂-t is képes megkötni 	<ul style="list-style-type: none"> TSA, VSA technológia jól alkalmazható, de csak kisebb méretben 	<ul style="list-style-type: none"> Leskálázható technológia 	<ul style="list-style-type: none"> Jól ismert technológia Alacsony energiaigény 	<ul style="list-style-type: none"> PSA: alacsony energiaigény a magas nyomás miatt Előnyösebb hulladékkezelés 	<ul style="list-style-type: none"> Földgázkezelésben jól ismert technológia Magas nyomás és stabil gázáram mellett hatékony 	<ul style="list-style-type: none"> Levegő helyett O₂-val való égetés miatt nem kell a nehézkes N₂ és CO₂ szétválasztást végezni Kijövő CO₂ magas tisztaságú Folyamatos nagy volumenű oxigénellátás szükséges, ami jelentős költség és energia Extrém magas hőmérséklet szükséges és 	
	<ul style="list-style-type: none"> Oldat regenerációja szükséges Korrózió, degradáció 	<ul style="list-style-type: none"> TSA: ipari méretben még nem hatékony a nagy hőigény miatt 	<ul style="list-style-type: none"> Kis nyomáson nagyon hatékonytalan technológia 	<ul style="list-style-type: none"> Oldat regenerációja szükséges Korrózió, degradáció 	<ul style="list-style-type: none"> A szilárd adszorbensről kis hatékonysággal választható le a CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Soklépéses folyamat, mire a CO₂ leválasztásra kerül, ezért komplexebb technológia 		
Technológiai érettség								
	Érett (TRL9)	Érett (TRL6)	Érett (TRL5)	Érett (TRL9)	Érett (TRL9)	Pilot (TRL7-8)	Érett (TRL5-6)	
Alkalmazási terület	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) IGCC erőmű 	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) Erőmű (szén, gáz) Vas-acél, cement 	<ul style="list-style-type: none"> Erőmű (földgáz) 	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) IGCC erőmű 	<ul style="list-style-type: none"> Ammónia, finomítás, vegyipar (SMR H₂) IGCC erőmű 	<ul style="list-style-type: none"> Földgázkezelés 	<ul style="list-style-type: none"> Erőmű (földgáz, szén), cementgyártás, vas-és acél 	

erősségek hátrányok

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

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.

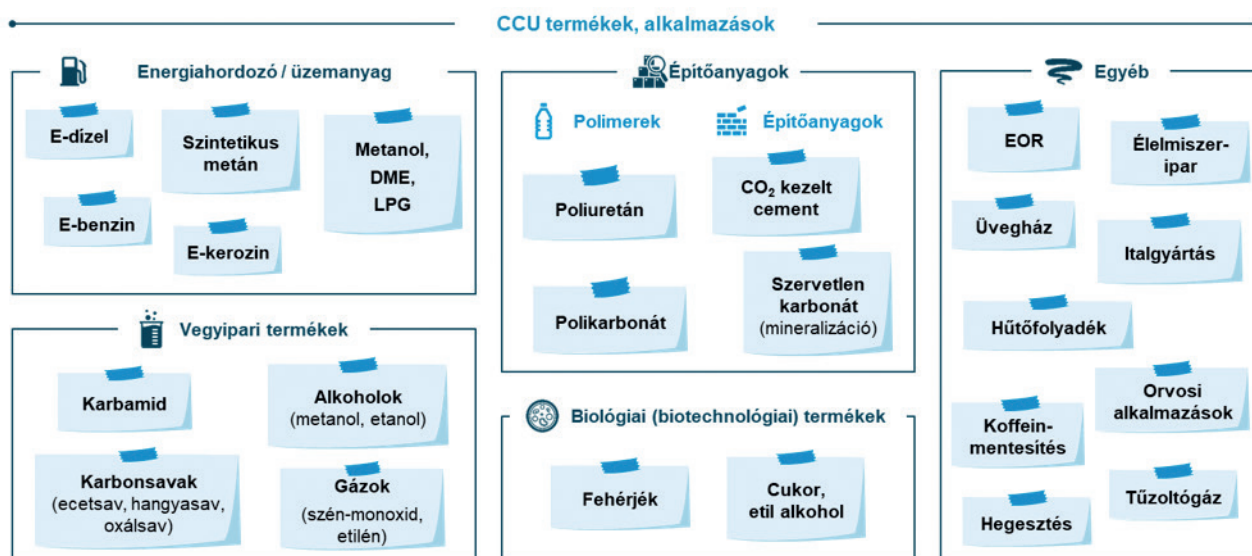
A CO₂ tartós tárolása elsősorban földalatti geológiai formációkban lehetséges, melyek közül meghatározó opciók a kimerült olaj- és földgázmezők, illetve a mélyen fekvő sós-vizes formációk (akvifer). További lehetőséget jelentenek a kitermelésre alkalmatlan széntelepek és a bazaltos/ultra-mafikus kőzetek. 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. 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 ellenállásba ütköztek CCS projektek. Azonban a nagyméretű CO₂-tárolás több évtizedes tapasztalatai alapján a légkörbe szivárgás vagy a talajvíz-szennyeződés kockázata kismértékű és hatékonyan kezelhető.

Hasznosítás

A tárolás mellett egyre nagyobb hangsúlyt kap a befogott CO₂ hasznosítása, hiszen alapanyagként számos iparágban van és lehet szerepe magas hozzáadott értékű termékek előállításában (32. ábra). Napjainkban mintegy 230 millió tonna szén-dioxidot használnak fel évente. A CO₂ közvetlen hasznosítása elsősorban az élelmiszeriparban, italgártásban, gyógyszerek előállításában és orvosi kezelésekből, valamint az olajiparban jelentős. A közvetlen felhasználási módok érett és kereskedelmi forgalomban lévő technológiák, továbbá számos ígéretes új eljárás kifejlesztése vagy kereskedelmi léptékű bevezetése is folyamatban van (pl. sótalanítás, üvegházi hozamnövelés). A CO₂ kémiai vagy biológiai átalakítással elsősorban vegyipari termékek és műanyagok, szintetikus energiahordozók, építőanyagok, valamint biológiai termékek előállításában hasznosítható. Az átalakításon alapuló felhasználási módok technológiai érettsége széles skálán mozog, a kereskedelmi léptéktől a laboratóriumi demonstrációig. Az aktív kutatás-fejlesztési tevékenységnek, illetve a növekvő számú pilot projekteknek köszönhetően az eljárások folyamatosan fejlődnek és új, ígéretes alkalmazási területek jelennek meg.

A különböző CCU megoldások esetén a hasznosított és a termékben ily módon megkötött CO₂ eltérő időtávokon kerül vissza a környezetbe és a szén-körforgásba, emiatt időszakos tárolási funkciót is betölthetnek. A legrövidebb, kevesebb mint 1 év CO₂-megtartási idővel a közvetlen felhasználás és az e-üzemanyagok rendelkeznek. A vegyipari anyagok néhány éven keresztül, a polimerek akár



32. ábra CCU termékek és alkalmazási területük, saját szerkesztés.

évtizedekig képesek megkötni az előállításukhoz felhasznált szén-dioxidot. Az építőanyagok CO₂-megtartási ideje kifejezetten hosszú, akár évszázadokon keresztül képesek tárolói funkciót betölteni.

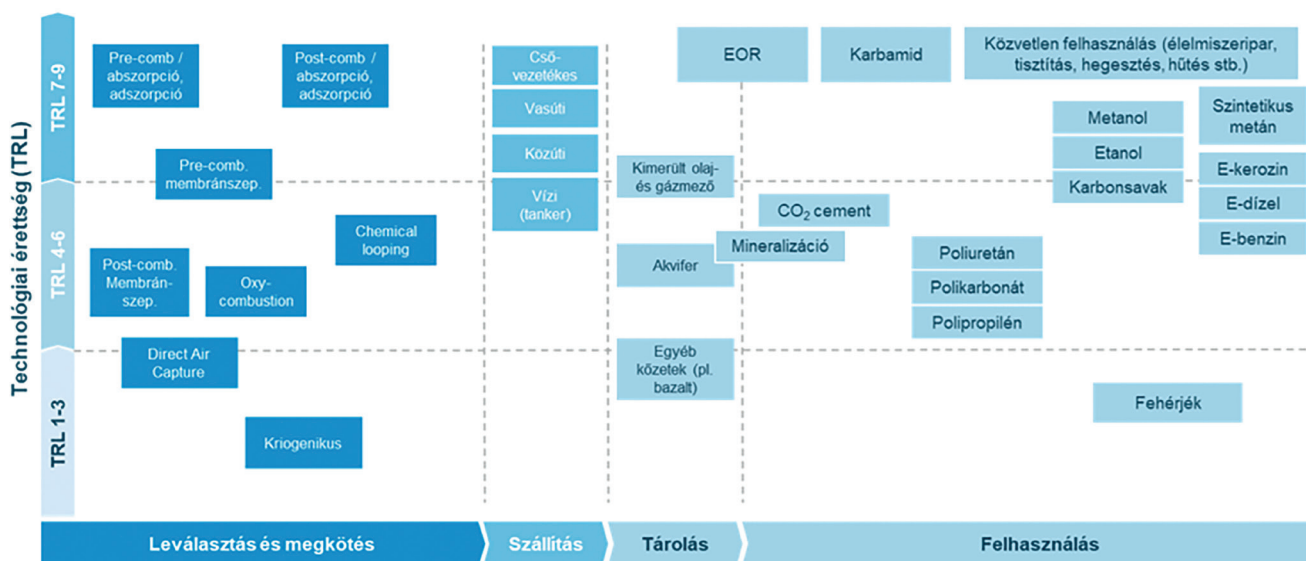
Az egyes CCU termékek piaci potenciálja becsülhető a CO₂-megtartási kapacitásuk és a jelenlegi piacméretük alapján. Nagy CCU potenciállal rendelkezik a vegyipar, mivel számos termék előállításában nagy mennyiségű CO₂ hasznosítására képes, és ezek piaca folyamatosan növekszik. Az energia-hordozók, üzemanyagok esetében várhatóan részpiacokon érhető el magas CCU potenciál (pl. e-kerozin) az elérhető alternatív, versengő zöld technológiák nagy száma miatt. A polimerek CCU potenciálja várhatóan növekedésnek indul, mivel hosszú megtartási idejük miatt vonzóak lehetnek az alacsony kibocsátású műanyagokat kereső iparágak (pl. autógyártás) számára. Szintén magas az építőanyagok CCU potenciálja, mivel piacméretük jelentős, és az iparágban kevés dekarbonizációs alternatíva áll rendelkezésre. A biológiai termékek esetén szintén a CCU potenciál növekedése várható, mivel jelentős megkötési kapacitással rendelkeznek, azonban jelenlegi piacméretük még kicsi.

Technológiai érettség az értéklánc mentén

A CCU/S értéklánc minden eleméhez rendelkezésre állnak érett technológiai megoldások, továbbá számos területen megjelentek feltörekvő, új megoldások is (35. 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



35. ábra CCU/S értéklánc technológiai érettségi térkép (2023), [135,181–200] alapján saját szerkesztés.

vegyiparban és az energiatermelésben, valamint ismertetik az ezekhez kapcsolódó CO₂-hasznosítási alkalmazásokat is. Továbbá bemutatunk két, kialakítás alatt álló európai CCU/S klasztert is, melyekben a befogáson túl a tárolás kap jelentős szerepet. 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.

11.4. Hazai relevancia

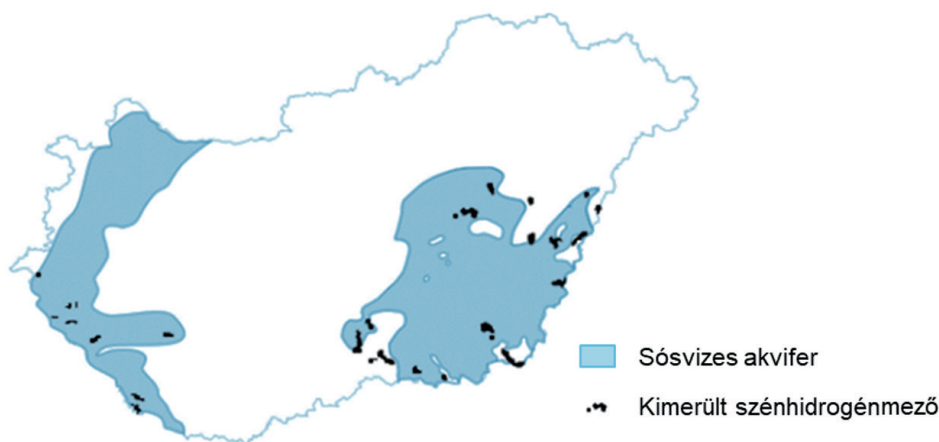
Magyarország éves CO₂-kibocsátása 47 millió tonnára tehető, melynek közel fele, kb. évi 22 millió tonna releváns a szén-dioxid befogása szempontjából. A legnagyobb kibocsátású ágazatok az energiaszektor (közélmű villamosenergia- és hőtermelés), a vegyipar (elsősorban ammónia- és etiléngyártás) és kőolajfinomítás, az ásványipar (főként cementgyártás), valamint a fémipar (vas- és acélgártás). A CCU/S elterjedése számos iparágban hozzájárulhat az ellátásbiztonság növeléséhez, a hazai előállítás fenntartásával és a külföldi kitérítés, az import igény csökkentésével. A villamosenergia-termelésben továbbá lehetővé teszi a rugalmas gázerőművi kapacitások alacsony kibocsátás melletti 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. 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 tehető 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 (41. ábra). A hazai befogott CO₂ tárolása eleinte kiürült szénhidrogénmezőkben történhet, hiszen

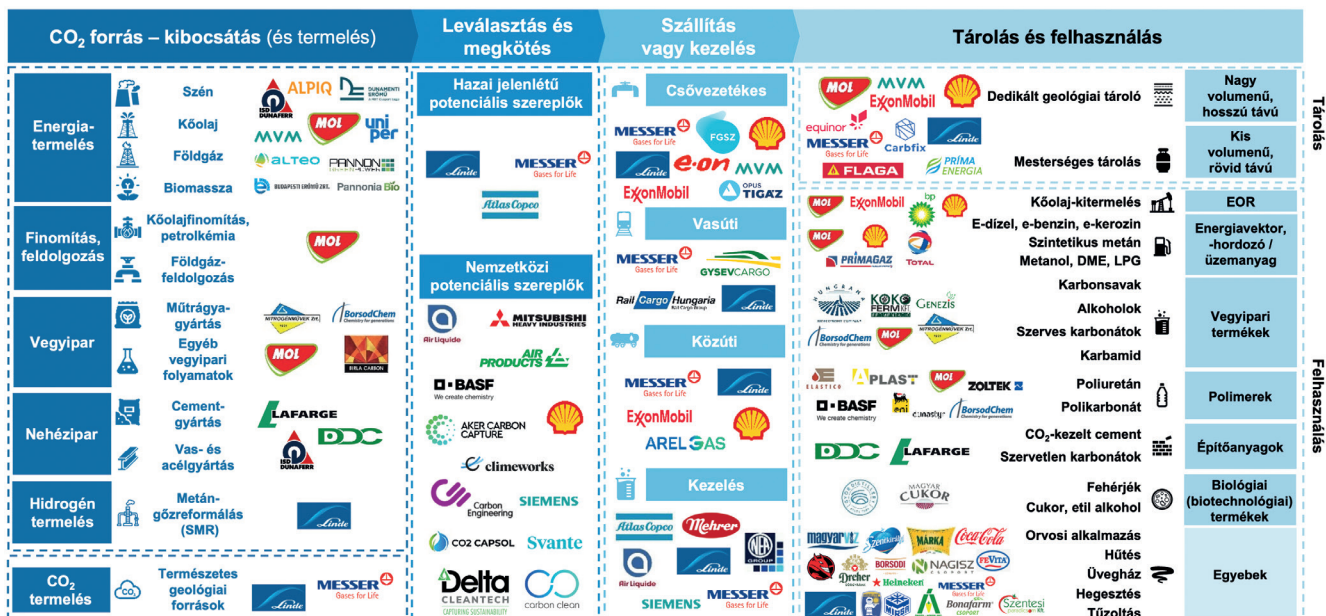


41. ábra Magyarországon a CO₂ földalatti tárolására alkalmas geológiai formációk földrajzi elhelyezkedése, [218] alapján saját szerkesztés.

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 sajátoláshoz, 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. Ezekhez a formációkhoz kapcsolódó hazai sajátolási és tárolási tapasztalat nem áll rendelkezésre, valamint az eddigi kutatások során csak regionális felmérésekre 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.

Magyarországon a befogott szén-dioxid számos ágazatban hasznosítható lehet, a jelenleg keresletet támasztó szektorok mellé a CCU/S ipar fejlődésével újabb piacok bekapcsolódása várható (42. 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 találhatóak. Ezen telepek viszonylag könnyen és alacsony költség mellett 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.

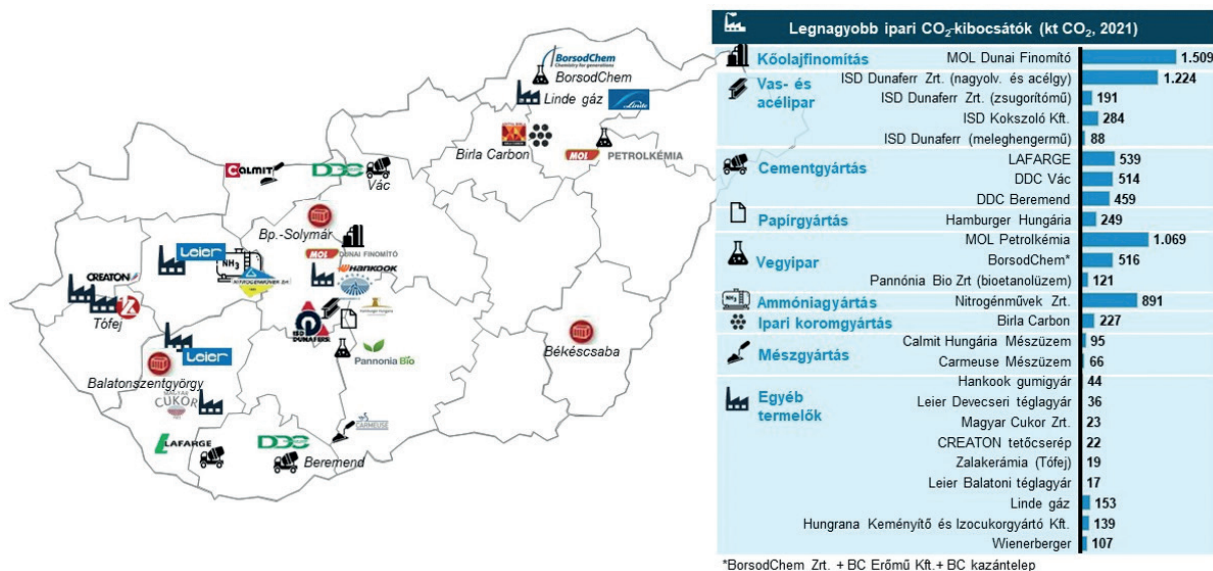


42. ábra A hazai CCU/S értéklánc főbb szereplőinek összefoglaló ábrája, saját szerkesztés.

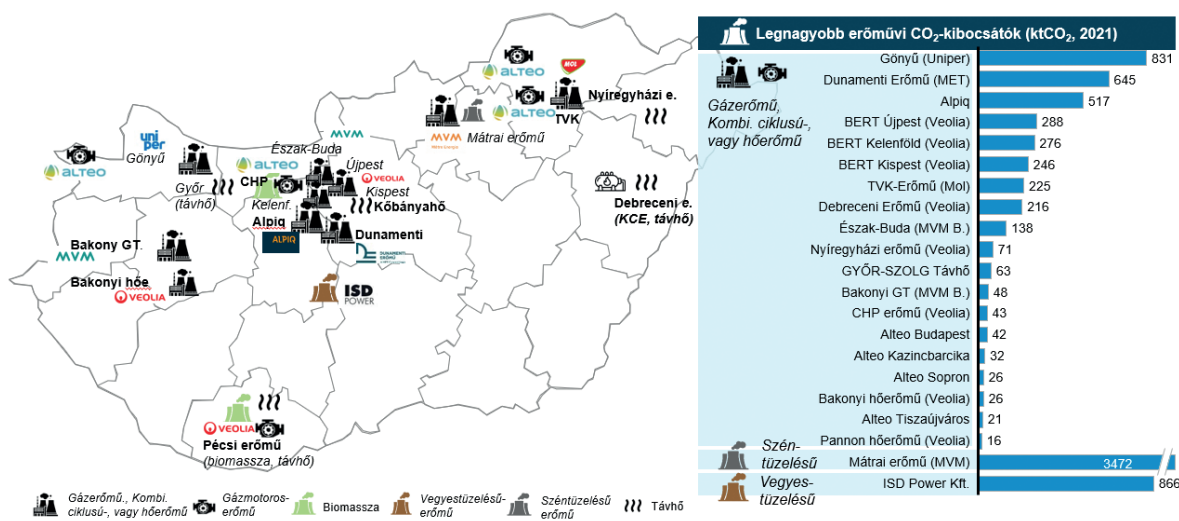
11.5. Hazai kibocsátók áttekintése

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 előállításának során alkalmazott kémiai reakciók mellékterméke a keletkező szén-dioxid. A leginkább érintett ágazatok a vegyipar (elsősorban ammónia- és etilén-gyártás), ásványipar (főként cementgyártás) és fémipar (vas- és acélgyártás). 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 tonna²²⁴. Ez a mennyiség lehet tágran értelmezve releváns a szén-dioxid befogása szempontjából. Az alábbi két térkép mutatja be a legnagyobb ipari és erőművi kibocsátókat (49. ábra és 50. ábra):



49. ábra Magyarország legnagyobb ipari kibocsátói, [223,228] alapján saját szerkesztés.



50. ábra Magyarország legnagyobb erőművi kibocsátói, [223,228] 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.

11.6. Hazai TOP kibocsátók elemzése

A CCU/S iparág legfontosabb szereplői a nagy kibocsátó-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 nyitottak 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 szezonális/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 iparágaknak. 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 CO_2 -infrastruktúra hiányát. Amíg nincs regionális alapokon szerveződött CO_2 -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.

11.7. 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 CO_2 befogása vagy hasznosítása áll, bemutattunk 1 tárolói esetet, valamint körvonalaztunk 2 kialakítható CCU/S klasztert is. Mindegyik eset leírását értékláncszemléletben készítettük el, így a CO_2 teljes életciklusát leképezzük a keletkezés-től a felhasználásig és tárolásig.

A CO_2 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

petrolkémiai folyamatok a MOL Petrolkémia 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 szénhidrogénmező 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 bevételáramot, 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. 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. 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 különböző 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. Ezentúl az állam az adórendszeren keresztül is támogathatja a CCU/S terjedését adókedvezmények bevezetésével vagy karbonadó kivetésével. A CCU/S technológiák elterjedésének eredményes ösztönzője lehetne az EU Kibocsátáskereskedelmi Rendszere, azonban az ETS egyelőre nem terjed ki a CO₂-hasznosítási megoldásokra. A bevételi modellek kialakíthatók elismert költség alapon is, tarifaszabályozással vagy közvetlen állami támogatással („költség plusz” mechanizmus). 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. 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.

11.8. 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), cementgyártás és gázerőművi energiatermelés során. 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 forгатókönyvek közül az évi 2,5 millió tonna kapacitású, 180 km távolságú, szárazföldi csővezetékes szállítás közelíti legjobban a hazai viszonyokat. 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 sós vizet 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 sós vizet 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 forгатókönyvek közül a szárazföldi, hasznosítható felhagyott kutak nélküli kimerült szénhidrogénmezős, illetve a sós vizet akviferes tárolás közelíti legjobban a hazai viszonyokat. 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 sós vizet 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, érték-ként tekinteni, amiből akár piacképes termékek állíthatók elő. Két konkrét esetet vizsgáltunk: szintetikus kerozin-előállítás és CO₂-alapú poliál-előállítás. A szintetikus kerozin előállítása nagy volumenben képes szén-dioxidot felhasználni, azonban emellett jelentős zöld hidrogén igénye is van. Ehhez pedig nagy volumenű megújuló villamos energia szükséges. Ennek a kielégítése jelentős beruházást igényel a szén-dioxid-leválasztás és az üzemanyag-előállító mellett: nagy kapacitásban van szükség megújulóenergia-termelőkre és elektrolizálókra. Emiatt az előállított szintetikus kerozin a konvencionális fosszilis alapú kerozinhoz képest akár háromszor is drágább lehet. Ez a terület ugyanakkor a szabályozás várható alakulása miatt komoly érdeklődésre tart számot.

A poliál-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 üzembről választják le nagy volumenben a szén-dioxidot, melynek 10%-át képesek hasznosítani a poliál-előállításban, a nagyobbik részét pedig letárolják. 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.



12 JAVASLATTÉTEL

12. Javaslattétel

12.1. 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 megosztására, 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, amint az korábbi pontban részletes kifejtésre került.

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 biomassza 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 geológia tárolást is megvalósítani. A jelenlegi jogszabályok szerint a széndioxid 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 kvóták árának 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 teremtene 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.

12.2. 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 képviselete az uniós jogalkotási folyamatban.



12.2.1. 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)

12.2.2. CCU/S infrastruktúra fejlesztése

- Vállalkozói 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 sósvizes akviferek) 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

12.2.3. 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)

12.2.4. 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



12.2.5. 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 szerevve tapasztalatot nagyobb komplexitású projektek megvalósításához, valamint sikeres példát adva a piaci szereplők számára

12.2.6. Irányelvek, szabványok és szabályozások

- Megbízható szilárd európai szabályozási keret, kiszámítható hosszútávú fejlődési stratégiák kialakítása, amely hosszútávra lehetővé teszi a projektervezést
- 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

12.2.7. 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 projekt lehetőségek felmérése, a kiválasztott projektek támogatása
- A CCU/S értéklánc szereplői közötti hosszútávú partnerségek kialakításának ösztönzése, támogatása

12.2.8. 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. Ritchie, H., Roser, M. & Rosado, P. CO2 and Greenhouse Gas Emissions. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (2020).
2. Edenhofer, O. *et al.* *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (2014).
3. Tollefson, J. Carbon emissions rapidly rebounded following COVID pandemic dip. *Nature* (2021) doi:10.1038/d41586-021-03036-x.
4. Zakeri, B. *et al.* Energy Transitions in Europe – Role of Natural Gas in Electricity Prices. *SSRN Electron. J.* (2022) doi:10.2139/ssrn.4170906.
5. Annual CO2 emissions worldwide from 1940 to 2020. <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>.
6. Sziebig, O. J. A környezet védelmének nemzetközi jogi eszközeiről bővebben. in *Nukleáris jogi ismeretek I.* (eds. Gellén, K., Farkas Csamangó, E. & Molnár, S.) 253–318 (2021).
7. Bándi, G. Környezetvédelmi politika. in *Bevezetés az Európai Unió politikáiba* (ed. Kende, T.) 669 (2019).
8. IPCC. *Climate change 2022: Mitigation of climate change.* https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf (2022).
9. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (2022).
10. *Summary Report on CCUS Integration in Energy and Industrial Systems.* (2022).
11. Tsvetkov, P., Cherepovitsyn, A. & Fedoseev, S. The Changing Role of CO2 in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects. *Sustainability* 11, 5834 (2019).
12. Alsarhan, L. M., Alayyar, A. S., Alqahtani, N. B. & Khedry, N. H. Circular Carbon Economy (CCE): A Way to Invest CO2 and Protect the Environment, a Review. *Sustainability* 13, 11625 (2021).
13. 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).
14. *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).
15. Lyons, M., Durrant, P. & Kochhar, K. *Reaching Zero with Renewables: Capturing Carbon.* https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Capturing_Carbon_2021.pdf?rev=b-f05359177504164aab7fad527b35e0d (2021).
16. 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-c8a67df-0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf (2020).
17. International Energy Agency (IEA). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.* (2021).
18. International Energy Agency (IEA). *Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage: CCUS in clean energy transitions.* (2020).
19. Láncoš, P. L. Uniós soft law jelentőségéről. *Iustum Aequum Salut.* 14, 55–68 (2018).
20. Károly, N. *Nemzetközi jog.* (Püski Kiadó, 1999).
21. László, B. A törvényesség és az igazságosság elve a nemzetközi jogban. *Acta Univ. Szeged. acta juridica Polit.* 3, 1-55. (1957).
22. Friedrich, J. *International Environmental „soft law”.* (Springer, 2013).
23. Bándi, G. A környezeti szabályozás útja az európai integrációban, példákkal illusztrálva. *Iustum Aequum Salut.* 14, 121–148 (2018).

24. Papp, M. & Várnay, E. *Az Európai Unió joga*. (Wolters Kluwer Kft., 2017).
25. Európai Parlament. Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2022/591 határozata (2022. április 6.) a 2030-ig tartó időszakra szóló általános uniós környezetvédelmi cselekvési programról. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022D0591&from=EN>. (2022).
26. Kengyel, Á. *Európai Unió Politikák*. (Akadémiai Kiadó, 2020).
27. Európai Parlament. Energiapolitika: általános elvek. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hu/sheet/68/energiapolitika-altalanos-elvek>.
28. Európai Parlament. *Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2021/1119 rendelete (2021. június 30.) a klímasemlegesség elérését célzó keret létrehozásáról és a 401/2009/EK rendelet, valamint az (EU) 2018/1999 rendelet módosításáról (európai klímarendelet)*. (2021).
29. Renewable energy directive - targets and rules. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en.
30. Commission presents Renewable Energy Directive revision. https://ec.europa.eu/info/news/commission-presents-renewable-energy-directive-revision-2021-jul-14_en (2021).
31. Zygierewicz A & Sanz S. *Renewable Energy Directive: Revision of Directive (EU) 2018/2001*. <https://euagenda.eu/upload/publications/eprs-bri2021662619-en.pdf> (2021).
32. European Council. Council and Parliament reach provisional deal on renewable energy directive. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/30/council-and-parliament-reach-provisional-deal-on-renewable-energy-directive/> (2023).
33. European Commission. *Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, Sustainable Carbon Cycles*. (2021).
34. Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2018/2001 irányelve (2018. december 11.) a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról (átdolgozás) (EGT-vonatkozású szöveg.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:32018L2001> (2022).
35. Directorate-General for Energy. Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels and annex. https://energy.ec.europa.eu/publications/delegated-regulation-minimum-threshold-ghg-savings-recycled-carbon-fuels-and-annex_en (2023).
36. European Commission. Commission sets out rules for renewable hydrogen. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_594 (2023).
37. Chatham Partners. Important step for renewable hydrogen: Commission adopts two Delegated Acts on RED II. <https://chatham.partners/insights/important-step-for-renewable-hydrogen-commission-adopts-two-delegated-acts-on-red-ii/> (2023).
38. 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).
39. European Council. 'Fit for 55': Council and Parliament reach provisional deal on EU emissions trading system and the Social Climate Fund. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/12/18/fit-for-55-council-and-parliament-reach-provisional-deal-on-eu-emissions-trading-system-and-the-social-climate-fund/> (2023).
40. IRENA. *A pathway to decarbonize the shipping sector by 2050*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA_Decarbonising_Shipping_2021.pdf (2021).
41. European Commission. Social Climate Fund. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/delivering-european-green-deal/social-climate-fund_en.
42. Az Európai Unió Tanácsa. Uniós helyreállítási terv: a Tanács elfogadta a REPowerEU-fejezetről szóló rendeletet. <https://www.consilium.europa.eu/hu/press/press-releases/2023/02/21/eu-recovery-plan-council-adopts-repowerEU/> (2023).

43. 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).
44. Az Európai Unió Tanácsa. REPowerEU: energiapolitika az uniós országok helyreállítási és reziliencia-építési terveiben. <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/eu-recovery-plan/repowereu/>.
45. eFuel alliance. What are eFuels? <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/what-are-efuels> (2022).
46. Uhde, H. How to ramp up Hydrogen under the new REPowerEU targets. <https://energypost.eu/how-to-ramp-up-hydrogen-under-the-new-repowereu-targets/> (2022).
47. 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).
48. 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>.
49. Butnar, I., Cronin, J. & Pye, S. *Review of Carbon Capture Utilisation and Carbon Capture and Storage in future EU decarbonisation scenarios*. (2020).
50. Kähler F, Carus M, vom Berg C & Stratmann M. *CO2 reduction potential of the chemical industry through CCU*. https://renewable-carbon-initiative.com/wp-content/uploads/2022/05/22-05-03-CO2_Reduction_Potential_of_the_Chemical_Industry_Through_CCU.pdf (2022).
51. International Energy Agency (IEA). CCUS Projects Database. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database> (2023).
52. Global CSS Institute. *Global status of CCS 2021*. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (2021).
53. *The potential for CCS and CCU in Europe*. (2019).
54. MEKH. Indul a kiemelt európai energiahálózati projektek kiválasztási folyamata. <http://www.mekh.hu/indul-a-kiemelt-europai-energiahalozati-projektek-kivalasztasi-folyamata> (2022).
55. European Commission. Targeted consultation on methodologies for assessing costs and benefits of candidate projects under the revised TEN-E Regulation - 2022. https://energy.ec.europa.eu/consultations/targeted-consultation-methodologies-assessing-costs-and-benefits-candidate-projects-under-revised_en (2022).
56. European Green Deal: EU agrees stronger legislation to accelerate the rollout of renewable energy. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_2061 (2023).
57. European Environmental Bureau. *RED III EEB Policy Brief*. (2022).
58. Reuters. Italy's battle against EU car emission rules 'not lost' - PM. <https://www.reuters.com/business/environment/italys-battle-against-eu-car-emission-rules-not-lost-pm-2023-03-24/> (2023).
59. 2022/0160(COD) Renewable Energy, Energy Performance of Buildings and Energy Efficiency Directives: amendments (REPowerEU). [https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/ficheprocedure.do?reference=2022/0160\(COD\)&l=en](https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/ficheprocedure.do?reference=2022/0160(COD)&l=en) (2022).
60. *Az Európai Parlament és a Tanács rendelete az alternatív üzemanyagok infrastruktúrájának kiépítéséről, valamint a 2014/94/EU európai parlamenti és tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről*. (2014).
61. *Az Európai Parlament és a Tanács rendelete az alternatív üzemanyagok infrastruktúrájának kiépítéséről, valamint a 2014/94/EU európai parlamenti és tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről*. 2. cikk, 3.pont (2014).
62. *AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2018/2001 IRÁNYELVE (2018. december 11.) a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról*. 2. cikk, 27. pont (2018).
63. *AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2018/2001 IRÁNYELVE (2018. december 11.) a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról*. 2. cikk, 33. pont (2018).

64. *AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2018/2001 IRÁNYELVE (2018. december 11.) a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról.* 2. cikk, 34. pont (2018).
65. *AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2018/2001 IRÁNYELVE (2018. december 11.) a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról.* 2. cikk, 35. pont (2018).
66. *AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2018/2001 IRÁNYELVE (2018. december 11.) a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról.* 2. cikk, 36. pont (2018).
67. *Global Status of CCS: Special Report, Understanding Industrial CCS Hubs and Clusters.* (2016).
68. EU Innovation Fund continues to support CCUS deployment, underlining the technology's key role in achieving a climate neutral EU by 2050. <https://akercarboncapture.com/2022/07/eu-innovation-fund-second-call-analysis/> (2022).
69. CO2 Value Europe. CO2 Value Europe. <https://co2value.eu/>.
70. CCUS set-plan. CCUS set-plan. <https://www.ccus-setplan.eu/>.
71. Zero Emissions Network (ZEN). Zero Emissions Network. <https://zeroemissionsnetwork.com/zero-emissions-network>.
72. European Commission. Zero Emission Network to facilitate CCUS uptake in industrial clusters. <https://cordis.europa.eu/project/id/101075693> (2022).
73. CCUS ZEN. <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/aktualnosci-2022/9408-press/file.html> (2022).
74. Zero Emissions Platform. <https://zeroemissionsplatform.eu/>.
75. Carbon capture, storage and utilisation. https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-storage-and-utilisation_en (2022).
76. Marcu, A. & Bonfiglio, E. *ERCST Reflection Note – 2022 CCUS Forum: An overview.* <https://ercst.org/ercst-reflection-note-2022-ccus-forum-an-overview/> (2022).
77. The CCUS Hub. <https://ccushub.ogci.com/>.
78. European Commission. What is the Innovation Fund? https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en?fbclid=IwAR2ccVpj7d5AnHTVrk58tjzg-NkfC2frxy8VxMQyyuMtVHm9DzurWpf2J2as.
79. Global CCS Institute. *Global Status of CCS 2022.* https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/03/GCCSI_Global-Report-2022_PDF_FINAL-01-03-23.pdf (2022).
80. Commission invests €3 billion in innovative clean tech projects to deliver on REPowerEU and accelerate Europe's energy independence from Russian fossil fuels. https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/ip_22_6489 (2022).
81. European Commission. *Commission decision on the financing of the activities by the Innovation Fund, serving as the financing decision for 2022 and as a decision launching the third calls for proposals.* https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-10/c_2022_7547_en.pdf (2022).
82. Az EU Horizont Európa kutatási és innovációs keretprogramja. <https://nkfih.gov.hu/hivatalrol/nemzetkozi-kapcsolatok/horizont-europa> (2021).
83. *Horizon Europe Work Programme 2023-2024: General Introduction (European Commission Decision C(2022)7550 of 6 December 2022).* https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-1-general-introduction_horizon-2023-2024_en.pdf (2022).
84. Az EU 13,5 milliárd eurós finanszírozással járul hozzá a kutatáshoz és az innovációhoz a 2023–2024-es időszakban. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hu/IP_22_7404 (2022).
85. *The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050.* <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf> (2021).

86. US Senate. *Infrastructure Investment and Jobs Act, Public Law 117-58*. <https://www.congress.gov/117/plaws/publ58/PLAW-117publ58.pdf> (2021).
87. US Senate. *Inflation Reduction Act of 2022*. https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/inflation_reduction_act_of_2022.pdf (2022).
88. Council on Environmental Quality. *Carbon Capture, Utilization, and Sequestration Guidance*. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/02/16/2022-03205/carbon-capture-utilization-and-sequestration-guidance> (2022).
89. Office of Fossil Energy and Carbon Management. *Strategic Vision: The Role of Fossil Energy and Carbon Management in Achieving Net-Zero Greenhouse Gas Emissions*. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-04/2022-Strategic-Vision-The-Role-of-Fossil-Energy-and-Carbon-Management-in-Achieving-Net-Zero-Greenhouse-Gas-Emissions.pdf> (2022).
90. U.S. Department of Transportation's Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). PHMSA Announces New Safety Measures to Protect Americans From Carbon Dioxide Pipeline Failures After Satartia, MS Leak. <https://www.phmsa.dot.gov/news/phmsa-announces-new-safety-measures-protect-americans-carbon-dioxide-pipeline-failures> (2022).
91. U.S. Department of the Interior - Bureau of Land Management. National Policy for the Right-of-way Authorizations Necessary for Site Characterization, Capture, Transportation, Injection, and Permanent Geologic Sequestration of Carbon Dioxide in Connection with Carbon Sequestration Projects. <https://www.blm.gov/policy/im-2022-041> (2022).
92. NextDecade. NEXT Carbon Solutions and California Resources Corporation Agree to FEED Study. <https://www.businesswire.com/news/home/20220505005148/en/NEXT-Carbon-Solutions-and-California-Resources-Corporation-Agree-to-FEED-Study> (2022).
93. Sweet, C. & Kramer, D. Carbon America to Construct, Own and Operate the First Two Commercial Carbon Capture and Sequestration Projects in Colorado. <https://www.businesswire.com/news/home/20220512005336/en/Carbon-America-to-Construct-Own-and-Operate-the-First-Two-Commercial-Carbon-Capture-and-Sequestration-Projects-in-Colorado> (2022).
94. Reuters. Tallgrass Energy, ADM plan CO2 transport and sequestration deal. <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/tallgrass-energy-adm-plan-co2-transport-sequestration-deal-2022-05-18/> (2022).
95. Red Trail Energy LLC. Red Trail Energy begins carbon capture and storage. https://undeerc.org/research/projects/_files/docs/redtrailannouncement.pdf (2022).
96. *Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050*. https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/pdf/ggs_full_en.pdf (2021).
97. Oil and Gas Division Agency for Natural Resources and Energy. Introduction of Long-Term CCS Roadmap. https://www.env.go.jp/earth/ccs/3rd_keynote2.pdf (2022).
98. Japan CCS Co. Ltd. A groundbreaking ceremony was held for the CO2 Ship Transportation Project Tomakomai Liquefied CO2 Receiving Facility on May 23. <https://www.japanccs.com/en/news/20220524/> (2022).
99. Mitsubishi Heavy Industries. Mitsubishi Shipbuilding Concludes Agreement on Construction of World's First Demonstration Test Ship for Liquefied CO2 Transportation — Ship Will Integrate Company's Liquefied Gas Handling Technologies, for Tomorrow's Long-distance, High-volume LCO2 Transport Needs . <https://www.mhi.com/news/220202.html> (2022).
100. Mitsui OSK Lines. MOL and PETRONAS Sign MoU on Liquefied CO2 Transportation for CCUS. <https://www.mol.co.jp/en/pr/2022/22019.html> (2022).
101. NYK Knutsen Group. NYK and Knutsen Group Establish New Company for Liquefied CO2 Transportation and Storage Business. https://www.nyk.com/english/news/2022/20220118_02. (2022).
102. International Energy Agency (IEA). *An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9448bd6e-670e-4cfd-953c-32e822a80f77/Anenergysectorroadmapto-carbonneutralityinChina.pdf> (2021).

103. Cai B, Li Q & Zhang X. *China CCUS Annual Report 2021- China CCUS Roadmap*. (2021).
104. National People's Congress. *14th Five-Year Plan*. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm (2021).
105. Ministry of Ecology and Environment. *Guidance on Strengthening Ecology and Environment Protection and Promoting Quality Development in Free Trade Zone*. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202105/t20210531_835481.html?keywords= (2021).
106. Netease. National CCUS Standards Working Group Established. <https://www.163.com/dy/article/G556ROD50514R9OJ.html> (2021).
107. BHP. BHP partners with China Baowu to address the challenges of climate change. (2020).
108. The People's Bank of China. The People's Bank of China Launches the Carbon Emission Reduction Facility . <http://www.pbc.gov.cn/en/3688006/3995557/4385345/index.html?&&&&&&&&&header=false&footer=false&relatedInsights=false&shareInsights=true&xyz=1543190452255> (2021).
109. The Government of the Republic of Korea. *2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf (2020).
110. Trendafilova P. Here is how South Korea plans to support carbon capture utilization and storage. (2021).
111. Yonhap News Agency. S. Korea to invest 1.4 tln won by 2030 fo carbon storage tech. <https://en.yna.co.kr/view/AEN20211103005500320> (2021).
112. Santos. Santos and SK E&S Sign MoU to Develop CCS Projects in Australia . <https://www.santos.com/news/santos-and-sk-es-sign-mou-to-develop-ccs-projects-in-australia/> (2022).
113. Magyar Közlöny. A Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia elfogadásáról. (2021).
114. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia 2020-2050*. <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/5/54/54e/54e01bf45e08607b21906196f75d836de9d6cc47.pdf> (2020).
115. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve*. https://2015-2019.kormany.hu/download/b/40/c1000/Strategiak_20200116.zip#!DocumentBrowse.
116. Májusban kezdődhet meg a Nemzeti Energia- és Klímaterv felülvizsgálata. <https://kormany.hu/hirek/majusban-kezdodhet-meg-a-nemzeti-energia-es-klimaterv-felulvizsgalata> (2023).
117. Magyar Hírlap. Bejelentették az Új Nemzeti Energia- és Klímastratégiát. (2020).
118. Bosnyák Zs. Itt a kormány nagy energiastratégiája. (2020).
119. 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).
120. Innovációs és Technológiai Minisztérium. *Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája*. <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/6/61/61a/61aa5f835ccf3e726fb5795f766f3768f7f829c1.pdf> (2021).
121. Magyar Akkumulátor Szövetség. Ismerje meg a Magyar Akkumulátor Szövetséget! <https://www.hu-ba.hu/> (2022).
122. Magyarország Kormánya. Nemzeti Akkumulátor Iparági Stratégia 2030. <https://kormany.hu/dokumentumtar/nemzeti-akkumulator-iparagi-strategia-2030> (2022).
123. *2020. évi XLIV. törvény a klímavédelemről*. 1.§ d) pont (2020).
124. ENSZ. *2007. évi LX. törvény az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye és annak Kiotói Jegyzőkönyve végrehajtási keretrendszeréről*. (2007).
125. *323/2007. (XII. 11.) Korm. rendelet az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye és annak Kiotói Jegyzőkönyve végrehajtási keretrendszeréről szóló 2007. évi LX. törvény végrehajtásának egyes szabályairól*. (2007).

126. 2003/87/EK irányelv az üvegházhatást okozó gázok kibocsátási egységei EU-n belüli kereskedelmi rendszerének létrehozásáról. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=celex%3A32003L0087> (2003).
127. 341/2013. (IX. 25.) Korm. rendelet a villamosenergia-termelők részére az üvegházhatású gázok közösségi kereskedelmi rendszerében és az erőfeszítés-megosztási határozat végrehajtásában történő részvételről szóló 2012. évi CCXVII. törvény alapján történő de. (2013).
128. 145/2012. (VII. 3.) Korm. rendelet a szén-dioxid geológiai tárolásáról. (2012).
129. Széndioxid tárolók. <https://mbfsz.gov.hu/hatosagi-ugyek/nyilvantartasok/szendioxid-tarolok>.
130. 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).
131. Naims, H. Economics of carbon dioxide capture and utilization—a supply and demand perspective. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 22226–22241 (2016).
132. *Efficient MAN CCUS*. <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q1-2023/Download/efficient-man-ccus/c76a4375-0ad3-4979-af06-4b9ed45956c4/Carbon-Capture-Utilization-Storage> (2022).
133. Deák, G. & Bartha, L. *A szén-dioxid befogás és tárolás*. (2009).
134. Khosroabadi, F., Aslani, A., Bekhrad, K. & Zolfaghari, Z. Analysis of Carbon Dioxide Capturing Technologies and their technology developments. *Clean. Eng. Technol.* 5, 100279 (2021).
135. Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A. & Rezaei, F. Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technol.* 5, 834–849 (2017).
136. Beuttler, C., Charles, L. & Wurzbacher, J. The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Front. Clim.* 1, (2019).
137. Debarre, R., Gahlot, P., Grillet, C. & Plaisant, M. *Carbon Capture Utilization and Storage*. <https://www. Kearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf> (2021).
138. 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).
139. Liang, Z., Fu, K., Idem, R. & Tontiwachwuthikul, P. Review on current advances, future challenges and consideration issues for post-combustion CO₂ capture using amine-based absorbents. *Chinese J. Chem. Eng.* 24, 278–288 (2016).
140. Gao, H., Wu, Z., Liu, H., Luo, X. & Liang, Z. Experimental Studies on the Effect of Tertiary Amine Promoters in Aqueous Monoethanolamine (MEA) Solutions on the Absorption/Stripping Performances in Post-combustion CO₂ Capture. *Energy & Fuels* 31, 13883–13891 (2017).
141. Luis, P. Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination* 380, 93–99 (2016).
142. Manzolini, G. *et al.* Economic assessment of novel amine based CO₂ capture technologies integrated in power plants based on European Benchmarking Task Force methodology. *Appl. Energy* 138, 546–558 (2015).
143. Alkhatib, I. I. I., Galindo, A. & Vega, L. F. Systematic study of the effect of the co-solvent on the performance of amine-based solvents for CO₂ capture. *Sep. Purif. Technol.* 282, 120093 (2022).
144. Gervasi, J., Dubois, L. & Thomas, D. Screening tests of new hybrid solvents for the post-combustion CO₂ capture process by chemical absorption. *Energy Procedia* 63, 1854–1862 (2014).
145. N. Borhani, T. & Wang, M. Role of solvents in CO₂ capture processes: The review of selection and design methods. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 114, 109299 (2019).
146. Bettenhausen, C. The life-or-death race to improve carbon capture. <https://cen.acs.org/environment/greenhouse-gases/capture-flue-gas-co2-emissions/99/i26> (2021).
147. Zhang, X., Song, Z., Gani, R. & Zhou, T. Comparative Economic Analysis of Physical, Chemical, and Hybrid Absorption Processes for Carbon Capture. *Ind. Eng. Chem. Res.* 59, 2005–2012 (2020).

148. Huang, W., Zheng, D., Xie, H., Li, Y. & Wu, W. Hybrid physical-chemical absorption process for carbon capture with strategy of high-pressure absorption/medium-pressure desorption. *Appl. Energy* 239, 928–937 (2019).
149. Kearns D, Liu H & Consoli C. *Technology readiness and costs of CCS*. (2021).
150. White, L. S., Amo, K. D., Wu, T. & Merkel, T. C. Extended field trials of Polaris sweep modules for carbon capture. *J. Memb. Sci.* 542, 217–225 (2017).
151. Air Liquide. Abatement of CO₂ emissions for a low-carbon society. <https://www.airliquide.com/sustainable-development/act-sustainable-future/abatement-co2-emissions-low-carbon-society>.
152. Air Liquide. Building a low-carbon society. <https://www.airliquide.com/stories/industry/building-low-carbon-society> (2022).
153. Air Liquide. Developing solutions jointly with our customers. <https://www.airliquide.com/stories/industry/developing-solutions-jointly-our-customers> (2022).
154. Air Liquide. Cryocap™: an inside look at the Port-Jérôme site. <https://www.airliquide.com/stories/industry/cryocaptm-inside-look-port-jerome-site> (2020).
155. Fan L S. *Chemical looping systems for fossil energy conversions*. (John Wiley & Sons, 2011).
156. 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).
157. Global CCS Institute. Technology Readiness and Costs of CO₂. at (2020).
158. 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).
159. Dicks, A. L. Molten carbonate fuel cells. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 8, 379–383 (2004).
160. Bischoff, M. Molten carbonate fuel cells: A high temperature fuel cell on the edge to commercialization. *J. Power Sources* 160, 842–845 (2006).
161. Horánszky, B. CO₂ vezeték: Hibák és kockázatok. *Műszaki Földtudományi Közlemények* 84, (2013).
162. Zero Emissions Platform, Z. *IEA Greenhouse The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage*. (2011).
163. Zero Emissions Platform (ZEP). *A Trans-European CO₂ Transportation Infrastructure for CCUS: Opportunities & Challenges*. <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/A-Trans-European-CO2-Transportation-Infrastructure-for-CCUS-Opportunities-Challenges-1.pdf> (2020).
164. Zero Emissions Platform (ZEP). *The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage*. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/17011/costs-co2-capture-transport-and-storage.pdf> (2021).
165. International Energy Agency R&D Programme (IEAGHG). *Monitoring and Modelling of CO₂ Storage: The Potential for Improving the Cost-Benefit Ratio of Reducing Risk*. <https://climit.no/app/uploads/sites/4/2020/05/2020-01-Monitoring-and-Modelling-of-CO2-Storage.pdf> (2020).
166. Solomon, S. Criteria for Intermediate Storage of Carbon Dioxide in Geological Formations. *Bellona* (2006).
167. Mikkelsen, M., Jørgensen, M. & Krebs, F. C. The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide. *Energy Environ. Sci.* 3, 43–81 (2010).
168. Styring P, Jansen D, de Coninck H, Reith H & Armstrong K. *Carbon Capture and Utilisation in the green economy*. [http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU in the green economy report.pdf](http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf) (2011).
169. Braga, P., Lemos, F., Santos, R. dos, Nascimento, C. & França, S. Use of Bauxite Residue (Red Mud) as CO₂ Absorbent. *5th Int. Semin. Tailings Manag. Santiago, Chile* 11–13 (2018).

170. Tran, C. P. Red Mud Minimisation and Management for the Alumina Industry by the Carbonation Method. (University of Adelaide, 2016).
171. Moret, S., Dyson, P. J. & Laurenczy, G. Direct synthesis of formic acid from carbon dioxide by hydrogenation in acidic media. *Nat. Commun.* 5, 4017 (2014).
172. Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S. J. & Saravanan, A. A review on photochemical, biochemical and electrochemical transformation of CO₂ into value-added products. *J. CO₂ Util.* 33, 131–147 (2019).
173. Afzal, S. *et al.* Optimization Approach to the Reduction of CO₂ Emissions for Syngas Production Involving Dry Reforming. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 7532–7544 (2018).
174. Noureldin, M. M. B., Elbashir, N. O., Gabriel, K. J. & El-Halwagi, M. M. A Process Integration Approach to the Assessment of CO₂ Fixation through Dry Reforming. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 3, 625–636 (2015).
175. Arora, S. & Prasad, R. An overview on dry reforming of methane: strategies to reduce carbonaceous deactivation of catalysts. *RSC Adv.* 6, 108668–108688 (2016).
176. Wijffels, R. H. & Barbosa, M. J. An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science (80-)*. 329, 796–799 (2010).
177. *Gaseous Carbon Waste Streams Utilization*. (National Academies Press, 2019). doi:10.17226/25232.
178. Turnau, S. *et al.* Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies, including their regulatory aspects : final report. (2019).
179. Galadima, A. & Muraza, O. Waste to liquid fuels: potency, progress and challenges. *Int. J. Energy Res.* 39, 1451–1478 (2015).
180. Gholami, Z., Tišler, Z. & Rubáš, V. Recent advances in Fischer-Tropsch synthesis using cobalt-based catalysts: a review on supports, promoters, and reactors. *Catal. Rev.* 63, 512–595 (2021).
181. 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).
182. 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).
183. 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).
184. 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).
185. 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).
186. 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).
187. 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).
188. 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).
189. 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).
190. 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).
191. Iijima, T. & Yamaguchi, T. K₂CO₃-catalyzed direct synthesis of salicylic acid from phenol and supercritical CO₂. *Appl. Catal. A Gen.* 345, 12–17 (2008).

192. LI, X., LI, Q., ZHAO, Y., KANG, M. & WANG, J. Utilization of carbon dioxide in polyurethane. *J. Fuel Chem. Technol.* 50, 195–209 (2022).
193. 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.
194. Langanke, J. *et al.* Carbon dioxide (CO₂) as sustainable feedstock for polyurethane production. *Green Chem.* 16, 1865–1870 (2014).
195. 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).
196. 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).
197. Romanov, V. *et al.* Mineralization of Carbon Dioxide: A Literature Review. *ChemBioEng Rev.* 2, 231–256 (2015).
198. 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).
199. Hills, C. D., Tripathi, N. & Carey, P. J. Mineralization Technology for Carbon Capture, Utilization, and Storage. *Front. Energy Res.* 8, (2020).
200. Zajac, M., Skocek, J., Ben Haha, M. & Deja, J. CO₂ Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry. *Energies* 15, 3597 (2022).
201. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Carbon dioxide capture and storage*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (2005).
202. Energy Monitor. GlobalData can provide actionable insights to drive your company forward. <https://www.energymonitor.ai/companies/globaldata-energy/>.
203. CO₂ Value Europe. CCU Projects Database. <https://database.co2value.eu/>.
204. CO₂ Value Europe. AGGREGACO₂. <https://database.co2value.eu/projects/278>.
205. 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).
206. 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).
207. 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).
208. NEFCO. Advancements in CCUS offer new investment opportunities for impact investors – CRI commissions the world's first commercial CO₂-to-methanol plant. <https://www.nefco.int/news/ccus-offer-investment-opportunities-for-impact-investors/> (2022).
209. Carbon Recycling International. The Shunli CO₂-to-methanol plant: commercial scale production in China. <https://www.carbonrecycling.is/projects-shunli>.
210. Carbon Recycling International. The Finnfjord E-methanol Project: Commercial Scale E-methanol Production in Norway. <https://www.carbonrecycling.is/finnfjord-emethanol>.
211. Porthos CO₂ Transport & Storage. Project. <https://www.porthosco2.nl/en/project/>.
212. Trendafilova P. Porthos Plant Granted \$2.4 Billion By The Dutch Government For Carbon Capture. (2021).
213. Biogradlija A. EPC awarded for world's first CCS at waste to energy plant in Norway CCUS. (2022).
214. Országos Meteorológiai Szolgálat. Nemzeti Kibocsátási Leltár 1985-2020. at (2022).

215. FGSZ. Magyarország földgázz szállító vezetékének fejlődése. <https://fgsz.hu/vallalatunk/cegtortenet>.
216. Zero Emissions Platform (ZEP). *Building a CO2 transport infrastructure for Europe*. https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/ZEP-report_-building-a-CO2-transport-infrastructure-for-Europe.pdf (2013).
217. Neele F *et al.* *Towards a transport infrastructure for large-scale CCS in Europe* . (2011).
218. 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).
219. Szunyog, I. A villamos erőműi szén-dioxid-kibocsátás föld alatti tárolásának lehetőségei Magyarországon. *Műszaki Földtudományi Közlemények* (2012).
220. Kubus P. A CCS-projekt realitása a hazai olajipar szempontjából . *Magy. Tudomány* (2011).
221. Kubus, P. *Szén-dioxid összegyűjtés és visszasajtolás realitása a hazai olajipar szempontjából*. (2010).
222. MOL. *MOL Group Strategy 2030+*. <https://molgroup.info/hu/strategia-2030> (2021).
223. Nemzeti Klímavédelmi Hatóság. Klímagáz Adatbázis.
224. United Nations Climate Change. *Hungary 2022 National Inventory Report (NIR)*. <https://unfccc.int/documents/461959> (2022).
225. Nations, U. National Inventory Report Hungary 1985-2020. <https://unfccc.int/documents/461956> (2020).
226. Huszár A, Koczóh L & Schaffhauser T. *Magyarország Első Klímasegítségügyi Előrehaladási Jelentése*. https://www.greenpolicycenter.com/wp-content/uploads/2023/02/GPC-2022_elorehaladasi-jelentes.pdf (2023).
227. Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal; MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Zrt. *A magyar villamosenergia-rendszer 2021. évi adatai*. http://mekh.hu/download/1/72/31000/MEKH_statistikai_kiadvany_villamos_energia_A4_web_VÉGLEGES.pdf (2022).
228. European Commission. EU ETS Database. https://climate.ec.europa.eu/index_hu (2021).
229. MOL Petrolkémia. *Biztonsági Jelentés*. (2018).
230. Nitrogénművek Zrt. *Nitrogénművek: Éves jelentés 2021*. https://www.nitrogen.hu/hu/?option=com_content&view=article&id=146&Itemid=77 (2021).
231. Dobor J. Veszélyes szerves anyagok felhasználásának katasztrófavédelmi szempontú elemzése és a szerves kémia technológiai folyamatainak összefoglalása. *Hadmérnök* (2018).
232. Némethné Dr. Sóvágó, J. *Vegyipari és Petrolkémiai Technológiák: Általános és szerves kémiai technológia*. (2011).
233. Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület. Előállítás, elektrolízis. <https://www.hfc-hungary.org/elektrolizis/>.
234. Bölkény I & Vadászi M. Hidrogén előállításának lehetőségei. in *XIII. Tudomány- és Technikatörténeti Online Konferencia* (Miskolci Egyetem, 2020).
235. Tóth A J *et al.* Ártalmatlanítási eljárások kőolajiparban keletkező MEROX lúgokra. *Környezetvédelem és Környezetvédelem* (2017).
236. Széchy, G. *Bevezetés a kőolajfeldolgozás technológiájába*. (Trainex Kiadó, 2003).
237. Hilger M. Cementipar, hulladékhasznosítás, levegőminőség. at <https://slideplayer.hu/slide/2186059/>.
238. Kern, V. Darum ist die Zement-Produktion so klimaschädlich. <https://www.fr.de/wissen/darum-zement-produktion-klimaschaedlich-11018039.html> (2017).
239. Vezse A. Környezetbarát cementek. (Miskolci Egyetem, 2016).

240. Pátzay, G., Kun, R. & Mika, L. T. *A szervesetlen vegyipar ágazatai: Vas- és acélgyártás*. [http://kkft.bme.hu/attachments/article/42/08_Vas- és acélgyártás.pdf](http://kkft.bme.hu/attachments/article/42/08_Vas-és%20acélgyártás.pdf).
241. Hamburger Containerboard Prinzhorn Group. *Papírgyártás*. <https://www.hamburger-containerboard.com/hu/termek-es-termeles/papirgyartas/>.
242. European Commission. *Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en.
243. Szunyog I. A villamos erőműi szén-dioxid-kibocsátás föld alatti tárolásának lehetőségei Magyarországon. *Műszaki Földtudományi Közlemények* (2012).
244. 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.
245. SPE London Net Zero. *Business Models for Carbon Capture, Utilisation and Storage*. (2022).
246. Honegger, M. Toward the effective and fair funding of CO₂ removal technologies. *Nat. Commun.* 14, 534 (2023).
247. 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).
248. AFRY & Gaffney Cline. *CCUS deployment challenges and opportunities for the GCC*. https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2022/03/Gulf-CCUS-challenges-and-opportunities-Mar-2022-vf_compressed.pdf (2022).
249. International Centre for Sustainable Carbon. *CCUS Business Models and Incentives*. (2022).
250. *Nyilvános ajánlattétel Zöld Magyar Államkötvények forgalomba hozataláról*. <https://www.allampapir.hu/dokumentumok/7624b74d-7658-47a7-8f2e-4bfc4fb7ecf.pdf> (2023).
251. Climate Technology Centre and Network (CTCN). *CCS from cement production*. <https://www.ctc-n.org/technologies/ccs-cement-production> (2016).
252. 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).
253. 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).
254. 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).
255. 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).
256. 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).
257. Stolaroff, J. K. *et al.* Transport Cost for Carbon Removal Projects With Biomass and CO₂ Storage. *Front. Energy Res.* 9, (2021).
258. Roussanaly, S. *et al.* Towards improved cost evaluation of Carbon Capture and Storage from industry. *Int. J. Greenh. Gas Control* 106, 103263 (2021).
259. 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).

260. Zero Emissions Platform (ZEP). *Business models for commercial CO2 transport and storage: Delivering large-scale CCS in Europe by 2030*. <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/ZEP-report-on-Business-Models-for-Commercial-CO2-Transport-and-Storage.pdf> (2014).
261. 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-cs-cs-eu.pdf> (2013).
262. European Commission. ReFuelEU Aviation – sustainable aviation fuels. https://commission.europa.eu/document/b94c33cd-7249-4b4e-9c0d-5a0f8aed6b1d_en (2021).
263. Eberle, U. *Renewables in Transport 2050: Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity*. (2016).
264. 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).
265. Perner J, Unteutsch M & Lövenich A. *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels*. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf (2018).
266. Atmosfair. Atmosfair - Energy transition in the Global South and in air traffic. <https://www.atmosfair.de/de/>.
267. IATA. Jet fuel price monitor. <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/> (2023).
268. Monteiro, J. & Roussanaly, S. CCUS scenarios for the cement industry: Is CO2 utilization feasible? *J. CO2 Util.* 61, 102015 (2022).
269. 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).

Kérdőív

Szén-dioxid megkötési, tárolási és hasznosítási (CCU/S) technológia hazai alkalmazási lehetőségei



Tisztelt Hölgyem / Uram!

Köszönjük, hogy részt vesz felmérésünkben és a kérdőív kitöltésével támogatja a **hazai CCU/S Fehér könyv** összeállítását.

2022. októberében a hazai CCU/S ipar fejlődését megalapozó projekt indult, amely a zöld technológiákkal kapcsolatos társadalomtudományi aspektusok széles skáláját vizsgálja elsődlegesen **közgazdasági és jogi fókusszal**.

A projektben részt vevő szervezetek:

Szegedi Tudományegyetem Greenovation Center
Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium
IFUA Horvath & Partners Kft.

A projekt célja a hazai szén-dioxid tárolási, hasznosítási (CCU/S) ipar szakmai megalapozását támogató, **a hazai CCU/S stratégiát megalapozó „Fehér Könyv” összeállítása**, amely a gazdasági szereplők **dekarbonizációs stratégiáinak kidolgozását is segítheti**.

Jelen kérdőívet a meghatározó hazai kibocsátók számára állítottuk össze.
A kérdőív 7 munkalapon 28 db kérdést tartalmaz.

A kérdőív a következőképpen épül fel:

- | | |
|--|---|
| 1. <u>Munkalap - I_Kibocsátás_általános</u> | Általános vállalat(csoport) szintű kibocsátási tevékenységek és kvótát illető adatok |
| 2. <u>Munkalap - I_Kibocsátás_kibocsátási pontok</u> | Adott kibocsátási pontok legfontosabb kibocsátási adatai |
| 3. <u>Munkalap - II_Törekvések és célkitűzések</u> | CO ₂ -kibocsátás csökkentésével kapcsolatos vállalati motivációk, célok, korlátok, jelenlegi projektek |
| 4. <u>Munkalap - III_Jövőbeli elképzelések</u> | CO ₂ -kibocsátás csökkentéséhez tervezett alkalmazandó technológiák, tervezett beruházások |
| 5. <u>Munkalap - IV_Szabályozási környezet</u> | CO ₂ -kibocsátás szabályozási környezetével kapcsolatos kérdések |
| 6. <u>Munkalap - V_Fenntarthatósági Jelentés</u> | A Fenntarthatósági Jelentés benyújtásának felülete |
| 7. <u>Munkalap - VI_Adatkezelési tájékoztató</u> | Az Adatkezelési tájékoztató elérésének és elfogadásának helye |

A kérdőív kitöltésének becsült időigénye 30 perc.

A megosztott adatokat bizalmasan kezeljük, az elemzések eredményeit kizárólag aggregáltan és **anonim módon** mutatjuk be.

Előre is köszönjük, hogy kitöltésével hozzájárul a hazai CCU/S Fehér Könyv összeállításához.

Amennyiben a kérdőívvel / témával kapcsolatban kérdése, észrevétele van, keressen minket bizalommal.

Az alábbi elérhetőségen állunk rendelkezésre:

ccus@szte.hu

Projekt forrása: RRF-2.3.1-21-2022-00009

Projekt finanszírozója: MEGÚJULÓ ENERGIÁK NEMZETI LABORATÓRIUM

I. Kibocsátási adatok, folyamatok - 1. Általános

1. A vállalat / vállalatcsoport neve

2. CO₂-kibocsátással érintett ipari tevékenységek

Kérjük, jelöljön meg minden, a vállalata által folytatott releváns tevékenységet (max. 5):

 Egyéb:

Tevékenységek

Tevékenység 1

Tevékenység 2

Tevékenység 3

Tevékenység 4

Tevékenység 5

3. 2021. évi vállalati szintű károsanyag-kibocsátás

Érték

Mértékegység

Teljes ÜHG kibocsátás:

t CO₂e

Teljes szén-dioxid kibocsátás:

t CO₂

Biomasszából származó szén-dioxid kibocsátás:

t CO₂

Szén-dioxid kibocsátásból megkötött (captured):

t CO₂

4. Mennyi CO₂-kvóta áll a vállalat rendelkezésére az EU ETS keretében?

Érték

Mértékegység

Ciklus:

évek között

Teljes ÜHG kvóta mennyisége:

t CO₂e

5. Hogyan kezeli a vállalat a tényleges kibocsátás és a rendelkezésre álló kvóta közötti különbséget?

Kérjük, válassza ki:

Amennyiben egyéb módon, kérjük, adja meg:

Kezelés módjának rövid leírása:

6. Hogyan jellemezné a vállalati szintű CO₂-kibocsátás változását az utóbbi időszak tekintetében?

Kérjük, válassza ki:

Kérjük, indokolja (pl. növekvő termelés, kibocsátáscsökkentő fejlesztések, stb.):

7. Rendelkezik a vállalat CO₂-kibocsátási dokumentációval?

Kérjük, válassza ki:

Kérjük, ha igen, adja meg, milyen formában, ha nem, hagyja üresen:

Ha igen, kérjük, adja meg, hozzáférhető-e (legalább egy része) jelen kutatás céljából:

8. Folytat jelenleg a vállalat szén-dioxid megkötés/tárolás/hasznosítási (CCU/S) tevékenységet?

Kérjük, válassza ki:

Amennyiben igen, kérjük, adja meg, milyen technológiát alkalmaz:

I. Kibocsátási adatok, folyamatok - 2. Kibocsátási pontok

9. **A vállalat kibocsátási pontjaival (telephelyekkel, egyéb definiált kibocsátási egységekkel) kapcsolatos adatok**
 Az egyes azonos tevékenységek és technológiák mentén a kibocsátási pontok aggregálhatók.
 Aggregált adatszolgáltatás esetén a kibocsátási volumenhez az aggregált kibocsátási pontok összegét, a főbb összetevők esetében pedig átlagos értéket adjon meg.

	Kibocsátási pont 1	Kibocsátási pont 2	Kibocsátási pont 3	Kibocsátási pont 4	Kibocsátási pont 5
Név (kibocsátási pont(ok) egyedi megnevezése)					
Helyszín (irányítószám)					
Tevékenység (kibocsátást okozó tevékenység megnevezése)					
Technológia (kibocsátást okozó berendezés megnevezése)					
Aggregált kibocsátási pontok száma					
Folyamat rövid leírása (max. 3 mondat)					
2021. évi kibocsátási pont szintű emisszió (t CO ₂ e)					

Ebből szén-dioxid (t CO₂)						
ebből biomasszából származó szén-dioxid (t CO ₂)						
ebből megkötött (captured) szén-dioxid (t CO ₂)						
Megkötés technológiája (ha releváns)						
Megkötöttből tárolt (stored) (t CO ₂)						
Tárolás módja (amennyiben releváns)						
Megkötöttből felhasznált (utilised) (t CO ₂ vagy %)						
Felhasználás célja						
Kibocsátott gáz jellemzői (kérjük, a CO ₂ mennyiségét mindenképpen töltsse fel)						
Főbb összetevők (%)	Megnevezés (név vagy jelölés)					
Összetevő 1						
Összetevő 2						
Összetevő 3						
Összetevő 4						
Összetevő 5						
Összetevő 6						
Összetevő 7						
Összetevő 8						
Gázelegy nyomása (bar)						
Kibocsátás fluktuációja (szezonális)						

Tapasztalható fluktuáció / szezonálisitás a kibocsátás mennyiségében?					
Ha igen, jellemzően milyen mértékű a napon belüli kibocsátási volumen ingadozása?					
Ha igen, jellemzően milyen mértékű a hónapon belüli kibocsátási volumen ingadozása?					
Ha igen, jellemzően milyen mértékű az éven belüli kibocsátási volumen ingadozása?					
Megjegyzés					
Adat forrása (Mérés / Mintavétel és becslés / Becslés)					
Mérési eszköz / számítási módszertan rövid leírása:					

II. Törekvések és célkitűzések

10. **Milyen releváns motivációkat azonosítottak a vállalat számára a CO₂-kibocsátás csökkentése kapcsán?**
Kérjük, tegye fontossági sorrendbe az alábbi kategóriákat (1 - legkevésbé fontos; 5 - legfontosabb), illetve ahol lehet, adjon hozzájuk példákat.

	Értékelés (kiválasztandó)	Példák (megadandó)
Környezeti fenntarthatósági célok		
Társadalmi / Vevői elvárások		
Gazdaság / Pénzügyi ösztönzők		
Technológiai fejlesztések		
Szabályozási előírások		
Foglalkoztatási szempontok		
Egyéb megjegyzések:		

11. **Rendelkezik a vállalat CO₂-kibocsátás-csökkentési céllal?**

Kérjük, válassza ki:

Ha igen,

egynél több céldátum és célérték esetén (pl. 2030 és 2050) kérjük, mindegyik kitűzött célértéket tüntesse fel:

mely év(ek)re vonatkozóan:				év
mely bázisévhez viszonyítva:				év
milyen mértékben (t vagy %):				

Egyéb megjegyzések:

Ha nem,

tervezett-e konkrét célértéket meghatározni:

milyen esetben kerülne ez megfontolásra:

- 12. Mik a CO₂-kibocsátás csökkentésének legrelevánsabb korlátjai a vállalata számára?**
Kérjük, értékelje a kategóriákat relevancia szerint, illetve ahol lehet, adjon hozzájuk példákat.

	Értékelés (kiválasztandó)	Példák (megadandó)
Gazdaság / Pénzügyi		
Technológiai		
Szabályozási		
Egyéb		

CCU/S releváns kérdések

- 13. Vállalatának iparágán belül mely terület(ek)en látja a CCU/S technológia jelentősebb szerepét?**

Kérjük, adja meg:

- 14. Van-e a vállalatnak CCU/S technológiára vonatkozó folyamatban lévő projektje?**

Kérjük, válassza ki:

Ha igen, kérjük, röviden fejtse ki:

III. Jövőbeli elképzelések

15. **Milyen módon kívánja a vállalat elérni CO₂-kibocsátás-csökkentési céljait?**
Kérjük, jelöljön meg minden tervezett módszert.

	Értékelés (kiválasztandó)	Megjegyzés, példa
Hatékonyaságnövelés		
Új gyártási technológia / Technológiaváltás		
CCU/S technológia bevezetése / alkalmazása		
Megújuló energiák alkalmazása		
Elektrolízis alapú zöld H₂		
Bezárás / Leállítás / Input csökkentése		
Nincsenek vállalati törekvések		
Egyéb		
amennyiben egyéb módon, kérjük, adja meg:		

16. **Kérjük, számszerűsítse (becsülje meg) a megvalósítandó CO₂-kibocsátás-csökkentési beruházások várható hatását.**

	Beruházás_1	Beruházás_2	Beruházás_3	Beruházás_4	Beruházás_5
Beruházás megnevezése					
Beruházások fajlagos kibocsátás-csökkentése (elkerült tCO ₂ /mEUR beruházás)					
Teljes kibocsátásintenzitás-csökkentés mértéke (tCO ₂ /t termék és %)					
Foglalkoztatott létszám várható változása					
Létszámváltozás mértéke (+/- fő)					

17. **A vállalat jövőbeli beruházásainak tervezetten hány százalékát fordítják a kibocsátás csökkentésére?**
Kérjük, az első három év átlagát adja meg.

Első beruházási év:

Kérjük, válassza ki:

CCU/S releváns kérdések

18. **Amennyiben a vállalat tervei között szerepel CCU/S technológiai projekt, kérjük, adjon róla rövid leírást.**

Leírás:

19. Amennyiben a vállalat nem tervez CCU/S technológiát, kérjük, fejtse ki ennek okát.

Indoklás:

20. A CCU/S megoldások és technológia kapcsán keres-e a vállalata külső partnert / külső kompetenciát?
Ha igen, milyen megoldás/technológia mentén?

Kérjük, válassza ki:

Ha igen, milyen megoldás / technológia mentén:

21. Milyen CO₂-kvóta árszínvonalon fontolná meg a CCU/S technológia (adott esetben további) alkalmazását vállalata?

Kérjük, adja meg: EUR / t CO₂

22. Milyen akadályozó tényezőket lát vállalata számára a CCU/S projektek megvalósulása előtt?
Kérjük, értékelje a kategóriákat relevancia szerint (1 - egyáltalán nem fontos; 5 - nagyon fontos).

Magas beruházási igény
Magas működtetési költség
Alacsony megtérülésű projektek

Technológiai / műszaki alkalmazhatóságból fakadó bizonytalanság

Technológia magas energiaigénye

Alacsony villamosenergia- és földgáz árak

Magas villamosenergia- és földgáz árak

Alacsony szén-dioxid-kvóta árak

CO₂ infrastruktúra hiánya

CO₂ piac (kereslet) hiánya

Szakpolitikai / szabályozási bizonytalanság

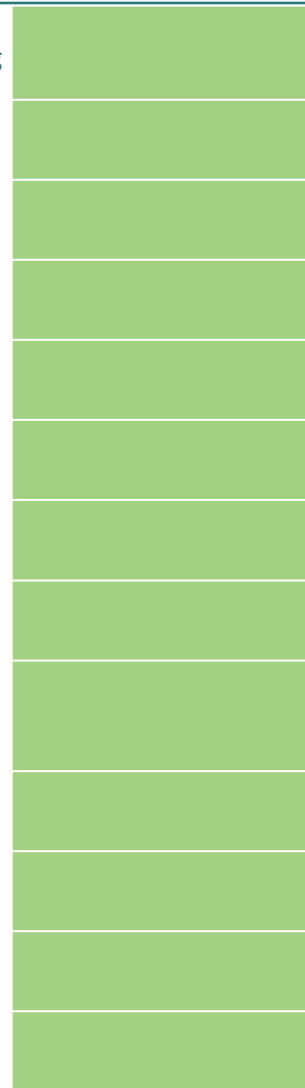
**Engedélyekkel, szabványokkal kapcsolatos bizonytalanság /
hiányosságok**

Szakpolitikai ösztönzők hiánya

Finanszírozási nehézségek

Társadalmi támogatottság hiánya

Egyéb



IV. Szabályozási környezet

23. **Mi akadályozza jelenleg szabályozási oldalról vállalata CO₂ kibocsátás csökkentési céljainak elérését?**

Kérjük, fejtse ki:

24. **Szabályozási oldalról jelenleg mi támogatná vállalata CO₂ kibocsátás csökkentési célkitűzések elérését?**

Kérjük, fejtse ki:

25. **Mit vár, mi fog változni az uniós és hazai szabályozási környezetben, ami befolyásolja vállalata jövőbeni CO₂ kibocsátás csökkentési céljainak elérését?**

Kérjük, fejtse ki:

26. **A CCU/S technológiák/megoldások alkalmazását milyen szabályozási tényezők akadályozzák?**

Kérjük, fejtse ki:

27. **A CCU/S technológiák/megoldások alkalmazását milyen szabályozási tényezők támogathatják?**

Kérjük, fejtse ki:

V. Fenntarthatósági Jelentés

28. Kérjük, adja meg a vállalkozás legfrissebb (lehetőleg 2021-es) Fenntarthatósági Jelentésének linkjét. Amennyiben Önnek kényelmesebb, úgy kérjük, küldje el a ccus@szte.hu e-mail címre.

Link:

VI. Adatkezelési tájékoztató

Számunkra fontos adatai védelme. Az alábbi linkre kattintva elérheti a jelen kérdőívhez tartozó Adatkezelési tájékoztatónkat, melyben minden fontos információt megtalál az adatok kezelési és -tárolási módjáról.

Link:

<https://greennovation.hu/kerdoiv-adatkezelesi-tajekoztato>

Az Adatkezelési tájékoztató elfogadásával hozzájárul ahhoz, hogy adatait kezeljük, valamint hozzájárul a kutatásban való részvételhez.

