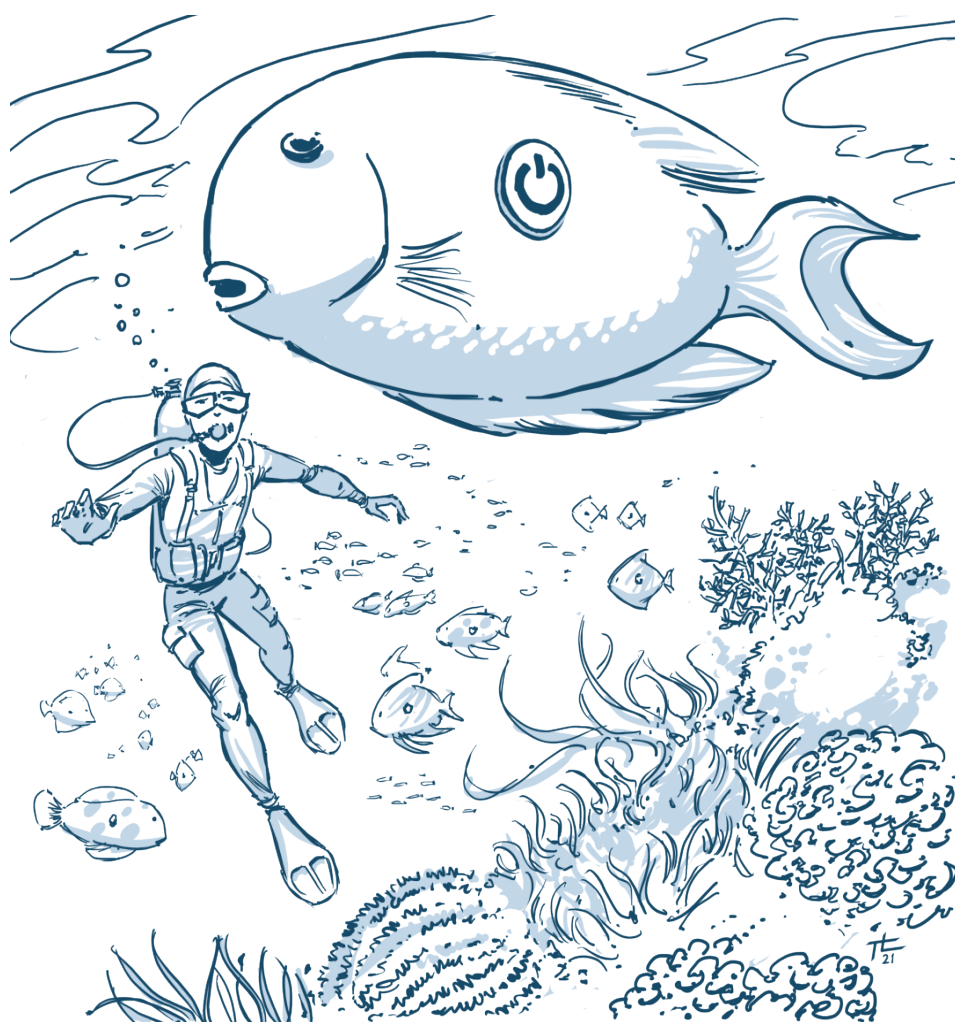


PRZYSZŁOŚĆ CO₂

CZY TECHNOLOGIE SEKWESTRACJI,
UTYLIZACJI I MAGAZYNOWANIA CO₂
PRZYNIOSĄ OCZEKIWANE REZULTATY?



The Futures Literacy Company



W ciągu ostatniego roku Unia Europejska poczyniła znaczące postępy w zakresie wdrażania polityk oraz rozwoju projektów sekwestracji, utylizacji i magazynowania dwutlenku węgla (CCUS). Przyspieszenie to nastąpiło dzięki ustanowieniu celu redukcji emisji o 90% do 2040 r. oraz zerowej emisji netto do 2050 r. Dotychczas pozostawione samemu sobie, europejskie CCUS doczekało się w tym krótkim czasie: konkretnego planu dotyczącego sposobów zachęcania do zwiększania skali projektów w tym obszarze, obowiązku rozwoju zdolności magazynowania CO₂ w UE oraz jasnej wizji tego, w jaki sposób CCUS ma przyczynić się do ogólnej polityki klimatycznej i osiągnięcia celów klimatycznych na rok 2040.

Aby osiągnąć cele na lata 2040 i 2050, UE zamierza zaprzestać korzystania z węgla, przejść z energii pochodzącej z paliw kopalnych na źródła odnawialne i zelektryfikować transport. Pozostaje jednak problem emisji pochodzących z pojazdów, żeglugi, lotnictwa oraz niektórych źródeł ropy i gazu. Aby temu zaradzić, UE przyspieszyła wdrażanie technologii CCUS. Pomimo tego implementacja tych technologii boryka się z szeregiem poważnych wyzwań i jest przedmiotem wielu kontrowersji zarówno ze strony organizacji ekologicznych, jak i przemysłu.

NIEWIDZIALNY KAMIEŃ WĘGIELNY: WYCHWYTYWANIE DWUTLENKU WĘGLA W WALCE Z KLIMATEM

CCUS obejmuje następujące podejścia:

- sekwestrację i magazynowanie dwutlenku węgla (CCS) bezpośrednio ze źródeł emisji przemysłowych i składowanie go głęboko pod ziemią lub w głębokich formacjach oceanicznych, zapobiegając jego uwolnieniu do atmosfery;
- usuwanie dwutlenku węgla bezpośrednio z atmosfery (CDR);
- przekształcanie wychwyconego CO₂ w produkty, takie jak paliwa, chemikalia i materiały budowlane (CCU);
- produkcję bioenergii z wychwytywaniem i magazynowaniem dwutlenku węgla (BECCS), podczas której biomasa przekształcana jest w paliwa lub bezpośrednio spalana w celu wytworzenia energii. Ponieważ rośliny pochłaniają CO₂ podczas wzrostu, jest to sposób na usunięcie CO₂ z atmosfery.

Ambitne cele określone w Porozumieniu Paryskim zachęciły rządy i przemysł do wdrożenia wspierających polityk oraz inwestowania w badania i projekty pilotażowe. Unia Europejska, Stany Zjednoczone, Wielka Brytania oraz kilka krajów Bliskiego Wschodu przewodzą w tych działaniach, podejmując znaczące zobowiązania i inicjując innowacyjne projekty.

Droga do powszechnego wdrożenia CCUS jest jednak wciąż daleka i pełna wyzwań. Wysokie koszty, niezwyfikowana technologia oraz konieczność rozbudowy infrastruktury stanowią poważne przeszkody. Dodatkowo, obawy, że CCUS będzie usprawiedliwieniem dalszego wydobycia i stosowania paliw kopalnych, jak również te związane z potencjalnymi zagrożeniami dla ludzi i środowiska, utrudniają uzyskanie społecznej akceptacji.

W obliczu wyzwań i możliwości nasuwa się szereg pytań:

JAKI JEST STOPIEŃ ZAAWANSOWANIA
CCUS?

CZY OBECNE WYZWANIA MOGĄ ZOSTAĆ
PRZEZWYCIĘŻONE WYSTARCZAJĄCO
SZYBKO, ABY POMÓC ZŁAGODZIĆ
ZMIANY KLIMATU?

JAKIE SĄ KONSEKWENCJE
ŚRODOWISKOWE KAŻDEJ Z TYCH
TECHNOLOGII W CAŁYM CYKLU JEJ ŻYCIA?

Z JAKIMI WYZWANIAM I PRZYJDZIE SIĘ
NAM ZMIERZYĆ, ZANIM CCUS TRAFIĄ
DO GŁÓWNEGO NURTU?

Przyjrzymy się również trendom oraz najnowszym osiągnięciom technologicznym, które mogą znacząco wzmocnić lub osłabić te trendy.



Postępy w rozwoju wszystkich ścieżek technologicznych zarządzania dwutlenkiem węgla są dość obiecujące. Globalne inicjatywy oraz rządowe polityki napędzają ten rozwój. Jednak aby osiągnąć odpowiednią skalę wychwytywania CO₂ i realnie przyczynić się do redukcji emisji, niezbędne są dalsze potężne inwestycje i innowacje.

Polityki i programy rządowe

Rządy na całym świecie uznają znaczenie CCUS dla osiągnięcia swoich celów klimatycznych i wdrażają wspierające polityki i programy, aby przyspieszyć rozwój technologii i projektów zarządzania dwutlenkiem węgla.

Unijna ustawa o zerowej emisji dwutlenku węgla. UE wyznaczyła ambitne cele w zakresie wychwytywania, utylizacji i magazynowania dwutlenku węgla w ramach ustawy Net-Zero Industry Act. Obejmują one utworzenie centrów wychwytywania i magazynowania dwutlenku węgla oraz zwiększenie finansowania badań i rozwoju w tej dziedzinie.

Unijna strategia zarządzania emisjami dwutlenku węgla w przemyśle (EU's Industrial Carbon Management Strategy). W lutym 2024 r. UE ustanowiła kompleksowe, ogólnounijne, dobrowolne ramy certyfikacji wychwytywania dwutlenku węgla. Rozporządzenie to określa unijne kryteria jakości oraz nakreśla procesy monitorowania i sprawozdawczości.

Horyzont Europa. Komisja Europejska wspiera również badania, rozwój i innowacje w zakresie przemysłowych technologii zarządzania emisjami dwutlenku węgla za pośrednictwem programu Horyzont Europa i poprzez zaangażowanie zainteresowanych stron - grupy roboczej ds. strategicznego planu dla technologii energetycznych CCUS (Strategic Energy Technology Plan Working Group on CCUS) i powiązanej z nią „Platformy zerowej emisji” (European Technology and Innovation Platform 'Zero Emissions Platform'). W ramach klastra 5 programu „Horyzont Europa” (Klimat, Energia i Mobilność) Komisja wspiera opracowywanie nowych lub ulepszanie istniejących technologii wychwytywania CO₂. Specjalny projekt CCUS Zero Emission Network (ZEN) wspiera integrację CCS i CCU w hubach i klastrach, w tym działania związane z wymianą wiedzy. W obrębie klastra 4 programu „Horyzont Europa” (sektor cyfrowy, przemysłowy i kosmiczny) będą prowadzone projekty w zakresie sekwestracji i wykorzystania dwutlenku węgla w sferze symbiozy przemysłowej i w hubach na rzecz obiegu zamkniętego.

Fundusz Innowacji. Od lutego 2024 r. Fundusz Innowacji wspiera łączną kwotę ponad 3,3 mld euro 26 projektów przemysłowego zarządzania emisjami dwutlenku węgla.

Brytyjska „mapa drogowa” inwestycji CCUS Net Zero. Rząd Wielkiej Brytanii opublikował kompleksową strategię wspierania rozwoju CCUS. Obejmuje ona inwestowanie w infrastrukturę, zapewnienie zachęt finansowych i usprawnienie przepisów. Wszystko po to, aby zachęcić prywatnych inwestorów i przyspieszyć realizację projektów.

Amerykańska ustawa o redukcji inflacji i program zakupu CDR. Ustawa Inflation Reduction Act znacznie rozszerzyła ulgi podatkowe związane z projektami CCUS, zwiększając ich atrakcyjność finansową. Ponadto rząd uruchomił pilotażowy program zakupu technologii sekwestracji dwutlenku węgla z atmosfery (CDR Purchase Program).

Japońska długoterminowa „mapa drogowa” CCS. Japonia opublikowała długoterminowy plan rozwoju CCS, którego celem jest osiągnięcie znacznej redukcji emisji CO₂ do 2050 roku.

Cele CCS Arabii Saudyjskiej. Arabia Saudyjska wyznaczyła ambitny cel wychwytywania i magazynowania 44 milionów ton metrycznych CO₂ rocznie do 2035 roku. Kraj ten inwestuje znaczne środki w infrastrukturę i rozwój technologii CCS.

500 projektów CCUS w toku

Obecnie na świecie realizowanych jest ponad 500 projektów CCUS (na różnych etapach rozwoju), obejmujących cały łańcuch wartości, od wychwytywania po magazynowanie i utylizację.

Sekwestracja. Kilka dużych projektów CCS już działa, wychwytyując CO₂ z elektrowni i obiektów przemysłowych. Godne uwagi przykłady obejmują projekt Petra Nova w USA, projekt Boundary Dam w Kanadzie oraz projekty Sleipner i Snøhvit w Norwegii.

Transport. Rozwija się infrastruktura transportu CO₂: rurociągi i sieci żeglugowe, które mają połączyć punkty sekwestracji z miejscami magazynowania dwutlenku węgla. Projekty Porthos w Holandii i Northern Lights w Norwegii odgrywają dziś wiodącą rolę w tym zakresie.

Utylizacja. Trwają badania nad wieloma innowacjami pozwalającymi przekształcać wychwycony CO₂ w konkretne produkty. Na przykład firmy takie jak Twelve i LanzaTech są pionierami w kwestii wdrażania technologii CCU na dużą skalę. Z kolei inne podmioty koncentrują się na przykład na produkcji cementu neutralnego pod względem emisji dwutlenku węgla czy na wykorzystaniu CO₂ w druku 3D.

Magazynowanie. Formacje geologiczne, takie jak solankowe warstwy wodonośne i wyczerpane złoża ropy naftowej i gazu, oferują możliwość trwałego składowania CO₂. Realizowanych jest kilka przedsięwzięć magazynowania na dużą skalę, w tym projekty Sleipner i Snøhvit w Norwegii, projekt Quest w Kanadzie i projekt Gorgon w Australii.

Postęp technologiczny

Ciągłe innowacje napędzają rozwój technologii CCUS, coraz bardziej zwiększając ich wydajność, opłacalność i skalowalność.

Sekwestracja. Postępy w technologiach wychwytywania, takich jak spalanie wtórne, spalanie wstępne i spalanie tlenowo-paliwowe, poprawiły wydajność i obniżyły koszty CCS. Nowe materiały, takie jak struktury metaloorganiczne (MOF) i sorbenty stałe, również zwiększają możliwości wychwytywania CO₂.

Transport. Rozwój specjalistycznych statków i rurociągów poprawia wydajność i bezpieczeństwo transportu wychwyconego CO₂.

Utylizacja. Prace badawczo-rozwojowe prowadzą do odkrycia nowych ścieżek przekształcania CO₂ w produkty, rozszerzając potencjalne zastosowania CCUS.

Magazynowanie. Postępy w technologiach monitorowania i nadzoru zwiększają bezpieczeństwo składowania CO₂.

Co dalej?

Dotychczas poczyniono znaczne postępy w całym łańcuchu wartości technologii CCUS. Jednak potrzeba jest wciąż znacznych inwestycji, wielu innowacji i współpracy międzynarodowej, aby sprostać wyzwaniom, których przezwyciężenie pozwoliłoby w pełni wykorzystać potencjał CCUS w łagodzeniu zmian klimatu i osiągnięciu celów zerowej emisji netto.

Polityki publiczne i wsparcie państw

- Obecne polityki i programy wdrażania technologii CCUS różnią się w poszczególnych państwach i wciąż podlegają ciągłej ewolucji.
- Ze względu na swój nowatorski i eksperymentalny charakter, technologie CCUS muszą zostać sprawdzone w projektach o dużej skali, które wymagają międzynarodowej współpracy.
- Konieczne jest państwowe wsparcie budowy wspólnej (ponadnarodowej) infrastruktury i pośrednie zachęty dla sektora prywatnego oraz jasne reguły udzielania i dostępu do pozwoleń, jak też precyzyjne zasady zarządzania ryzykami związanymi z CCUS.

Realizacja projektów

- Projekty są duże i nowatorskie. Ich opracowanie zabiera dużo czasu. Wiążą się też z ryzykiem niepowodzenia już na wczesnym etapie. 78% projektów z lat 1995-2018 o wielkości powyżej 0,3 MT CO₂ rocznie zostało zaniechanych lub wstrzymanych.
- Projekty CCUS wymagają koordynacji i współpracy między wieloma firmami i organizacjami o różnych celach, agendach i harmonogramach, modelach biznesowych, czy różnych etapach realizacji przez nie danego projektu w łańcuchu wartości CCUS.

Opłacalność

- Wysokie koszty wychwytywania, transportu i magazynowania lub utylizacji CO₂.
- Inwestycje w infrastrukturę i korzyści skali są niezbędne do obniżenia kosztów.
- Trudno jest określić strumienie przychodów z CCUS, co sprawia, że trudno jest obronić plany inwestycji i uzyskać finansowanie na realizację projektów. Obecnie projekty są często finansowane ze środków własnych wielkich koncernów.
- Również same firmy wahają się angażować własny kapitał bez pewności regulacyjnej.
- Istnieje duża rozbieżność kosztowa obecnie realizowanych projektów, w których koszt tony CO₂ waha się pomiędzy 80 a 150 euro.

Akceptacja społeczna

- Niektórzy postrzegają CCUS jako typowe technologie „końca rury”, umożliwiające kontynuację działalności przemysłu opartego na paliwach kopalnych, a nie jako zielone innowacje.
- Ponadto akceptację społeczną utrudniają obawy o to, że techniki geoinżynierijne nie usuwają pierwotnych przyczyn zmian klimatu. Na obszarach, na których znajdują się podziemne magazyny CO₂ dochodzi do protestów ze strony lokalnych społeczności.
- Jednym ze znaczących ryzyk są nieprzewidywalne warunki podpowierzchniowe, potencjalne wycieki gazów cieplarnianych i zagrożenie dla ludzi i środowiska.
- Brak jasnej odpowiedzialności za koszty związane z monitorowaniem magazynów i za ewentualne środki zaradcze i usuwanie skutków potencjalnych wycieków.

Dojrzałość technologiczna

- niesprawdzona technologia, wiele rozwiązań CCUS wciąż znajduje się na wczesnym etapie rozwoju.
- Potrzebne są intensywne badania i rozwój oraz szeroka prezentacja ich rezultatów, aby można było wdrażać CCUS na wielką skalę i osiągnąć opłacalność ekonomiczną w przyszłości.
- Budowa magazynów CO₂ może zająć od 3 do 10 lat. Może to być zbyt długo, aby skutecznie przeciwdziałać zmianom klimatu czy skutecznie przyczynić się do osiągnięcia założeń polityki redukcji emisji CO₂ do 2050 r.
- Wykazanie niezawodności materiałów budowlanych wykorzystujących do ich produkcji CO₂ ma kluczowe znaczenie.

Infrastruktura

- Głównym wąskim gardłem w wdrażaniu technologii CCUS jest brak infrastruktury transportu i magazynowania CO₂.
- Koordynacja elementów łańcucha wartości ma kluczowe znaczenie dla skutecznego wychwytywania dwutlenku węgla przez centra przemysłowe.



Zużycie energii

- Wychwytywanie i sprężanie CO₂ wymaga znacznej ilości energii, zwiększając zapotrzebowanie na paliwo o 25-40% w przypadku elektrowni węglowych.
- Obecnie wysoka temperatura konieczna w konfiguracjach L-DAC ogranicza elastyczność w korzystaniu z niskoemisyjnych źródeł energii.

Wymagania dotyczące gruntów i wody

- BECCS wymaga dużej ilości gruntów pod uprawy biomasy.
- Zapotrzebowanie na wodę dla DAC różni się w zależności od zastosowanej technologii.
- Wymagane są dalsze testy instalacji DAC w różnych warunkach klimatycznych.

Przepisy

- Do stworzenia popytu na usługi CCUS potrzebne są odpowiednie ramy regulacyjne i mechanizmy rynkowe.
- Należy opracować też spójne międzynarodowo metodologie i ramy rozliczeniowe CCUS.
- Magazynowanie CO₂ wymaga rygorystycznych przepisów dotyczących monitorowania wycieków i długoterminowej integralności składowania dwutlenku węgla.





Obserwowane obecnie zmiany wpływające korzystnie [↗] lub niekorzystnie [↘] na rozwój technologii CCUS.

- **Postępujące zmiany klimatyczne**
W miarę nasilania się zmian klimatu, technologie CCUS mają szansę zostać powszechnie uznanymi za ważne narzędzie ograniczania skutków emisji gazów cieplarnianych. Może to prowadzić do większej liczby eksperymentów geoinżynieryjnych.
- **Rosnące zobowiązania klimatyczne ze strony rządów i przedsiębiorstw**
Wdrożenie podatków od emisji dwutlenku węgla lub systemów ograniczania emisji i handlu nimi zachęca do redukcji emisji oraz czyni CCUS coraz bardziej atrakcyjnym finansowo. Wdrażane są różne polityki i regulacje wspierające rozwój technologii CCUS. Coraz więcej jest też zachęt takich jak ulgi podatkowe, granty i dotacje, które mają skłonić firmy do inwestowania w projekty CCUS.
- **Szybki rozwój nowych technologii w dziedzinie materiałoznawstwa, biologii syntetycznej, sztucznej inteligencji, technologii blockchain i obliczeń kwantowych**
Trwające prace badawczo-rozwojowe przyczyniają się do zwiększenia wydajności i opłacalności wychwytywania i magazynowania dwutlenku węgla. Prowadzą również do powstania nowych technologii transportowych czy technik monitorowania magazynów CO₂ oraz do opracowania neutralnych pod względem emisji dwutlenku węgla alternatywnych materiałów i produktów.
- **Rosnące zużycie energii**
Rosnące zużycie energii spowodowane wzrostem globalnej populacji i rozwojem technologicznym (AI) może wymagać wdrożenia wielorakich rozwiązań pozwalających na obniżenie emisji gazów cieplarnianych.
- **Wzrost świadomości społecznej dotyczącej zmian klimatu**
W miarę jak opinia publiczna staje się bardziej świadoma zagrożeń związanych ze zmianami klimatu, może pojawić się większe poparcie dla polityk promujących CCUS.

- **Transformacja energetyczna i dekarbonizacja**
CCUS zapewnia możliwość wychwytywania emisji CO₂ bezpośrednio u źródła, w zakładach branży cementowej, stalowej i przetwórstwa chemicznego. Technologia ta pomaga tym sektorom w osiąganiu celów zrównoważonego rozwoju i przestrzeganiu wymogów regulacyjnych. Uznaje się, że z technologicznego punktu widzenia niemożliwe będzie całkowite wyeliminowanie emisji przemysłowych, tak by osiągnąć zerowe emisje zgodnie z założeniami UE. Te pozostałe emisje będą musiały zostać wychwycone za pomocą technologii CCUS.
- **Rozwój nowych metod pozyskiwania energii**
Nowe procesy produkcji energii jądrowej (fuzja jądrowa) mogą uzupełnić lub zastąpić bardziej tradycyjne źródła emitujące dwutlenek węgla. Fale, pływy i prądy morskie również mogą zapewnić w przyszłości bardziej niezawodne źródła energii niż wiatr czy słońce.
- **Rosnące inwestycje środowiskowe, społeczne i związane z łaodem korporacyjnym (ESG)**
Inwestorzy coraz częściej poszukują firm, które podejmują kroki zmniejszające ich wpływ na środowisko. Może to prowadzić do zwiększenia inwestycji w projekty CCUS.
- **Rozwój nowych modeli biznesowych wykorzystujących CCUS**
Nowe modele biznesowe, takie jak na przykład wychwytywanie dwutlenku węgla jako usługa, mogłyby uczynić CCUS bardziej atrakcyjnym finansowo dla firm.
- **Deglobalizacja**
Ograniczenie międzynarodowej współpracy, może negatywnie wpłynąć na rozwój CCUS. Jej skutkiem może być fragmentacja regulacji, zakłócenia w łańcuchach dostaw oraz mniejsza wymiana innowacji technologicznych. Osłabienie globalnych porozumień klimatycznych i koncentracja na krajowych priorytetach energetycznych mogą ograniczyć inwestycje w CCUS. W rezultacie, odchodzenie od globalnej integracji może utrudnić zbiorowe działania niezbędne do rozwoju CCUS i osiągnięcia celów klimatycznych.



ROZWIĄZANIA INSPIROWANE NATURĄ

Naśladowanie naturalnych procesów (fotosynteza, biomineralizacja) i wykorzystywanie zmodyfikowanych za pomocą bioinżynierii organizmów (mikroalg) i enzymów do wydajnego wychwytywania, utylizacji i magazynowania dwutlenku węgla.

Sztuczna fotosynteza

Naśladowanie naturalnej fotosyntezy, aby wychwytywać i przekształcać CO₂ w związki organiczne przy użyciu światła słonecznego, np. zmodyfikowane liście, które naśladują naturalną fotosyntezę ze zwiększoną wydajnością.

Biologia syntetyczna

Inżynieria organizmów wykorzystywanych do wychwytywania i/lub utylizacji CO₂ w produkcji szerokiej gamy chemikaliów i materiałów. Pomogłoby to przekształcić procesy przemysłowe i stworzyć nowe rynki dla produktów pochodzących z CO₂. Można to potencjalnie osiągnąć poprzez:

- stworzenie specjalnie zaprojektowanych mikroorganizmów, które będą wychwytywać CO₂ z różnych źródeł, np. z gazów spalinowych, powietrza, a nawet wody morskiej oraz większą stabilność, pojemność, wydajność i bezpieczeństwo geologicznego magazynowania CO₂,
- opracowanie materiałów syntetycznych inspirowanych naturalnymi systemami biologicznymi, takimi jak enzymy lub białka, aby wychwytywać CO₂ w wysoce wydajny i selektywny sposób oraz zwiększać żywotność materiałów wychwytyjących CO₂,
- wykorzystanie CO₂ dla zmodyfikowanych mikroorganizmów używanych do produkcji bioproduktów: paliw, chemikaliów, składników żywności oraz materiałów: biodegradowalnych tworzyw sztucznych, tekstyliów i materiałów budowlanych,
- wykorzystanie zmodyfikowanych biofilmów (podpowierzchniowych barier biofilmowych), aby zwiększyć sekwestrację CO₂ w formacjach geologicznych, ustabilizować CO₂ w magazynach i zmniejszyć ryzyko wycieku,
- wykorzystanie mikroorganizmów ekstremofilnych, przystosowanych do ekstremalnych środowisk, do przekształcania CO₂ w trudnych warunkach przemysłowych lub w niekonwencjonalnych warunkach, takich jak głębokie kominy morskie lub obszary geotermalne.

Hodowla modyfikowanych genetycznie (mikro)alg

Wykorzystanie zaawansowanych technik inżynierii genetycznej do opracowania szczepów (mikro)alg o zwiększonej zdolności pochłaniania CO₂.

- Może to znacząco poprawić efektywność i wydajność systemów wychwytywania dwutlenku węgla i produkcji biopaliw opartych na (mikro)algach.
- Może to zapewnić zdolność do tworzenia bogatych w węgiel biopelletów, które opadając na dno oceanu, mogłaby stworzyć samowystarczalny system sekwestracji węgla, wykorzystujący naturalne procesy oceaniczne.
- Rozwój alg w systemach oczyszczania ścieków mógłby jednocześnie usuwać zanieczyszczenia, takie jak azot i fosfor, oraz wychwytywać węgiel ze ścieków. Proces ten mógłby zapewnić cyrkularne podejście do zarządzania ściekami i redukcji CO₂, a także produkcję wartościowej biomasy dla biopaliw lub innych zastosowań.

Inspirowana biologią mineralizacja węgla

Czerpiąc inspirację z naturalnych procesów biomineralizacji (np. rafy koralowe), opracowywane są systemy bioreaktorów, które będą mogły efektywnie przekształcać CO₂ w stabilne węglany mineralne (np. przy użyciu oliwinów, które są powszechne). Mogłoby to pozwolić na skalowalne, zrównoważone i trwałe składowanie CO₂. Proces ten można przyspieszyć dzięki specjalnie zaprojektowanym bioreaktorom lub poprzez rozsypywanie drobno zmielonego oliwinu na lądzie lub w oceanie. Zmineralizowany CO₂ mógłby znaleźć potencjalne zastosowanie w materiałach budowlanych. Można byłoby doprowadzić do tego w dwojaki sposób:

- poprzez stworzenie społeczności mikroorganizmów, które współdziałają w wychwytywaniu CO₂ i przekształcaniu go w stabilne węglany mineralne. Społeczności te można dostosować do konkretnych formacji geologicznych i warunków środowiskowych, optymalizując efektywność i trwałość składowania CO₂,
- dzięki reaktorom z krzemianu magnezu: reakcja CO₂ z minerałami krzemianu magnezu prowadziłaby do tworzenia stabilnych węglanów.



ROZWIĄZANIA INSPIROWANE NATURĄ (CD.)

Przekształcanie CO₂ przy pomocy sztucznych enzymów

Enzymy mogłyby efektywnie katalizować reakcje przekształcania CO₂ i umożliwić produkcję szerokiej gamy chemikaliów i paliw.

Drukowanie 3D narządów i tkanek z wykorzystaniem CO₂

Opracowanie technologii biodruku 3D, która wykorzystuje biomateriały pochodzące z CO₂ do tworzenia funkcjonalnych narządów i tkanek do przeszczepów. Może to zrewolucjonizować medycynę regeneracyjną i stanowić zrównoważone rozwiązanie problemu niedoboru organów.

Mikrobiologiczna elektrosynteza

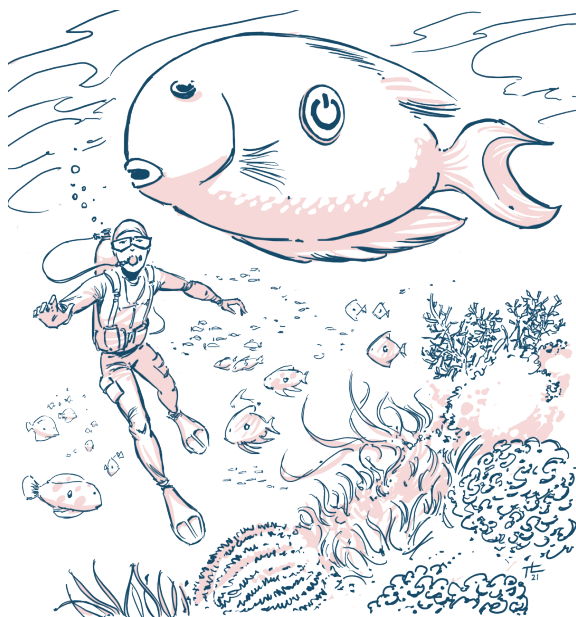
Mikrobiologiczna elektrosynteza wykorzystuje elektroaktywne mikroorganizmy do przekształcania CO₂ w cenne związki chemiczne i paliwa. Poprzez zastosowanie prądu elektrycznego do kultur mikroorganizmów, CO₂ można przekształcić w produkty takie jak octan, metan czy biopaliwa.

Podejścia biomimetyczne

Naśladowanie naturalnych procesów wiązania węgla przy użyciu enzymów i innych systemów biologicznych pozwala na efektywne przekształcanie CO₂ w użyteczne związki organiczne, oferując zrównoważone podejście do wykorzystania CO₂.

Mikrobiologiczne wychwytywanie i magazynowanie węgla w głębinowych basenach solankowych

Wykorzystanie modyfikowanych mikroorganizmów do wychwytywania CO₂ z gazów spalinowych i przekształcania go w biofilmy lub inne stabilne formy w głębinowych basenach solankowych. Takie podejście może zapewnić bezpieczne i długoterminowe rozwiązanie do wychwytywania CO₂ przy minimalnym wpływie na środowisko.





ZAAWANSOWANE MATERIAŁY

Opracowanie wysoce selektywnych i efektywnych materiałów (metalowo-organicznych struktur szkieletowych, nanomateriałów, wodorków metali) do wychwytywania CO₂ oraz zaawansowanych katalizatorów do przekształcania CO₂ w wartościowe produkty może otworzyć nowe rynki dla produktów pochodzących z CO₂ i promować wdrażanie technologii CCUS w różnych branżach.

Nanomateriały

Wykorzystanie nanomateriałów, takich jak tlenek grafenu i nanorurki węglowe, zwiększa efektywność i selektywność procesów wychwytywania, magazynowania i przekształcania CO₂.

Materiały nanoporowate

Materiały nanoporowate, takie jak zaawansowane formy zeolitów i krzemionki, charakteryzują się dużymi powierzchniami i objętościami porów, co czyni je idealnymi do adsorpcji gazów. Naukowcy opracowują nowe materiały o dostosowanych rozmiarach porów i grupach funkcyjnych, aby zwiększyć ich zdolność adsorpcji CO₂.

Metalowo-organiczne struktury szkieletowe (MOFs)

MOFs to wysoko porowate materiały, które można projektować na poziomie molekularnym, aby selektywnie wychwytywały CO₂ z wyjątkową efektywnością. Ich duża powierzchnia oraz możliwość dostosowania właściwości czynią je idealnymi do zastosowań w CCUS.

Zaawansowane membrany

Opracowanie nowoczesnych membran polimerowych i ceramicznych o wysokiej przepuszczalności i selektywności dla CO₂ może drastycznie poprawić efektywność procesów separacji gazów, czyniąc wychwytywanie CO₂ bardziej opłacalnym.

Wychwytywanie CO₂ za pomocą wodorków metali

Zastosowanie wodorków metali, które mogą odwracalnie pochłaniać i uwalniać duże ilości wodoru, w procesie wychwytywania CO₂ przy użyciu chemicznego cyklu.

Materiał sorpcyjny w postaci stałej

Innowacyjne materiały, które pochłaniają CO₂ w niskich stężeniach i uwalniają go pod wpływem podgrzewania, mogą zrewolucjonizować CCUS, zwiększając efektywność i obniżając koszty operacyjne.

Materiały samonaprawiające się

Materiały, które automatycznie naprawiają wszelkie uszkodzenia lub degradację infrastruktury. Mogą zwiększyć niezawodność i trwałość obiektów magazynujących CO₂, redukując koszty utrzymania i ryzyko awarii.

Piezoelektryczne wychwytywanie CO₂

Wykorzystanie materiałów piezoelektrycznych do wychwytywania CO₂ pod wpływem naprężeń mechanicznych oferuje nowatorski mechanizm, który można zintegrować z różnymi metodami.

Materiały hybrydowe organiczno-nieorganiczne

Te materiały łączą zalety polimerów organicznych i związków nieorganicznych, tworząc struktury o ulepszonych właściwościach wychwytywania i konwersji CO₂.





INŻYNIERIA CHEMICZNA

Postępy w inżynierii chemicznej, zwłaszcza w procesach elektrochemicznych, katalitycznych i fotokatalitycznych, umożliwiają coraz bardziej efektywną konwersję CO₂ na wartościowe produkty, takie jak metanol, etylen czy syntetyczne paliwa.

Redukcja CO₂ w procesach elektrochemicznych

Postępy w dziedzinie katalizatorów i procesów elektrochemicznych sprawiają, że konwersja CO₂ na chemikalia, takie jak metanol i etylen, staje się coraz bardziej efektywna i ekonomicznie opłacalna.

Elektrochemiczna mineralizacja CO₂

Wykorzystanie procesów elektrochemicznych do przyspieszenia konwersji CO₂ w stabilne minerały.

Fotokatalityczna redukcja dwutlenku węgla

Fotokataliza wykorzystuje energię świetlną do przyspieszenia reakcji chemicznych. Naukowcy opracowują nowatorskie fotokatalizatory, które efektywnie wykorzystują światło słoneczne do napędzania procesów konwersji CO₂ w użyteczne produkty, takie jak paliwa czy chemikalia.

Katalityczna hydrogenizacja CO₂

Wykorzystanie zaawansowanych katalizatorów do przekształcania CO₂ i wodoru w syntetyczne paliwa. Proces ten wytwarza paliwa neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla, integrując energię odnawialną z wychwytywaniem dwutlenku węgla.

Wykorzystanie CO₂ do produkcji nawozów

Przekształcanie CO₂ w amoniak i inne nawozy za pomocą procesów chemicznych, które wspiera zrównoważone rolnictwo i zmniejsza emisję gazów cieplarnianych pochodzących z tradycyjnej produkcji.

Zielone rozpuszczalniki do absorpcji CO₂

Opracowywane są przyjazne dla środowiska rozpuszczalniki, które mogą pomóc w efektywnym wychwytywaniu CO₂.

Wychwytywanie CO₂ za pomocą cieczy jonowych

Obiecująca alternatywa dla tradycyjnych rozpuszczalników, oferująca możliwość dostosowania selektywności, niższe zużycie energii podczas regeneracji oraz zmniejszony wpływ na środowisko.

Termochemiczna konwersja CO₂

Cykle termochemiczne wykorzystują ciepło, często pochodzące ze źródeł odnawialnych, do napędzania reakcji chemicznych przekształcających CO₂ w paliwa lub inne chemikalia. Postępy w dziedzinie materiałów odpornych na wysokie temperatury oraz projektowaniu reaktorów sprawiają, że te cykle stają się coraz bardziej efektywne i opłacalne w zastosowaniach przemysłowych.

Bezpośrednie wychwytywanie CO₂ z powietrza (DAC)

Technologie DAC mają na celu bezpośrednie wychwytywanie CO₂ z atmosfery przy użyciu sorbentów chemicznych i nowatorskich materiałów, oferując skalowalne rozwiązanie dla obniżenia poziomu CO₂ w atmosferze.

Hybrydowe systemy elektrochemiczne-biologiczne do przekształcania CO₂

Integracja elektrochemicznej redukcji CO₂ z mikrobiologiczną elektrosyntezą, tworząc synergiczne systemy, które łączą zalety obu podejść w celu efektywnej i selektywnej produkcji cennych chemikaliów i paliw. Takie rozwiązanie mogłoby przezwyciężyć ograniczenia poszczególnych technologii i umożliwić wytwarzanie szerszej gamy produktów z wychwyconego CO₂.

Zintegrowana biorafinacja z wykorzystaniem CO₂

Połączenie wychwytywania CO₂ z procesami biorafinacji w celu produkcji biopaliw, chemikaliów i innych wartościowych produktów. Takie rozwiązanie maksymalizuje efektywność wykorzystania zasobów i tworzy synergiczne korzyści między technologiami CCUS a bioekonomią.

Elektroliza zasilana CO₂ do produkcji wodoru

Wykorzystanie wychwyconego CO₂ i energii odnawialnej do wspólnej produkcji wodoru i cennych chemikaliów poprzez elektrolizę. Takie rozwiązanie zapewnia źródło wodoru neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla, jednocześnie magazynując energię odnawialną w postaci chemicznej.



PROCESY PRZEMYSŁOWE

Integracja procesów przemysłowych z technologiami CCUS wspiera transformację w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, przyczyniając się do redukcji emisji i tworzenia nowych rynków w różnych sektorach przemysłowych.

Wychwytywanie CO₂ w ramach symbiozy przemysłowej

Integracja procesów przemysłowych, w których odpadowy CO₂ z jednego procesu jest wykorzystywany przez inny. Zwiększa efektywność wykorzystania zasobów i redukuje całkowite emisje dwutlenku węgla.

Mineralizacja węgla

Udoskonalanie naturalnych procesów, które przekształcają CO₂ w stabilne minerały, idealne do długoterminowego wykorzystania w materiałach budowlanych i w ramach innych zastosowań.

Sekwestracja węgla w materiałach budowlanych

Opracowanie materiałów budowlanych (cementu i betonu), które aktywnie sekwestrują CO₂ w trakcie procesu produkcji i użytkowania. Takie rozwiązanie nie tylko redukuje emisję z istotnego źródła przemysłowego, ale także może poprawić właściwości materiałów, przekształcając budynki w pochłaniacze dwutlenku węgla i integrując technologie wychwytywania CO₂ z rozwojem urbanistycznym.

CO₂-EOR z dedykowanym składowaniem

Połączenie zaawansowanej metody wydobywania ropy naftowej (EOR) z użyciem CO₂, z jednoczesnym składowaniem wpompowywanego CO₂ w geologicznych zbiornikach. Takie podejście wychwytuje CO₂, jednocześnie umożliwiając zwiększenie wydobywania ropy.

Wykorzystanie CO₂ w stanie nadkrytycznym do produkcji energii geotermalnej (SCPG)

Polega na wychwytywaniu CO₂ z emisji odpadowych, takich jak te z elektrowni węglowych, przy użyciu technologii CCUS, a następnie wtryskiwaniu go do naturalnych, wysoko przepuszczalnych formacji geologicznych w celu pozyskiwania energii. Umożliwiłoby to produkcję energii odnawialnej i jednoczesne magazynowanie CO₂.

Wykorzystanie CO₂ w druku 3D

Opracowanie materiałów do druku 3D z wykorzystaniem wychwyconego CO₂. Stworzyłoby to nowe możliwości dla zrównoważonej produkcji oraz tworzenia spersonalizowanych produktów.

Kriogeniczne wychwytywanie CO₂

Wychwytywanie CO₂ poprzez schładzanie gazów spalinowych do bardzo niskich temperatur, co powoduje kondensację CO₂ i jego oddzielenie od innych gazów. Wysoka czystość wychwytywanego CO₂ z potencjałem integracji z istniejącymi procesami przemysłowymi.

Przekształcanie CO₂ wspomaganie plazmą

Wykorzystanie technologii plazmowej do przekształcania CO₂ w użyteczne chemikalia i paliwa.

Zintegrowane systemy CCUS i wykorzystania odpadów

Połączenie wychwytywania CO₂ z procesami waloryzacji odpadów w celu jednoczesnej produkcji cennych produktów z różnych strumieni odpadów. Wspierałoby to gospodarkę o obiegu zamkniętym oraz pozwoliłoby na maksymalizację wykorzystania zasobów.

CO₂ jako magazyn energii odnawialnej

Przekształcanie CO₂ w paliwa, takie jak metanol czy kwas mrówkowy mogłoby wspomóc magazynowanie energii odnawialnej i utrzymanie stabilności sieci, integrując wychwytywanie CO₂ z systemami energetycznymi.

Integracja CCUS z produkcją energii odnawialnej

Połączenie systemów CCUS z odnawialnymi źródłami energii stworzyłoby zrównoważony i zamknięty obieg, w którym nadmiar energii odnawialnej jest wykorzystywany do procesów wychwytywania i przekształcania CO₂.

Przetwarzanie energii słonecznej na paliwa

Opracowanie procesów zasilanych energią słoneczną, które efektywnie przekształcają CO₂ w paliwa, umożliwiając magazynowanie energii słonecznej w wiązaniach chemicznych.

CCS z bioenergii (BECCS)

Postępy w technologii BECCS, łączącej produkcję energii z biomasy z CCS, mogą zwiększyć skalowalność technologii o ujemnym bilansie CO₂.



PRODUKTY I INNE ROZWIĄZANIA Z CO₂

Powszechne wykorzystanie CO₂ jako surowca do produkcji chemikaliów, paliw, polimerów, materiałów budowlanych, a nawet żywności mogłoby zrewolucjonizować procesy przemysłowe i otworzyć zupełnie nowe rynki.

Włókna węglowe

Opracowanie procesów przekształcania wychwyconego CO₂ w włókna węglowe, wspierających tworzenie lekkich materiałów do zastosowań w transporcie i w budownictwie.

Grafen

Przekształcanie CO₂ w grafen, niezwykle cenny materiał o wielu zastosowaniach.

Sadza techniczna

Produkcja sadzy technicznej z CO₂ do zastosowania w oponach, tuszach i tworzywach sztucznych.

(Bio)plastiki i inne polimery

Wykorzystanie wychwyconego CO₂ jako surowca do produkcji biodegradowalnych plastików i innych polimerów. Zmniejsza to zależność od materiałów pochodzących z paliw kopalnych i wspiera rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym.

Beton o ujemnym bilansie dwutlenku węgla

Naukowcy opracowują nowe formuły betonu, które pochłaniają więcej CO₂ podczas procesu twardnienia, niż jest emitowane podczas jego produkcji. Ten beton o ujemnym bilansie dwutlenku węgla wykorzystuje uboczne produkty przemysłowe, takie jak popiół lotny i żużel.

Cementy geopolimerowe

Cementy geopolimerowe, wytwarzane z przemysłowych produktów ubocznych, mają zdolność pochłaniania CO₂ podczas produkcji i twardnienia. Stanowią one zrównoważoną alternatywę dla tradycyjnego cementu portlandzkiego, z potencjałem znaczącego zmniejszenia śladu węglowego branży budowlanej.

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe oparte na CO₂

Wykorzystanie mikroorganizmów zdolnych do pochłaniania CO₂ i wytwarzania energii elektrycznej w mikrobiologicznych ogniwach paliwowych. Takie rozwiązanie mogłoby przynieść podwójną korzyść – wychwytywać CO₂ i produkować energię odnawialną.

Paliwa syntetyczne na bazie CO₂ do transportu ciężkiego

Opracowanie paliw syntetycznych z wychwyconego CO₂ do stosowania w sektorach trudnych do elektryfikacji, takich jak lotnictwo (Zrównoważone Paliwo Lotnicze - SAF), żegluga i transport długodystansowy. Takie rozwiązanie mogłoby znacząco obniżyć emisje w tych branżach, jednocześnie wykorzystując istniejącą infrastrukturę.

Wykorzystanie CO₂ w produkcji chemikaliów o wysokiej wartości dodanej

Rozszerzenie gamy chemikaliów wysokiej wartości, które można wytwarzać z CO₂, w tym leków, chemikaliów specjalistycznych i zapachów. Takie podejście stworzyłoby nowe możliwości gospodarcze dla technologii CCUS i zmniejszyłoby zależność od surowców pochodzących z paliw kopalnych.

Białko z CO₂

Przekształcanie CO₂ w bogate w białko produkty spożywcze za pomocą fermentacji mikrobiologicznej. Pomogłoby to rozwiązać problem bezpieczeństwa żywności, jednocześnie obniżając poziom dwutlenku węgla w atmosferze.

Biomateriały na bazie CO₂ do implantów medycznych

Opracowanie biokompatybilnych i biodegradowalnych materiałów z CO₂ do stosowania w implantach medycznych i inżynierii tkankowej.



OPTYMALIZACJA DZIĘKI AI, UCZENIU MASZYNOWEMU, BLOCKCHAIN I OBLICZENIOM KWANTOWYM

Integracja sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego może zoptymalizować (zwiększyć efektywność i opłacalność) technologii i różnych aspektów CCUS, od projektowania i monitorowania procesów po predyktcyjne utrzymanie ruchu i śledzenie emisji w czasie rzeczywistym. Z kolei wykorzystanie technologii blockchain do zapewnienia przejrzystości, śledzenia i bezpieczeństwa na rynkach CO₂ będzie sprzyjało zwiększeniu zaufania i wzrostowi inwestycji w projekty CCUS. Natomiast moc obliczeniowa komputerów kwantowych do symulacji i optymalizacji złożonych procesów CCUS na poziomie molekularnym może umożliwić odkrywanie nowych materiałów, katalizatorów oraz konfiguracji procesów, które są obecnie nieosiągalne.

Optymalizacja projektowania i działania instalacji CCUS z wykorzystaniem AI

Zastosowanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do optymalizacji projektowania i działania instalacji CCUS, od wyboru lokalizacji i konfiguracji procesów po monitorowanie wydajności w czasie rzeczywistym oraz predyktcyjne utrzymanie ruchu. Może to znacząco obniżyć koszty, poprawić efektywność i zwiększyć ogólną niezawodność systemów CCUS.

Projektowanie molekuł i materiałów do wychwytywania CO₂ z wykorzystaniem AI

Zastosowanie algorytmów AI do projektowania nowatorskich molekuł i materiałów o optymalnych właściwościach wychwytywania CO₂. Może to prowadzić do opracowania wysoce efektywnych i selektywnych sorbentów dostosowanych do konkretnych zastosowań i składu gazów spalinowych.

Inteligentne systemy monitoringu

Zaawansowane czujniki i AI do monitorowania miejsc składowania CO₂ w czasie rzeczywistym zwiększą bezpieczeństwo i zapewnią zgodność z przepisami.

Uczenie maszynowe w predyktyjnym utrzymaniu ruchu i optymalizacji procesów CCUS

Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych operacyjnych z instalacji CCUS, przewidywania awarii sprzętu oraz optymalizacji parametrów procesów zwiększy efektywność i niezawodność. Może zredukować przestoje, obniżyć koszty operacyjne oraz poprawić ogólną wydajność i bezpieczeństwo instalacji CCUS.

Uczenie maszynowe w odkrywaniu nowych materiałów

Algorytmy uczenia maszynowego przyspieszają odkrywanie nowych materiałów, również wykorzystywanych do wychwytywania CO₂. Przewidując wydajność potencjalnych kandydatów skraca czas i koszty testów eksperymentalnych.

Platformy handlu CO₂ i księgowanie oparte na blockchain

Tworzenie zdecentralizowanych platform handlu CO₂, które wykorzystują technologię blockchain do zapewnienia bezpiecznych, przejrzystych i efektywnych transakcji kompensacjami za CO₂. Może to zwiększyć płynność rynku, obniżyć koszty transakcji oraz zwiększyć zaufanie i udział w rynkach handlu CO₂ oraz sprzyjać inwestycjom w projekty CCUS.

Materiały do wychwytywania CO₂ wzbogacone o kropki kwantowe

Wykorzystanie kropek kwantowych do poprawy wydajności materiałów do wychwytywania CO₂.

Kropki kwantowe z CO₂ w ogniwach słonecznych

Wykorzystanie kropek kwantowych pochodzących z CO₂ do zwiększenia efektywności ogniw słonecznych, tworząc synergistyczny system, który zarówno pochłania CO₂, jak i generuje czystą energię. Może to wspierać zrównoważoną transformację energetyczną, jednocześnie promując wykorzystanie CO₂.



CCS W OCEANACH

Integracja technologicznych rozwiązań oceanicznych może znacząco zwiększyć efektywność i skalowalność procesów wychwytywania i składowania CO₂, jednocześnie wspierając produkcję czystej energii. Wykorzystanie potencjału oceanów w tym zakresie mogłoby przyczynić się do ochrony ekosystemów morskich.

Integracja technologicznych rozwiązań oceanicznych CCUS

Zintegrowane wykorzystanie ogromnego potencjału oceanów w zakresie składowania CO₂ i produkcji czystej energii, dzięki masowemu wykorzystaniu technologii takich jak OTEC, mineralizacja przy użyciu oliwinu, CDR czy permakultury morskiej.

Wykorzystanie energii termalnej oceanu (OTEC) dla CCUS

Wykorzystanie różnic temperatur w warstwach oceanicznych do zasilania procesów CCUS. Utworzenie synergistycznego systemu, który generuje czystą energię i jednocześnie usuwa CO₂. Może to stanowić skalowalne i zrównoważone rozwiązanie, szczególnie w regionach tropikalnych.

Wychwytywanie CO₂ z oceanu

Rozwój technologii bezpośredniego wychwytywania CO₂ z wody morskiej. Takie podejście może zapewnić efektywne energetycznie i potencjalnie mniej inwazyjne usuwanie CO₂ w porównaniu do DAC, jednocześnie przeciwdziałając zakwaszeniu oceanów.

Permakultura morska i sekwestracja CO₂ w oceanie za pomocą zakwitów alg

Rozwój upraw wodorostów (również modyfikowanych za pomocą bioinżynierii), które pochłaniają CO₂ oraz które mogą być zbierane jako biomasa do produkcji biopaliw czy jako źródło żywności.

Składowanie CO₂ w głębokich formacjach oceanicznych

Przechowywanie CO₂ w głębokich warstwach oceanicznych (np. w hydratowych złożach gazu) stanowi rozległe i potencjalnie bezpieczne rozwiązanie dla długoterminowego sekwestrowania dwutlenku węgla.

Bezpośrednie nawożenie oceanów

Dodawanie składników odżywczych do wód oceanicznych w celu wspierania wzrostu fitoplanktonu i pochłaniania CO₂. Zwiększa naturalną zdolność oceanów do pochłaniania dwutlenku węgla, jednocześnie wspierając ekosystemy morskie.

Zwiększanie alkaliczności oceanów

Dodawanie materiałów alkalicznych do wód oceanicznych w celu zwiększenia pochłaniania i składowania CO₂. Znacząco podnosi zdolność oceanów do pełnienia roli pochłaniacza dwutlenku węgla.

Sztuczne podnoszenie wód

Symulowanie naturalnego podnoszenia wód oceanicznych w celu zwiększenia dostępności składników odżywczych i poprawy sekwestracji dwutlenku węgla w morzach.





CCUS W KOSMOSIE

Choć są to na razie spekulatywne koncepcje, pomysły takie jak sekwestracja CO₂ w kosmosie czy wykorzystanie pozaziemskich zasobów do jego zagospodarowania mogą otworzyć zupełnie nowe perspektywy. Mimo że obecnie brzmią one jak science fiction, są przykładem twórczego myślenia, które może doprowadzić do przełomowych innowacji w dziedzinie CCUS.

Wychwytywanie CO₂ z górnych warstw atmosfery

Wykorzystanie satelitów lub stacji kosmicznych do wychwytywania CO₂ z górnych warstw atmosfery może stanowić obecnie futurystyczne, ale potencjalnie wielkoskalowe rozwiązanie dla globalnego usuwania dwutlenku węgla.

CO₂ jako surowiec do produkcji pozaziemskiej

Rozwój technologii, które wykorzystują CO₂ z atmosfer planetarnych (np. Marsa) jako surowiec do produkcji niezbędnych materiałów i paliw in-situ. Może to wspierać przyszłą eksplorację i kolonizację kosmosu, jednocześnie rozwijając technologie CCUS.

Kosmiczna energia słoneczna dla CCUS

Przesyłanie energii słonecznej zbieranej w przestrzeni kosmicznej na Ziemię, aby zasilać energochłonne procesy CCUS, takie jak DAC czy elektrochemiczną redukcję CO₂ mogłoby zapewnić nieprzerwane i obfite źródło czystej energii dla sekwestracji i utylizacji dwutlenku węgla.

Włókna węglowe z CO₂ dla przemysłu kosmicznego

Opracowanie wysokowydajnych włókien węglowych z wychwytywanego CO₂ do zastosowania w przemyśle kosmicznym może zmniejszyć masę i emisje samolotów, jednocześnie promując wykorzystanie CO₂ w przemyśle o wysokiej wartości.

INNE TECHNIKI GEOINŻYNIERYJNE WSPIERAJĄCE SEKWESTRACJĘ CO₂

Inne techniki geoinżynierijskie wspierające sekwestrację CO₂ opierają się na modyfikacji naturalnych procesów w celu przyspieszenia absorpcji i trwałego magazynowania dwutlenku węgla. Obejmują one zarówno działania bezpośrednio zwiększające pochłanianie CO₂ przez środowisko, jak i bardziej pośrednie metody, które mogą wspomóc walkę ze zmianami klimatycznymi. Dzięki pasywnemu charakterowi oraz potencjalnej skalowalności, te technologie oferują perspektywę długoterminowego rozwiązania problemu nadmiernej emisji dwutlenku węgla, wspierając globalne wysiłki na rzecz zrównoważonego rozwoju. Nie należy zapominać, że wszelkie rozwiązania geoinżynierijskie budzą wiele kontrowersji ze względu na ryzyka, jakie ze sobą niosą i ograniczoną wiedzę na temat potencjalnych skutków stosowania tych rozwiązań.

Przyspieszenie wietrzenia skał

Przyspieszanie naturalnych procesów wietrzenia skał poprzez stosowanie sproszkowanych minerałów lub modyfikowanych mikroorganizmów w celu zwiększenia absorpcji CO₂ i mineralizacji. Takie podejście może zapewnić pasywną, skalowalną i potencjalnie ekonomiczną metodę trwałego wychwytywania i magazynowania dwutlenku węgla.

Zarządzanie promieniowaniem słonecznym (SRM)

Techniki odbijania światła słonecznego i ochładzania planety, które pośrednio wpływają na poziom CO₂, choć bardzo kontrowersyjne, mogą dać czas na rozwój i wdrożenie innych strategii usuwania CO₂.

Magazynowanie węgla

w głębokich formacjach geologicznych

Wprowadzanie CO₂ do głębokich struktur geologicznych, znajdujących się głęboko pod powierzchnią Ziemi oferuje potencjalnie nieograniczoną pojemność magazynowania.



ROLNICTWO, REFORESTACJA I SADZENIE NOWYCH LASÓW

Rolnictwo, reforestacja i sadzenie nowych lasów stanowią kluczowe elementy naturalnych strategii sekwestracji dwutlenku węgla, które mają zdolność nie tylko do odbudowy ekosystemów, ale także do stabilizowania klimatu. Poprzez regenerację ekosystemów możemy wspierać długofalową zdolność planety do pochłaniania CO₂, tworząc bardziej stabilne i odporne środowisko dla przyszłych pokoleń.

Zasilanie wzrostu roślin CO₂

Wykorzystanie wychwyconego w rolnictwie CO₂ w kontrolowanych warunkach do zwiększenia plonów.

Sekwestracja CO₂ w glebie

Doskonalenie praktyk zarządzania gruntami w celu zwiększenia wychwytywania CO₂ w glebie.

Produkcja biocharu

Przekształcanie biomasy w biochar za pomocą pirolizy, sekwestrując CO₂ w stabilnej formie. Może poprawić żyzność gleby i zapewnia skalowalną metodę długoterminowego magazynowania dwutlenku węgla.

Mikrobiologiczne pompy CO₂ w glebie

Zwiększanie aktywności mikroorganizmów glebowych w celu poprawy sekwestracji dwutlenku węgla w glebie może poprawić żyzność gleby i znacząco zwiększa jej zdolność do magazynowania CO₂.

Wzmocnione systemy korzeniowe

Rozwój roślin z głębszymi i bardziej rozbudowanymi systemami korzeniowymi, aby sekwestrować więcej dwutlenku węgla w glebie. Może zwiększyć potencjał sekwestracji węgla przy reforestacji i w rolnictwie.

CO₂ jako surowiec do sztucznej syntezy żywności

Innowacyjne podejście do produkcji żywności, wykorzystujące CO₂ jako źródło węgla do tworzenia zrównoważonych i personalizowanych produktów spożywczych, np. mięsa hodowanego komórkowo.

Bioinżynieryjne rośliny z ulepszoną fotosyntezą

Modyfikacja genów roślin w celu poprawy efektywności fotosyntezy pozwoliłaby im skuteczniej wychwytywać CO₂. Przyspieszyłoby to też produkcję biomasy.

Masowe sadzenie drzew

Sprawdzona i opłacalna metoda długoterminowego magazynowania CO₂ oraz odbudowy ekosystemów.

Masowe zalesianie pustyń

Masowe sadzenie drzew i roślinności na obszarach pustynnych w celu sekwestracji CO₂. Przekształca jałowe tereny w pochłaniacze CO₂ i wspiera odbudowę ekosystemów.

Sekwestracja węgla poprzez sadzenie drzew na terenach rolniczych

Integracja drzew w krajobrazach rolniczych w celu sekwestracji CO₂ i poprawy produktywności gruntów.

Odbudowa torfowisk

Przywracanie zdegradowanych torfowisk, aby zwiększyć ich naturalne zdolności do wychwytywania CO₂.





POZOSTAŁE

Aby przyspieszyć adopcję technologii CCUS niezbędne jest wprowadzenie przełomowych innowacji, które obniżą koszty i zwiększą konkurencyjność tego rozwiązania względem innych technologii niskoemisyjnych. Kluczowymi czynnikami, które mogą wpłynąć na redukcję kosztów, są postęp technologiczny, rozwój infrastruktury oraz zmiany regulacyjne, które stworzą korzystniejsze warunki ekonomiczne dla inwestycji w CCUS.

Redukcja kosztów CCUS

Dotychczas technologie CCUS są zbyt kosztowne i niekonkurencyjne wobec innych zrównoważonych rozwiązań, a polityki klimatyczne – w tym ceny dwutlenku węgla – nie są jeszcze wystarczająco wysokie, by CCUS było również opłacalne ekonomicznie. Istnieje jednak znaczny potencjał do obniżenia kosztów w całym łańcuchu wartości CCUS. Wiele zastosowań jest wciąż na wczesnym etapie komercjalizacji. Koszty CCUS powinny maleć wraz z rozwojem rynku, postępem technologicznym, spadkiem kosztów finansowania, osiąganiem korzyści skali oraz gromadzeniem doświadczenia w budowie i eksploatacji instalacji CCUS.

Takie zjawisko było już obserwowane w przypadku technologii energii odnawialnej w ostatnich dekadach. Redukcje kosztów zostały już osiągnięte w dużych projektach CCUS. Na przykład koszt wychwytywania CO₂ w sektorze energetycznym spadł o 35% (na podstawie porównania pierwszej i drugiej dużej instalacji CCUS). Trend ten może się utrzymać wraz z rozwojem rynku.

Czynniki środowiskowe i geologiczne

Dostępność odpowiednich formacji geologicznych do magazynowania CO₂ oraz wpływ procesów wychwytywania dwutlenku węgla na środowisko to istotne czynniki, które będą determinować rozwój tych technologii i ich zastosowań. Nieoczekiwane wyzwania środowiskowe lub odkrycia nowych miejsc magazynowania mogą znacząco oddziaływać na wykonalność i lokalizację projektów CCUS.

Wpływ zmian klimatycznych

Przyspieszające efekty zmian klimatycznych mogą wymusić przyspieszenie starań w zakresie wychwytywania węgla. Z drugiej strony, ekstremalne zjawiska pogodowe i zmieniające się wzorce klimatyczne mogą zakłócać działanie istniejącej infrastruktury i operacje CCUS.

Zależność od paliw kopalnych

W miarę gdy niektóre regiony nadal polegają na paliwach kopalnych dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, rola CCUS może stać się kluczem w walce ze zmianami klimatu.

Rozwój infrastruktury

Jednym z ważnych punktów rozwoju CCUS jest budowa solidnej infrastruktury do transportu i magazynowania CO₂, w tym rurociągów i magazynów. Opóźnienia lub przyspieszenie budowy tej infrastruktury mogą znacząco wpłynąć na projekty CCUS.

Nowe źródła czystej energii, np. z fuzji jądrowej

Sukces komercyjnego rozwoju energii z fuzji mógłby zapewnić praktycznie nieograniczone źródło czystej energii, które mogłoby zasilać energochłonne procesy CCUS. Znacząco poprawiłoby to zrównoważony charakter i skalowalność technologii CCUS.

Awarie technologiczne i katastrofy ekologiczne

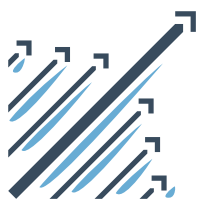
Nieoczekiwane awarie lub nieefektywności istniejącej infrastruktury CCUS mogą podważyć zaufanie i opóźnić dalsze inwestycje.

Mechanizmy kompensacji za CCUS

Wprowadzenie innowacyjnych modeli i polityk wyceny CO₂ może zapewnić silniejsze bodźce finansowe dla firm do inwestowania w technologie wychwytywania dwutlenku węgla.

Opinia i akceptacja społeczna

Obawy dotyczące bezpieczeństwa i wpływu na środowisko technologii CCUS może znacząco wpłynąć na ich wdrażanie.



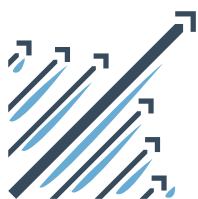
WNIOSKI

W obliczu zbyt wolnego wdrażania innych rozwiązań w walce ze zmianami klimatu, technologie CCUS zyskują na znaczeniu jako istotny element strategii dążenia do neutralności emisyjnej. Choć rozwój CCUS przez lata postępował powoli, ostatnie osiągnięcia technologiczne oraz rosnące wsparcie rządowe w wielu regionach świata nadały temu procesowi nowy impuls. Dzięki temu, perspektywa szerszego wdrożenia tych technologii w nadchodzących latach staje się coraz bardziej realna.

Niestety, obecny poziom implementacji CCUS pozostaje niewystarczający, by technologia ta mogła w znaczący sposób pomóc w osiągnięciu zerowej emisji netto do 2050 roku. Wysokie koszty sekwestracji, transportu, utylizacji i magazynowania CO₂, jak również konieczność ogromnych inwestycji w infrastrukturę, to tylko niektóre z wyzwań stojących przed masowym wdrożeniem CCUS. Dodatkowo, wciąż istnieje wiele pytań dotyczących bezpieczeństwa i dojrzałości tych technologii, co wpływa na ograniczone zaufanie społeczne.

Aby przełamać te bariery, niezbędne są dalsze innowacje, wsparcie ze strony polityk publicznych oraz zwiększone inwestycje. Kluczowe będzie opracowanie bardziej efektywnych, opłacalnych technologii, stworzenie stabilnych ram regulacyjnych oraz zachęt, które pozwolą podjąć ryzyko finansowania tych inwestycji. Istotna jest również edukacja i budowanie społecznej akceptacji dla tej formy walki ze zmianami klimatu.

Adopcja CCUS będzie prawdopodobnie najbardziej dynamiczna w regionach spełniających odpowiednie kryteria, takie jak dostępność magazynów CO₂, długowieczne źródła emisji, wsparcie rządowe, korzystne koszty energii oraz synergie przemysłowe. Ostateczny sukces tej technologii będzie zależał od ścisłej współpracy rządów, przemysłu i ośrodków badawczych.



ŹRÓDŁA

- (1) <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- (2) <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/carbon-capture-and-storage/>
- (3) <https://status23.globalccsinstitute.com/regional-overviews/>
- (4) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982014000626>
- (5) https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management_en
- (6) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A62%3AFIN&qid=1707312980822>
- (7) <https://www.weforum.org/agenda/2023/10/why-carbon-capture-is-key-to-reaching-climate-goals/>
- (8) <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/scaling-the-c-cus-industry-to-achieve-net-zero-emissions>
- (9) <https://www.geoengineeringmonitor.org/2024/01/geo-map-ccs-jan-2023/>
- (10) <https://www.weforum.org/agenda/2023/10/why-carbon-capture-is-key-to-reaching-climate-goals/>
- (11) <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- (12) <https://www.hw.ac.uk/news-archive/2024/ai-breakthrough-accelerates-carbon-capture.htm>
- (13) <https://www.hks.harvard.edu/publications/carbon-capture-utilization-and-storage-technologies-and-costs-us-context>
- (14) <https://unece.org/sustainable-energy/cleaner-electricity-systems/carbon-capture-use-and-storage-ccus>
- (15) <https://www.energymonitor.ai/carbon-removal/ccu-dangerous-distraction-or-essential-for-the-energy-transition/?cf-view>

O NAS

SKONTAKTUJ SIĘ Z NAMI,
JEŚLI INTERESUJE CIĘ
PRZYSZŁOŚĆ!

4CF The Futures Literacy Company

4CF Sp. z o.o.
Pl. Trzech Krzyży 10/14
00-535 Warszawa, Polska

Dariusz Kozdra

dyrektor ds. komunikacji
email: darek@4cf.pl
tel.: +48 600 200 538
www: 4cf.eu

4CF jest polską firmą doradczą zajmującą się foresightem strategicznym i budową długoterminowych strategii. Od prawie 20 lat 4CF pomaga klientom przygotować się na niepewne jutro. Firma zrealizowała setki projektów dla firm prywatnych, instytucji publicznych i podmiotów międzynarodowych, w tym UNFCCC, UNESCO, UNDP i WHO, Komisji Europejskiej czy Ministerstwa Funduszy i Polityki Regionalnej. Wykorzystując foresight 4CF pomaga odkrywać przyszłe możliwości, umożliwiając podejmowanie strategicznych decyzji dotyczących przyszłości i wdrażanie przełomowych rozwiązań, które zapewnią najlepszą możliwą przyszłość interesariuszom naszych klientów. Firma jest członkiem The Global Future Society (GFS), Association of Professional Futurists, Foresight Educational and Research Network i założycielem polskiego węzła The Millennium Project.

Firma jest również w czołówce światowych innowatorów i aktywnie przyczynia się do rozwoju najnowocześniejszych narzędzi foresightowych. Ekspertyza firmy w zakresie analizy trendów i tworzeniu scenariuszy przyszłości, przy użyciu platformy do badań delfickich nowej generacji - 4CF HalnyX i platformy mapowania argumentów - 4CF Sprawler, pozwala wzmacniać zdolności foresightowe interesariuszy firmy. Z kolei cyfrowe gamebooki 4CF FLEx pomagają zwiększać innowacyjność zespołów. Eksperti firmy posiadają rozległą interdyscyplinarną wiedzę i doświadczenie foresightowe. Stale doskonalą metodologię 4CF i aktywnie współpracują z wiodącymi międzynarodowymi ośrodkami foresightowymi.

