

Dr inż. Paweł Gładysz

Centrum Energetyki AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Technologie gospodarczego wykorzystania dwutlenku węgla

✓ Carbon Capture and Storage (CCS)

Wychwyt i składowanie CO₂

✓ Carbon Capture and **Utilization (CCU)**

Wychwyt i **utylizacja** CO₂

✓ Carbon Capture, **Utilization** and Storage (**CCUS**)

Wychwyt, **utylizacja** i składowanie CO₂

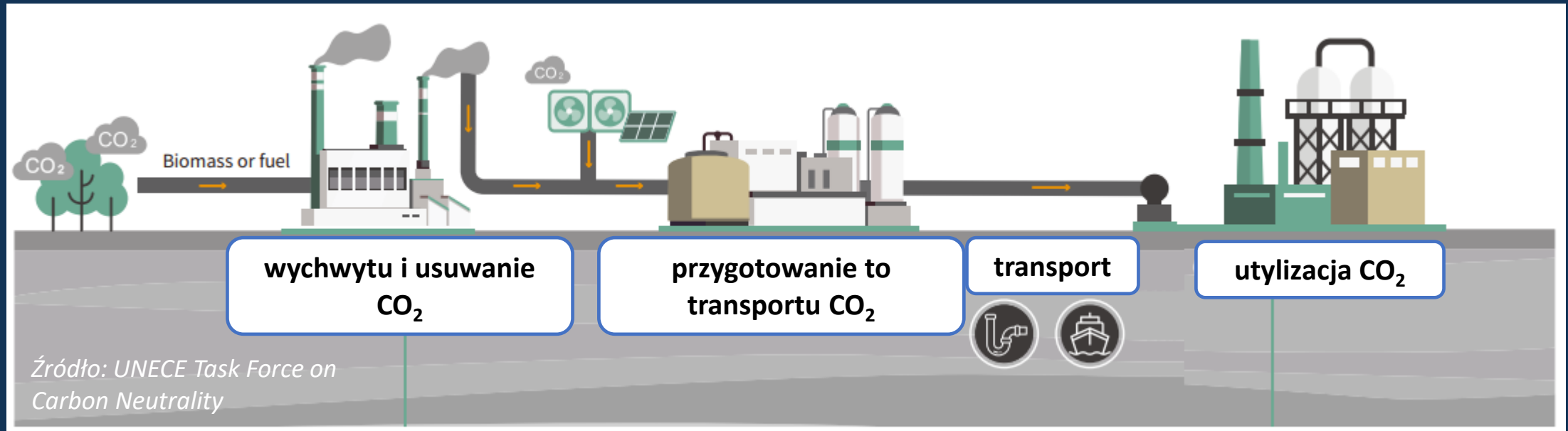
ŹRÓDŁO EMISJI CO₂

WYCHWYT I
SPRĘŻANIE CO₂

TRANSPORT CO₂

SKŁADOWANIE LUB
UTYLIZACJA CO₂

Technologie CCU, czyli Carbon Capture and Utilization



Główne ścieżki utylizacji CO₂ – mineralizacja (budownictwo), paliwa syntetyczne i nawozy (przemysł chemiczny), wykorzystanie biologiczne (rolnictwo i przetwórstwo żywności).

Technologie CCU – obszary zastosowania

- technologie przemysłowego wykorzystania CO₂ w gospodarce – **utylizacja CO₂**:
 - **produkcja paliw syntetycznych,**
 - **wspomagane systemy do wydobycia ropy naftowej i gazu,**
 - wspomagane systemy produkcji energii elektrycznej i/lub ciepła ze źródeł geotermalnych,
 - mineralizacja,
 - wspomaganie wytwórni nawozów,
 - produkcja polimerów,
 - uprawa alg,
 - ...

Utylizacja CO₂ – szerokim spojrzeniem

Rozwiązania warte uwagi:

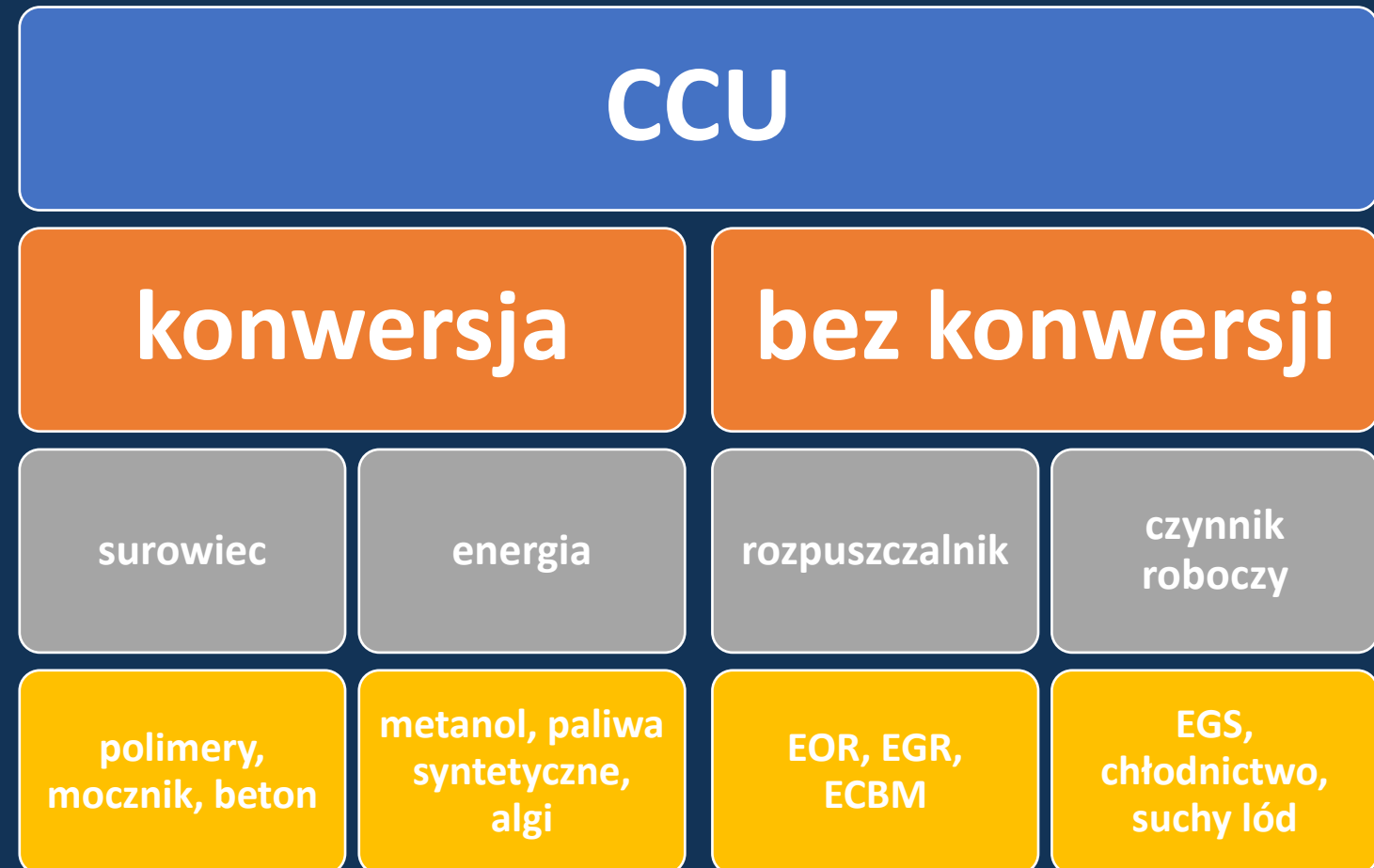
- wspomagane systemy wydobywania ropy naftowej (EOR)
- wspomagane systemy wydobywania gazu ziemnego (EGR)
- wspomagane systemy wydobywania metanu z pokładów węgla (ECBM)
- wspomagane systemy geotermalne (EGS)
- wspomaganie wytwórni nawozów (mocznik)
- produkcja metanolu
- produkcja gazu syntezowego
- termochemiczna metanacja CO₂
- biologiczna metanacja CO₂
- produkcja eteru dimetylowego (DME)
- produkcja kwasu mrówkowego
- produkcja polimerów
- uprawa alg
- mineralizacja CO₂

Rozwiązania o bardzo małym potencjale aplikacyjnym w wymaganej skali:

- czynnik roboczy w obiegach silnikowych i chłodniczych (obiegi prawo- i lewobieżne)
- szczelinowanie w procesie wydobywania ropy i gazu
- mycie suchym lodem
- przemysł spożywczy
- przemysł farmaceutyczny
- wspomaganie produkcji roślinnej w szklarniach
- wykorzystanie w przemyśle papierniczym
- gaz osłonowy
- gaz gaśniczy
- elektrokatalityczna i fotokatalityczna redukcja CO₂
- sztuczna fotosynteza

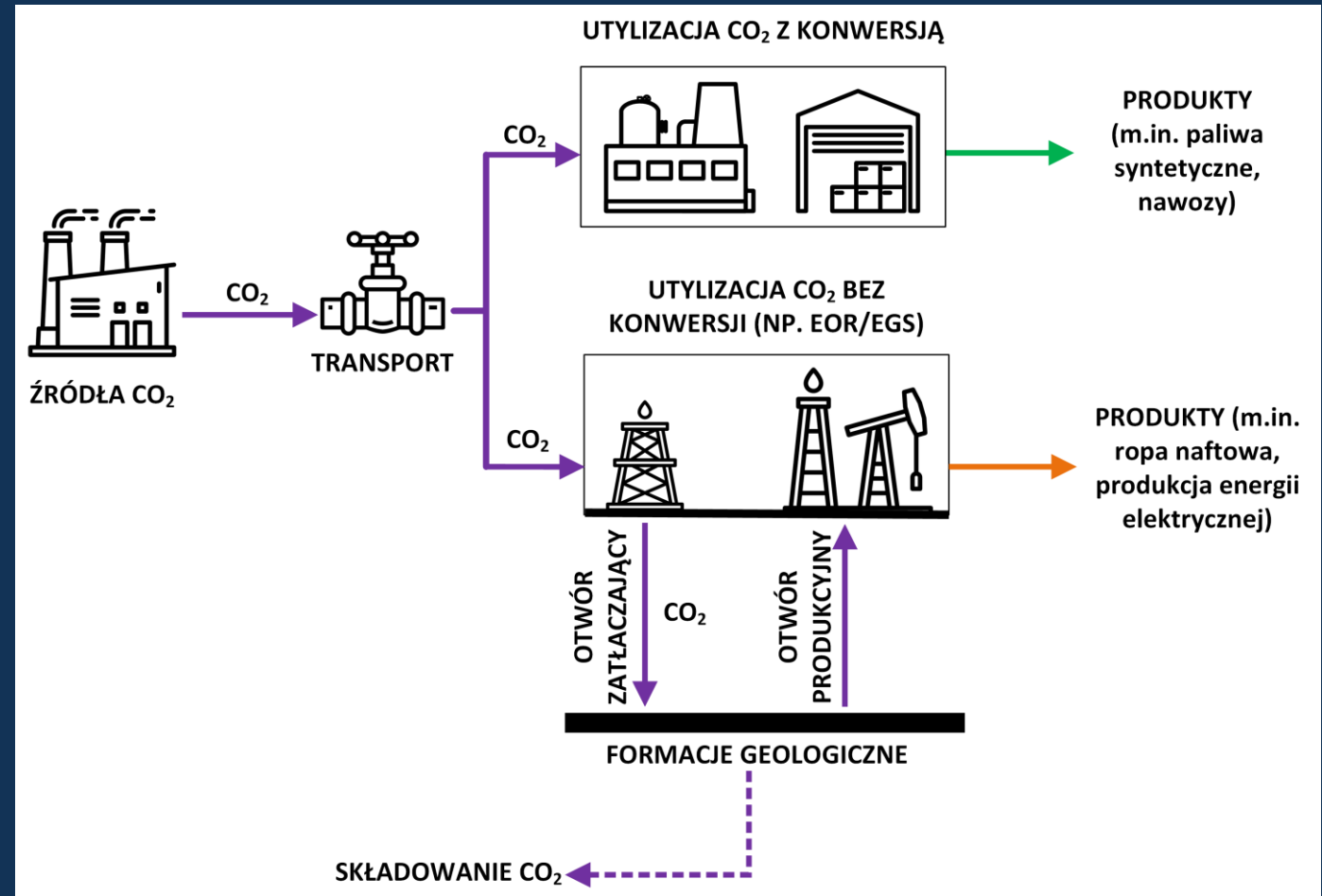
Utylizacja CO₂ – ogólny podział

- **ważne pytania przy utylizacji CO₂:**
 - ponowna emisja CO₂?
 - permanentne magazynowanie?
 - efekt energetyczny?
 - bezpieczeństwo procesu?
 - gotowość technologiczna?
 - skala procesu?



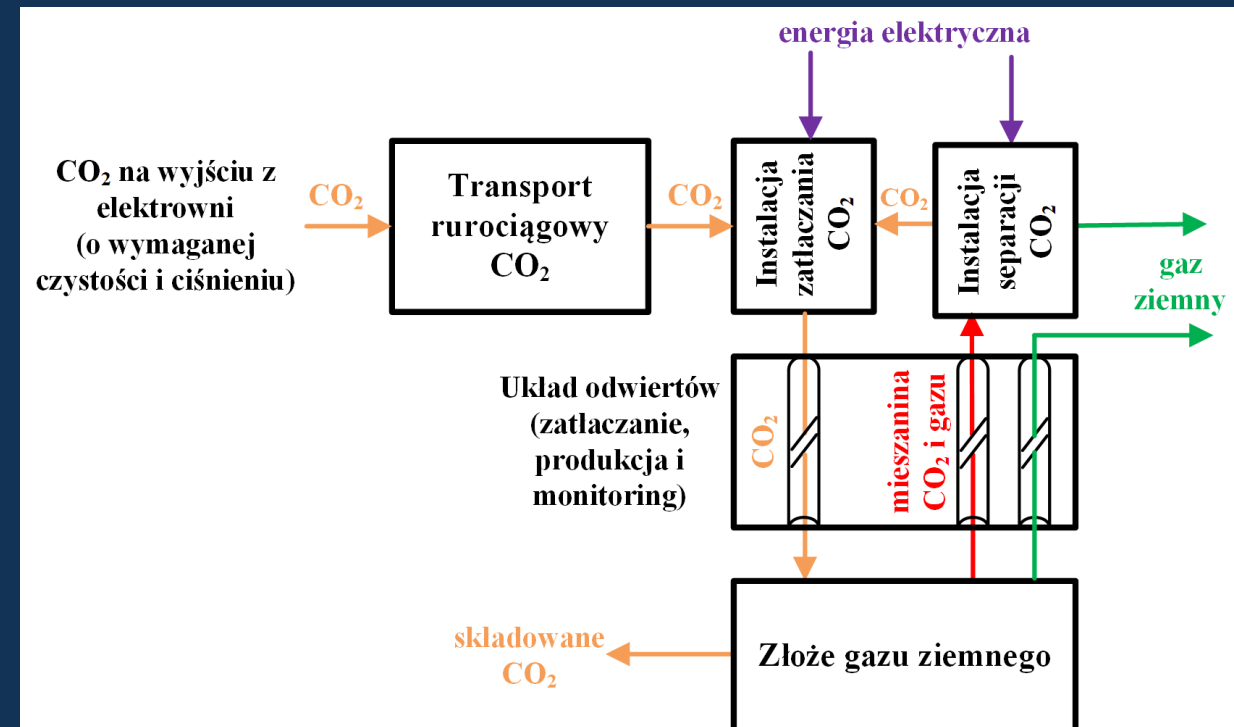
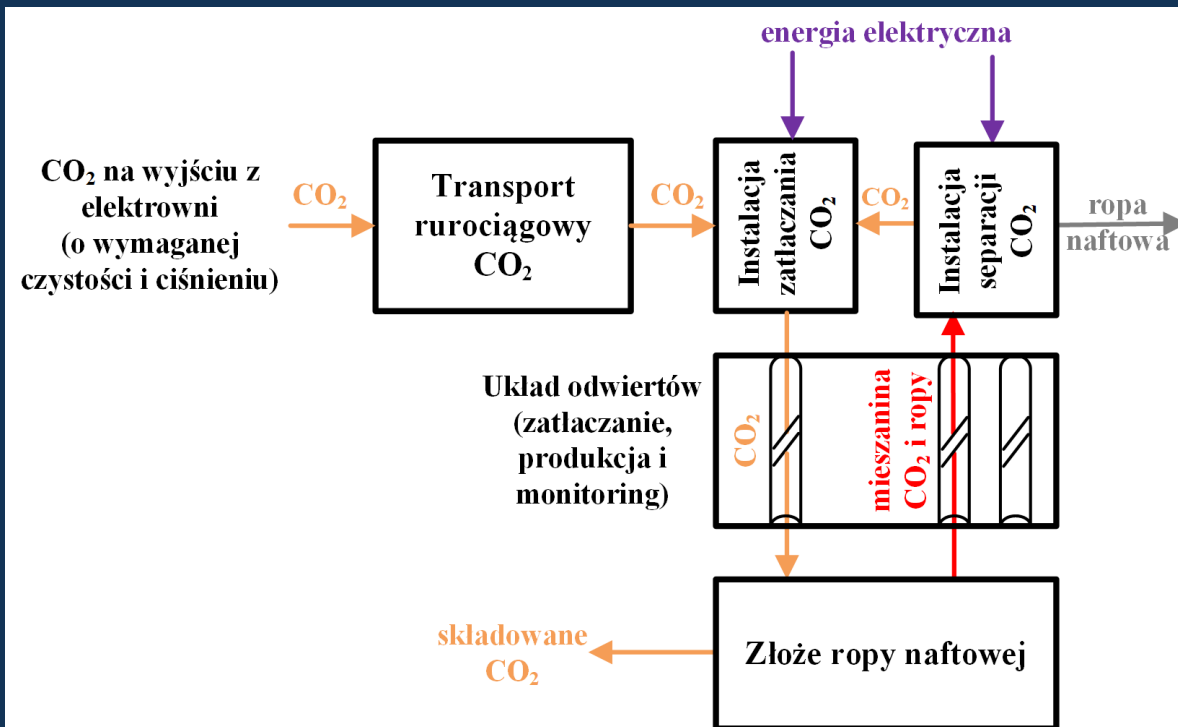
Utylizacja CO₂ – ogólny podział

- **ważne pytania przy utylizacji CO₂:**
 - ponowna emisja CO₂?
 - permanentne magazynowanie?
 - efekt energetyczny?
 - bezpieczeństwo procesu?
 - gotowość technologiczna?
 - skala procesu?



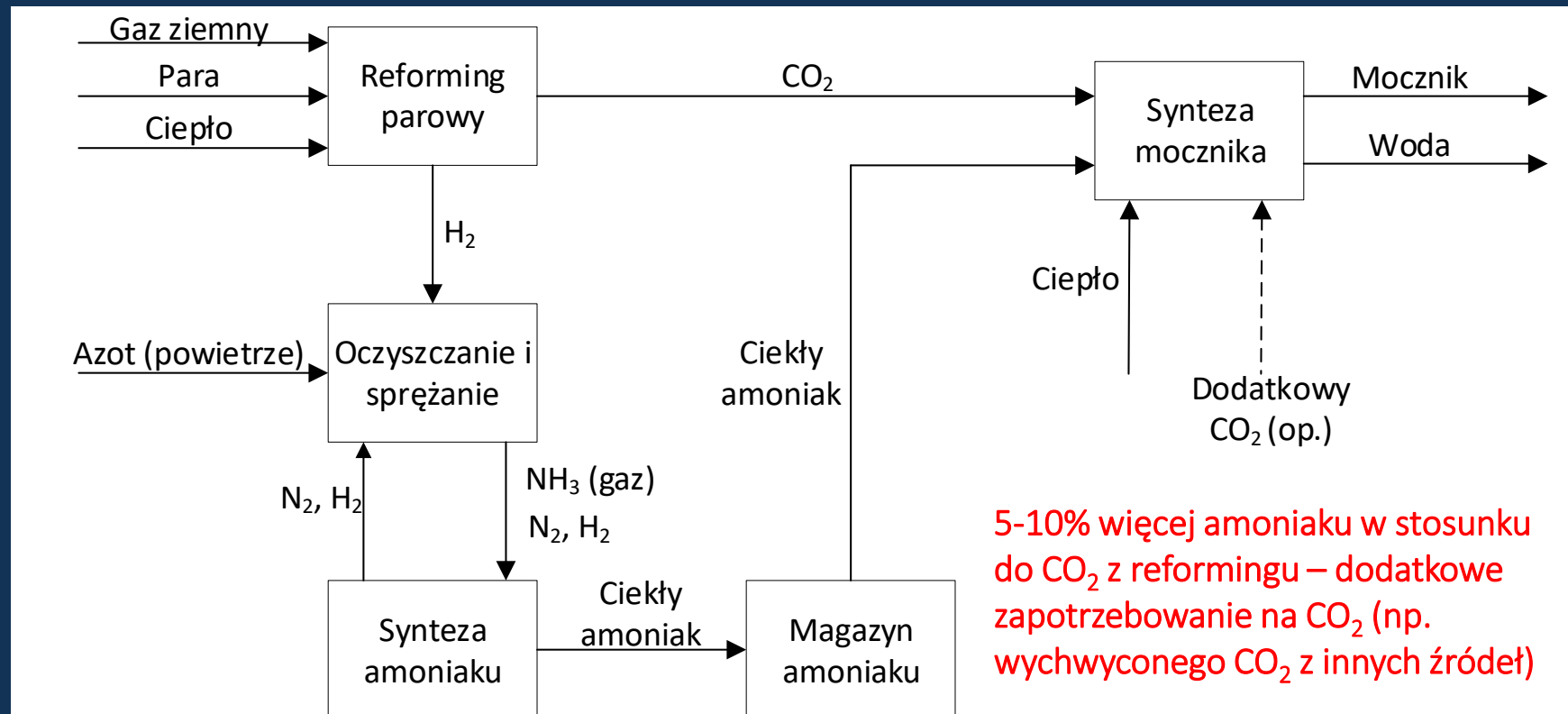
Utylizacja CO₂ – EOR i EGR

- rozwiązania „problematiczne” w UE z uwagi na ślad węglowy (dodatkowy wolumen paliw kopalnych dzięki intensyfikacji wydobywania)



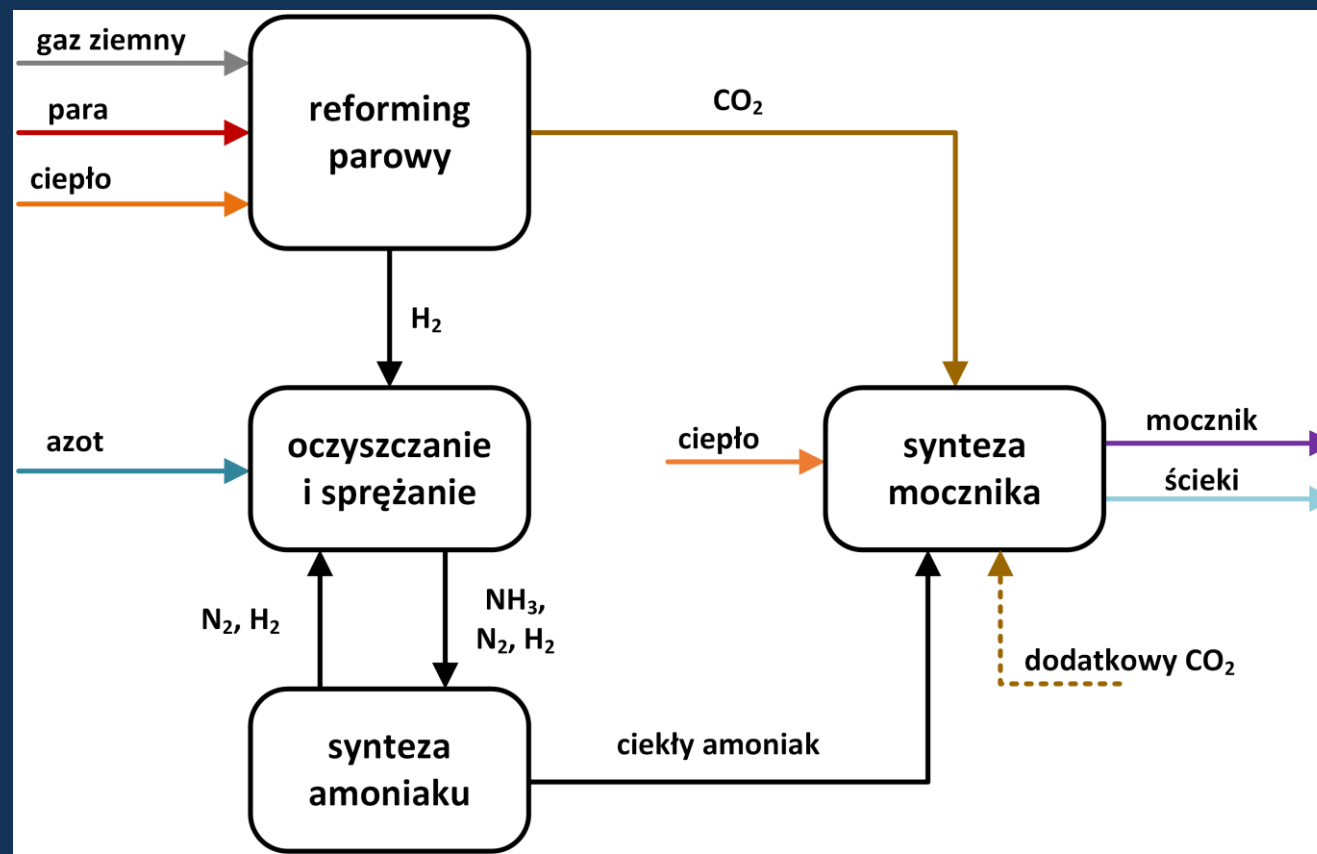
Utylizacja CO₂ – konwersja chemiczna – wspomaganie wydajności konwencjonalnych wytwórni nawozów

- mocznik – wynik reakcji amoniaku i dwutlenku węgla



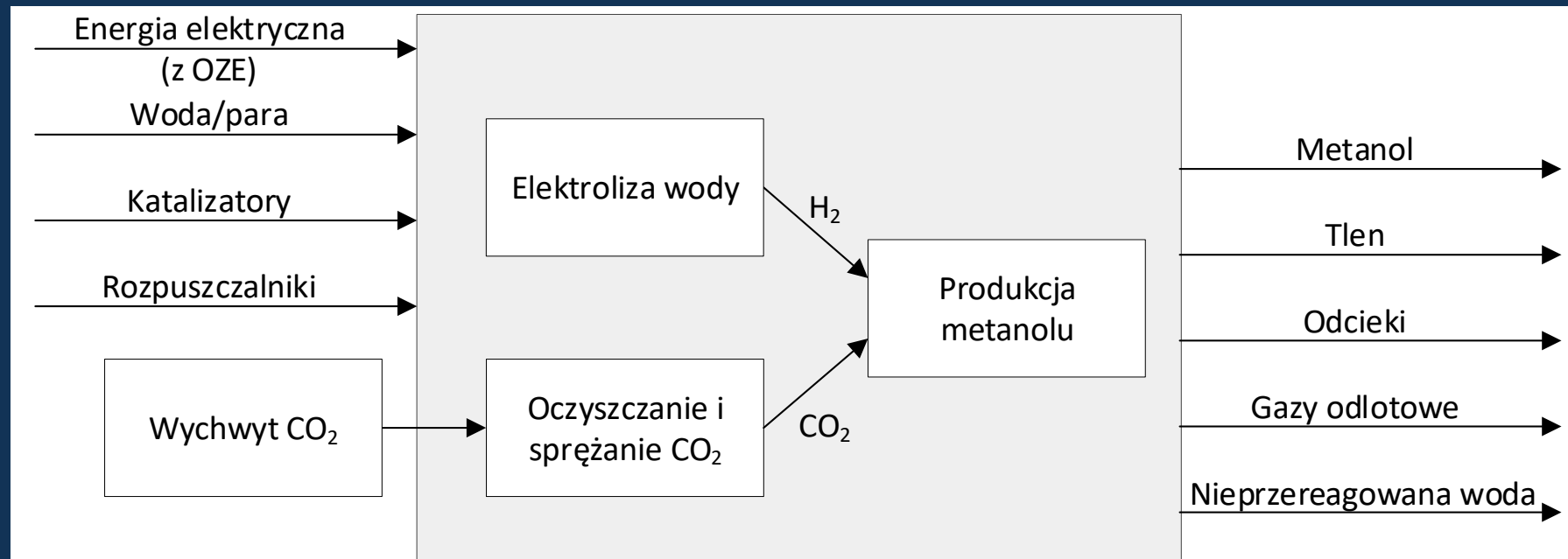
Utylizacja CO₂ – konwersja chemiczna – wspomaganie wydajności konwencjonalnych wytwórni nawozów

- mocznik – wynik reakcji amoniaku i dwutlenku węgla



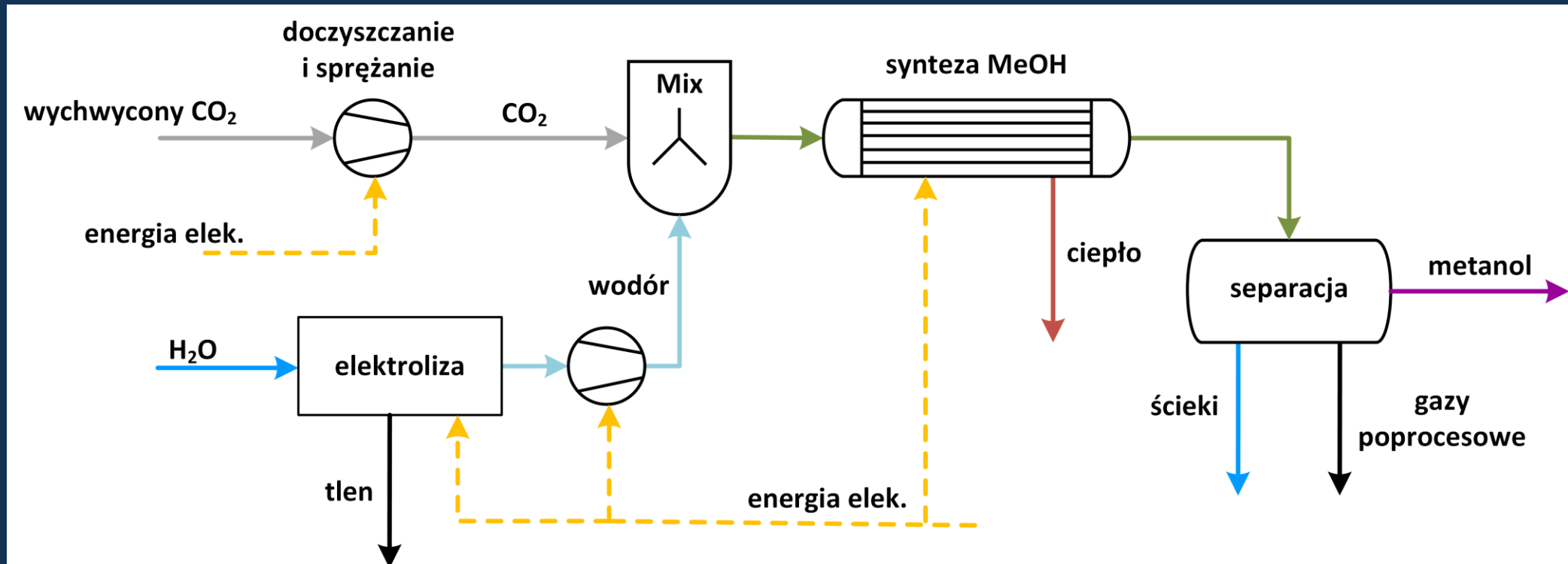
Utylizacja CO₂ – konwersja chemiczna – produkcja metanolu

- forma magazynowania energii nadmiarowej (np. z niesterowalnych OZE)
- dwie drogi katalityczne syntezy metanolu z dwutlenku węgla: bezpośrednio uwodornienie CO₂ z H₂ lub konwersja CO₂ w CO i dalsze uwodornienie CO



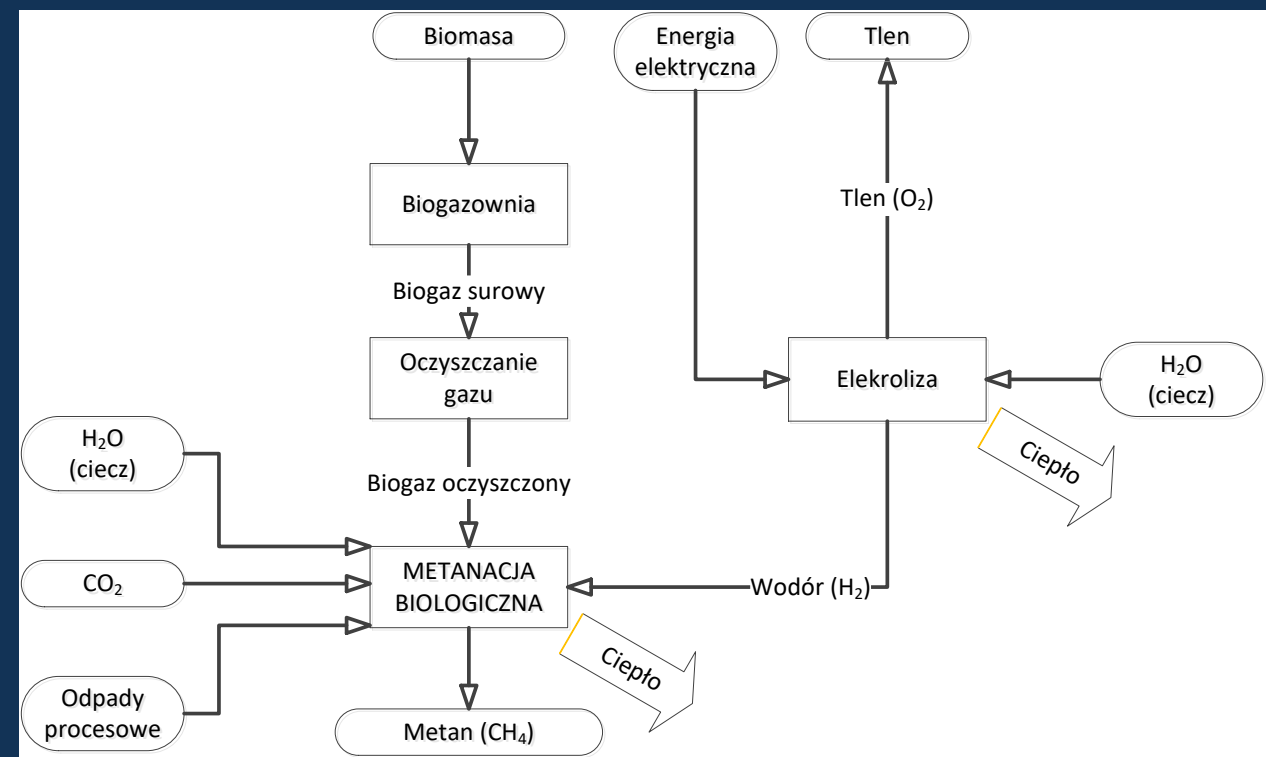
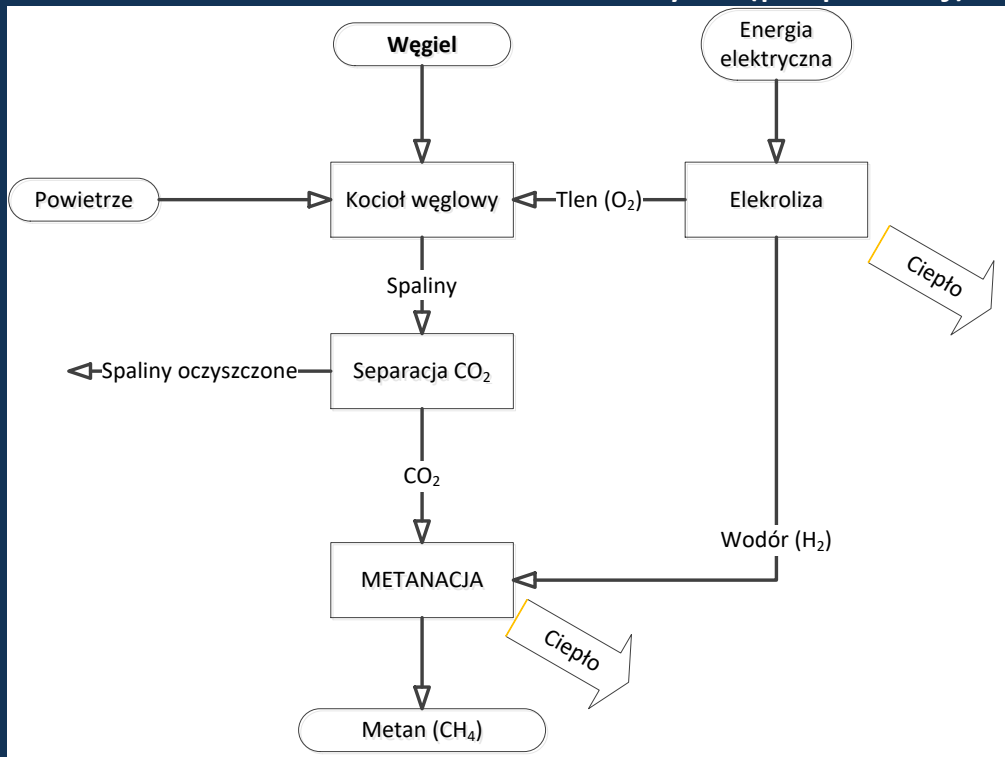
Utylizacja CO₂ – konwersja chemiczna – produkcja metanolu

- forma magazynowania energii nadmiarowej (np. z niesterowalnych OZE)
- dwie drogi katalityczne syntezy metanolu z dwutlenku węgla: bezpośrednie uwodornienie CO₂ z H₂ lub konwersja CO₂ w CO i dalsze uwodornienie CO



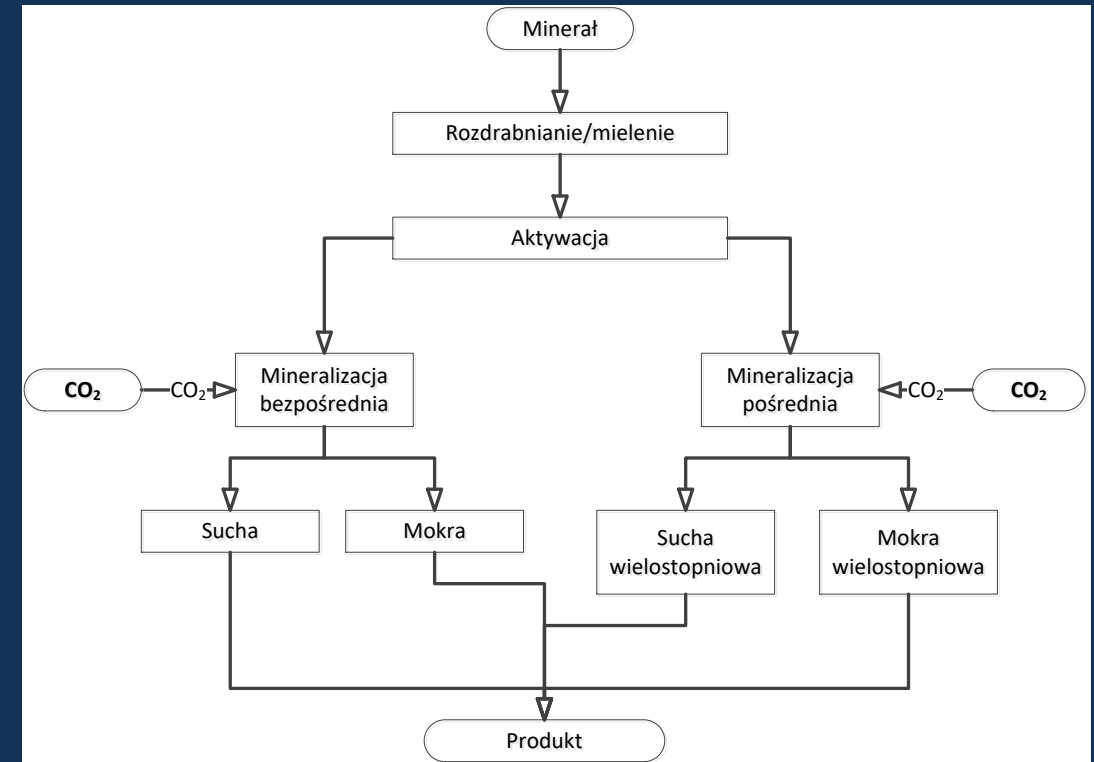
Utylizacja CO₂ – termochemiczna i biologiczna metanacja CO₂

- metanacja termochemiczna jest to proces polegający na reakcji dwutlenku lub tlenku węgla z wodorem w reaktorze katalitycznym (po lewej)
- metanacja biologiczna to proces w którym przy udziale organizmów żywych – fermentacja w warunkach beztlenowych (po prawej)

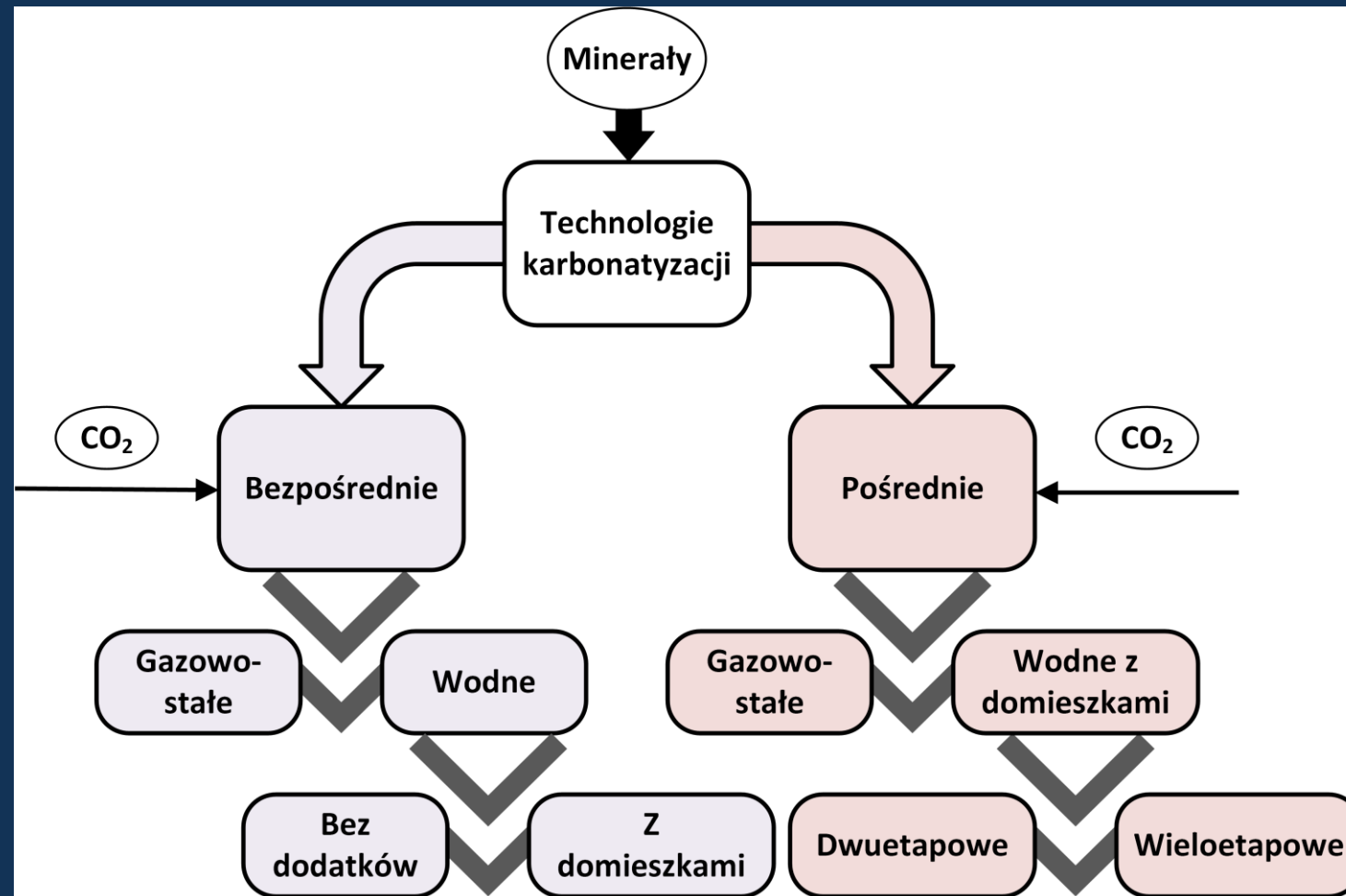


Utylizacja CO₂ – mineralizacja CO₂

- rozdrabnianie/mielenie – skała wsadowa jest rozdrabniana do wymiaru cząstki 50 do 250 mm,
- aktywacja (mechaniczna; termiczna; chemiczna)** – rozbijanie siatki strukturalnej w celu zmniejszenia energii aktywacji kolejnych reakcji,
- proces zasadniczy:
 - suchy bezpośredni** – doprowadzenie do reaktora CO₂ (lub mieszaniny w fazie gazowej), proces w temperaturze 200 do 1000°C,
 - mokry bezpośredni** – rozpuszczenie CO₂ w wodzie w kierunku zwiększenia kwasowości, wprowadzenie do reaktora wraz z minerałem, proces w podwyższonej temperaturze (ok 150°C) i ciśnieniu 150 do 200 bar,
 - suchy pośredni wielostopniowy** – z zastosowaniem innych reagentów,
 - mokry pośredni wielostopniowy** – z zastosowaniem również innych reagentów (np. pH swing process).



Utylizacja CO₂ – mineralizacja CO₂



Gotowość do wdrożenia dla technologii CCU

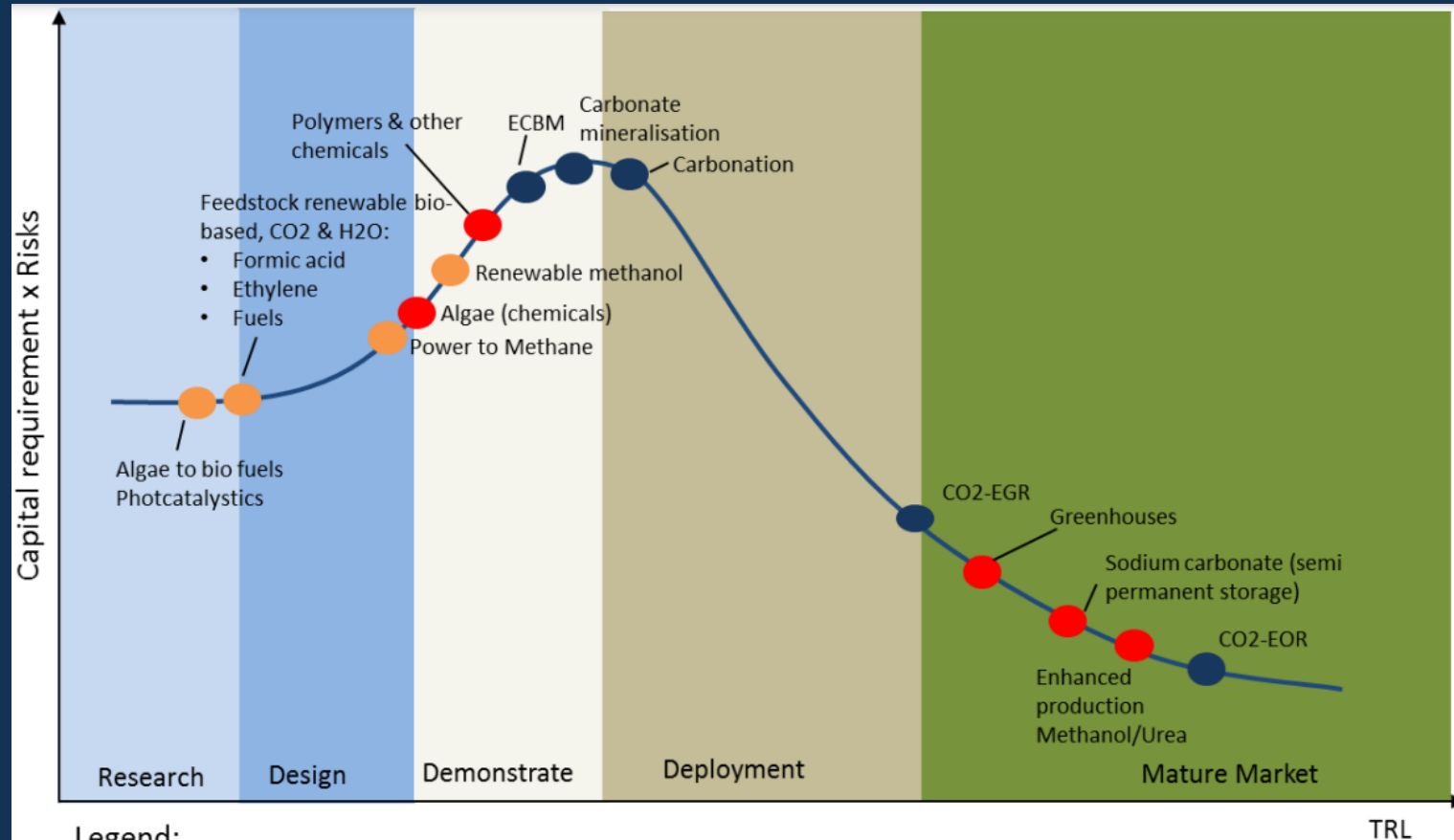
Poziom gotowości technologicznej (Technology Readiness Level)		Poziom gotowości komercyjnej (Commercial Readiness Level)		Poziom gotowości społecznej (Social Readiness Level)	
		CRL 6	klasa aktywów bankowych		
		CRL 5	konkurencja rynkowa i rozwój		
		CRL 4	aplikacja komercyjna (kilka układów)		
TRL 9	gotowość do wdrożenia	CRL 3	skalowanie komercyjne	SRL 5	wprowadzenie do legislacji i polityk
TRL 8	testy i demonstracja w skali pilotowej	CRL 2	testy komercyjne w małej skali	SRL 4	szczegółowa ocena w oparciu o badania w skali pilotowej
TRL 7					
TRL 6					
TRL 5	weryfikacja w skali laboratoryjnej i warunkach symulowanych	CRL 1	hipotetyczna oferta komercyjna	SRL 3	ocena technologii i decyzja kierunkowa o dalszym rozwoju
TRL 4					
TRL 3	określenie możliwości zastosowania i potwierdzenie koncepcji	CRL 1	hipotetyczna oferta komercyjna	SRL 2	zwiększone zainteresowanie i upowszechnienie informacji
TRL 2					
TRL 1	rozpoczęcie badań naukowych	CRL 1	hipotetyczna oferta komercyjna	SRL 1	świadomość wśród polityków

Gotowość do wdrożenia dla technologii CCU – w ujęciu globalnym (2020)

Obszar (metody)	Poziom gotowości technologicznej (TRL)									Poziom gotowości komercyjnej (CRL)						Poziom gotowości społecznej (SRL)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
Elektro i fotochemiczne																				
Termochemiczne																				
Biologiczne																				
Karbonizacja																				
EOR (konwencjonalny)																				
EOR (niekonwencjonalny)																				

- EOR (konwencjonalny) w USA czy Kanadzie jest technologią w pełni wdrożoną (zarówno z punktu widzenia TRL, CRL i SRL)

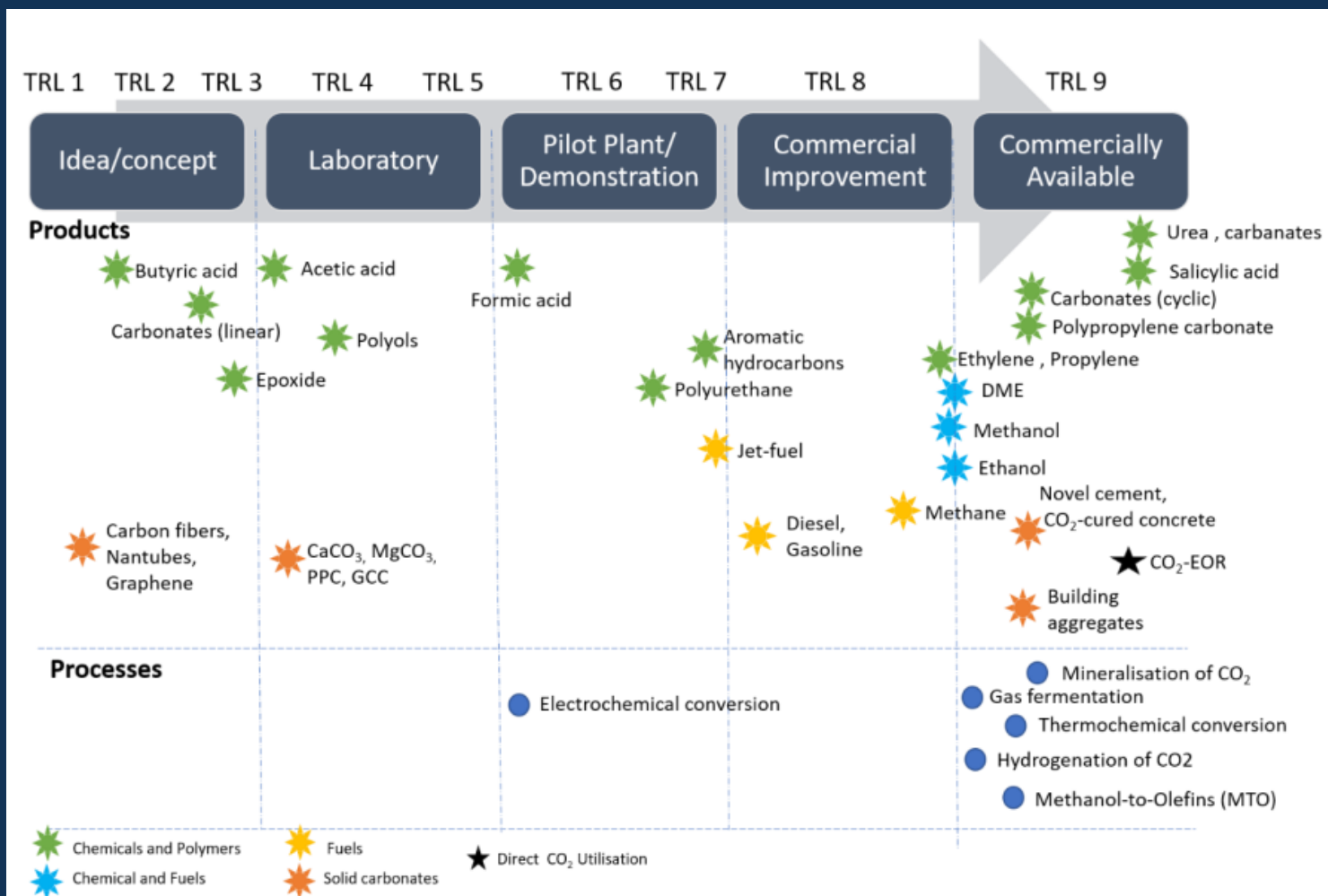
Gotowość do wdrożenia dla technologii CCU (2015)



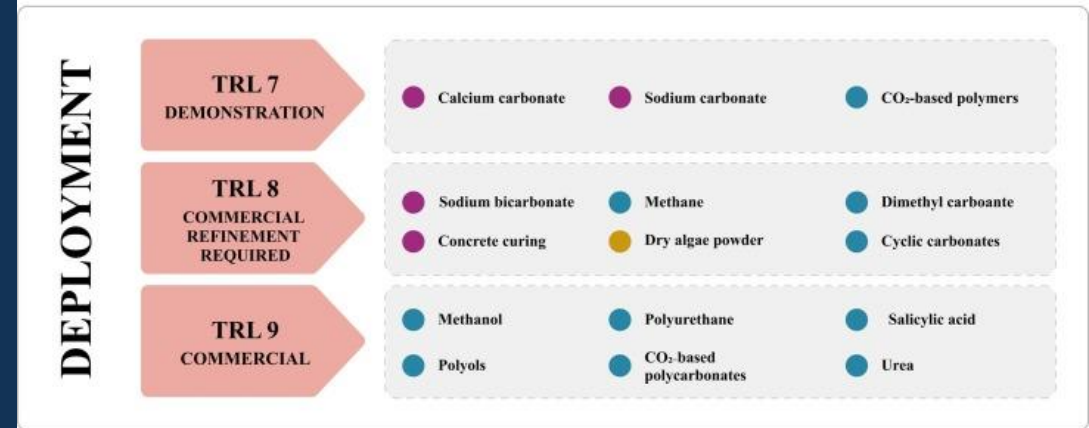
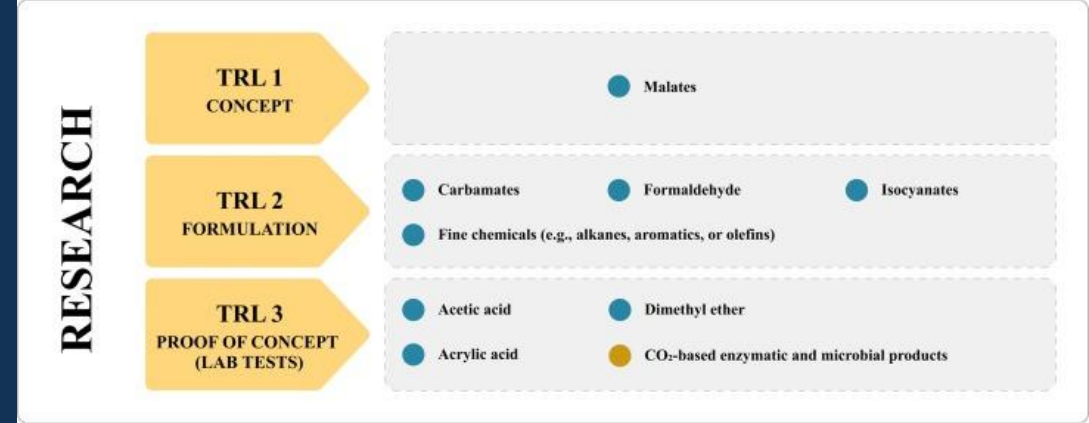
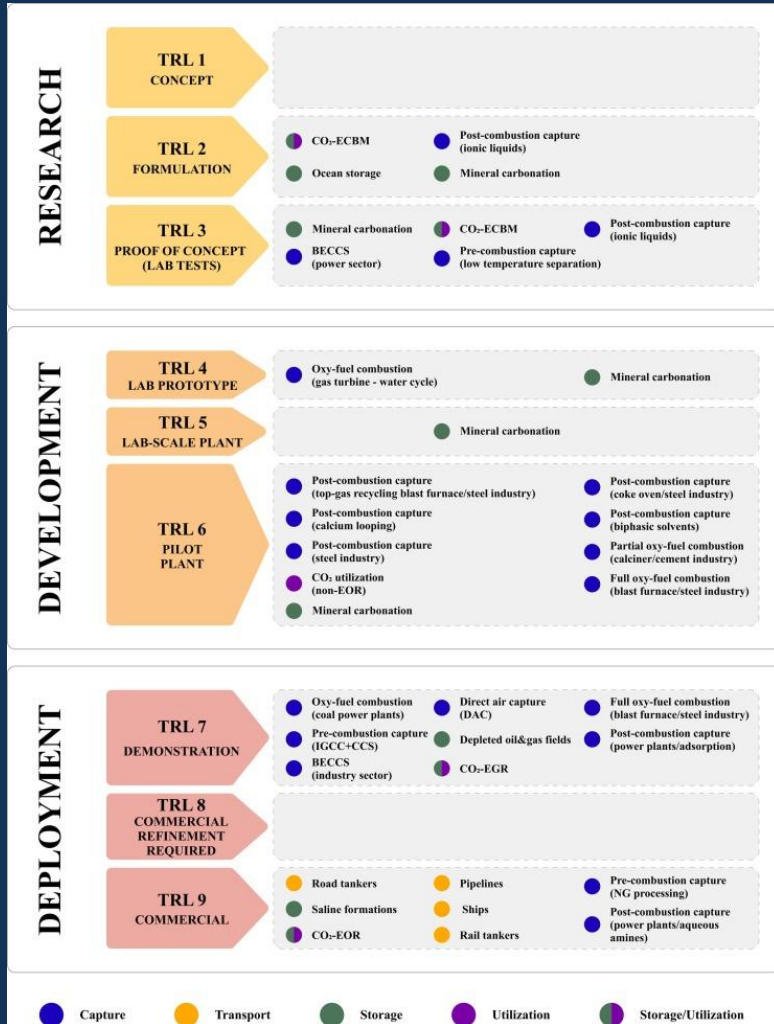
Legend:

- Permanent storage
- Temporary storage
- Displacement of fossil fuels

Gotowość do wdrożenia dla technologii CCU (2020)



Gotowość do wdrożenia dla technologii CCUS i CCU (2023)



Gotowość do wdrożenia dla technologii CCU – podsumowanie

- dla utylizacji CO₂
 - technologie o wysokim poziomie gotowości mogą nie być postrzegane jako rozwiązania pozwalające na efektywne zmniejszenie emisji CO₂ (kwestia śladu węglowego), co może prowadzić to braku celowości realizacji procesu CCU,
 - wydajność instalacji utylizacji CO₂, pozwalających na rzeczywiste zmagazynowanie CO₂ lub uniknięcie emisji CO₂ z procesów referencyjnych, jest znacząco poniżej potrzeb wynikających z wolumenu zaplanowanego do usunięcia (wychwycenia) CO₂,
 - przewagą technologii CCU jest możliwość ulokowania instalacji w pobliżu źródła wychwyczonego CO₂ oraz wytworzenie dodatkowych źródeł przychodu.

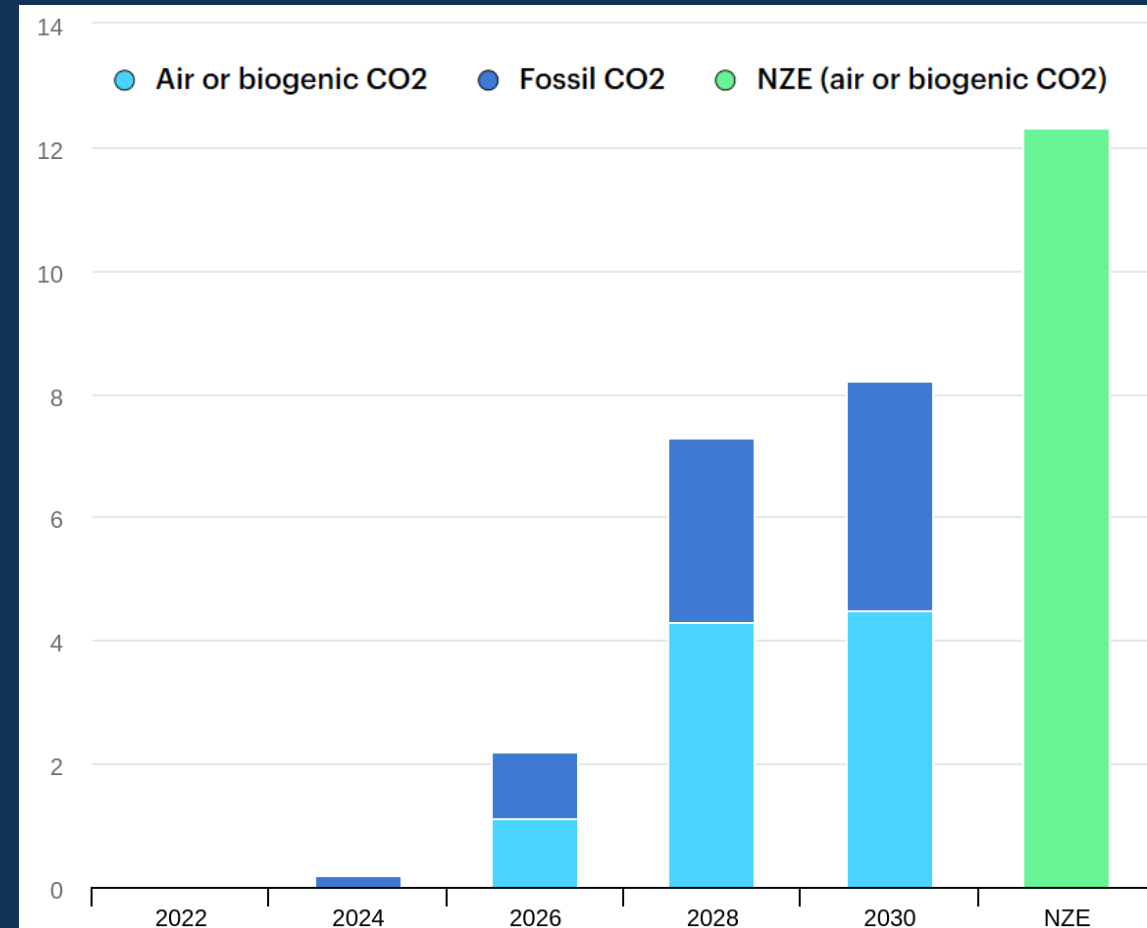
Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

- konieczność zwiększenia wysiłków na rzecz wdrożenia technologii CCU;
- **aktualny bilans gospodarczego wykorzystania CO₂ na świecie:**
 - ok. 230 milionów ton CO₂ na rok jest wykorzystywane na świecie:
 - ścieżka bezpośrednia w przemyśle nawozowym (ok. 130 milionów ton CO₂) do produkcji mocznika
 - wspomagane wydobycie ropy naftowej (ok. 80 milionów ton CO₂)
- aktualnie w przygotowaniu (do roku 2030) są projekty obejmujące utylizację ok. 15 mln ton CO₂ na rok, w tym **8 mln ton CO₂ dla potrzeb produkcji paliw syntetycznych (z czego połowa tego wolumenu dwutlenku węgla będzie pochodzić z BECCS i DAC)**

Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

- scenariusz NZE (cel net-zero na 2050 rok) przygotowany przez IEA wskazuje na konieczność zwiększenia aktualnego wolumenu projektów produkcji paliw syntetycznych **z 8 Mtpa do 12 Mtpa dla 2030 roku (wyłącznie dla BECCS i DAC)**

źródło: IEA (2023), Planned commercial CO₂ use in synthetic fuel production by CO₂ source compared to the Net Zero Scenario, 2022-2030, IEA, Paris
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/planned-commercial-co2-use-in-synthetic-fuel-production-by-co2-source-compared-to-the-net-zero-scenario-2022-2030>, Licence: CC BY 4.0



Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

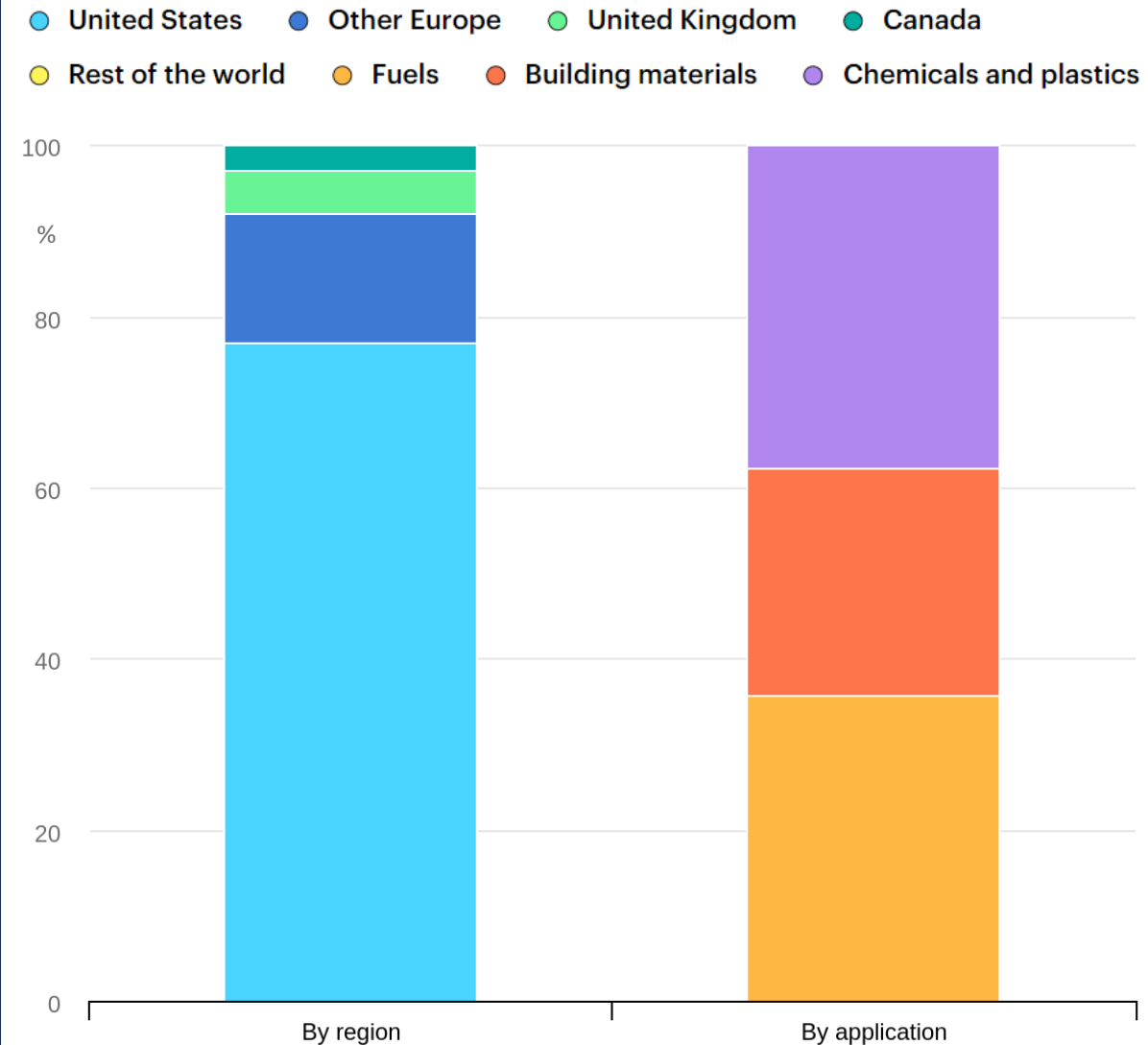
- inwestycje kapitału wysokiego ryzyka w **technologii CCU są w trendzie rosnącym**
- zwiększone zainteresowanie technologią utylizacji CO₂ znajduje odzwierciedlenie w rosnącej ilości **prywatnych i publicznych środków** dla firm działających w tym obszarze
- zauważyć można trend związany z wykorzystaniem CO₂ **do produkcji zrównoważonych paliw lotniczych oraz materiałów budowlanych**

źródło: IEA (2023), Annual venture capital investment in CCUS projects and companies, 2015-2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-venture-capital-investment-in-ccus-projects-and-companies-2015-2022>, Licence: CC BY 4.0



Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

- inwestycje kapitału wysokiego ryzyka w technologicie CCUS według zastosowania i regionu, lata 2015-2022
- **dominująca pozycja USA (prawie 80% inwestycji)**
- Inwestycje w technologicie przetwarzania CO₂ na paliwa oraz do produkcji chemikaliów, dominują wśród finansowanych zastosowań



Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

- zwraca się uwagę na fakt, iż wykorzystanie CO₂ nie koniecznie musi prowadzić do zmniejszenia emisji CO₂ do atmosfery:
 - chodzi zarówno o źródło dwutlenku węgla (**paliwa kopalne vs bioenergia i bezpośrednio usuwanie z atmosfery**)
 - pokrycie zapotrzebowania na energię do procesów zagospodarowania CO₂ (**ponownie mówimy o śladzie węglowym**)
- **podczas gdy wykorzystanie CO₂ mogłoby przynieść znaczne korzyści klimatyczne, stosunkowo ograniczony rozmiar rynku dla tych zastosowań oznacza, że dedykowane składowanie powinno pozostać głównym celem wdrażania technologii CCUS na świecie!**

Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

- **Stany Zjednoczone:**
 - wsparcie dla utylizacji CO₂ poprzez **45Q tax credits** – wsparcie finansowe wynoszące **60 USD na tonę wykorzystanego CO₂**
 - dodatkowe dostępne dofinansowanie projektów utylizacji CO₂ – **120 mln USD w 2023 roku**
- **Kanada:**
 - planowane wsparcie (tax credits) dla projektów CCUS na lata 2022 – 2030 obejmuje do wsparcie **w wysokości do 37,5% dla projektów CCU**
 - projekty EOR nie kwalifikują się do tego wsparcia
 - ukierunkowanie wsparcia dla projektów utylizacji obejmujące mineralizację w przemyśle cementowym

Rola technologii CCU na świecie (za IEA)

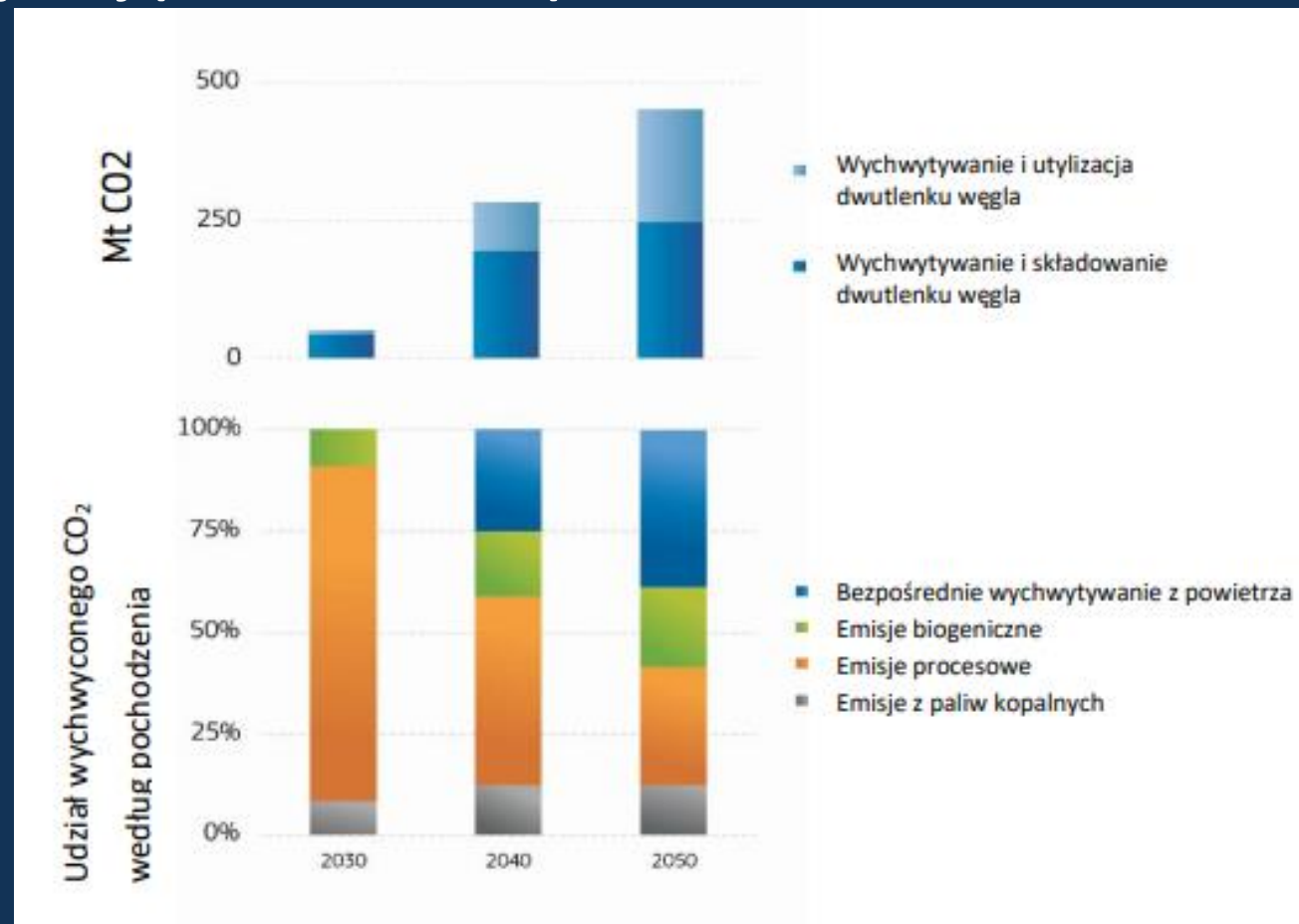
- **Unia Europejska:**
 - inicjatywa **RefuelEU Aviation**, jako element pakietu Fit for 55, wskazuje na konieczność zwiększenia podaży i popytu na zrównoważone paliwa lotniczne (**SAF – Sustainable Aviation Fuels**)
 - 2% w 2025 roku
 - 6% w 2030 roku
 - 70% w 2050 roku
 - **dotatkowo paliwa syntetyczne:**
 - 1,2% w 2030 roku
 - 50% w 2050 roku
- **pięć projektów CCS ukierunkowanych na CCU dostało dofinansowanie z Funduszu Innowacji w 2022 roku**

Rola technologii CCU w Unii Europejskiej (za IEA)

- w Unii Europejskiej **pięć dużych projektów CCU** zostało wybranych do finansowania w ramach naboru wniosków w Funduszu Innowacyjnym UE na rok 2022 (projekty ze startem w latach 2027-2028):
 - **IRIS** w rafinerii Agioi Theodoroi w Grecji (127 milionów EUR) – **produkcja e-metanolu** (z części wychwyconego CO₂ z SMR: ok. 10 tyś. ton CO₂ na rok do utylizacji)
 - **eM-Rhone** z CO₂ pochodzącym z cementowni Le Teil Blanc we Francji (115 milionów EUR) – **produkcja e-metanolu** (produkcja ok. 140 tyś. ton metanolu na rok z udziałem H₂ z elektrolizera zasilanego OZE)
 - **GREEN MEIGA** w Hiszpanii (123 miliony EUR) – **produkcja e-metanolu** (produkcja ok. 100 tyś. ton metanolu na rok z udziałem CO₂ pochodzącym z DAC opartego na enzymach),
 - **Triskelion** w Hiszpanii (49 milionów EUR) – **produkcja e-metanolu** (produkcja ok. 40 tyś. ton metanolu na rok)
 - **Colombus** w Belgii (69 milionów EUR) – **produkcja e-metanu (SNG)**

Rola technologii CCU w Unii Europejskiej (w ramach ICM)

- wolumen wychwyconego CO₂ do celów składowania i **utylizacji w UE** oraz udział wychwyconego CO₂ według pochodzenia



Rola technologii CCU w Unii Europejskiej (w ramach ICM)

- technologie CCU jako element modelu **gospodarki o obiegu zamkniętym**
- technologie CCU jako element klastrów przemysłowych, z uwzględnieniem zdecentralizowanego modelu infrastruktury (**łączenie źródeł emisji CO₂ z instalacjami utylizacji na poziomie lokalnym**)
- konieczność zapewnienia podaży wodoru dla technologii CCU i **potencjał wykorzystania efektów synergii**
- konieczność zapewnienia **odnawialnych źródeł energii** dla potrzeb technologii CCU
- niektóre zastosowania wychwyconego CO₂ w produktach przewidziano już w przepisach prawa - przepisy te zachęcają do **stosowania paliw opartych na CCU w celu zastąpienia paliw kopalnych w kluczowych sektorach**, wraz z zabezpieczeniami zapewniającymi wymagane minimalne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych (**ponownie ślad węglowy**)

Rola technologii CCU w Unii Europejskiej (w ramach ICM)

- w przeglądzie dyrektywy EU ETS przeprowadzonym w 2023 r. uznano również **trwałość składowania dwutlenku węgla w niektórych rodzajach produktów**
- trwają prace nad aktem delegowany w celu określenia warunków, na jakich można uznać **stałe składowanie, aby zapewnić równe traktowanie stałego CCU i CCS w ETS**
- kluczowe znaczenie ma mieć **promowanie zrównoważonych obiegów węgla** i znaczne zmniejszenie zależności przemysłu chemicznego od surowców kopalnych oraz wykorzystanie źródeł zrównoważonego węgla w tych sektorach, w których są one najbardziej potrzebne i mogą przynieść największe korzyści dla klimatu
- konieczność identyfikacji **istniejących wyzwań strukturalnych i barier regulacyjnych** utrudniające wdrażanie CCU

Rola technologii CCU w Unii Europejskiej (w ramach ICM)

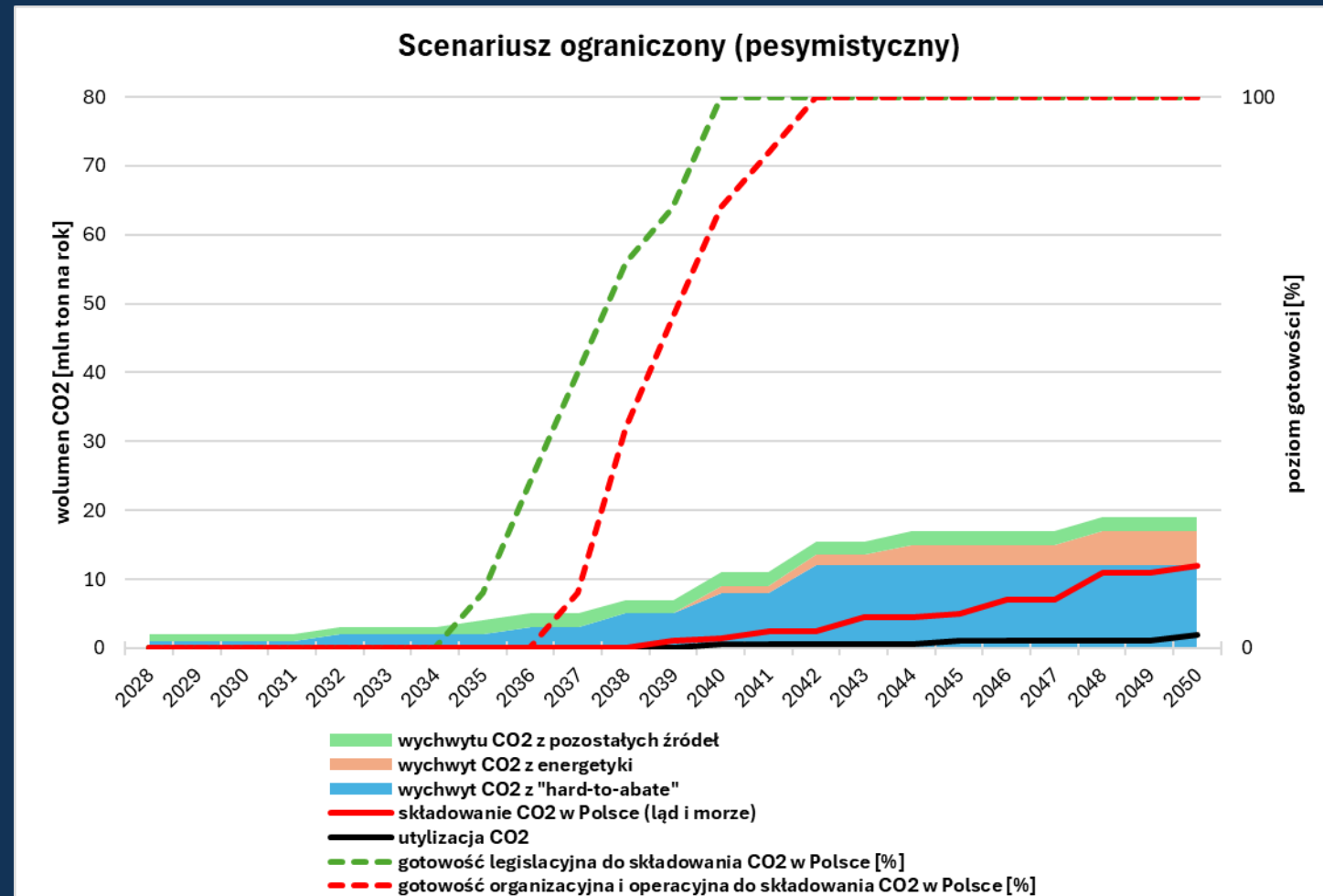
- w 2026 r. przeprowadzony zostanie przegląd EU ETS, w ramach którego ocenie poddanych zostanie kilka kwestii, w tym to:
 - czy system rozliczania EU ETS zapewnia rozliczanie wszystkich emisji i pozwala **uniknąć podwójnego liczenia**, gdy wychwycony CO₂ jest wykorzystywany w produktach, które nie są uznawane za trwałe w kontekście ETS
 - czy CO₂ potencjalnie uwalniany z produktów i paliw CCU o charakterze tymczasowym powinien być rozliczany w momencie, gdy jest emitowany do atmosfery („**rozliczanie w momencie emisji**”), czy też w momencie, gdy CO₂ jest pierwotnie wychwytywany („**rozliczanie w momencie wychwycenia**”)
 - czy włączenie wybranych sektorów (np. spalanie odpadów) do EU ETS mogłoby **pomóc w uznaniu CCU o charakterze tymczasowym** za drogę do ograniczenia obowiązku umorzenia poprzez ustalanie cen emisji na niższym szczeblu

Scenariusze eksperckie rozwoju CCUS w Polsce

Obszar	Scenariusz ograniczony	Scenariusz rozwojowy	Scenariusz opóźniony
Rola technologii CCUS w dekarbonizacji	<ul style="list-style-type: none"> ograniczony rozwój CCS w przemysłach z emisjami procesowymi (cementowy, wapienniczy) minimalny udział CCS w energetyce zawodowej i komunalnej oraz przemyśle chemicznym i metalurgicznym (alternatywne ścieżki dekarbonizacji) opóźnione w czasie (lata 2035 – 2045) wdrożenie technologii CCS z uwagi na niski potencjał i małą skalę brak wdrożenia wielkoskalowych rozwiązań dla utylizacji CO₂ (np. do produkcji paliw syntetycznych) 	<ul style="list-style-type: none"> pełne wdrożenie technologii CCS w przemysłach z emisjami procesowymi (cementowy, wapienniczy, inny) duży udział CCS w energetyce zawodowej i pozostałych sektorach, gdzie wychwyty CO₂ staje się dominującą technologią redukcji emisji gazów cieplarnianych szybkie wdrożenie technologii CCS w czasie (lata 2030 – 2040) w całym spektrum gospodarki krajowej stopniowe (od 2035 – 2040) wdrażanie wielkoskalowych rozwiązań dla utylizacji CO₂ (w tym rozwiązania inne niż produkcja paliw syntetycznych) 	<ul style="list-style-type: none"> ambitne cele wdrożenia technologii CCS w przemysłach z emisjami procesowymi (cementowy, wapienniczy, inny) średni udział CCS w energetyce zawodowej i pozostałych sektorach towarzyszący rozwojowi alternatywnych ścieżek dekarbonizacji potencjalne wyhamowanie projektów wychwyty CO₂ w czasie (w latach 2030 – 2040) generujące lukę pomiędzy stroną podażową (wychwyty CO₂) a popytową (transportu i składowania CO₂) technologie utylizacji CO₂ są wdrażane z wyprzedzeniem (2030 – 2040), jak odpowiedź na potencjalną lukę po stronie popytowej
Gotowość legislacyjna do transportu i składowania CO ₂ na lądzie	<ul style="list-style-type: none"> bardzo opóźnione w czasie wdrożenie rozwiązań legislacyjnych regulujących transport rurociągowy i składowanie na lądzie CO₂ (w latach 2035 - 2040) brak dedykowanych form wsparcia (finansowego i organizacyjnego) dla przedsięwzięć CCS w Polsce brak znaczącej roli technologii CCS i CCU w celach net-zero na 2050 rok w Polsce 	<ul style="list-style-type: none"> wdrożenie pełnego łańcucha legislacyjnego dla transportu rurociągowego i składowania na lądzie CO₂ (w latach 2028 – 2032) dedykowane formy wsparcia projektów CCS w Polsce (np. kontrakty różnicowe) oraz pełne wykorzystanie potencjału środków zagranicznych prywatnych (np. partnerstwa publiczno-prywatne) oraz europejskich (np. fundusze strukturalne) duża rola technologii CCS oraz rosnąca w czasie rola technologii CCU w celach net-zero na 2050 rok w Polsce 	<ul style="list-style-type: none"> opóźnione w czasie wdrożenie rozwiązań legislacyjnych regulujących transport rurociągowy i składowanie na lądzie CO₂ (po 2035 roku) ograniczone formy wsparcia projektów CCS w Polsce i brak efektywnego wsparcia przy staraniach o dodatkowe środki finansowe dla podmiotów ze środków europejskich sformalizowana rola technologii CCS i CCU w celach net-zero na 2050 rok w Polsce bez wiążących celów z poziomu krajowego
Gotowość techniczna i organizacyjna operatorów transportu i składowania CO ₂ na lądzie	<ul style="list-style-type: none"> opóźnione powołanie krajowych operatorów transportu rurociągowego CO₂ w Polsce (w latach 2038 – 2042) opóźnione (w latach 2038 – 2042) lub zablokowane (np. protesty społeczności lokalnych) powołanie operatorów składowania CO₂ na lądzie 	<ul style="list-style-type: none"> szybkie i efektywne powołanie krajowych operatorów transportu rurociągowego CO₂ w Polsce (do roku 2030) szybkie i efektywne powołanie krajowych operatorów składowania CO₂ na lądzie w Polsce (do roku 2030) 	<ul style="list-style-type: none"> stopniowe powołanie krajowych operatorów transportu rurociągowego CO₂ w Polsce (w latach 2032 – 2036) stopniowe (w latach 2032 – 2036) powołanie operatorów składowania CO₂ na lądzie

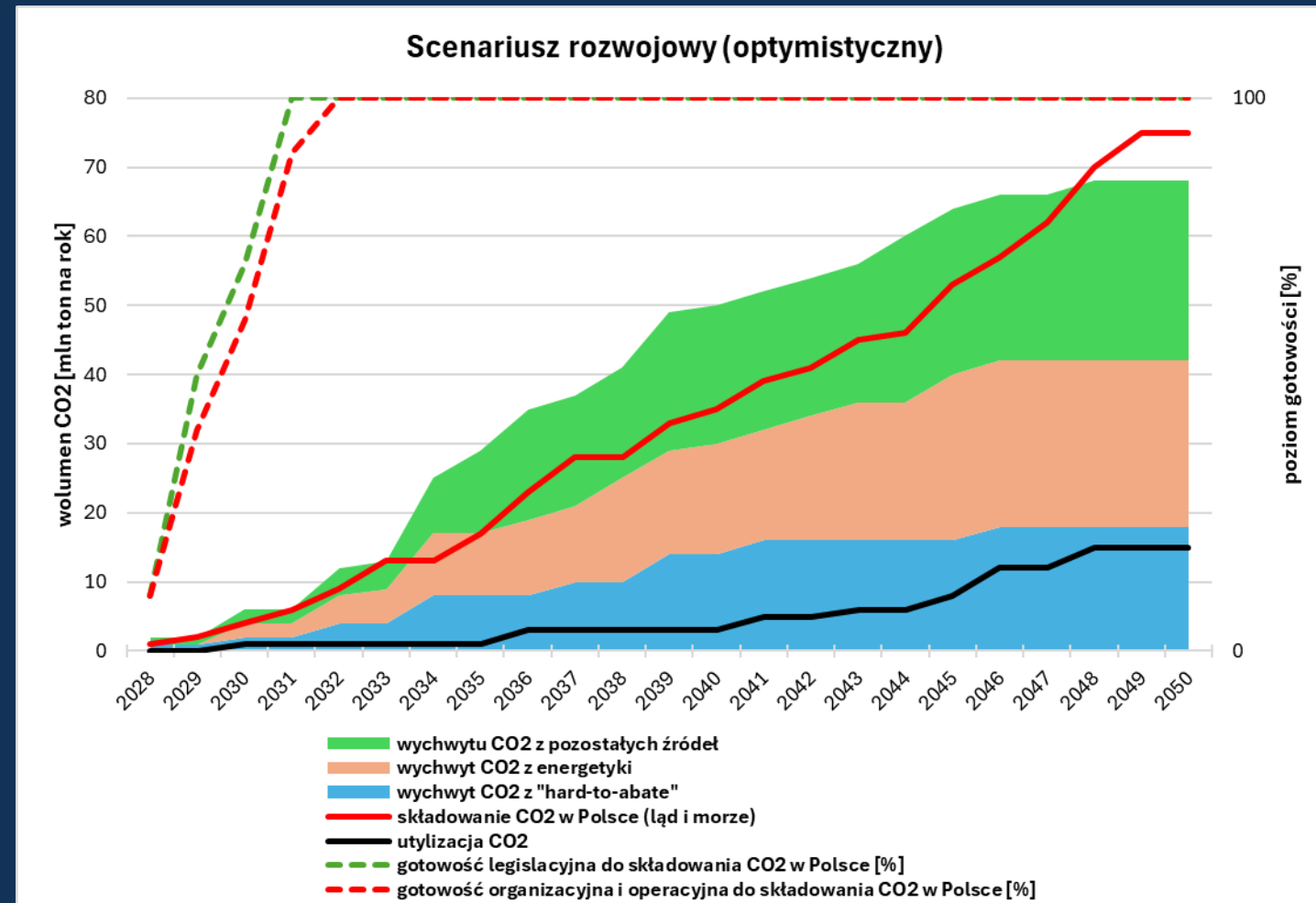
Scenariusze eksperckie rozwoju CCUS w Polsce

- scenariusz ograniczonego rozwoju CCUS w Polsce:
 - **wychwyt CO₂**: ok. 220 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **eksport CO₂**: ok. 153 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **składowanie CO₂ w Polsce**: ok. 60 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **utylizacja CO₂**: ok. 10 mln ton CO₂ (do roku 2050)



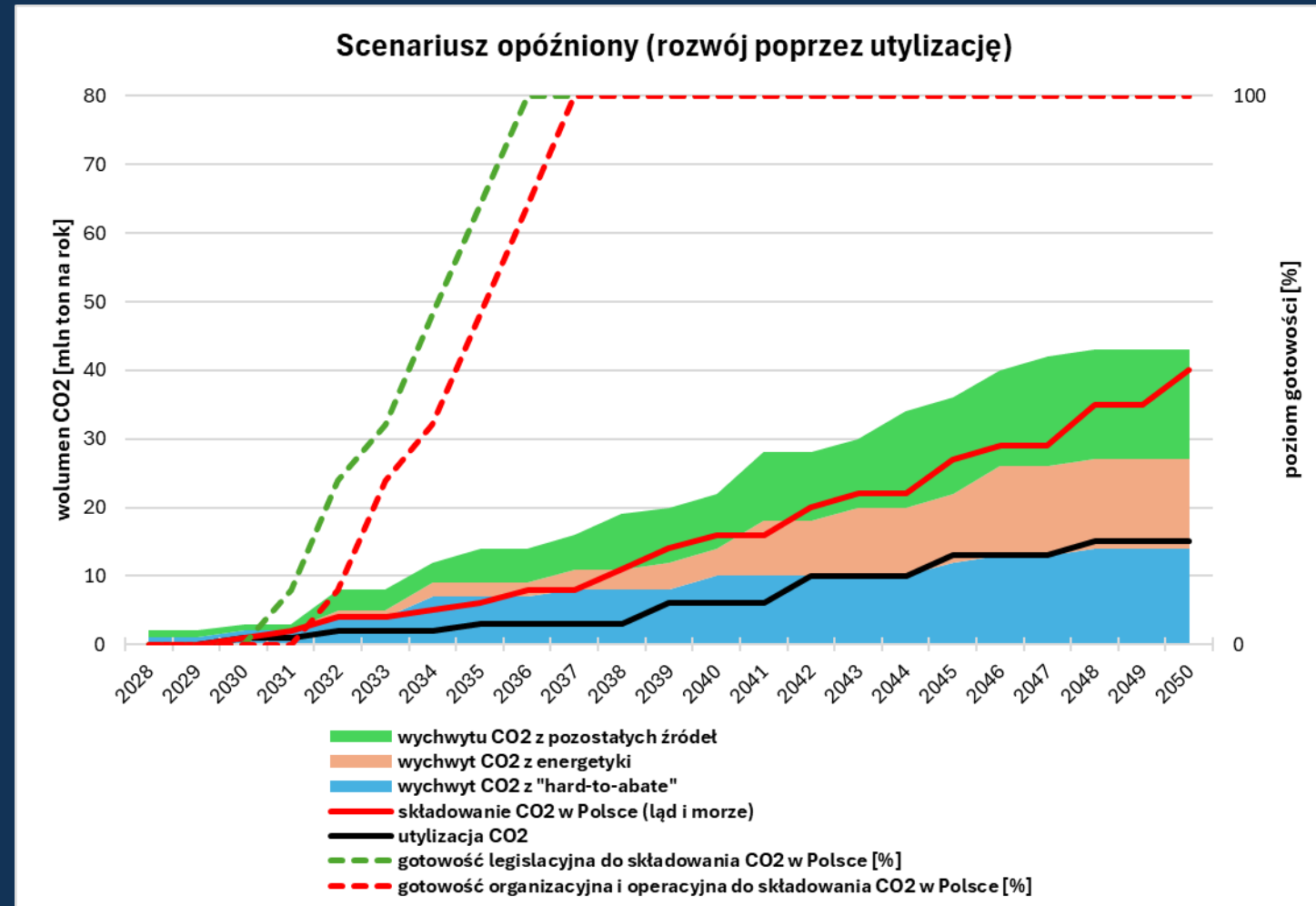
Scenariusze eksperckie rozwoju CCUS w Polsce

- scenariusz szybkiego rozwoju CCUS w Polsce:
 - **wychwyt CO₂**: ok. 930 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **eksport CO₂**: ok. 154 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **składowanie CO₂ w Polsce**: ok. 655 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **utylizacja CO₂**: ok. 120 mln ton CO₂ (do roku 2050)



Scenariusze eksperckie rozwoju CCUS w Polsce

- scenariusz opóźnionego rozwoju CCS w Polsce:
 - wychwyt CO₂: ok. 510 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - eksport CO₂: ok. 156 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - składowanie CO₂ w Polsce: ok. 202 mln ton CO₂ (do roku 2050)
 - **utylizacja CO₂: ok. 152 mln ton CO₂ (do roku 2050)**

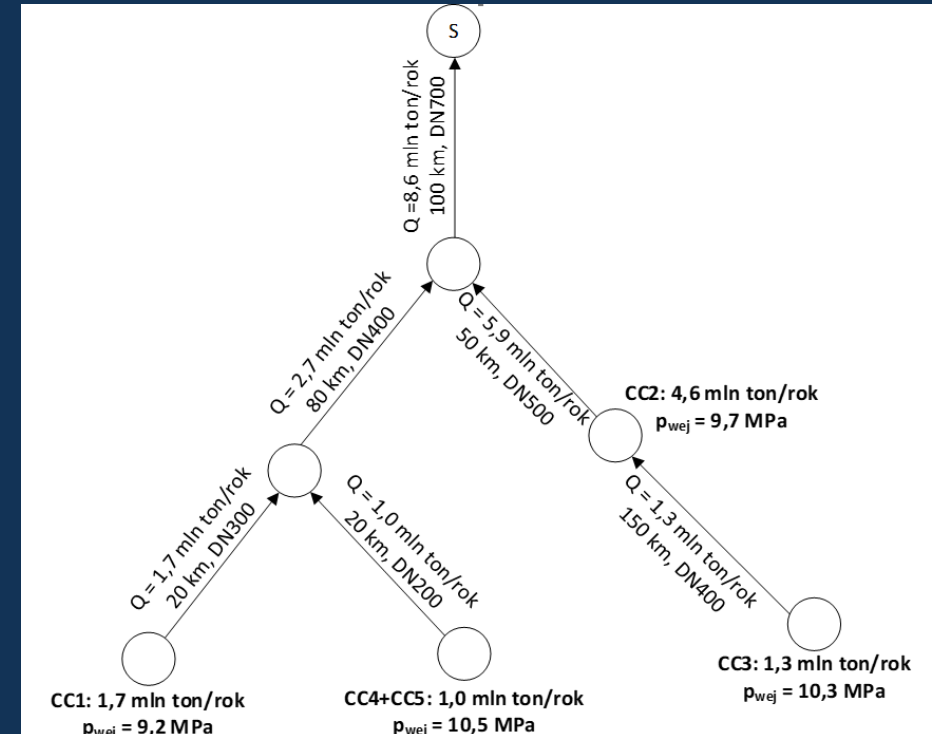


Scenariusze eksperckie rozwoju CCUS w Polsce

Obszar	Scenariusz ograniczony	Scenariusz rozwojowy	Scenariusz opóźniony
Wolumeny (łącznie do roku 2050)	<ul style="list-style-type: none"> wychwyt CO₂: ok. 220 mln ton CO₂ (do roku 2050) eksport CO₂: ok. 153 mln ton CO₂ (do roku 2050) składowanie CO₂ w Polsce: ok. 60 mln ton CO₂ (do roku 2050) utylizacja CO₂: ok. 10 mln ton CO₂ (do roku 2050) 	<ul style="list-style-type: none"> wychwyt CO₂: ok. 930 mln ton CO₂ (do roku 2050) eksport CO₂: ok. 154 mln ton CO₂ (do roku 2050) składowanie CO₂ w Polsce: ok. 655 mln ton CO₂ (do roku 2050) utylizacja CO₂: ok. 120 mln ton CO₂ (do roku 2050) 	<ul style="list-style-type: none"> wychwyt CO₂: ok. 510 mln ton CO₂ (do roku 2050) eksport CO₂: ok. 156 mln ton CO₂ (do roku 2050) składowanie CO₂ w Polsce: ok. 202 mln ton CO₂ (do roku 2050) utylizacja CO₂: ok. 152 mln ton CO₂ (do roku 2050)
Wnioski dla technologii CCU	<ul style="list-style-type: none"> przy ograniczonym rozwoju sektora CCUS w Polsce, utylizacja stanowić będzie bardzo niewielki wolumen CO₂ w gospodarce kraju – szczególnie z uwagi na brak dostępności CO₂ pochodzącego z bioenergii lub bezpośrednio z atmosfery (BECCS i DAC) wdrożenie technologii następuje po roku 2040 głównie w oparciu o technologie produkcji paliw syntetycznych maksymalna wydajność utylizacji CO₂ w Polsce: 2 mln ton CO₂ na rok 	<ul style="list-style-type: none"> rozwój sektora CCUS w Polsce napędza również projekty utylizacji CO₂ – zarówno w oparciu o CO₂ pochodzące z paliw kopalnych oraz BECCS i DAC wdrożenie technologii w skali komercyjnej rozpoczyna się od 2030 roku i nabiera tempa po 2040 roku wszystkie ścieżki technologiczne dla utylizacji CO₂ są brane pod uwagę maksymalna wydajność utylizacji CO₂ w Polsce: 15 mln ton CO₂ na rok 	<ul style="list-style-type: none"> opóźnienia po stronie składowania CO₂ w Polsce, przy jednoczesnym zaangażowaniu podmiotów w projekty utylizacji CO₂, powoduje wzrost liczby projektów gospodarczego wykorzystania CO₂ wdrożenie technologii w skali komercyjnej rozpoczyna się od 2030 roku i nabiera tempa już w 2035 roku wszystkie ścieżki technologiczne dla utylizacji CO₂ są brane pod uwagę maksymalna wydajność utylizacji CO₂ w Polsce: 15 mln ton CO₂ na rok

Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- wariant teoretyczny klastra CCUS w Polsce:
 - CC1: **Elektrownia gazowo-parowa** z wychwytem CO₂ (absorpcja aminowa)
 - CC2: **Elektrownia węglowa** z wychwytem CO₂ (absorpcja aminowa)
 - CC3: **Cementownia** (piec do wypalania klinkieru) z wychwytem CO₂ (separacja kriogeniczna)
 - CC4: **Instalacja przemysłowa** z wychwytem CO₂ (separacja kriogeniczna)
 - CC5: **Instalacja bezpośredniego usuwania CO₂ z atmosfery** (niskotemperaturowa na sorbentach stałych)



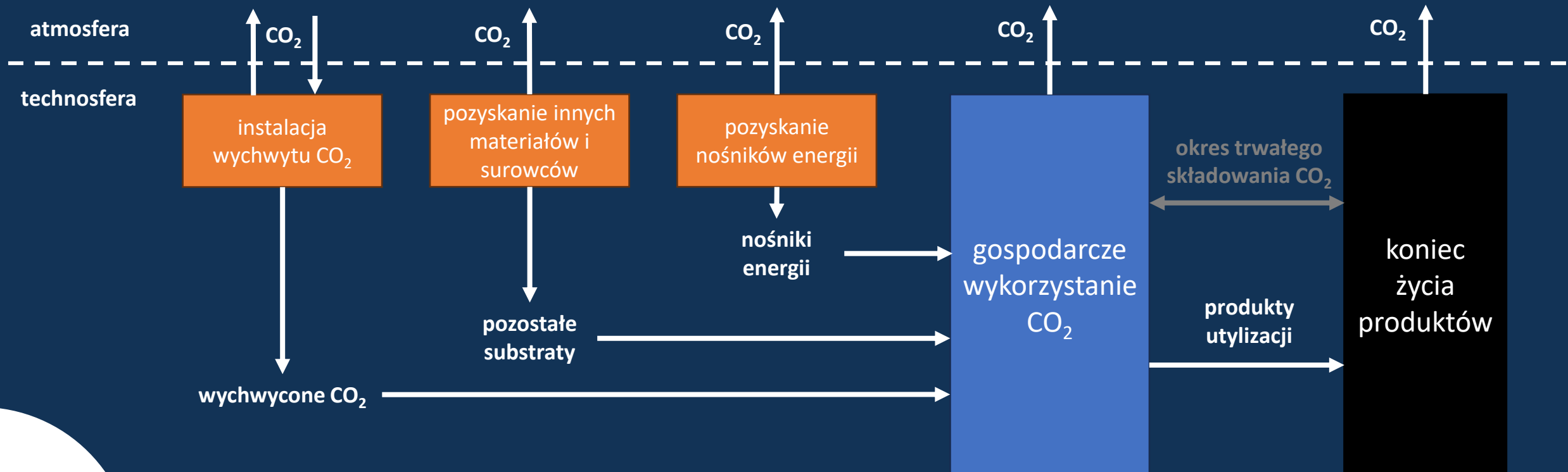
Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- wariant teoretyczny klastra CCUS w Polsce:

Technologie utylizacji (gospodarczego wykorzystania) CO ₂	
Produkcja paliw syntetycznych	<p>CU1: Instalacja do produkcji metanolu (CH₃OH)</p> <ul style="list-style-type: none"> • proces: synteza katalityczna • parametry procesu: 7,8 MPa i 250°C • wydajność nominalna: 310 tyś. ton metanolu na rok • stopień konwersji CO₂: 94% • jednostkowy stopień utylizacji CO₂: 1,46 ton CO₂/tonę metanolu • jednostkowe zapotrzebowanie na H₂: 0,2 ton H₂ /tonę metanolu • jednostkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną: 0,17 MWh_{el}/tonę metanolu • jednostkowe zapotrzebowanie na ciepło (para wodna): 0,44 MWh_{th}/tonę metanolu • roczna utylizacja CO₂: 0,453 mln ton
	<p>CU2: Instalacja do produkcji metanu (CH₄)</p> <ul style="list-style-type: none"> • proces: metanacja termochemiczna • typ reaktora: ze złożem stałym • parametry procesu: 1 MPa i 450°C • stopień konwersji CO₂: 97% • wydajność nominalna: 180 tyś. ton SNG na rok • jednostkowy stopień utylizacji CO₂: 1,46 ton CO₂/tonę metanolu • jednostkowe zapotrzebowanie na H₂: 0,2 ton H₂ /tonę metanolu • jednostkowa produkcja ciepła odpadowego: 2,51 kJ_{th}/kg CH₄ • roczna utylizacja CO₂: 0,482 mln ton

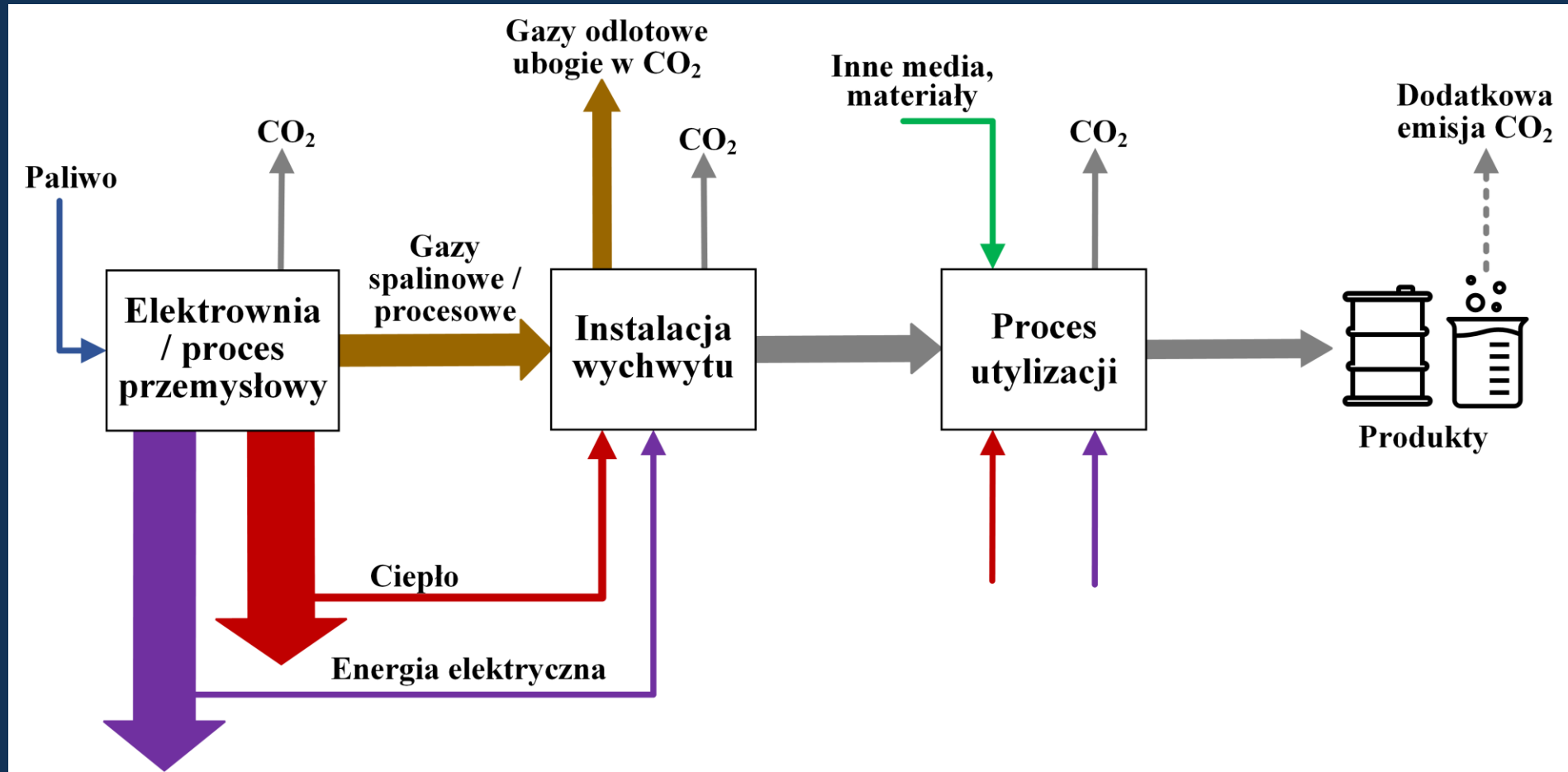
Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- sposób uwzględnienia emisji bezpośrednich i pośrednich dla technologii CCU w ramach śladu węglowego:



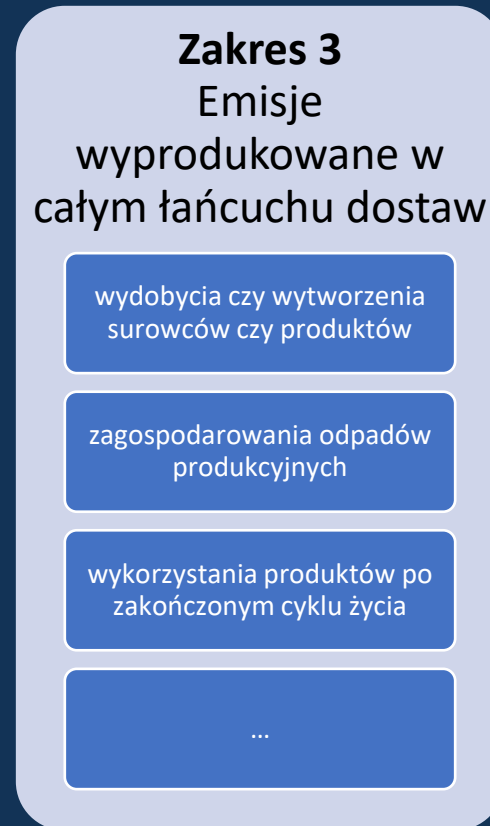
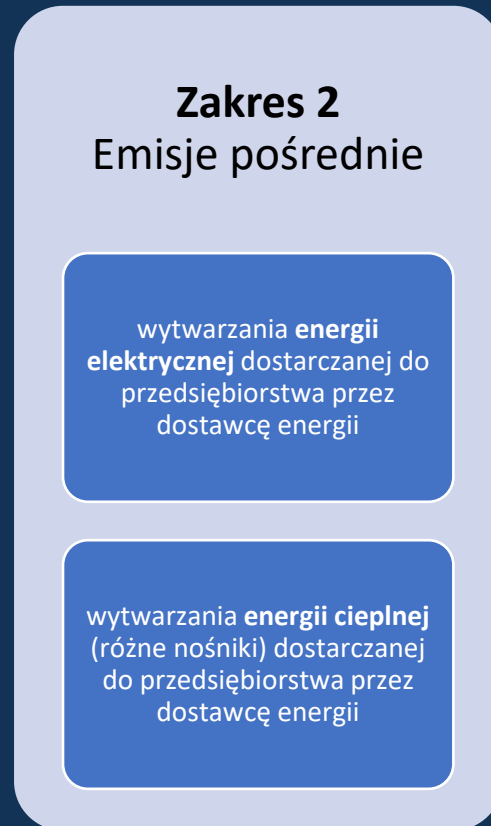
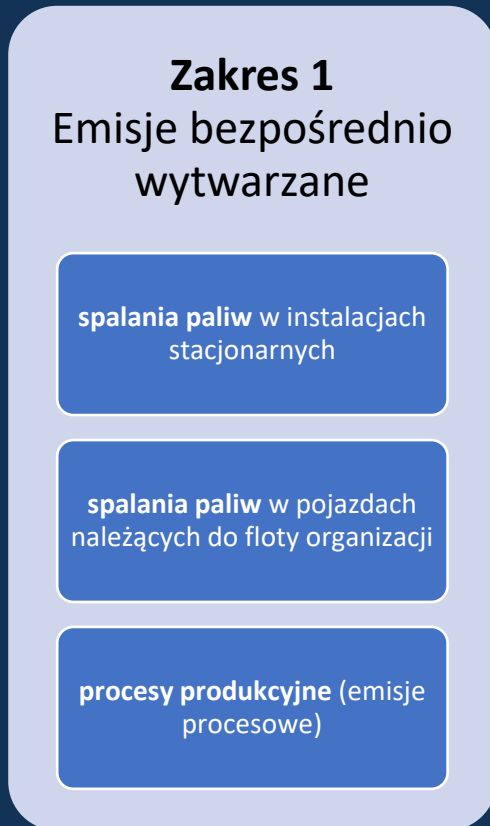
Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- sposób uwzględnienia emisji bezpośrednich i pośrednich dla technologii CCU w ramach śladu węglowego:



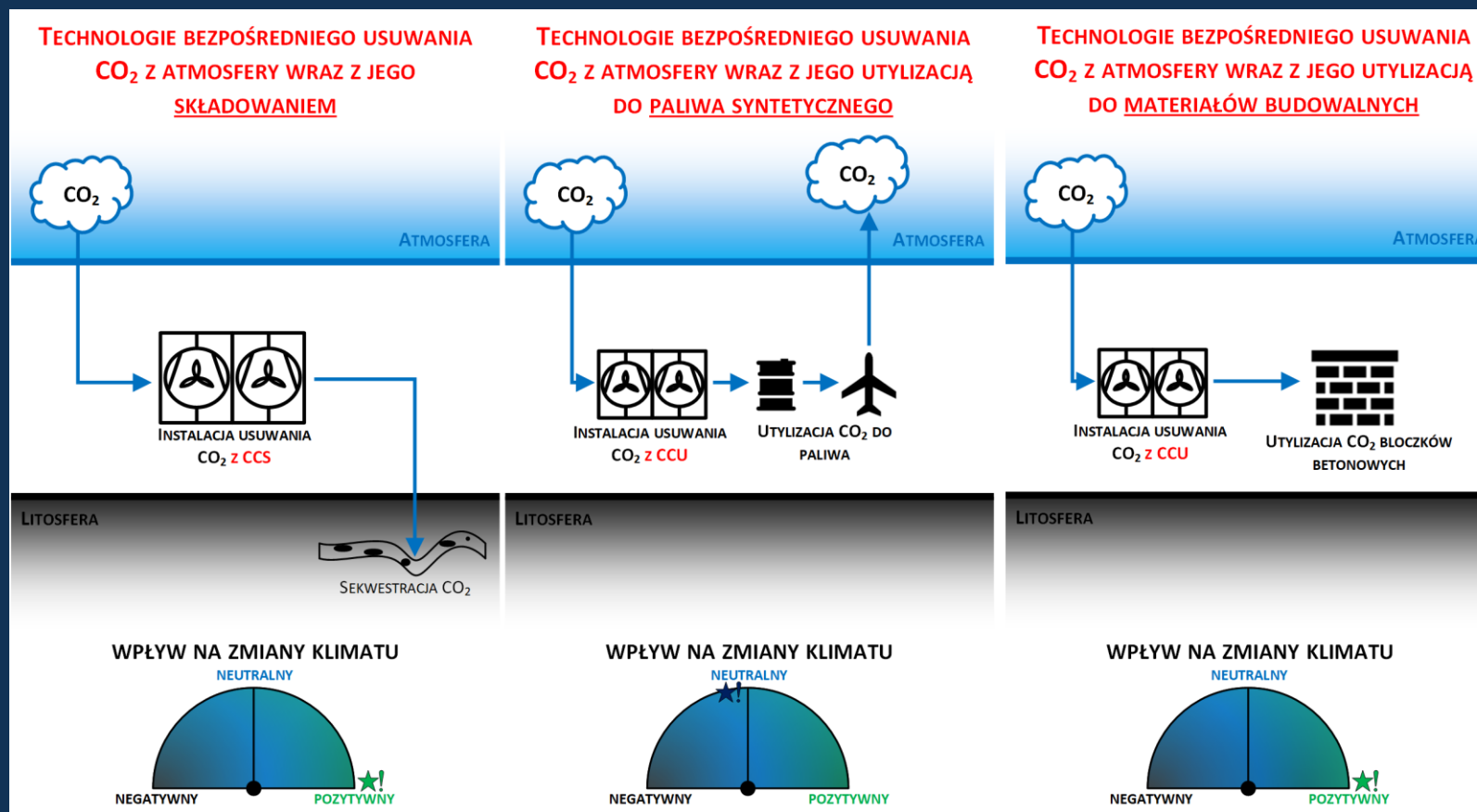
Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- sposób uwzględnienia emisji bezpośrednich i pośrednich dla technologii CCU w ramach śladu węglowego:



Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- CCU a wpływ na klimat – wybrane przykłady



Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- wskaźniki pośrednie oceny śladu węglowego dla technologii CCU:

$$e_{CO_2}^{neg} = e_{CO_2}^{act} - c_{CO_2}^{bio}$$

$$= (e_{CO_2}^{tot} - e_{CO_2}^{bio}) - (c_{CO_2}^{tot} - c_{CO_2}^{fos})$$

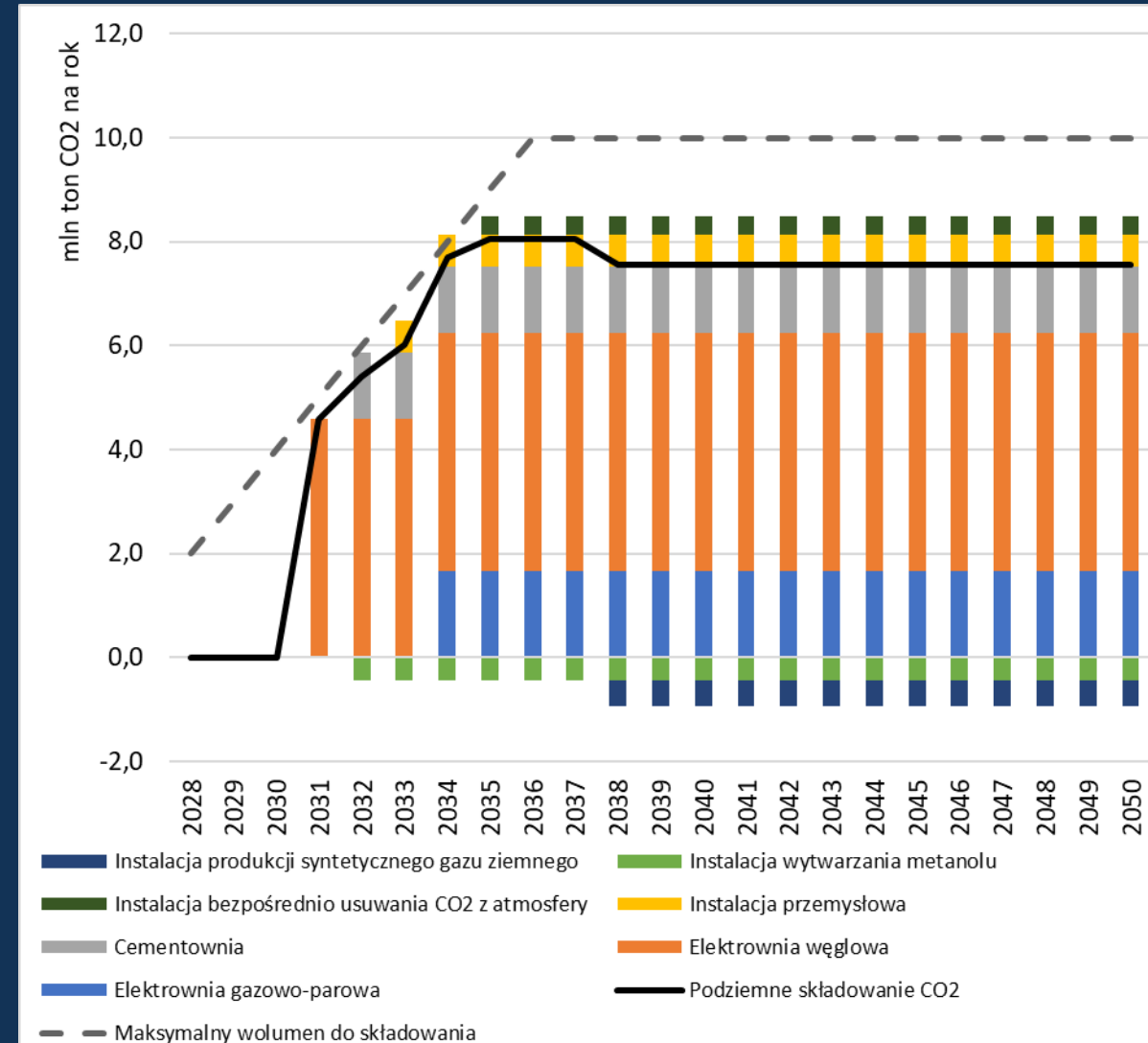
$$CI = \frac{e_{CO_2}^{act} - c_{CO_2}^{bio}}{E_{el,net}}$$

$$C2A = \frac{f_{CO_2 source} - (1 - f_{emitted})}{\left(\frac{f_{emitted} \times f_{CO_2 source} \times f_{re-emitted}}{2} \right)}$$

wskaźnik C2A	wskaźniki CI, $e_{CO_2}^{neg}$	Efekt oceny
$C2A \geq 1$	$CI, e_{CO_2}^{neg} > 0$	brak redukcji lub jej wzrost w stosunku do rozwiązań referencyjnych
$0 < C2A < 1$		potencjał do redukcji w stosunku do rozwiązań referencyjnych
$C2A = 0$	$CI, e_{CO_2}^{neg} = 0$	potencjał do neutralności emisyjnej
$-1 \leq C2A < 0$	$CI, e_{CO_2}^{neg} < 0$	tzw. „ujemna” emisja

Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- wariant teoretyczny klastra CCUS w Polsce – **optymalizacja śladu węglowego:**
 - **optymalizacja w kierunku minimalizacji śladu węglowego funkcjonowania takiego klastra**
 - wprowadzone ograniczenie w zakresie wolumenu składowania CO₂ wymusiło odłożenie w czasie uruchomienia projektów CCUS
 - wcześniej niż w scenariuszu referencyjnym, pojawiają się technologie utylizacji i bezpośredniego usuwania CO₂ z atmosfery



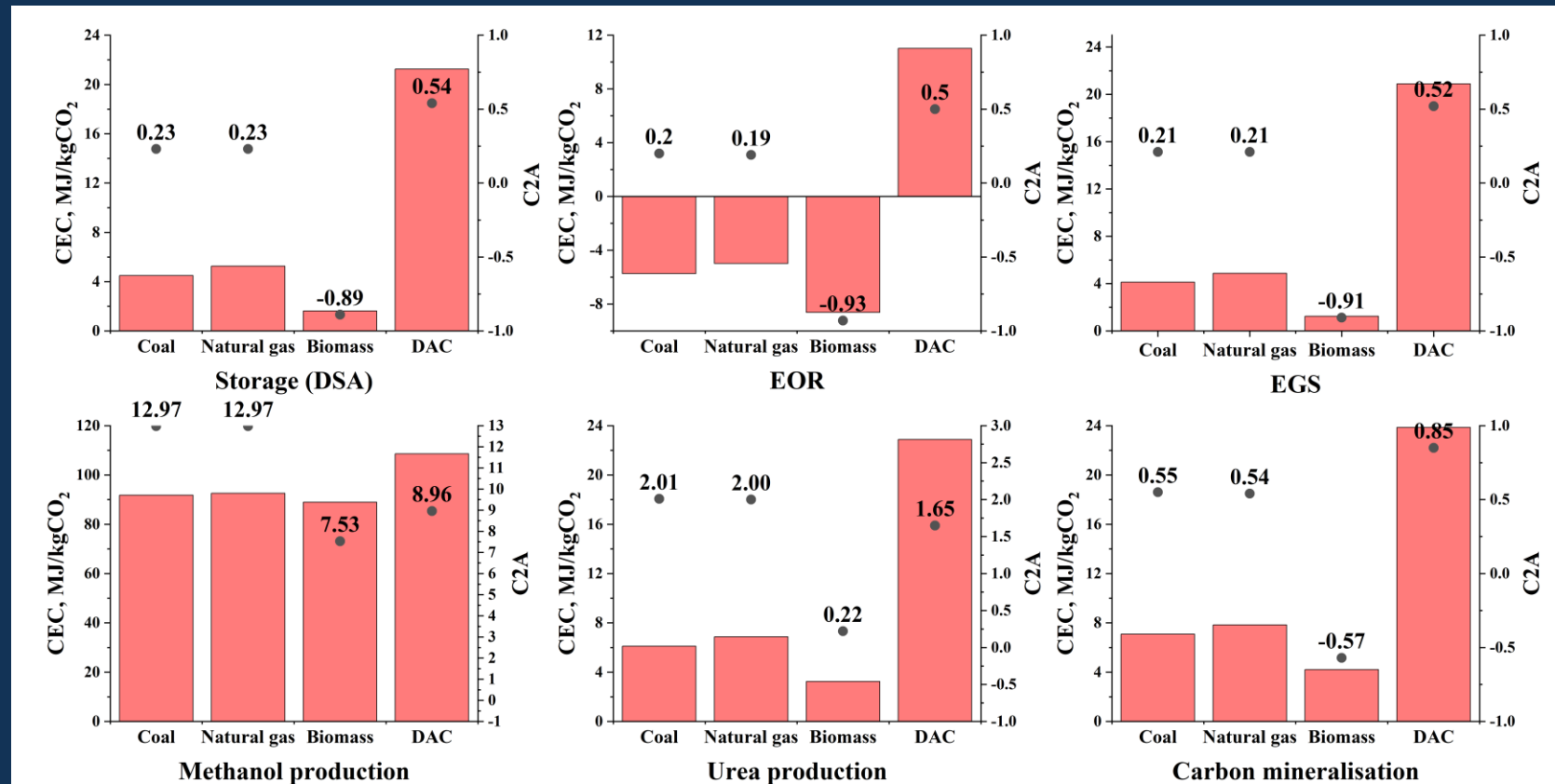
Scenariusze rozwoju klastrów CCUS w Polsce

- wariant teoretyczny klastra CCUS w Polsce – porównanie wyników (łącznie do roku 2050):

Parametr	Przed optymalizacją	Po optymalizacji
Całkowita ilość wychwyconego i usuniętego CO ₂	150 445 556 ton CO ₂	161 057 841 ton CO ₂
w tym ilość CO ₂ pochodzenia antropogeniczne	132 981 155 ton CO ₂	144 142 032 ton CO ₂
w tym ilość CO ₂ pochodzenia nieantropogenicznego	17 464 401 ton CO ₂	16 915 810 ton CO ₂
Całkowita ilość składowanego (magazynowanego) CO ₂	139 255 356 ton CO ₂	146 187 241 ton CO ₂
Całkowita ilość zutilizowanego CO₂	11 190 200 ton CO₂	14 870 600 ton CO₂
Bezwzględna wartość śladu węglowego	38 102 332 ton CO _{2eq}	29 058 655 ton CO _{2eq}
Uśredniona jednostkowa wartość śladu węglowego	0,25 ton CO_{2eq} / tonę wychwyconego CO₂	0,18 ton CO_{2eq} / tonę wychwyconego CO₂

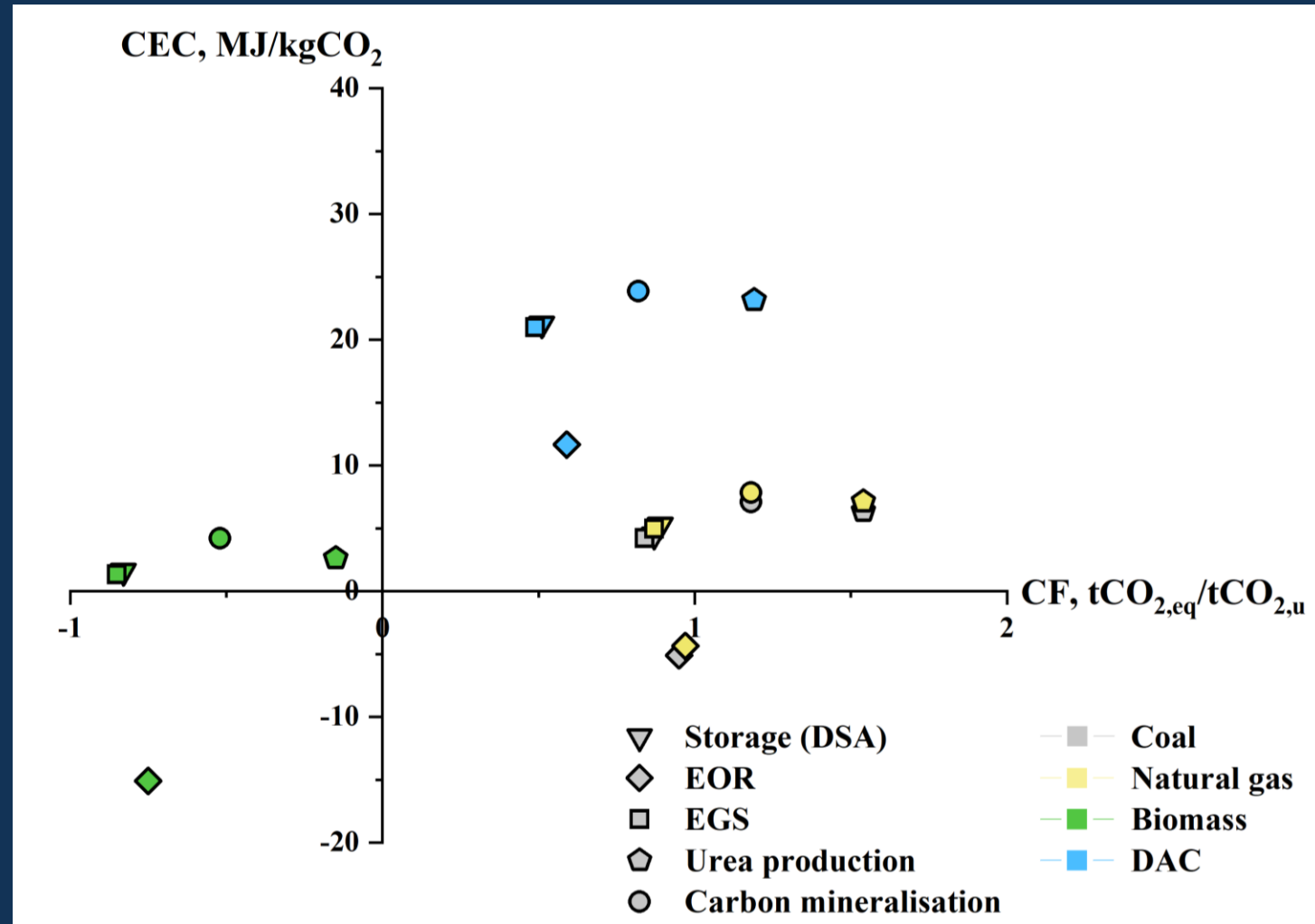
Scenariusze rozwoju technologii CCU w Polsce

- przeгляд technologii dla aplikacji w Polsce – CEC i C2A w zależności od technologii utylizacji CO₂ oraz źródła CO₂ (w porównaniu do składowania CO₂)

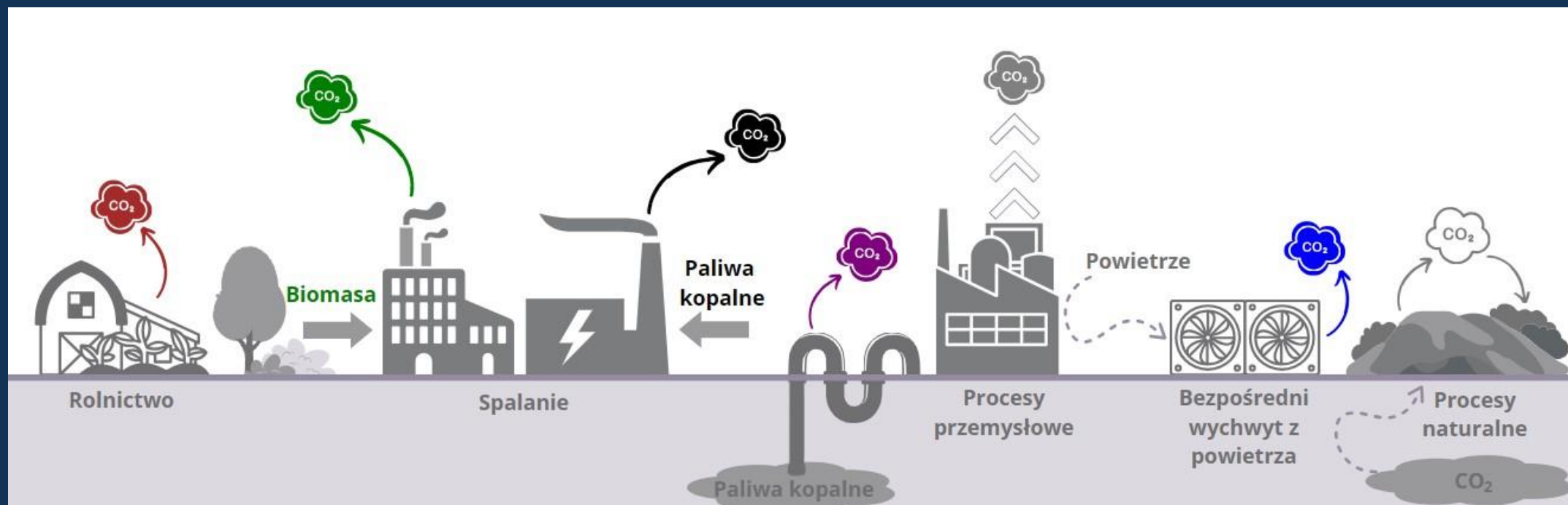


Scenariusze rozwoju technologii CCU w Polsce

- przegląd technologii utylizacji CO₂ (oraz składowania CO₂) dla aplikacji w Polsce
- ślad węglowy versus energochłonność skumulowana w funkcji źródeł emisji wychwyconego CO₂
- wyniki wstępne uwzględniające emisje z produktów utylizacji CO₂ (np. emisja z paliw)



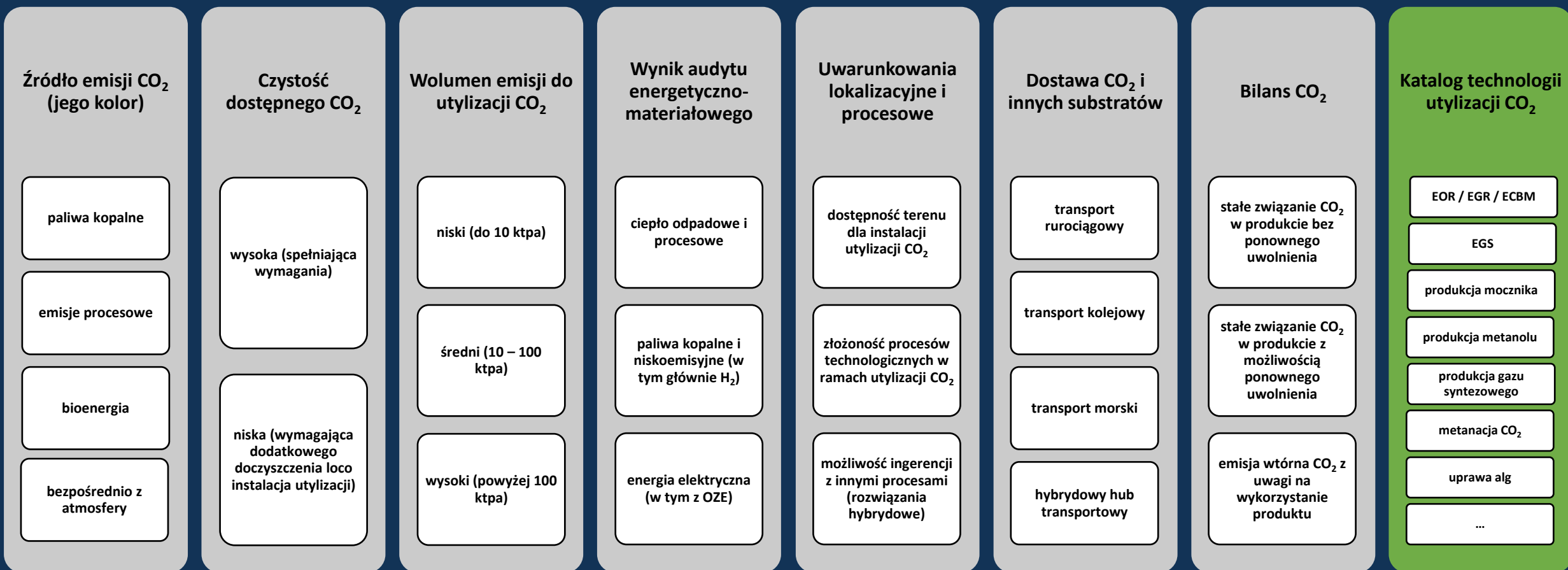
Kolory CO₂ – szczególnie istotne dla utylizacji CO₂



... czyli analogia do kolorów wodoru!

Uwarunkowania technologiczne CCU

Jak analizować technologie CCU w kontekście obowiązujących i przyszłych regulacji prawnych?



Podsumowanie

- **technologie utylizacji powinny być rozpatrywane jako uzupełnienie w stosunku do składowania CO₂**
- wybór spośród technologii utylizacji CO₂ zależy od popytu na produkty, ale należy mieć na uwadze następujące kwestie:
 - **trwałość redukcji emisji CO₂ w pełnym cyklu istnienia**
 - **źródło wychwyczonego CO₂ do procesów utylizacji**
 - **skali i gotowości technologicznej do wdrożenia danego rozwiązania utylizacji CO₂**
- kompleksowa analiza zasadności stosowania technologii utylizacji CO₂ obejmować powinna część technologiczną, ekonomiczną **i środowiskową**

Dziękujemy za uwagę

e-mail: pgladysz@agh.edu.pl

Projekt współfinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu badań naukowych i prac rozwojowych Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków
GOSPOSTRATEG