



**Referat wygłoszony w dniu 16 października 2024r. na
posiedzeniu Komisji Nauk Geologicznych PAN Oddział w
Krakowie**

Polska Akademia Nauk
Oddział w Krakowie
Komisja Nauk Geologicznych

Prof. dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak
Katedra Inżynierii Naftowej
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
E-mail: uliasz@agh.edu.pl

Geologiczne składowanie CO₂ - perspektywy i bariery

Zmiany klimatu obserwowane na całym globie są faktem, niekwestionowanym obecnie przez większość naukowców. Za główną przyczynę zachodzących zmian przyjmuje się antropogeniczną emisję do atmosfery gazów cieplarnianych, zwłaszcza dwutlenku węgla. Jednym ze sposobów spowolnienia niekorzystnych zmian (w ciągu najbliższych dwóch dekad) jest redukcja emisji gazów cieplarnianych. Jak wskazują raporty IPCC zmniejszenie emisji CO₂ ma także spowodować zauważalne zmian w składzie atmosfery w ciągu kilku lat (IPCC 2023).

Jednym ze środków łagodzenia globalnych zmian klimatu ma być zastąpienie paliw kopalnych źródłami energii o bardzo niskiej lub zerowej emisji dwutlenku węgla (odnawialne źródła energii lub paliwa kopalne z wychwytywaniem i składowaniem dwutlenku węgla – Carbon Capture and Storage - CCS) (IPCC 2023). Zgodnie z Dyrektywą UE CCS polega na wychwytywaniu dwutlenku węgla z instalacji przemysłowych, jego transporcie i zatłoczeniu do odpowiedniej podziemnej formacji geologicznej w celu permanentnego składowania (Directive 2009/31/EC, 2009). CCS jest technologią umożliwiającą składowanie dużych ilości antropogenicznego dwutlenku węgla w poziomach wodonośnych, złożach węglowodorów oraz pokładach węgla. Miejsca geologicznego składowania CO₂ muszą charakteryzować się: odpowiednim układem formacji skalnych (skała zbiornikowa przykryta skałą uszczelniającą); odpowiednią głębokością zalegania i pojemnością formacji przeznaczonej do składowania, a także szczelnością (Tarkowski et al. 2021, Schultz et al. 2023). Ze względu na właściwości CO₂ jego składowanie powinno być prowadzone w strukturach zalegających na głębokościach poniżej 800-1000 m p.p.t. do 3000-3500 m p.p.t. (Metz et al. 2005). Przy czym maksymalne głębokości składowania CO₂ wynikają z pogorszenia właściwości petrofizycznych formacji

skalnych oraz wysokich kosztów zatłaczania na większych głębokościach. Formacja do składowania CO₂ musi się charakteryzować wysoką porowatością i przepuszczalnością oraz posiadać uszczelnienie praktycznie nieprzepuszczalnym nadkładem o miąższości powyżej 20 metrów (Chen et al. 2014, Shukla et al. 2010). Ponadto formacja przeznaczona do składowania CO₂ nie powinna być zaangażowana tektonicznie.

W trakcie geologicznego składowania działają różne mechanizmy pułapkowania CO₂ (Bachu and Adams 2003, Potdar and Vishal 2016, Zhang and Song 2015): pułapkowanie fizyczne związane z zatrzymaniem gazu w miejscu składowania przez uszczelniający nadkład (Metz et al. 2005), rozpuszczanie dwutlenku węgla w płynach złożowych (Ang et al. 2022, Iglauer 2011, Szulczewski et al. 2013), pułapkowanie gazu rezydualnego CO₂ w wyniku działania sił napięcia powierzchniowego, mineralna karbonatyzacja. Poszczególne mechanizmy pułapkowania działają w różnym czasie. Natychmiast, w czasie i po zatłaczaniu CO₂, działają pułapkowanie fizyczne i gazu rezydualnego. W dużo dłuższym okresie czasu (setki tysięcy lat) działają mechanizmy pułapkowania chemicznego (rozpuszczanie i wytrącanie minerałów). W zależności od rodzaju struktury geologicznej przeznaczonej do składowania dwutlenek węgla może być unieszkodliwiany poprzez kombinację różnych mechanizmów.

Technologia wychwytywania i zatłaczania CO₂ jest wykorzystywana w przemyśle naftowym od dawna. W latach dwudziestych XX wieku zaczęto wychwytywać CO₂ z gazu wydobywanego ze złóż gazu ziemnego. Zatłaczanie dwutlenku węgla w celu uzyskania dodatkowego wydobywania ropy stosuje się od 70. XX wieku. Technologia ta została zapoczątkowana w USA, a następnie wdrożona w innych krajach: Turcji, Kanadzie, Brazylii, na Węgrzech, Trynidadzie. Technologia zatłaczania dwutlenku węgla do pokładów węgla w celu intensyfikacji wydobywania metanu z pokładów węgla jest na etapie badań. Od połowy lat 90. XX wieku realizowane są projekty badawczo-rozwojowe. Pierwszy projekt uruchomiono w basenie San Juan (Kolorado, USA). Inne projekty były realizowane w: Kanadzie, Japonii, Chinach i Polsce (projekt RECOPOL) (Uliasz-Misiak et al. 2012). Pierwsze komercyjne projekty składowania dwutlenku węgla w celu redukcji jego emisji, norweski projekt Sleipner (1996 r.) i kanadyjski Weyburn-Midale Carbon Dioxide Project (2000 r.) uruchomiono na przełomie XX i XXI wieku (Ma et al. 2022). Od momentu uruchomienia pierwszych instalacji CCS liczba projektów badawczych i komercyjnych rośnie. W 2023 roku na świecie działały 41 projektów komercyjnych CCS, 26 projektów było w budowie, a 325 znajdowało się na różnych etapach rozwoju (Global CCS Institute 2023).

Na możliwość wdrożenia CCS na szerszą skalę wpływa cały szereg czynników, zarówno sprzyjających, jak również opóźniających zastosowanie tej technologii. Mają one zróżnicowany charakter od naturalnych (geologicznych), przez techniczne, prawne czy społeczne. Jako perspektywy rozwoju technologii CCS w Polsce wskazano: polityki energetyczne i klimatyczne EU i krajowe, wysoki udział w mikście energetycznym paliw kopalnych, szanse na stworzenie nowego sektora związanego z wychwytem i podziemnym składowaniem CO₂ oraz znaczny potencjał geologiczny podziemnego składowania CO₂.

Jednym z głównych celów Unii Europejskiej w zakresie polityki energetyczno-klimatycznej określonym w unijnym pakiecie działań klimatyczno-energetycznych (2008), a także w zintegrowanych ramach polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030 (2014) jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Europejskie prawo o klimacie ustala cel redukcji emisji gazów cieplarnianych na co najmniej 55% do 2030 r. oraz ustanawia osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. jako prawnie wiążący cel. Tak znaczna redukcja emisji CO₂ może być osiągnięta m. in. przez zastosowanie technologii wychwytu CO₂ (lub usuwania bezpośrednio z atmosfery), a następnie przechowywania lub wykorzystywania (CCS lub Carbon Capture Use and Storage - CCUS). Wykorzystanie CCS wskazane jest w m. in. w Komunikacie Komisji UE Czysta planeta dla wszystkich - Europejska długoterminowa wizja strategiczna dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki (2018) czy „Europejskim Zielonym Ładzie” (2019), a także w Akcie UE w sprawie neutralnego emisyjnie przemysłu (2023). Także „Polityka energetyczna Polski do 2040 roku” (2021) przewiduje redukcję emisji CO₂ (o 30% w stosunku do poziomu z 1990 r.) jako jedną z możliwości dokument wymienia technologię CCS. W „Krajowym Planie w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r.” (projekt 2024) przewidziano również redukcję emisji gazów cieplarnianych m in. poprzez realizację projektów mających na celu rozwój technologii wychwytywania i wykorzystania dwutlenku węgla, a także budowy i eksploatacji instalacji do wychwytywania i składowania dwutlenku węgla.

W mikście energetycznym w Polsce w 2023 roku węgiel kamienny i brunatny miały 64% udział w wytwarzaniu energii elektrycznej. Nasz kraj stoi w obliczu rosnącej presji na zmniejszenie zużycia węgla w perspektywie najbliższych lat. W ostatnich latach wielu użytkowników indywidualnych przeszło ze spalania węgla na kotły gazowe i pompy ciepła. Podczas gdy przechodzenie przemysłowych użytkowników węgla jest wolniejsze ze względu na brak opłacalnych alternatyw lub ograniczenia technologiczne. W przypadku niektórych gałęzi przemysłu (np. cementowy) jedną z głównych opcji redukcji emisji jest wykorzystanie paliw kopalnych z CCS (Świerż et al. 2024).

Ze względu na budowę geologiczną Polska ma duży potencjał możliwości składowania CO₂ w strukturach geologicznych przewyższający potrzeby przemysłu na składowanie dwutlenku węgla. Jako najbardziej perspektywiczne do geologicznego składowania CO₂ wskazano mezozoiczne poziomy wodonośne Niżu Polskiego (w centralnej i północnej Polsce), w których wstępnie wytypowano od kilkunastu do kilkudziesięciu struktur antyklinalnych (18 - 48) (Tarkowski et al. 2010). Potencjał składowania w złożach węglowodorów zlokalizowanych w Karpatach i zapadlisku przedkarpackim oraz w zachodniej i północno-zachodniej części kraju jest kilka rzędów mniejszy niż w strukturach w mezozoicznych poziomach wodonośnych (Uliasz-Misiak 2008, Wójcicki (koordynator) 2013).

Jako bariery wdrożenia technologii CCS wskazano: wybrane aspekty geologiczne, obowiązujące obecnie regulacje prawne oraz społeczną akceptację. Najbardziej perspektywiczne do geologicznego składowania są poziomy wodonośne. Niestety, w większości budowa geologiczna struktur w warstwach wodonośnych jest słabo rozpoznana, co

powoduje, że przed rozpoczęciem budowy instalacji CCS muszą być one szczegółowo przebadane. Liczne i kosztowne prace badawcze są konieczne do potwierdzenia możliwości zatłaczania, a przede wszystkim szczelności tych struktur.

Działalność związaną z geologicznym składowaniem CO₂ reguluje przede wszystkim Prawo geologiczne i górnicze (PGiG) wraz z odpowiednimi rozporządzeniami. Regulacje te obejmują pełny cykl życia projektu podziemnego składowania CO₂ od etapu poszukiwania i rozpoznania kompleksu składowania, przez etap działania składowiska (zatłaczania CO₂), po jego zamknięcie. Ubiegłoroczna nowelizacja PGiG usunęła część przeszkód związanych z prowadzeniem podziemnych składowisk CO₂. Jednak pozostało szereg zagadnień nie rozwiązanych: od kwestii wskazania obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, przez dostęp do informacji geologicznej, odpowiedzialność za podziemne składowisko dwutlenku węgla po jego zamknięciu, do wymogu ustanowienia zabezpieczenia finansowego z tytułu prowadzenia działalności polegającej na podziemnym składowaniu dwutlenku węgla oraz przekazania odpowiedzialności za podziemne składowisko dwutlenku węgla Krajowego Administratora Podziemnych Składowisk CO₂.

Barierą związaną z wdrożeniem technologii CCS w Polsce może być akceptacja społeczna. Ostatnie badania wiedzy i opinii Polaków na temat technologii CCUS wykonane w ramach projektu „Strategia rozwoju technologii wychwytu, transportu, utylizacji i składowania CO₂ w Polsce oraz pilotaż Polskiego Klastra CCUS”(2021-2024) wskazały pozytywny stosunek do inwestowania w tą technologię. Jednak jak wykazały ankiety znajomość technologii CCS/CCUS jest niska. Problem może także stanowić kwestia lokalizacji podziemnych składowisk CO₂ w miejscu zamieszkania (32% respondentów było przeciw). Przeciwnicy jako powód najczęściej podawali niebezpieczeństwo (ogólne). W dalszej kolejności ankietowani wskazali obawy przed wyciekami CO₂ ze składowiska do atmosfery oraz zanieczyszczenie gleby. Badania wskazały również brak informacji jako bardzo istotny czynnik. Z tego względu przeciwnicy składowania uznają technologię CCS za niesprawdzoną (Szyller 2024).

Literatura:

- Ang, L., Yongming, L., Xi, C., Zhongyi, Z., and Yu, P. (2022) 'Review of CO₂ Sequestration Mechanism in Saline Aquifers'. *Natural Gas Industry B* 9 (4), 383–393
- Bachu, S. and Adams, J.J. (2003) 'Sequestration of CO₂ in Geological Media in Response to Climate Change: Capacity of Deep Saline Aquifers to Sequester CO₂ in Solution'. *Energy Conversion and Management* 44 (20), 3151–3175
- Chen, Z., Zhou, F., and Rahman, S.S. (2014) 'Effect of Cap Rock Thickness and Permeability on Geological Storage of CO₂: Laboratory Test and Numerical Simulation'. *Energy Exploration & Exploitation* 32 (6), 943–964
- Global CCS Institute (2023) *The Global Status of CCS: 2023*. Australia

- Iglauer, S. (2011) *Dissolution Trapping of Carbon Dioxide in Reservoir Formation Brine – A Carbon Storage Mechanism*. ed. by Nakajima, H. IntechOpen
- IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ed. by Lee, H. and Romero, J. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change
- Ma, Jinfeng, Li, L., Wang, H., Du, Y., Ma, Junjie, Zhang, X., and Wang, Z. (2022) 'Carbon Capture and Storage: History and the Road Ahead'. *Engineering* 14, 33–43
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H.C., Loos, M., and Meyer, L. (2005) *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York
- Potdar, R.S. and Vishal, V. (2016) 'Trapping Mechanism of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers: Brief Review'. *Geologic Carbon Sequestration: Understanding Reservoir Behavior* 47–58
- Schultz, R.A., Heinemann, N., Horváth, B., Wickens, J., Miocic, J.M., Babarinde, O.O., Cao, W., Capuano, P., Dewers, T.A., Dusseault, M., Edlmann, K., Goswick, R.A., Hassanpouryouzband, A., Husain, T., Jin, W., Meng, J., Kim, S., Molaei, F., Odunlami, T., Prasad, U., Lei, Q., Schwartz, B.A., Segura, J.M., Soroush, H., Voegeli, S., Williams-Stroud, S., Yu, H., and Zhao, Q. (2023) 'An Overview of Underground Energy-Related Product Storage and Sequestration'. *Geological Society, London, Special Publications* 528 (1), 15–35
- Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., and Choi, X. (2010) 'A Review of Studies on CO₂ Sequestration and Caprock Integrity'. *Fuel* 89 (10), 2651–2664
- Świerz, W., Matuszko, M., Moskwik, K., Bisiński, W., and Kordalski, M. (2024) Rynek Energii w Polsce w 2024 Roku, <https://www.adlittle.com/>
- Szulczewski, M.L., Hesse, M.A., and Juanes, R. (2013) 'Carbon Dioxide Dissolution in Structural and Stratigraphic Traps'. *Journal of Fluid Mechanics* 736, 287–315
- Szyller, K. (2024) Badanie Wiedzy i Opinii Polaków Na Temat CCUS [online] available from <<https://ccus.pl/badanie-wiedzy-i-opinii-polakow-na-temat-ccus/>> [17 September 2024]
- Tarkowski, R., Dziwińska, L., Marek, S., and Uliasz-Misiak, B. (2010) 'Potencjalne Struktury Geologiczne Do Składowania CO₂ w Utworach Mezozoiku Niżu Polskiego : (Charakterystyka Oraz Ranking)'. *Studia Rozprawy Monografie* 138, 1–138, Wyd. IGMiE PAN
- Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., and Tarkowski, P. (2021) 'Storage of Hydrogen, Natural Gas, and Carbon Dioxide – Geological and Legal Conditions'. *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (38), 20010–20022
- Uliasz-Misiak, B. (2008) *Pojemność Podziemnego Składowania CO₂ Dla Wybranych Mezozoicznych Poziomów Wodonośnych Oraz Złóż Węglowodorów w Polsce | Request PDF*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN
- Uliasz-Misiak, B., Chećko, J., Wątor, L., and Zawisza, L. (2012) Przegląd Projektów Intensyfikacji Wydobywania Metanu z Pokładów Węgla Poprzez Zatlaczanie CO₂ i N₂ | Request PDF. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 11, 10–19
- Wójcicki (koordynator), A. (2013) Rozpoznanie Formacji i Struktur Do Bezpiecznego Geologicznego

Składowania CO₂ Wraz z Ich Programem Monitorowania - Raport Końcowy-Segment I
(*Regionalny*) [online] Warszawa. available from <skladowanie.pig.gov.pl> [27 September 2023]

Zhang, D. and Song, J. (2015) 'Mechanisms for Geological Carbon Sequestration'. *Procedia IUTAM* 10, 319–327