

Integracja geotermii z mineralną sekwestracją CO₂

Combining of the geothermal production with the mineral sequestration of CO₂

Mirosław Wojnicki, Jerzy Kuśnierczyk, Sławomir Szuflika, Marcin Warnecki

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Według aktualnego stanu wiedzy sekwestracja CO₂ jest niezbędnym ogniwem procesu ograniczania emisji w sektorze energetycznym i innych gałęziach przemysłu. Najnowsze szacunki Międzynarodowej Agencji Energetycznej dotyczące redukcji emisji CO₂ mówią, że do osiągnięcia scenariusza zrównoważonego rozwoju konieczne jest zwiększenie dynamiki CCS z obecnie składowanych 40 Mt CO₂/rok do około 5,6 Gt CO₂/rok w 2050 roku. Wielkoskalowe projekty CCS wciąż obciążone są jednak wysokimi kosztami inwestycyjnymi i operacyjnymi, stąd też w ostatnim czasie obserwowany jest wzrost zainteresowania możliwościami łączenia sekwestracji CO₂ z innymi inwestycjami w celu zwiększenia efektywności ekonomicznej. Jednocześnie zachodzi konieczność podejmowania działań w kierunku dynamicznego rozwoju odnawialnych źródeł energii. Geotermia wyróżnia się spośród pozostałych OZE szczególnie istotnymi cechami, tj. niezależnością od warunków klimatycznych i pogodowych oraz stosunkowo łatwą kontrolą i przewidywalnością generowanej mocy. W tym świetle wydaje się, że zarówno zwiększone wykorzystanie energii geotermalnej, jak i sekwestracja CO₂ stanowią filary transformacji energetycznej. Ich integracja może pozwolić na osiągnięcie dodatkowych korzyści wynikających z wzajemnego wzmocnienia pozytywnych aspektów środowiskowych oraz zwiększenia efektywności ekonomicznej obu procesów. Połączenie sekwestracji mineralnej z geotermią wydaje się szczególnie interesujące, gdyż zatłaczanie CO₂ rozpuszczonego w wodzie wymaga pozyskania dużej ilości wody – dostępnej w trakcie eksploatacji zasobów geotermalnych. Sekwestracja mineralna to proces, w którym CO₂ reaguje z fazami mineralnymi zawierającymi Mg i Ca, a wynikiem reakcji jest związanie CO₂ w stabilnych mineralach węglanowych. W publikacji omówiono bieżący stan wiedzy na temat możliwości powiązania sekwestracji CO₂ (w szczególności sekwestracji mineralnej) z wykorzystaniem geotermicznego ciepła Ziemi. Przedstawiono również status obecnie realizowanych projektów tego typu na świecie oraz analizę możliwości realizacji na terenie Polski.

Słowa kluczowe: mineralna sekwestracja CO₂, energia geotermalna, CCS, OZE.

ABSTRACT: According to the current knowledge, CO₂ sequestration is an essential link in reducing emissions in the energy and other industrial sectors. The most recent estimations from International Energy Agency on lowering CO₂ emissions indicate a need of increasing dynamics of CCS implementation from 40 Mt CO₂/year currently stored to about 5.6 Gt CO₂/year in 2050. At the same time, it is crucial to take action towards the rapid development of renewable energy sources. In comparison with other RES, geothermal energy stands out due to some particularly important features, i.e. independence from climate and weather conditions, relatively easy control and predictability of generated power. From this perspective, both increased use of geothermal energy and CO₂ sequestration seem to be pillars of the energy transformation. Their integration may allow achieving the additional benefits of mutually reinforcing positive environmental aspects and increasing the economic efficiency of the combined processes. The combination of mineral sequestration with geothermal production seems particularly interesting since the injection of CO₂ dissolved in water requires the acquisition of a large amount of water – available during the exploitation of geothermal resources. Mineral sequestration is a process in which CO₂ reacts with mineral phases containing Mg and Ca, and the reaction results in the binding of CO₂ in stable carbonate minerals. This publication discusses the current knowledge on the potential for coupling CO₂ sequestration (specifically mineral sequestration) with geothermal energy production. It also presents the status of currently implemented projects of this type globally and an analysis of the possibility of implementation in Poland.

Key words: mineral CO₂ sequestration, geothermal energy, CCS, RES.

Wstęp

Od czasów rewolucji przemysłowej emisja antropogenicznego dwutlenku węgla, którego wpływ na nasilenie

efektu cieplarnianego jest niepodważalny, rośnie wykładniczo. Wywołana przez człowieka zmiana klimatu już obecnie wpływa na występowanie wielu ekstremów pogodowych i klimatycznych we wszystkich regionach świata. Najnowsze

Autor do korespondencji: M. Wojnicki, e-mail: miroslaw.wojnicki@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 20.01.2022 r. Zatwierdzono do druku: 02.06.2022 r.

dane wskazują, że utrzymanie wzrostu temperatury poniżej 2°C w XXI wieku będzie bardzo trudne i możliwe jedynie przy drastycznym ograniczeniu emisji dwutlenku węgla. Stale zwiększające się zapotrzebowanie na energię w globalnym ujęciu sprawia, że zastąpienie paliw kopalnych źródłami niskoemisyjnymi w krótkim czasie jest mocno utrudnione. Z tego względu technologia wychwytu i geologicznego składowania CO₂ (ang. *carbon capture and storage*, CCS) jest przedstawiana jako jeden z głównych filarów transformacji energetycznej. Nie jest to nowy pomysł, gdyż zatłaczanie CO₂ do górotworu praktykuje się od wielu dziesiątków lat, głównie w powiązaniu ze wspomaganym wydobywaniem ropy – CO₂-EOR (Wojnicki, 2017, 2020). Jeszcze do niedawna zatłaczanie CO₂ dla samego składowania pod powierzchnią ziemi w strukturach geologicznych (bez wykorzystania w EOR) w większości przypadków nie było uzasadnione ekonomicznie z uwagi na wysokie koszty inwestycyjne, niski potencjał zwrotu krótkoterminowego i znaczące ryzyko. Wraz z postępującym kryzysem klimatycznym i drastycznym wzrostem cen uprawnień do emisji CO₂ (250% od początku 2021 r.) zauważalne jest wzmożone zainteresowanie realizacją projektów CCS na świecie. By sprostać wyzwaniom związanym z odejściem od paliw kopalnych, wraz z intensyfikacją prac nad wdrażaniem CCS w większej skali niezbędne jest również zwiększenie udziału odnawialnych i niskoemisyjnych źródeł energii. Jednym z bardziej perspektywicznych kierunków jest wykorzystanie energii ciepłej Ziemi zmagazynowanej w skałach oraz wodach nagromadzonych w ich przestrzeni porowej, tj. energii geotermalnej, w ciepłownictwie lub energetyce. Idea składowania antropogenicznego CO₂ wraz z wykorzystaniem ekologicznie czystych zasobów geotermalnych doskonale wpisuje się we wszelkie działania na rzecz gruntownej dekarbonizacji gospodarki.

Sekwestracja CO₂ (CCS)

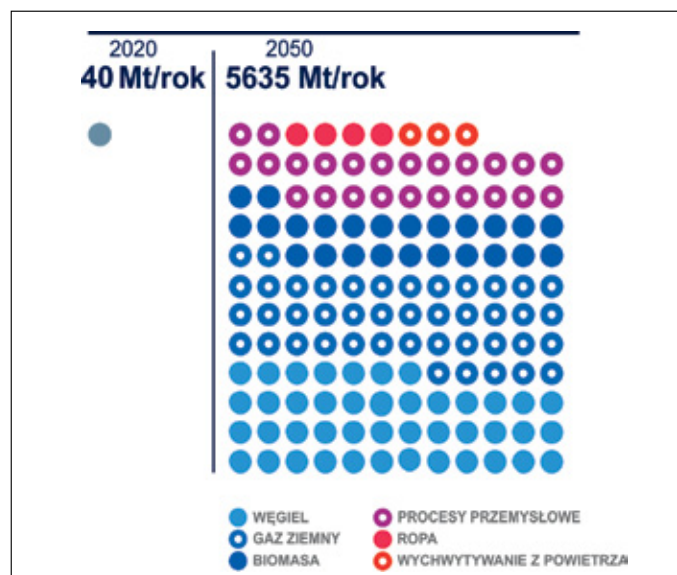
Status CCS

Scenariusz zrównoważonego rozwoju (ang. *sustainable development scenario*, SDS) przygotowany przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (IEA) zakłada realizację celów zrównoważonego rozwoju, określonych przez Organizację Narodów Zjednoczonych (ONZ), dotyczących ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (GHG), dostępności energii oraz jakości powietrza (McGlade et al., 2018). Powodzenie tego globalnego przedsięwzięcia zależy w znacznej mierze od drastycznego ograniczenia emisji CO₂.

IEA (2021a) podaje, że do końca kwietnia 2021 roku 44 kraje i UE ogłosiły cel zerowej emisji netto. Dziesięć z nich ustanowiło odpowiednie przepisy, osiem proponuje uczynić zerową emisję obowiązkiem prawnym, a pozostałe zobowiązały

się do realizacji celów zerowej emisji CO₂ netto w rządowych dokumentach. Zobowiązania te obejmują około 70% światowej emisji CO₂. Unia Europejska uczyniła plan osiągnięcia neutralności ekonomicznej do 2050 roku prawnie wiążącym celem – wraz z redukcją GHG o 55% do 2030 roku (w porównaniu z poziomem z 1990 roku). Sojusz klimatyczny Global Climate Action, który zrzesza kraje, regiony, miasta, przedsiębiorstwa i inwestorów, liczy już ponad 26 tys. podmiotów zaangażowanych w działania na rzecz klimatu (GCAP UNFCCC, 2021). Duża część deklaruje osiągnięcie zerowej emisji do 2050 roku (IEA, 2021a).

Dane zawarte w raportach IPCC (2021) dotyczące globalnego ocieplenia w prognozach IEA (2020, 2021a, 2021b) oraz długoterminowej strategii energetycznej Komisji Europejskiej (European Commission, 2019) jednoznacznie wskazują, że do spełnienia postanowień klimatycznych niezbędna jest realizacja wielkoskalowych projektów wychwytu i składowania CO₂. Według obecnego stanu wiedzy CCS jest niezbędnym ogniwem w transformacji energetycznej dla ograniczenia emisji w sektorze energetycznym i przemysłowym. Szacunki IPCC (2018, 2021) dotyczące redukcji emisji mówią, że do osiągnięcia realizacji scenariusza SDS konieczne jest zwiększenie dynamiki CCS z obecnie składowanych 40 megaton (Mt) CO₂ rocznie (2020 rok) do około 5,6 gigaton (Gt) (rysunek 1), a według niektórych danych nawet do 10 Gt w roku 2050 (Global CCS Institute, 2021b).



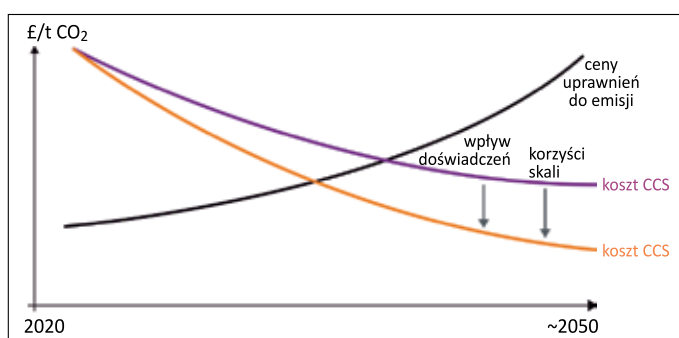
Rysunek 1. Możliwości wychwytu i składowania CO₂ w latach 2020 i 2050 w zależności od źródła i sektora (Global CCS Institute, 2020)

Figure 1. CO₂ capture and storage capacity in 2020 and 2050 by source and sector (Global CCS Institute, 2020)

Do najtrudniejszych w dekarbonizacji zaliczane są sektory, które emitują CO₂ w procesie technologicznym, a zaliczają się

do nich sektory: żelaza i stali, chemiczny oraz cementowy. W tych gałęziach przemysłu uniknięcie emisji bez wykorzystania CCS jest praktycznie niemożliwe. CCS jest też szansą dla nieuniknionej transformacji w obszarze paliw, będąc wsparciem w produkcji tzw. niebieskiego wodoru. Obecnie wykorzystanie węgla lub gazu ziemnego w powiązaniu z CCS jest wciąż najtańszą opcją produkcji wodoru o niskim śladzie węglowym.

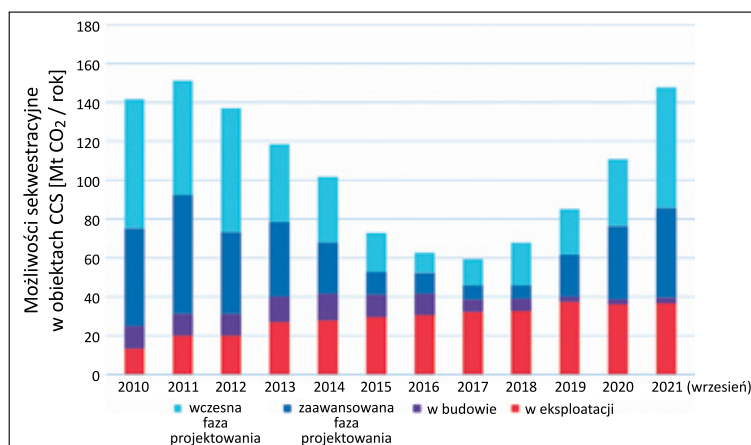
W obecnym czasie dramatycznie zmniejsza się różnica między ceną emisji a kosztem CCS, a w przypadku wielu projektów koszty wychwytu i składowania są już niższe od opłat za emisję. Jest to punkt zwrotny, gdyż projekty CCS nie będą wymagały wsparcia zewnętrznego, a biorąc pod uwagę tendencję wzrostową cen uprawnień do emisji, staną się w pełni rentownymi i przynoszącymi zyski przedsięwzięciami. W przyszłości na zwiększenie efektywności ekonomicznej CCS oprócz rosnących cen uprawnień wpłynie również rozpowszechnienie doświadczeń i dobrych praktyk z realizowanych projektów i tzw. korzyści skali (zjawisko obniżania przeciętnych kosztów całkowitych w miarę zwiększania skali działań i prowadzenia nowych technologii) – rysunek 2.



Rysunek 2. Czynniki kształtujące efektywność ekonomiczną projektów CCS – projekcja do roku 2050 (IOGP, 2021b)

Figure 2. The factors shaping economic efficiency of CCS projects – projection to 2050 (IOGP, 2021b)

Obecnie na świecie (2021 rok) działa 27 komercyjnych instalacji CCS, z czego większość znajduje się na terenie Ameryki Północnej (Global CCS Institute, 2021a). Globalne możliwości wychwytu i składowania w aktywnych projektach wynoszą około 40 Mt CO₂/rok (druga połowa 2021 roku). Liczba planowanych projektów CCS na świecie, na różnym etapie realizacji, we wrześniu 2021 roku wynosiła 108, z planowanymi możliwościami sekwestracyjnymi na poziomie 112 Mt CO₂/rok. Tym samym planowane pojemności składowania CO₂ wróciły do poziomów sprzed 2012 roku (rysunek 3). Nastąpił wtedy znaczący spadek zainteresowania CCS zarówno w sektorze prywatnym, jak i publicznym, gdyż większość inwestycji



Rysunek 3. Przebieg zmian pojemności sekwestracyjnych planowanych i będących w użytku obiektów CCS w latach 2010–2021 (Global CCS Institute, 2021b)

Figure 3. Sequestration capacity changes of planned and operational CCS facilities in years 2010–2021 (Global CCS Institute, 2021b)

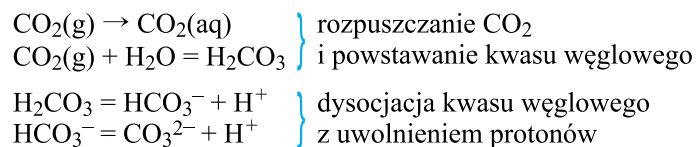
była skoncentrowana na reaktywacji gospodarki po globalnym kryzysie finansowym (2007/2008–2012/2013).

Obecnie na terenie Europy CO₂ zatłaczany jest do struktur geologicznych w czterech lokalizacjach. Dwa największe obiekty zlokalizowane są w Norwegii (na obszarach morskich) i pozwalają na składowanie około 1,7 Mt CO₂ na rok (Snøhvit – około 0,7 Mt/rok, Sleipner – około 1,0 Mt/rok). Nieco mniejszym projektem jest CO₂-EOR Croatia, gdzie na trzech chorwackich złożach węglowodorów (na lądzie) zatłaczane jest około 0,4 Mt CO₂ rocznie. Najmniejszym, jednak niezwykle ciekawym ze względu na eksperymentalne połączenie sekwestracji mineralnej CO₂ z eksploatacją energii geotermalnej jest projekt CarbFix w Hellisheiði (Islandia), gdzie rocznie zatłaczanych jest około 15 000 ton CO₂ i 6000 t H₂S (IOGP, 2021a). Całkowita liczba działających i planowanych projektów CCUS (ang. *carbon capture, utilization & storage/sequestration*) w Europie (w tym projektów wychwytywania, scentralizowanego transportu – hubów CO₂ oraz składowania w rozmaitej skali) według stanu na listopad 2021 roku wynosiła około 70. Ich pojemność składowania do 2030 roku ma wynosić około 60 Mt/rok.

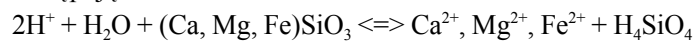
Sekwestracja mineralna

Wielkoskalowe składowanie CO₂ w strukturach geologicznych może zachodzić przy udziale czterech mechanizmów pułapkowania. Mechanizmy te mogą występować jednocześnie podczas zatłaczania CO₂, a udział każdego z nich w pułapkowaniu zależy od sposobu zatłaczania i zmienia się w czasie. Zaliczamy do nich pułapkowanie: strukturalne i stratygraficzne, rezydualne, mineralne oraz w formie rozpuszczonej (rysunek 4). W standardowych projektach CCS, gdy CO₂ zatłaczany jest w fazie nadkrytycznej, pułapkowanie mineralne będzie miało

większe znaczenie dopiero po upływie tysięcy lat. Do tego czasu większość CO₂ zostanie trwale uwięziona przy udziale trzech pozostałych mechanizmów. Podstawowym problemem zatłaczania CO₂ w fazie gazowej, ciekłej lub nadkrytycznej jest jego mobilność. CO₂, migrując w fazie wolnej, ze względu na niską gęstość będzie przemieszczał się ku szczytowi struktury sekwestracyjnej, co w przypadku wystąpienia niekorzystnych okoliczności może prowadzić do jego ucieczki. Przy zatłaczaniu w formie rozpuszczonej problem ten nie występuje, gdyż solanka nasycona CO₂ ma większą gęstość i będzie opadać ku dolnej części struktury. Unieruchomienie CO₂ w wyniku mineralizacji zapewnia największe bezpieczeństwo składowania spośród wszystkich znanych mechanizmów (rysunek 4).

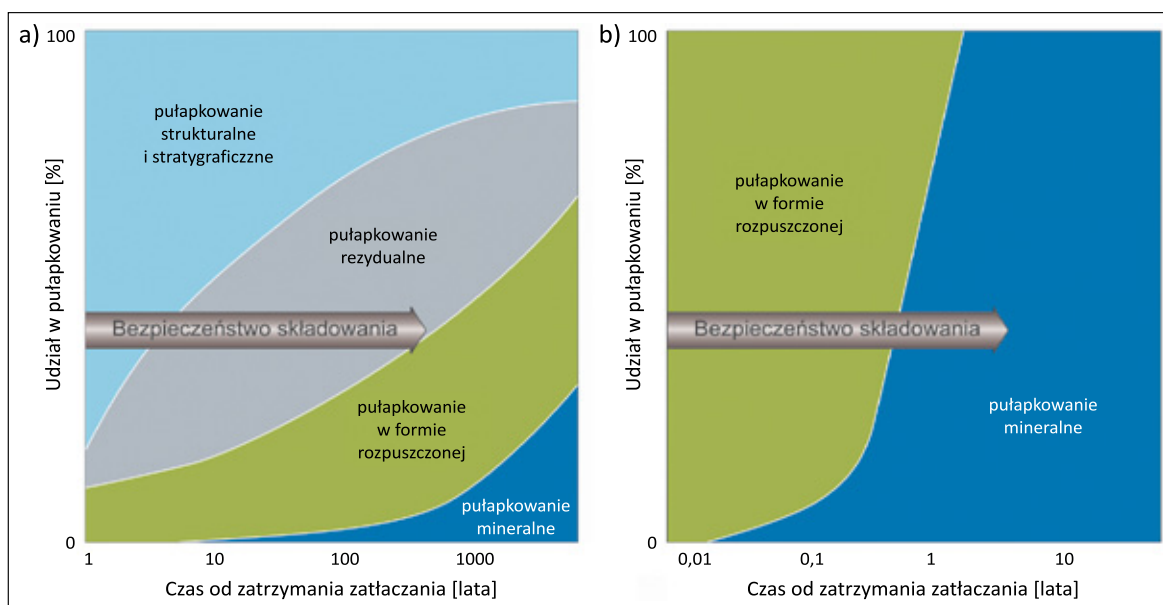


Rozpuszczanie minerałów krzemianowych obecnych w bazaltach i perydotytach, na przykładzie piroksenów, wygląda następująco:



Tego typu reakcja przyczynia się do sekwestracji mineralnej CO₂ na dwa sposoby:

- po pierwsze, pochłaniane są protony, co neutralizuje kwasowy odczyn wody i ułatwia wytrącanie się minerałów węglanowych wraz ze wzrostem pH;



Rysunek 4. Zmiany w udziale poszczególnych mechanizmów pułapkowania w czasie po zatłoczeniu: a) nadkrytycznego CO₂ (Metz et al., 2005), b) CO₂ rozpuszczonego w wodzie (Snæbjörnsdóttir et al., 2017)

Figure 4. Changes in the contribution of different trapping mechanisms over time after injection of a) supercritical CO₂ (Metz et al., 2005), CO₂ dissolved in water (Snæbjörnsdóttir et al., 2017)

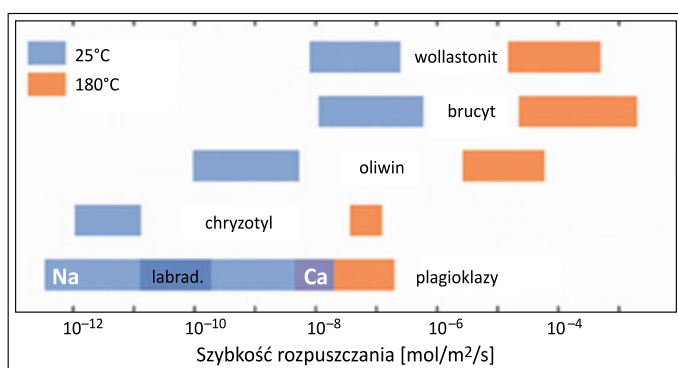
Sekwestracja mineralna, zwana również mineralną karbonatyzacją, jest procesem, w którym CO₂ reaguje z fazami mineralnymi zawierającymi Mg i Ca. W wyniku reakcji powstają stabilne minerały węglanowe, takie jak kalcyt, magnezyt, dolomit, oraz szereg uwodnionych węglanów magnezu (Kelemen et al., 2019).

Solanka nasycona CO₂ ma odczyn kwaśny, z pH w zakresie 3–5, w zależności od ciśnienia parcjalego CO₂, składu chemicznego wody oraz temperatury. Odczyn pH ma szczególne znaczenie, gdyż niskie pH sprzyja zwykle rozpuszczaniu minerałów, natomiast wysokie pH – ich wytrącaniu (Park i Fan, 2004; Pokrovsky i Schott, 2004). Zatłaczany dwutlenek węgla, rozpuszczając się w solance, tworzy roztwór słabego kwasu węglowego. Rozpuszczaniu CO₂ w wodzie towarzyszą następujące reakcje:

- po drugie, dostarcza kationów, które mogą reagować z rozpuszczonym CO₂.

Najszybsza reakcja rozpuszczania zachodzi w przypadku wollastonitu (CaSiO₃) (rysunek 5), jednakże jest on stosunkowo rzadko występującym minerałem (Palandri i Yousif, 2004). Zdecydowanie bardziej powszechny i charakteryzujący się dużą szybkością reakcji w obecności CO₂ jest oliwin (MgSiO₄). Jest on głównym minerałem budującym perydotyty, dlatego są one często brane pod rozważę w badaniach nad sekwestracją mineralną (Kelemen, 2017; Kelemen et al., 2021).

Skalenie sodowo-wapniowe (plagioklasy), które są głównymi składnikami bazaltów i gabra, charakteryzują się nieco niższą szybkością reakcji z CO₂. Przy niskich temperaturach (25°C) najbardziej bogaty w wapń skałen z szeregu plagioklazów (CaAl₂Si₂O₆ – anortyt) rozpuszcza się szybciej (rysunek 5)



Rysunek 5. Szybkość rozpuszczania się minerałów bogatych w Mg i Ca (Kelemen et al., 2019)

Figure 5. Dissolution rates of Mg and Ca minerals (Kelemen et al., 2019)

niż przedstawiciel najbardziej ubogi w wapń ($\text{CaAlSi}_3\text{O}_6$ – albit). Najczęściej występującym plagioklazem w bazaltach jest labratoryt (50–70% anortytu), którego szybkość reakcji w 25°C wynosi około $1,3 \cdot 10^{-11}$ – $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (rysunek 5). Uwolnione w wyniku rozpuszczania kationy Ca z łatwością reagują, w temperaturze niższej niż 280°C, z rozpuszczonym w solance CO_2 , tworząc kalcyt (CaCO_3) lub aragonit (Ellis, 1959).

W temperaturze wyższej od 65°C jony Mg^{2+} , reagując z CO_2 , tworzą magnezyt (MgCO_3) i dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Saldi et al., 2009). W niższych temperaturach wytrącanie tych minerałów jest inhibitowane kinetycznie. W takich warunkach mogą powstawać mniej stabilne uwodnione węglany magnezu (hydroksywęglany), takie jak: hydromagnezyt ($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), dypingit ($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) oraz nesquehonit ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (Turvey et al., 2018). Uwolnione kationy Mg^{2+} mogą być również włączane do minerałów ilastych, ograniczając efektywność karbonatyzacji mineralnej.

Powstawanie minerałów w wyniku połączenia Fe^{2+} i rozpuszczonego CO_2 nie jest do końca wyjaśnione. W warunkach tlenowych Fe^{2+} utlenia się, zanim zdąży wytrącić się w postaci węglanu, dlatego też syderyt (FeCO_3) jest rzadko spotykany we współczesnych skałach osadowych i magmowych. W szczególnie sprzyjających warunkach, tj. w niskich i średnich temperaturach, gdy pH roztworu jest wystarczająco niskie, by zapobiec utlenianiu Fe^{2+} do Fe^{3+} , może powstawać ankeryt ($\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$) (Gysi i Stefánsson, 2012).

Szereg eksperymentów rozpuszczania krzemianów zawierających dwuwartościowe kationy metali wskazuje, że uwalnianie Mg^{2+} i Ca^{2+} jest bardzo silnie zależne od pH roztworu (Blum i Lasaga, 1988; Brady i Walther, 1989; Golubev et al., 2005). Szybkość rozpuszczania wzrasta gwałtownie wraz z obniżeniem pH. W przypadku faz mineralnych zawierających Al, takich jak plagioklasy i szkliwa wulkaniczne, szybkość rozpuszczania jest najmniejsza przy neutralnym pH, a następnie

wzrasta przy wyższym pH (Oelkers i Gislason, 2001; Gislason i Oelkers, 2003; Munz et al., 2012; Gudbrandsson et al., 2014). W przypadku minerałów niezawierających Al, takich jak oliwin (forsteryt) i piroksen (diopsyd), szybkość rozpuszczania zwykle maleje wraz ze wzrostem pH, dlatego jest ona bardzo niska w warunkach wytrącania się węglanów.

Innymi istotnymi czynnikami wpływającymi na efektywność sekwestracji mineralnej są porowatość i przepuszczalność skały przyjmującej CO_2 . Pory i szczeliny pozwalają na migrację płynów w obrębie całej struktury sekwestracyjnej, zapewniają dostęp do powierzchni minerałów, niezbędny w procesie rozpuszczania, oraz gwarantują przestrzeń wymaganą do wytrącania się minerałów węglanowych (Snæbjörnsdóttir et al., 2014).

Na efektywność sekwestracji mineralnej ma wpływ również skład mineralogiczny formacji, a szczególnie zawartość minerałów ilastych oraz zeolitów. Minerale te będą konkurować z węglanami o dwuwartościowe kationy uwolnione w wyniku rozpuszczania krzemianów oraz o dostępność przestrzeni porowej (Gysi i Stefánsson, 2011).

Wytrącanie się minerałów węglanowych zwykle nie powoduje problemów operacyjnych związanych z utratą chłonności w odwiertach zatłaczających, gdyż kinetyka rozpuszczania/wytrącania jest korzystna dla zatłaczania. W strefie przyodwiertowej solanka o niskim pH rozpuszcza minerały, otwierając przestrzeń porową i ścieżki przepływu. Wytrącanie minerałów węglanowych następuje dopiero po migracji płynu w dalsze strefy struktury, gdy rozpuszczanie minerałów zawartych w formacji zneutralizowało wystarczająco solankę nasyconą CO_2 (Clark et al., 2018).

Integracja CCS z geotermią

Energia geotermalna zaliczana jest do odnawialnych źródeł energii (OZE), spośród których wyróżniają ją szczególnie istotne cechy takie jak: niezależność od zmiennych warunków klimatycznych i pogodowych, stosunkowo łatwa kontrola i możliwość użytkowania bez powodowania większych zakłóceń w środowisku naturalnym. W obliczu konieczności prowadzenia zdecydowanych działań związanych z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych pozycja geotermii w transformacji energetycznej wydaje się coraz silniejsza. Wielu ekspertów postrzega energię geotermalną jako niezbędny element światowej „zielonej przyszłości”.

Obecnie dzięki znacznemu postępowi technologicznemu i konieczności zwiększenia udziału OZE w mikście energetycznym eksploatacja systemów geotermalnych na obszarach o normalnym i niskim gradiencie geotermicznym nabiera coraz większego tempa (Ryżyński i Majer, 2015; Kępińska, 2018).

W świetle powyższych rozważań nie ulega wątpliwości, że zarówno wykorzystanie energii geotermalnej, jak i sekwestracja CO₂ są niezwykle ważnymi elementami transformacji energetycznej. Ich integracja może pozwolić na osiągnięcie dodatkowych korzyści wynikających z wzajemnego wzmocnienia pozytywnych aspektów środowiskowych oraz zwiększenia efektywności ekonomicznej połączonych procesów. Integracja systemu zatłaczania CO₂ z eksploatacją systemu geotermalnego pozwala na wykorzystanie schłodzonej wody geotermalnej do rozpuszczania w niej CO₂. Użycie tych samych odwiertów zatłaczających dla zintegrowanego projektu geotermalnego/CCS znacząco zmniejsza koszty inwestycyjne, co zwiększa efektywność ekonomiczną. Biorąc pod uwagę obecne ceny uprawnień do emisji CO₂, które mogą przekraczać koszt wychwycenia, transportu i składowania CO₂, w powiązaniu z geotermią taka integracja mogłaby pozwolić na obniżenie równoważnego, jednostkowego kosztu wytwarzania energii cieplnej lub elektrycznej (LCOE lub LCOH).

Kolejnym bardzo ważnym aspektem integracji geotermii i sekwestracji CO₂ jest zwiększenie akceptacji społecznej dla tego typu projektów (Miranda-Barbosa et al., 2017). Wykorzystanie energii geotermalnej, która powszechnie postrzegana jest jako bezpieczne, tanie i niezawodne źródło energii cieplnej i elektrycznej, ma długą historię. Ciepło Ziemi (gorące źródła) wykorzystywane było przez lokalne społeczności od zarania dziejów do celów leczniczych, podgrzewania i gotowania pożywienia. Przykładami wczesnego korzystania z ciepła Ziemi na większą skalę są rzymskie łaźnie czy pierwszy na świecie system ciepłowniczy w Chaudes-Aigues (XIV wiek). Pierwsza elektrownia geotermalna została wybudowana w 1904 roku we Włoszech, a na Islandii około 90% budynków ogrzewanych jest z zastosowaniem geotermii. W Polsce idea wykorzystania zasobów geotermalnych (do produkcji energii cieplnej) ma 30 lat – pierwsza instalacja powstała w 1992 roku na Podhalu.

Dobry wizerunek geotermii, budowany na przestrzeni wielu lat na całym świecie, można wykorzystać w projektach zintegrowanych dla rozwiania obaw i pozyskania akceptacji społecznej dla sekwestracji CO₂. Integracja geotermii i sekwestracji mineralnej, ze względu na wysokie bezpieczeństwo (brak migracji CO₂ w kierunku powierzchni), może być dźwignią dla projektów pionierskich na danym obszarze oraz dla rejonów, gdzie występuje niska akceptacja społeczna tego typu działalności.

Realizacja zintegrowanego procesu geotermii i CCS w skali przemysłowej – CarbFix

Prace nad składowaniem CO₂ w postaci zmineralizowanej w skałach bazaltowych w pobliżu elektrowni geotermalnej w Hellisheiði (Islandia), zlokalizowanej 25 km na wschód

od Rejkiawiku, rozpoczęły się w 2006 roku. Górotwór na tym obszarze budują oliwinowe bazalty toleitowe pokryw lawowych oraz formacje hialoklastytowe. Hialoklastyty to wulkanoklastyczne skały zbudowane ze szkliwa wulkanicznego powstałe w wyniku działania lodowca i wód lodowcowych. Cechuje je niska przepuszczalność, dlatego mają charakter skały uszczelniającej w tej strukturze (Matter et al., 2011).

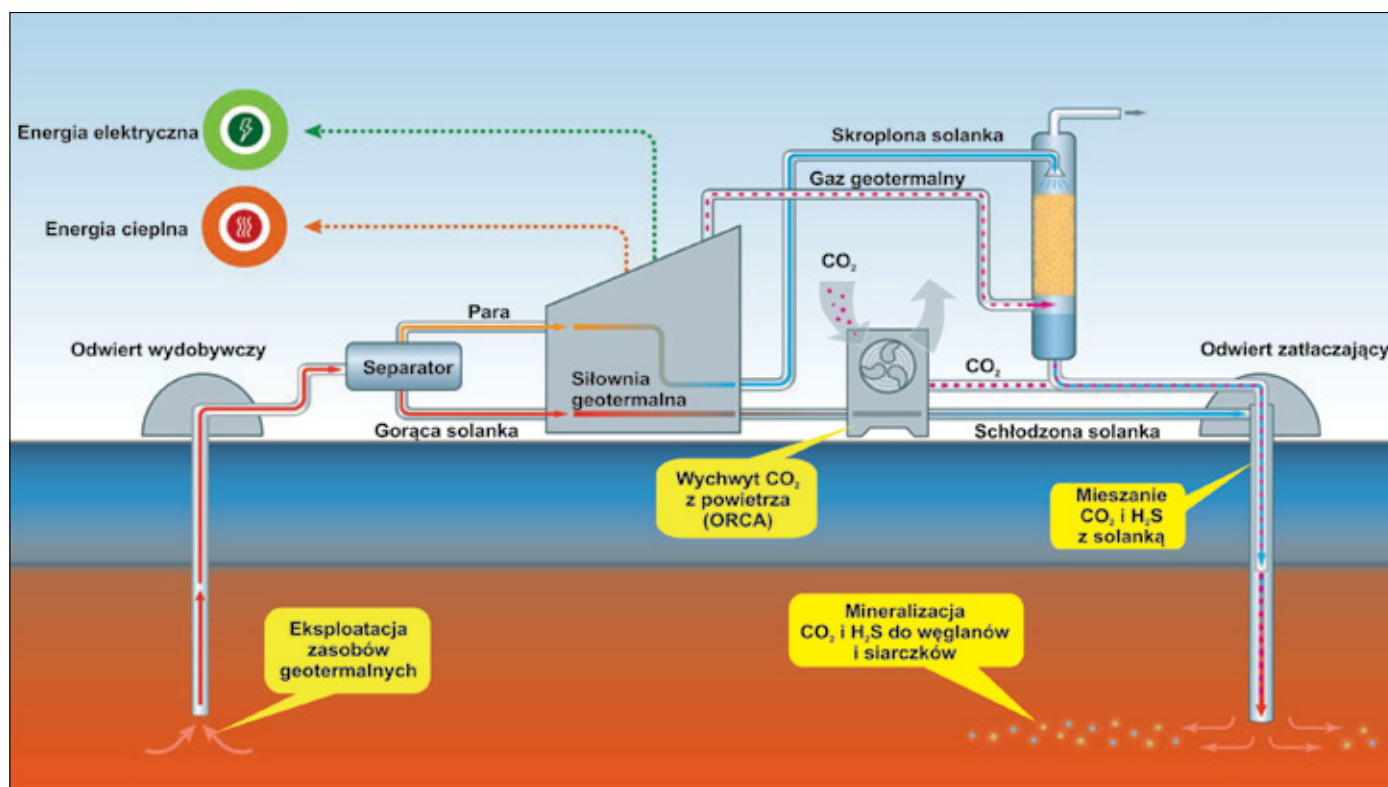
Faza pilotażowa projektu CarbFix, finansowana ze środków UE, rozpoczęła się w 2012 roku. W jej trakcie zatłoczono 230 t gazu: 175 t czystego CO₂ oraz 60 t mieszaniny CO₂ i H₂S (około 75% CO₂ i 25% H₂S) z pobliskiej siłowni geotermalnej. Gazy zatłaczane były w formie zmieszanej z wodą, z wykorzystaniem istniejącego odwiertu zrzutowego siłowni geotermalnej (Matter et al., 2014). W odwiercie zamontowano prosty system rozpuszczania gazu w formie kolumny polietylenowej z bełkotką i mieszadłem ślimakowym (Gunnarsson i Sigfússon, 2013).

Po sukcesie fazy pilotażowej CarbFix projekt w 2014 roku został rozszerzony i jest kontynuowany w skali przemysłowej. Jego rozwój był w dużej mierze finansowany w ramach programu Horyzont 2020 (lata 2017–2021). Tym razem zatłaczanie rozpoczęto do głębszych (1900–2200 m) i cieplejszych stref (260–280°C). Strefa zbiornikowa zbudowana jest głównie ze skał hialoklastycznych przewarstwionych spływami lawowymi oraz poprzecinana jest przez intruzje (Gunnarsson et al., 2018), które wpłynęły na obecność sieci szczelinowej. Ilość zatłaczanego CO₂ i H₂S zwiększano stopniowo w latach 2014–2017 od 0% do 34% (CO₂) i od 0% do 68% (H₂S) emisji pochodzącej z siłowni geotermalnej, co odpowiada ~10 000 t CO₂ i 5000 t H₂S. Na podstawie pierwszych wyników szczegółowego monitoringu hydrogeochemicznego stwierdzono, że 50% CO₂ i 76% H₂S uległo mineralizacji w czasie od 130 do 272 dni (Gunnarsson et al., 2018). W późniejszych badaniach wykazano, że tempo mineralizacji nawet przyspieszyło do 60% CO₂, co można wiązać ze zwiększeniem ilości zatłaczanego CO₂ (a tym samym zwiększeniem kwasowości wody). Jak do tej pory nie zaobserwowano żadnych zmian w chłonności odwiertów, które mogłyby świadczyć o wytrącaniu się minerałów w strefie przyodwiertowej (Clark et al., 2020). Obecny schemat działania sekwestracji mineralnej sprzężonej z CCS przedstawiono na rysunku 6. Na bazie niewątpliwego sukcesu CarbFix i wieloaspektowego doświadczenia zdobytego na przestrzeni wielu lat realizacji projektu i zwiększania jego skali (ponad 70 publikacji w czasopismach naukowych, 9 prac doktorskich) powstały projekty pochodne, pośrednio lub bezpośrednio powiązane z CarbFix. Ich celem jest zwiększenie skali sekwestracji mineralnej do wolumenów obserwowanych w „konwencjonalnych” projektach CCS oraz implementacja technologii w innych warunkach geologicznych. Poniżej przedstawiono ważniejsze z nich.

- Projekt Silverstone – Fundusz Innowacji UE udzielił wsparcia w kwocie 4 mln EUR na rozwój jednostki wychwytywania, która pozwoli na zwiększenie efektywności wychwytu emisji z siłowni geotermalnej Hellisheiði do 95%. Nowa instalacja będzie oddana do użytku w 2025 r. i będzie wychwytywać 34 000 ton CO₂ rocznie (zatłaczanie w CarbFix).
- Projekt Orca – instalacja wychwytywania CO₂ z powietrza (w kooperacji) z Climeworks (Szwajcaria), oddana do użytku w 2021 r. Wychwytuje około 4000 t CO₂ rocznie (składowanie w CarbFix).
- Terminal CODA w Straumsviku (20 km od Hellisheiði) – hub CO₂ pozwalający na sekwestrację mineralną na obszarze morskim – 3 Mt CO₂ rocznie. Start zatłaczania w pierwszej fazie 2025 r. Zatłaczanie poprzez sieć płytkich odwiertów, do których w miarę zwiększania przepustowości będą dołączane kolejne. Szacowany koszt składowania: około 15 EUR/t.
- Projekt GECCO (2018) – finansowanie UE: 16 mln EUR, 18 jednostek badawczych. Cel: dalszy rozwój metody CarbFix oraz jej implementacja w innych lokalizacjach:
 - Bochum (Zagłębie Ruhry), Niemcy. Sprężenie zatłaczania CO₂ do zbiornika piaskowcowego z niskotemperaturową geotermią. Woda zrzutowa o temperaturze 10°C zatłaczana do zbiornika o temperaturze 19°C;
 - Castelnuovo, Włochy. Zatłaczanie CO₂ sprężone z wysokotemperaturową geotermią;
 - Nesjavellir, Islandia (w pobliżu Hellisheiði). Pilotażowy projekt mineralnej sekwestracji;
 - Kızıldere, Turcja. Zatłaczanie CO₂ emitowanego w trakcie eksploatacji zasobów geotermalnych.
- Projekt SUCCEED (Synergetic Utilisation of CO₂ Storage Coupled With Geothermal Energy Deployment) – koordynowany przez ICL (Imperial College London). Ma na celu przyspieszenie stosowalności CCS powiązanego z geotermią na świecie jako narzędzia w walce z globalnym ociepleniem.
- Projekt CO₂-Seastone. Wspólny projekt CarbFix, ETH Zürich i UCL (University College London) – finansowany przez Technology Development Fund (Islandia) oraz Eurostars (Eureka). Transport CO₂ od emitentów ze Szwajcarii, przez port Rotterdam do Reykiawiku. Pierwszy projekt pełnego cyklu CCS (wychwytywanie, transport i składowanie) sekwestracji mineralnej z wykorzystaniem wody morskiej. Zatłaczanie do istniejących odwiertów geotermalnych na półwyspie Reykjanes.

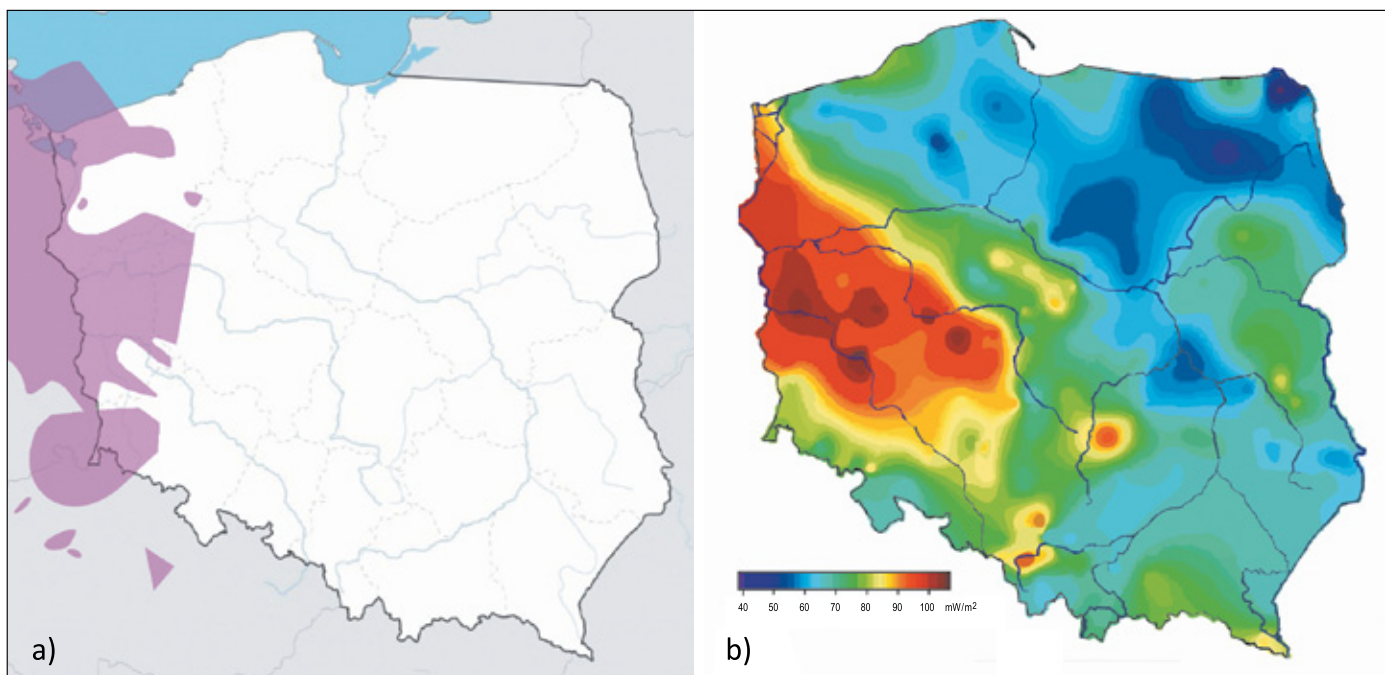
Analiza możliwości realizacji projektów geotermii powiązanej z CCS w warunkach krajowych

Zespół CarbFix na podstawie ogólnodostępnych, globalnych danych geologicznych (BGR; Hartmann i Moosdorf, 2012; Whittaker et al., 2015; Müller et al., 2016, 2019) opracował atlas prezentujący obszary predysponowane do mineralnej



Rysunek 6. Schemat działania projektu CarbFix (CarbFix)

Figure 6. The CarbFix project operational scheme (CarbFix)



Rysunek 7. Strefy predysponowane do sekwestracji mineralnej (a) oraz o dobrych warunkach geotermicznych (b) na terenie Polski (Szewczyk i Gientka, 2009)

Figure 7. The areas predisposed to mineral sequestration (a), and with favorable geothermal potential (b) in Poland (Szewczyk and Gientka, 2009)

sekwestracji CO₂. Atlas zawiera również lokalizacje i podstawową charakterystykę ważniejszych emitentów na danym obszarze. Jak wynika z rysunku 7, obszary oznaczone w atlasie obejmują rejon zachodniej Polski i korespondują ze strefą występowania dolnopermskich serii wulkanicznych. Jest to jednocześnie rejon o podwyższonej, w skali regionalnej, gęstości strumienia ciepła (do 100 mW/m²) oraz wysokim gradiencie geotermicznym (~40°C/km). Na rysunku 7 przedstawiono lokalizacje stref predysponowanych do mineralnej sekwestracji (a) oraz o dobrych warunkach geotermicznych (b) na terenie Polski.

Wulkanity dolnego permu

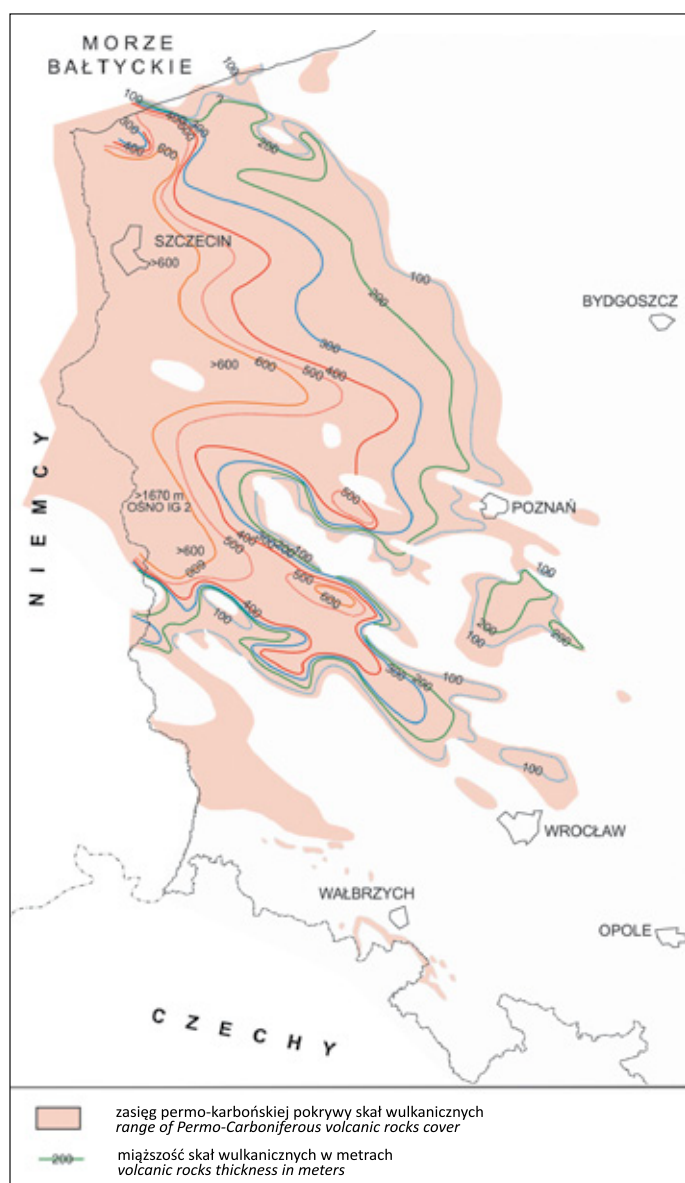
Zachodnia część Nizy Polskiego stanowi największy obszar występowania skał wulkanicznych autunu (grupa Odry). Wulkanity nawiercono odwiertami PGNiG S.A., jak i otworami badawczymi PiG – PIB. Można wyróżnić dwie regionalne jednostki dolnopermskich pokryw wulkanicznych, tj. jednostkę monokliny przedsudeckiej oraz występującą na ich przedpolu jednostkę Pomorza Zachodniego (rysunek 8). Na obszarze Pomorza serię wulkaniczną reprezentują skały kwaśne, tj. riolity i dacyty (Ryka, 1978). Bardzo wyraźnie zaznaczona jest progresja objętościowa skał maficznych w kierunku południowym od jednostki Pomorza Zachodniego do monokliny przedsudeckiej. Progresja objętościowa charakteryzuje się przewagą skał

kwaśnych na północy, gdzie udział andezytów i bazaltów jest ograniczony. Odwrotna sytuacja występuje na południu, gdzie widoczna jest wyraźna przewaga skał zasadowych i obojętnych (Kiersnowski i Buniak, 2006).

Skały wulkaniczne tworzą pokrywę o zmiennej miąższości (od kilku do około 1500 m), zalegającą najczęściej na skałach osadowych karbonu, rzadziej wczesnego permu lub dewonu (Pokorski, 1978). W nadkładzie obserwowane są skały osadowe czerwonego spągowca lub sole cechsztynu. Głębokość zalegania pokryw wulkanicznych waha się od kilkuset metrów (południowa część monokliny przedsudeckiej) do ponad 5000 m (na północnym obrzeżeniu). Wzrasta ona w kierunku obszaru o najsilniejszej subsydencji – rozwiniętej po zakończeniu wulkanizmu (Maliszewska et al., 2016).

Pokrywy bazaltowo-andezytowe

Zasadowe skały wylewne w postaci bazaltów i andezytów (oraz trachybazaltów i trachyandezytów) nawiercono ponad 50 otworami wiertniczymi. Strop pokryw wulkanicznych pojawia się na głębokości od około 800 m (Lubanice IG 1) do ponad 5000 m (Piła IG 1). Miąższość pokryw erupcyjnych waha się od kilku do ponad 400 m (437 m – Pomorsko 1). Największe miąższości skał erupcyjnych występują w rejonie Zielonej Góry, gdzie najprawdopodobniej znajdowało się centrum erupcji wulkanicznych (Juroszek et al., 1981). W kompleksach



Rysunek 8. Mapa zasięgu i miąższości skał wulkanicznych według Kiersnowskiego (Kiersnowski, 2008; Maliszewska et al., 2016)

Figure 8. Map of the extent and thickness of volcanic rocks according to Kiersnowski (Kiersnowski, 2008; Maliszewska et al., 2016)

wulkanicznych o znacznych miąższościach pokrywy składają się z nakładających się na siebie potoków lawowych pochodzących z kilku impulsów erupcyjnych tej samej działalności wulkanicznej (Maliszewska et al., 2016).

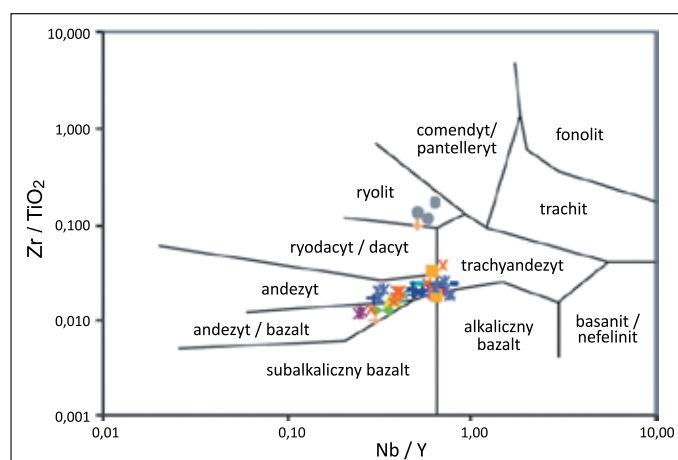
Omawiane skały wykazują barwę ciemnobrunatną lub ciemnoszarą z odcieniem zielonkawym lub ciemnofioletowym. Struktura bazaltów jest zwykle porfirowa i tylko lokalnie afirowa. Dominuje tekstura zbity i bezładna – jedynie lokalnie migdałowcowa i fluidalna. Większość skał jest silnie przeobrażona, a obecność składników mineralnych o małych wymiarach i przekształconego szkliwa utrudnia dokładne określenie ich rodzaju. Przeobrażenie jest obserwowane zarówno

w fenokryształach, jak i składnikach krystalicznych ciasta skalnego (Maliszewska et al., 2016).

Odróżnienie bazaltów (trachybazaltów) od andezytów (trachyandezytów) jest mocno utrudnione i niepewne ze względu na bardzo silną albityzację plagioklazów. W większości przypadków przeobrażenie jest tak silne, że udział anortytu wynosi poniżej 10%. Oprócz metasomatycznej albityzacji powszechnie obserwowane są procesy chlorytyzacji piroksenów i amfiboli oraz serycytyzacji skałeni. Rzadziej spotykana jest silifikacja skał i uralityzacja piroksenów (Juroszek et al., 1981). Skład mineralny ciasta skalnego stanowią w 70–90% silnie przeobrażone plagioklasy. Dodatkowo w zmiennych ilościach występują pirokseny, skałenie potasowe, zdewitryfikowane szkliwo wulkaniczne, wtórny chloryt i węglany. Prakryształy reprezentowane są przez silnie przeobrażone plagioklasy oraz pseudomorfozy po piroksenach, oliwinach i amfibolach. W większości przypadków minerały maficzne są prawie całkowicie zastąpione pseudomorfozami wypełnionymi chlorytem, serpentynem, węglanami, minerałami ilastymi, pumpellyitem, zeolitami, tytanitem i epidotem. Pumpellyit wypełniający pęcherzyki pogazowe i tworzący pseudomorfozy po minerałach maficznych jest wskaźnikiem metamorfizmu bardzo niskiego stopnia (Dubińska et al., 1998). Pseudomorfozy po oliwinach występujące w bazaltach często wypełnione są minerałami wtórnymi w postaci chalcedonu, węglanów, tlenków żelaza czy kryptokrystalicznych agregatów bogatych w chloryt.

W przeważającej części są to skały silnie spękanе, jednak szczeliny są często wypełnione kalcytem. Szerokość tych szczelin zawiera się w zakresie 0,1–1,0 cm, rzadziej spotyka się szczeliny o większej rozwartości. Szczeliny i spękania przebiegają pod kątem 20–90°C (Ryka, 1978).

Pomimo dość dużej liczby odwiertów udostępniających wulkanity dolnego permu praktycznie brak jest dostępnych

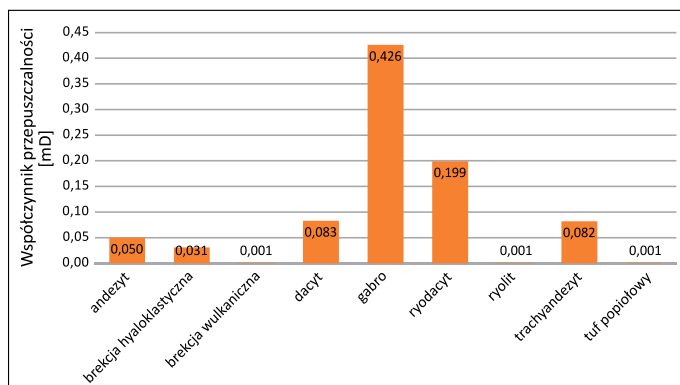


Rysunek 9. Typy analizowanych skał wulkanicznych w rejonie bloku Gorzowa (Wójcicki et al., 2013)

Figure 9. Volcanic rock types in analyzed samples from the Gorzow Block area (Wójcicki et al., 2013)

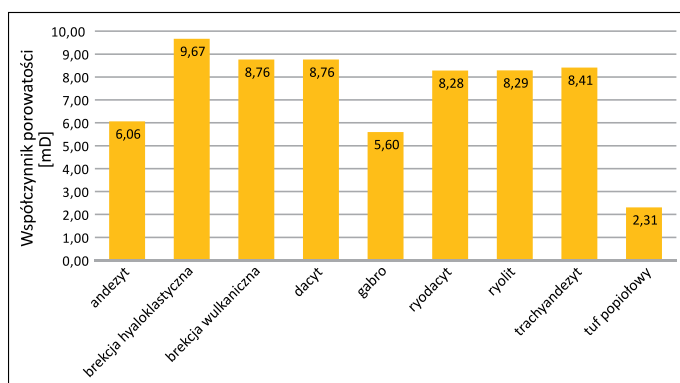
informacji na temat parametrów petrofizycznych tych skał. Jednym z nielicznych opracowań, w których przedstawiono wyniki badań porowatości i współczynnika przepuszczalności dolnopermskich wulkanitów, jest projekt dotyczący zamkniętych systemów geotermalnych w Polsce (Wójcicki et al., 2013). W wymienionym opracowaniu przeprowadzono ocenę potencjału technologii HDR (ang. *hot dry rocks*) i EGS (ang. *enhanced geothermal systems*) m.in. dla obszaru zachodniej Polski w skałach wulkanicznych dolnego permu. W projekcie przebadano 95 próbek wulkanitów z 17 otworów wiertniczych zlokalizowanych na bloku Gorzowa (północno-wschodnia część monokliny przedsudeckiej). Wśród litologii dominowały trachyandezyty i andezyty/bazalty (rysunek 9).

Z opublikowanych danych (Wójcicki et al., 2013) wynika, że badane próbki są bardzo słabo przepuszczalne lub nieprzepuszczalne (rysunek 10).



Rysunek 10. Średni współczynnik przepuszczalności dla wulkanitów z rejonu bloku Gorzowa (Wójcicki et al., 2013)

Figure 10. Average total permeability for igneous rocks from Gorzow Block area (Wójcicki et al., 2013)



Rysunek 11. Średni współczynnik porowatości całkowitej dla wulkanitów z rejonu bloku Gorzowa (Wójcicki et al., 2013)

Figure 11. Average total porosity coefficient for igneous rocks from Gorzow Block area (Wójcicki et al., 2013)

Analizowane skały cechowały się dość wysoką porowatością. Porowatość całkowita w badanych próbkach przyjmowała wartości od 0,39% do 22,44%. W wielu przypadkach

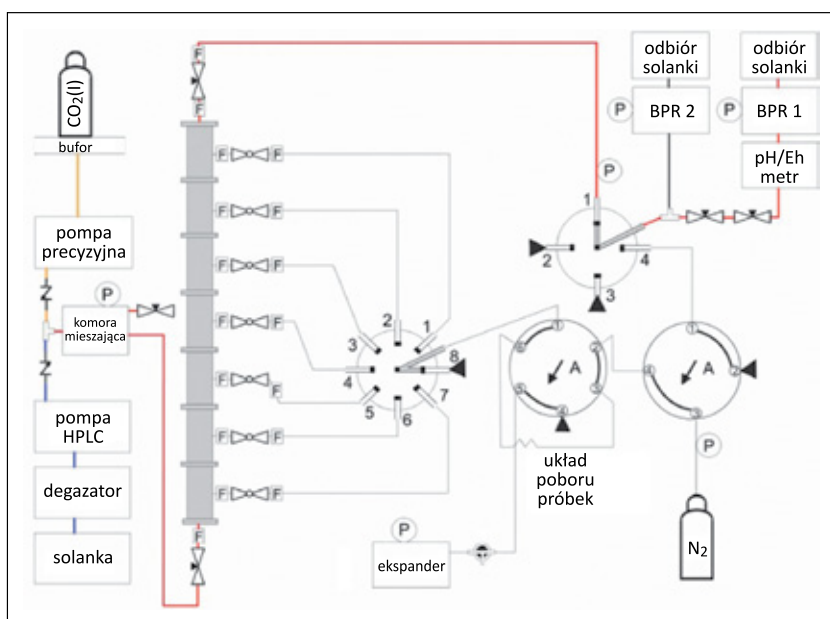
porowatość przekraczała 10%. Na rysunku 11 przedstawiono wartości średnie dla przebadanych litologii.

Wulkanity dolnego permu ze względu na słabe właściwości filtracyjne nie stanowią perspektywicznych poziomów hydrotermalnych (Górecki et al., 2006). Mogą być one perspektywiczne dla HDR/EGS, lecz obecnie nie ma wystarczających danych do prawidłowej oceny skuteczności szczelinowań hydraulicznych celem stworzenia zamkniętych systemów geotermalnych. Słabe parametry filtracyjne mogą mocno ograniczać możliwość lokalizowania odwiertów chłonnych w dolnopermskich wulkanitach w kontekście geotermii powiązanej z sekwestracją. Wydatek energii niezbędnej do zatłoczenia schłodzonej solanki nasyconej CO₂ do odwiertu o bardzo słabej chłonności może warunkować efektywność ekonomiczną całego przedsięwzięcia.

Brak korzystnych uwarunkowań geologicznych do powiązania eksploatacji zasobów geotermalnych z sekwestracją mineralną nie przekreśla możliwości wykorzystania silnego potencjału wynikającego z połączenia geotermii i CCS. Rozpuszczanie CO₂ w schłodzonej wodzie, a następnie zatłaczanie jej do odwiertu chłonnego w dublecie geotermalnym jest obecnie jedną z najczęściej rozpatrywanych możliwości skojarzenia geotermii z CCS (Castillo et al., 2017; Randi et al., 2017). Wadami takiego podejścia są wysokie bezpieczeństwo pułapkowania CO₂ w formie rozpuszczonej oraz wykorzystanie strumienia gazów spalinowych bezpośrednio od lokalnego emitenta bez konieczności uprzedniego wychwytu CO₂. Wychwył CO₂ może być realizowany w specjalnie skonstruowanej kolumnie odwiertu zatłaczającego, z wykorzystaniem różnic w rozpuszczalnościach poszczególnych składników spalin, gdzie CO₂ przechodzi do fazy wodnej, a N₂ i O₂ są uwalniane do atmosfery (Kervévan et al., 2014; Randi et al., 2014). Nasycona CO₂ solanka o większej gęstości przemieszcza się na dno zbiornika geotermalnego (warstwy wodonośnej), kierując świeżą solankę ku odwiertom wydobywczym. Na podstawie symulacji typowego dubletu w zbiorniku geotermalnym o dużej przepuszczalności na terenie Holandii nie prognozowano przebiegu solanki nasyconej CO₂, w ciągu 30 lat eksploatacji, do odwiertu wydobywczego (Koenen et al., 2018).

Eksperymentalne badania sekwestracji mineralnej

Badania szybkości rozpuszczania i wytrącania minerałów w skali laboratoryjnej zapewniają wgląd w podstawowe procesy zachodzące w danych warunkach i są zwykle punktem wyjścia do podejmowania decyzji, projektowania i realizowania działań w skali terenowej. Wiele dostępnych wyników badań potwierdza zdolność minerałów krzemianowych do uwalniania kationów, a tym samym ich przydatność w pułapkowaniu CO₂ w formie zmineralizowanej w postaci węglanów. Badania



Rysunek 12. Schemat aparatury wykorzystywanej do badań sekwestracji mineralnej (Galeczka et al., 2013)

Figure 12. Experimental set-up used in studies of CO₂ mineral storage (Galeczka et al., 2013)

laboratoryjne polegają najczęściej na analizie szybkości rozpuszczania krzemianów obecnych w danej skale, w konkretnych warunkach ciśnienia i temperatury oraz nasycenia solanką. To właśnie rozpuszczanie faz krzemianowych jest najczęściej czynnikiem limitującym tempo sekwestracji mineralnej, gdyż mineralizacja CO₂, czyli wytrącanie się węglanów, przebiega zwykle zdecydowanie szybciej (DePaolo et al., 2013).

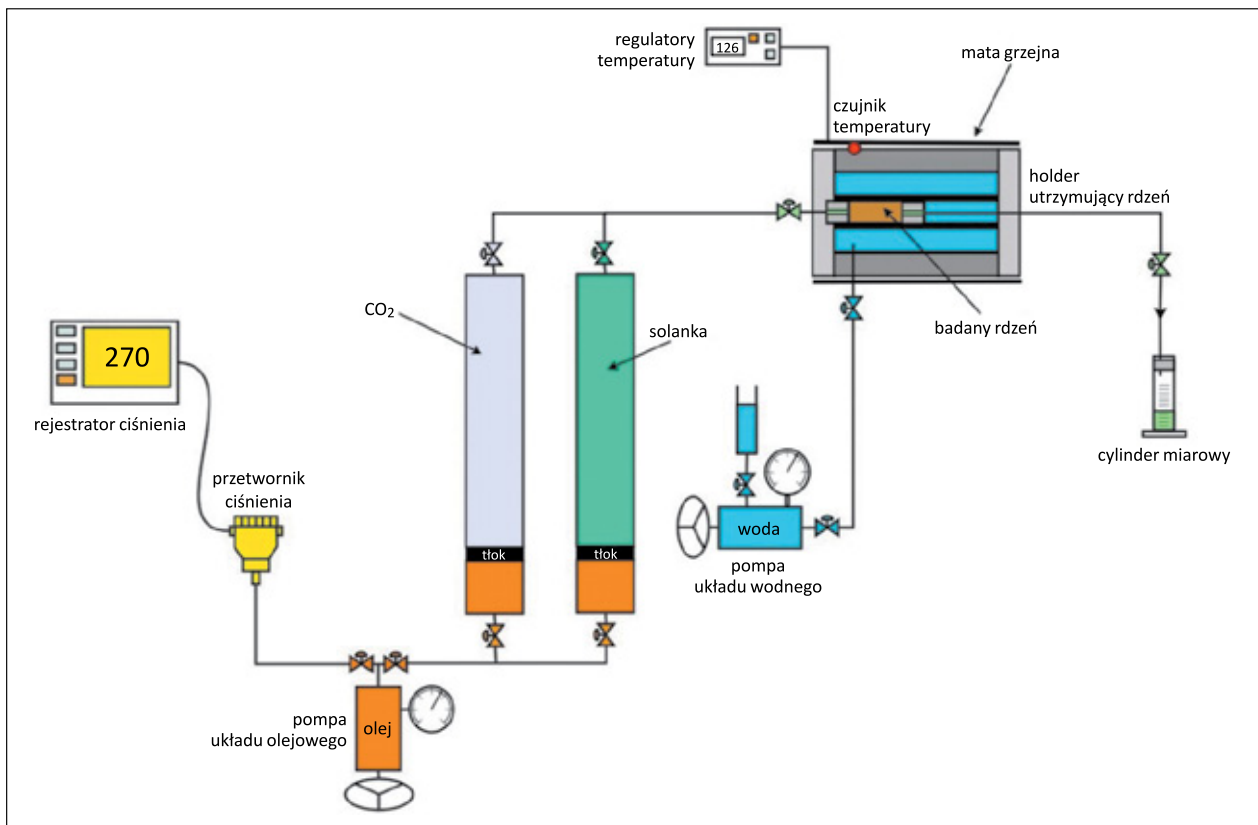
Jak dotąd nie prowadzono w naszym kraju badań dotyczących mineralnej sekwestracji w skałach bazaltowych. Opublikowane dotychczas prace dotyczą rozważań na temat karbonatyzacji mineralnej CO₂ *ex situ* z wykorzystaniem surowców naturalnych (Labus, 2010) oraz odpadów przemysłowych (Lempart i Labus, 2015) i energetycznych (Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki, 2013, 2014). Szacunki dotyczące wykorzystania serpentynitu do karbonatyzacji wskazują, że jego zasoby są zbyt małe, by mogły zostać wykorzystane na skalę przemysłową (Labus, 2010). Alternatywą dla sekwestracji mineralnej *ex situ* może być wykorzystanie popiołów ze spalania węgla (Uliasz-Bocheńczyk, 2011) lub żużli hutniczych (Uliasz-Bocheńczyk, 2008). W projekcie CarbFix do badań sekwestracji mineralnej zaprojektowano zestaw badawczy składający się z wysokociśnieniowej komory – pozwalającej na dokładny pomiar zmian chemizmu wody w trakcie długotrwałego eksperymentu (Galeczka et al., 2013). Wieleelementowa konstrukcja pozwala na pobór próbek na różnych etapach przepływu wody przez ponad dwumetrową komorę wypełnioną sproszkowanym materiałem skalnym (rysunek 12). Słabą stroną takiego rozwiązania jest brak możliwości badania próbek o zachowanej oryginalnej strukturze. Próbkę pobrane w określonych

interwałach czasowych z poszczególnych części komory analizowano z wykorzystaniem optycznej spektrometrii emisyjnej oraz chromatografii jonowej. Uzyskane w ten sposób dane pozwalają na analizę ilości dostępnych kationów Ca i Mg oraz szybkości ich uwalniania.

Zakład Badania Złóż Ropy i Gazu INiG – PIB dysponuje stanowiskiem do badań oddziaływania gazów kwaśnych na skałę zbiornikową, które z powodzeniem można byłoby zaadaptować do potrzeb badań oddziaływania solanki nasyconej CO₂ (Szufflita, 2016; rysunek 13). Wcześniej przygotowana solanka nasycona CO₂ byłaby zatłaczana z odpowiednio dobranym wydatkiem przez precyzyjną pompę objętościową. Rdzeń o średnicy 1 cala umieszczany jest w komorze rdzeniowej, której temperatura utrzymywana jest z wykorzystaniem maty grzewczej. Stałe ciśnienie kontrolowane jest poprzez precyzyjne pompy objętościowe układu zatłaczającego i uszczelniającego. Zatłaczana solanka po przepłynięciu przez badany rdzeń jest odbierana na wyjściu z komory i przekazywana do analizy chemicznej. Dużą wagę należałoby przyłożyć do zaprojektowania odpowiedniego schematu poboru próbek, tak by uzyskać jak najlepszy obraz zmian chemizmu w czasie. Z uwagi na to, że procesy rozpuszczania minerałów zachodzą wolno, preferowany czas trwania takiego badania to minimum 2 miesiące.

Podsumowanie i wnioski

1. Wszystkie ważniejsze organizacje zrzeszające ekspertów ds. klimatu/energetyki oraz krajowe i międzynarodowe instytucje/organy działające w tym obszarze są zgodne co do kluczowej roli CCS w realizacji postanowień klimatycznych i efektywnej transformacji energetycznej. Konieczne jest podjęcie zdecydowanych działań w celu zwiększenia wolumenu składowanego CO₂ z 40 Mt/rok do 5,6 Gt/rok.
2. Pozycja geotermii w transformacji energetycznej jest coraz silniejsza. Ma to związek z istotnymi cechami wyróżniającymi ją spośród pozostałych źródeł OZE, tj. z niezależnością od warunków klimatycznych i pogodowych, stabilnością i łatwością kontroli generowanej mocy (cieplnej lub elektrycznej) oraz minimalnym wpływem na środowisko naturalne.
3. Połączenie pułapkowania CO₂ w formie rozpuszczonej lub mineralnej z geotermią wydaje się szczególnie trafione, gdyż wymaga ono pozyskania dużej ilości wody – dostępnej przy eksploatacji zasobów geotermalnych. Dodatkową korzyścią



Rysunek 13. Schemat stanowiska badawczego do badań oddziaływania gazów na skałę zbiornikową, które można zaadaptować do badań sekwestracji mineralnej (Szufflita, 2016)

Figure 13. An experimental set-up used for testing the impact of gas on the reservoir rock that can be adapted for mineral sequestration studies (Szufflita, 2016)

skojarzenia CCS z geotermią jest wykorzystanie dobrej prasy geotermii (technologia znana od lat i powszechnie uważana za bezpieczną) w celu zyskania akceptacji społecznej dla współprowadzonej sekwestracji.

4. Sekwestracja mineralna to najbezpieczniejsza forma uwięzienia CO₂. Proces ten, nazywany mineralną karbonatyzacją, polega na reakcji CO₂ z fazami mineralnymi zawierającymi Mg i Ca. W jej wyniku powstają stabilne minerały węglanowe. Już na etapie zatłaczania CO₂ z solanką jest on pułapkowany w formie rozpuszczonej, a solanka nasycona CO₂ o większej gęstości opada na dno struktury. Większa część ryzyka związana z podziemnym zatłaczaniem CO₂ dotyczy migracji CO₂ w fazie gazowej ku szczytowi struktury, co w niesprzyjających okolicznościach może prowadzić do jego ucieczki. W przypadku sekwestracji mineralnej unieruchomienie CO₂ wyklucza możliwość migracji, a tym samym ucieczki z formacji docelowej. Dzięki temu nie ma potrzeby prowadzenia szczegółowego monitoringu po zaprzestaniu zatłaczania, co istotnie wpływa na obniżenie kosztów sekwestracji.
5. Możliwość prowadzenia sekwestracji mineralnej, w powiązaniu z geotermią, na skałę przemysłową została potwierdzona w ramach projektu CarbFix (i projektów

pochodnych). Wyniki szeroko zakrojonych prac badawczych z wykorzystaniem różnych metod wykazały bardzo szybką mineralizację CO₂ w bazaltach. Ponad 95% zatłoczonego CO₂ do skał bazaltowych zostało związane mineralnie w czasie krótszym niż 2 lata.

6. Niewątpliwym sukcesem sekwestracji mineralnej CO₂ powiązanej z geotermią w skali przemysłowej przełożył się bezpośrednio na wzrost zainteresowania tym tematem wśród inwestorów i operatorów zakładów geotermalnych. Na bazie CarbFix powstało wiele projektów pochodnych, których celem jest zwiększenie skali sekwestracji mineralnej w bazaltach (Silverstone, CO₂-Seastone, Coda terminal – 3 Mt CO₂/rok) oraz implementacja technologii w innych lokalizacjach na świecie i innych skałach (GECO: Niemcy – geotermia niskotemperaturowa w piaskowcach, Włochy, Turcja).
7. Pomimo tego, że Polska leży poza strefami współczesnej aktywności tektonicznej i wulkanicznej, to w zachodniej części kraju występują korzystne warunki geotermiczne – przejawiające się wysoką gęstością strumienia ciepła (do 100 mW/m²) i wysokim gradientem geotermicznym (~40°C/km). Obszar ten pokrywa się częściowo ze strefą występowania dolnopermskich wulkanitów, w tym

- bazaltów, w których teoretycznie mógłby zachodzić proces sekwestracji mineralnej.
8. Dolnopermskie wulkanity swoim zasięgiem obejmują jednostki Pomorza Zachodniego i monokliny przedsudeckiej. Wyraźnie zaznacza się progresja objętościowa skał maficznych w kierunku południowym, przez co obszar o teoretycznie najlepszych warunkach geologicznych do sekwestracji mineralnej (największa miąższość pokryw bazaltowych) to południowa część monokliny przedsudeckiej.
 9. Analizy mineralogiczne bazaltów z tego obszaru wskazują na wysoki stopień przeobrażenia faz mineralnych biorących udział w sekwestracji mineralnej (minerałów maficznych oraz plagioklazów). Plagioklasy wykazują bardzo silną albityzację, czyli zastąpienie Ca przez Na. W większości przypadków minerały maficzne są prawie całkowicie zastąpione pseudomorfozami, wypełnionymi m.in. wtórnymi węglanami, chlorytem i minerałami ilastymi. Wymienione cechy świadczą o niskiej dostępności Ca i Mg, niskiej reaktywności i tym samym o obniżonym powinowactwie dla mineralizacji CO₂. W celu dokładnej oceny należałoby przeprowadzić eksperymenty oddziaływania solanki z rozpuszczonym CO₂ na próbkach rdzeniowych z wytypowanych poziomów bazaltowych pokryw wulkanicznych.
 10. Kolejnym problemem dla prowadzenia sekwestracji mineralnej powiązanej z geotermią w krajowych formacjach wulkanicznych mogą być bardzo słabe parametry petrofizyczne pokryw bazaltowych. Mimo dowiercenia perm-skich wulkanitów ponad 50 odwiertami – bardzo mało jest dostępnych informacji na temat ich właściwości zbiornikowych. Z dostępnych danych dotyczących wulkanitów z rejonu bloku Gorzowa wynika, że w większości są to skały nieprzepuszczalne lub bardzo słabo przepuszczalne (~0,001–0,4 mD). Słabe właściwości filtracyjne są czynnikiem warunkującym lokalizację odwiertów chłonnych. W bazaltach obserwowane są liczne spękania i szczeliny, ale bardzo często wypełnione są minerałami wtórnymi. Podobnie jak wyżej – w celu dokładniejszej oceny należałoby przeprowadzić badania petrofizyczne dla wytypowanych poziomów pokryw bazaltowych.
 11. Biorąc pod uwagę znaczny stopień przeobrażenia oraz słabe parametry zbiornikowe wulkanitów dolnego permu, możliwości prowadzenia sekwestracji mineralnej w powiązaniu z geotermią na terenie Polski wydają się mocno ograniczone. Niemniej jednak potencjał energetyczny wód termalnych w skałach osadowych na Niżu Polskim jest bardzo duży, szczególnie w zbiornikach hydrogeotermalnych dolnej jury, ale również w dolnopermskich poziomach wodonośnych. Perspektywna wydaje się idea prowadzenia prac badawczych nad rozwojem geotermii zintegrowanej z sekwestracją CO₂ w formie rozpuszczonej na terenie naszego kraju.
- Artykuł powstał na podstawie pracy własnej pt. *Analiza możliwości wdrożenia procesu mineralnej sekwestracji CO₂ w warunkach geotermii wspomaganiej na obszarze Polski*, praca INiG – PIB, nr zlecenia 1869/KB/2021, nr archiwalny DK-4101-0148/2021.

Literatura

- BGR – Geology 1:5 Mio – The 1:5 Million International Geological Map of Europe and Adjacent Areas. <https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Europa/IGME5000/IGME_Project/IGME_Projectinfo.html> (dostęp: 08.11.2021).
- Blum A., Lasaga A., 1988. Role of surface speciation in the low-temperature dissolution of minerals. *Nature*, 331: 431–433. DOI: 10.1038/331431a0.
- Brady P., Walther J., 1989. Controls on silicate dissolution rates in neutral and basic pH solutions at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(11): 2823–2830. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90160-9.
- CarbFix. The CarbFix Project – Fact Sheet. <https://www.or.is/documents/82/pressfactsheet_XaNfVms.pdf> (dostęp: 10.12.2021).
- Castillo C., Marty N., Hamm V., Kervévan C., Thiéry D., de Lary L., Manceau J.C., 2017. Reactive Transport Modelling of Dissolved CO₂ Injection in a Geothermal Doublet. Application to the CO₂-DISSOLVED Concept. *Energy Procedia*, 114: 4062–4074. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1547.
- Clark D.E., Gunnarsson I., Aradóttir E.S., Arnarson M.P., Þorgeirsson P.A., Sigurardóttir S.S., Sigfússon B., Snæbjörnsdóttir S., Oelkers E.H., Gíslason S.R., 2018. The chemistry and potential reactivity of the CO₂-H₂S charged injected waters at the basaltic CarbFix2 site, Iceland. *Energy Procedia*, 146: 121–128. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.016.
- Clark D.E., Oelkers E.H., Gunnarsson I., Sigfússon B., Snæbjörnsdóttir S., Aradóttir E.S., Gíslason S.R., 2020. CarbFix2: CO₂ and H₂S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 279: 45–66. DOI: 10.1016/j.gca.2020.03.039.
- DePaolo D.J., Cole D.R., David R., Navrotsky A., Bourg I.C., 2013. Geochemistry of geologic CO₂ sequestration. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77(1): 1–28. DOI: 10.2138/rmg.2013.77.0.
- Dubińska E., Bagiński B., Kaproń G., Bylina P., 1998. Pumpellyit w zmienionych zasadowych skałach wulkanicznych z okolic Gorzowa Wielkopolskiego (północno-zachodnia część monokliny przedsudeckiej): przejawy metamorfizmu bardzo niskiego stopnia (VLGM). *Przegląd Geologiczny*, 46 (1): 71–79.
- Ellis A.J., 1959. The solubility of calcite in carbon dioxide solutions. *American Journal of Science*, 257(5): 354–365. DOI: 10.2475/ajs.257.5.354.
- European Commission, 2019. Communication from the Commission. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019. COM/2019/640 final. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583420149564&uri=CELEX:52019DC0640>> (dostęp: 12.12.2021).
- Galeczka I., Wolff-Boenisch D., Jonsson T., Sigfússon B., Stefánsson A., Gíslason S.R., 2013. A novel high pressure column flow reactor for experimental studies of CO₂ mineral storage. *Applied Geochemistry*, 30: 91–104. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.08.010.
- GCAP UNFCCC, 2021. <<https://climateaction.unfccc.int/>> (dostęp: 10.12.2021).
- Gíslason S.R., Oelkers E.H., 2003. Mechanism, rates, and consequences of basaltic glass dissolution: II. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of pH

- and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(20): 3818–3832. DOI: 10.1016/S0016-7037(03)00176-5.
- Global CCS Institute, 2020. The Global Status of CCS 2020. <<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf>> (dostęp: 11.12.2021).
- Global CCS Institute, 2021a. CCS Requirement. <<https://co2re.co/inherentinterest>> (dostęp: 11.12.2021).
- Global CCS Institute, 2021b. The Global Status of CCS 2021. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf> (dostęp: 10.12.2021).
- Golubev S., Pokrovsky O.S., Schott J., 2005. Experimental determination of the effect of dissolved CO₂ on the dissolution kinetics of Mg and Ca silicates at 25°C. *Chemical Geology*, 217(3–4): 227–238. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.12.011.
- Górecki W., Szczepański A., Sadurski A., Hajto M., Papiernik B., Szewczyk J., Sokołowski A., Strzetelski W., Haładus A., Kania J., Rajchel L., Feldman-Olszewska A., Wagner R., Leszczyński K., Sowiżdżał A., 2006. Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim. *Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie*.
- Gudbrandsson S., Wolff-Boenisch D., Gislason S.R., Oelkers E.H., 2014. Experimental determination of plagioclase dissolution rates as a function of its composition and pH at 22°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139: 154–172. DOI: 10.1016/j.gca.2014.04.028.
- Gunnarsson I., Aradóttir E.S., Oelkers E.H., Clark D.E., Arnarson M.P., Sigfússon B., Snæbjörnsdóttir S., Matter J.M., Stute M., Júlíusson B.M., Gislason S.R., 2018. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 79: 117–126. DOI: 10.1016/j.ijggc.2018.08.014.
- Gunnarsson I., Sigfússon B., 2013. Gas injection system. CarbFix Project No. 281348, 1–29. <https://carbfix.cdn.prismic.io/carbfix/c37a9ef9-6854-4e3d-982c-81df71f5bf85_D2.2.pdf> (dostęp: 16.12.2021).
- Gysi A.P., Stefánsson A., 2011. CO₂-water-basalt interaction. Numerical simulation of low temperature CO₂ sequestration into basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(17): 4728–4751. DOI: 10.1016/j.gca.2011.05.037.
- Gysi A.P., Stefánsson A., 2012. CO₂-water-basalt interaction. Low temperature experiments and implications for CO₂ sequestration into basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 81: 129–152. DOI: 10.1016/j.gca.2011.12.012.
- Hartmann J., Moosdorf N., 2012. The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12): 1–37. DOI: 10.1029/2012GC004370.
- IEA, 2020. World Energy Outlook 2020 – Analysis. <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>> (dostęp: 16.12.2021).
- IEA, 2021a. Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>> (dostęp: 16.12.2021).
- IEA, 2021b. World Energy Outlook 2021. Revised version, October 2021. <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>> (dostęp: 11.12.2021).
- IOPG, 2021a. Map of EU CCUS Projects. <<https://iogpeurope.org/documents/map-of-eu-ccs-projects/>> (dostęp: 16.12.2021).
- IOPG, 2021b. Scaling up CCS in Europe. <<https://iogpeurope.org/documents/scaling-up-ccs-in-europe-2/>> (dostęp: 16.12.2021).
- IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change sustainable development, and efforts to eradicate poverty. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf> (dostęp: 10.12.2021).
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf> (dostęp: 10.12.2021).
- Juroszek C., Klapciński J., Sachanbiński M., 1981. Wulkanity dolnego permu południowej części monokliny przedsudeckiej i perykliny Żar. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 51(3–4): 517–546.
- Kelemen P., 2017. Harnessing Peridotite Alteration for Carbon Capture and Storage. *CO₂ Summit III: Pathways to Carbon Capture, Utilization, and Storage Deployment, 22–26.05.2017 r., Cetraro (Calabria), Włochy*.
- Kelemen P., Benson S.M., Pilorgé H., Psarras P., Wilcox J., 2019. An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate*, 1(9): 1–20. DOI: 10.3389/fclim.2019.00009.
- Kelemen P., Leong J.A.M., Ellison E.T., Nothaft D.B., Templeton A.S., Ternieten L., 2021. Ongoing carbon mineralization and peridotite alteration at the Oman Drilling Project’s Multi-Borehole Observatory. *AGU Fall Meeting, 13–17.12.2021 r., New Orleans, LA, USA & Online*. <<https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/910180>> (dostęp: 28.12.2021).
- Kervévan C., Beddelem M.H., O’Neil K., 2014. CO₂-DISSOLVED: a Novel Concept Coupling Geological Storage of Dissolved CO₂ and Geothermal Heat Recovery – Part 1: Assessment of the Integration of an Innovative Low-cost, Water-based CO₂ Capture Technology. *Energy Procedia*, 63: 4508–4518. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.485.
- Kępińska B., 2018. Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej w Polsce w latach 2016–2018. *Technika Poszukiwań Geologicznych*, 57(1): 11–26.
- Kiersnowski H., 2008. Mapa miąższości wulkanitów dolnego czerwonego spągowca. [W:] Peryt T. (red.). Atlas polskiej części południowego basenu permskiego. *Państwowy Instytut Geologiczny*.
- Kiersnowski H., Buniak A., 2006. Evolution of the Rotliegend Basin of northwestern Poland. *Geological Quarterly*, 50(1): 119–138.
- Koenen M., Neele F., Hofstee C., Hanegraaf M., Kervévan C., 2018. Combined geothermal and dissolved CO₂ storage system – Example of application to a geothermally heated greenhouse area in The Netherlands. *14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne, 21–26.10.2018 r., Melbourne, Australia*. DOI: 10.2139/ssrn.3365895.
- Labus M., 2010. Próba oceny krajowych zasobów złóż serpentynitu dla celów sekwestracji CO₂. *Górnictwo i Geologia*, 5(2): 133–141.
- Lempart M., Labus M., 2015. Differential scanning calorimetry (DSC) in researching the mineral carbonation processes of cement materials, in terms of CO₂ sequestration. *Nafta-Gaz*, 71(12): 998–1004. DOI: 10.18668/NG2015.12.08.
- Maliszewska A., Jackowicz E., Kuberska M., Kiersnowski H., 2016. Skaly permu dolnego (czerwonego spągowca) zachodniej Polski : monografia petrograficzna. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 204: 1–115.
- Matter J.M., Broecker W.S., Gislason S.R., Gunnlaugsson E., Oelkers E.H., Stute M., Sigurdardóttir H., Stefánsson A., Alfreðsson H.A., Aradóttir E.S., Axelssone G., Sigfússon B., Wolff-Boenisch D., 2011. The CarbFix Pilot Project – Storing carbon dioxide in basalt. *Energy Procedia*, 4: 5579–5585. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.546.

- Matter J.M., Stute M., Hall J., Mesfin K., Snæbjörnsdóttir S., Gislason S.R., Oelkers E.H., Sigfusson B., Gunnarsson I., Aradóttir E.S., Alfredsson H.A., Gunnlaugsson E., Broecker W.S., 2014. Monitoring permanent CO₂ storage by *in situ* mineral carbonation using a reactive tracer technique. *Energy Procedia*, 63: 4180–4185. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.450.
- McGlade C., Sondak G., Han M., 2018. Whatever happened to enhanced oil recovery? International Energy Agency. <<https://www.iea.org/commentaries/whatever-happened-to-enhanced-oil-recovery>> (dostęp: 10.12.2021).
- Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L. (eds.), 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press. <<https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>> (dostęp: 20.10.2021).
- Miranda-Barbosa E., Sigfusson B., Carlsson J., Tzimas E., 2017. Advantages from Combining CCS with Geothermal Energy. *Energy Procedia*, 114: 6666–6676. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1794.
- Müller R.D., Seton M., Zahirovic S., Williams S.E., Matthews K.J., Wright N.M., Shephard G.E., Maloney K.T., Barnett-Moore N., Hosseinpour M., Bower D.J., Cannon J., 2016. Ocean Basin Evolution and Global-Scale Plate Reorganization Events Since Pangea Breakup. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44: 107–138. DOI: 10.1146/Annurev-Earth-060115-012211.
- Müller R.D., Zahirovic S., Williams S.E., Cannon J., Seton M., Bower D.J., Tetley M.G., Heine C., le Breton E., Liu S., Russell S.H.J., Yang T., Leonard J., Gurnis M., 2019. A Global Plate Model Including Lithospheric Deformation Along Major Rifts and Orogens Since the Triassic. *Tectonics*, 38(6): 1884–1907. DOI: 10.1029/2018TC005462.
- Munz I.A., Brandvoll Ø., Haug T.A., Iden K., Smeets R., Kihle J., Johansen H., 2012. Mechanisms and rates of plagioclase carbonation reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 77: 27–51. DOI: 10.1016/j.gca.2011.10.036.
- Oelkers E.H., Gislason S.R., 2001. The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(21): 3671–3681. DOI: 10.1016/S0016-7037(01)00664-0.
- Palandri J.L., Yousif K., 2004. A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling. *U.S. Geological Survey, Open File Report 2004-1068*. <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1068/pdf/OFR_2004_1068.pdf> (dostęp: 20.10.2021).
- Park A.H.A., Fan L.S., 2004. CO₂ mineral sequestration: physically activated dissolution of serpentine and pH swing process. *Chemical Engineering Science*, 59(22–23): 5241–5247. DOI: 10.1016/j.ces.2004.09.008.
- Pokorski J., 1978. Zarys rozwoju basenu czerwonego spągowca na obszarze Nizy Polskiego. *Przegląd Geologiczny*, 26 (12): 686–693.
- Pokrovsky O.S., Schott J., 2004. Experimental study of brucite dissolution and precipitation in aqueous solutions: surface speciation and chemical affinity control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 31–45. DOI: 10.1016/S0016-7037(03)00238-2.
- Randi A., Sterpenich J., Morlot C., Pironon J., Kervévan C., Beddelem M.H., Fléhoc C., 2014. CO₂-DISSOLVED: a Novel Concept Coupling Geological Storage of Dissolved CO₂ and Geothermal Heat Recovery – Part 3: Design of the MIRAGES-2 Experimental Device Dedicated to the Study of the Geochemical Water-Rock Interactions Triggered by CO₂ Laden Brine Injection. *Energy Procedia*, 63: 4536–4547. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.487.
- Randi A., Sterpenich J., Thiéry D., Kervévan C., Pironon J., Morlot C., 2017. Experimental and Numerical Simulation of the Injection of a CO₂ Saturated Solution in a Carbonate Reservoir: Application to the CO₂-DISSOLVED Concept Combining CO₂ Geological Storage and Geothermal Heat Recovery. *Energy Procedia*, 114: 2942–2956. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1423.
- Ryka W., 1978. Permskie skały wylewne z nadbałtyckiej części Pomorza Zachodniego. *Geological Quarterly*, 22 (4): 753–776.
- Rzyżyński G., Majer, E., 2015. Geotermia niskotemperaturowa : informacja geologiczna i procedury prawne. *Przegląd Geologiczny*, 63(12/1): 1388–1396.
- Saldi G.D., Jordan G., Schott J., Oelkers E.H., 2009. Magnesite growth rates as a function of temperature and saturation state. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19): 5646–5657. DOI: 10.1016/j.gca.2009.06.035.
- Snæbjörnsdóttir S., Oelkers E.H., Mesfin K., Aradóttir E.S., Dideriksen K., Gunnarsson I., Gunnlaugsson E., Matter J.M., Stute M., Gislason S.R., 2017. The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the *in situ* mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix site in SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 58: 87–102. DOI: 10.1016/j.ijggc.2017.01.007.
- Snæbjörnsdóttir S., Wiese F., Fridriksson T., Ármannsson H., Einarsson G.M., Gislason S.R., 2014. CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63: 4585–4600. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.491.
- Szewczyk J., Gientka D., 2009. Terrestrial heat flow density in Poland – a new approach. *Geological Quarterly*, 53(1/B3): 125–140.
- Szufflita S., 2016. Badania laboratoryjne oddziaływania gazów kwaśnych na skałę zbiornikową w procesach sekwestracji CO₂. *Nafta-Gaz*, 72(7): 520–527. DOI: 10.18668/NG.2016.07.04.
- Turvey C.C., Wilson S.A., Hamilton J.L., Tait A.W., McCutcheon J., Beinlich A., Fallon S.J., Dipple G.M., Southam G., 2018. Hydrotalcites and hydrated Mg-carbonates as carbon sinks in serpentinite mineral wastes from the Woodsreef chrysotile mine, New South Wales, Australia: Controls on carbonate mineralogy and efficiency of CO₂ air capture in mine tailings. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 79: 38–60. DOI: 10.1016/j.ijggc.2018.09.015.
- Uliasz-Bocheńczyk A., 2008. Wiązanie CO₂ w żuźlach hutniczych na drodze mineralnej karbonatyzacji. Część 1: Metody wiązania CO₂ na drodze bezpośredniej i pośredniej karbonatyzacji. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24 (1): 79–86.
- Uliasz-Bocheńczyk A., 2011. Mineralna sekwestracja CO₂ przy zastosowaniu zawiesin wodnych wybranych popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27(1): 145–153.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., 2013. Mineralna sekwestracja CO₂ przy zastosowaniu odpadów energetycznych – próba oszacowania potencjału w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 29(3): 179–189. DOI: 10.2478/gospo-2013-0037.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., 2014. Mineralna karbonatyzacja przy zastosowaniu surowców naturalnych – metodą redukcji CO₂? *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 30(3): 99–110. DOI: 10.2478/gospo-2014-0027.
- Whittaker J.M., Afonso J.C., Masterton S., Müller R.D., Wessel P., Williams S.E., Seton M., 2015. Long-term interaction between mid-ocean ridges and mantle plumes. *Nature Geoscience*, 8(6): 479–483. DOI: 10.1038/ngeo2437.
- Wojnicki M., 2017. Experimental investigations of oil displacement using the WAG method with carbon dioxide. *Nafta-Gaz*, 73(11): 864–870. DOI: 10.18668/NG.2017.11.06.

Wojnicki M., 2020. Naprzemienne zatłaczanie wody i gazu (WAG) wspomagane pianą (FAWAG) jako efektywna metoda EOR w złożach szczelinowatych i heterogenicznych. *Nafta-Gaz*, 76(5): 311–321. DOI: 10.18668/NG.2020.05.04.

Wójcicki A., Sowizdzał A., Bujakowski W., 2013. Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (Hot Dry Rocks) w Polsce. *Ministerstwo Środowiska, Warszawa*.



Dr inż. Mirosław WOJNICKI
Adiunkt w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: miroslaw.wojnicki@inig.pl



Mgr inż. Sławomir SZUFLITA
Asystent w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: slawomir.szuflita@inig.pl



Mgr inż. Jerzy KUŚNIERCZYK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Badania Złóż Ropy i Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: jerzy.kusnierczyk@inig.pl



Dr inż. Marcin WARNECKI
Adiunkt, kierownik Zakładu Badania Złóż Ropy
i Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marcin.warnecki@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU BADANIA ZŁÓŻ ROPY I GAZU

- pobór wgłębnymi i powierzchniowymi próbek płynów złożowych;
- kompleksowe badania i analizy zmian fazowych próbek płynów złożowych na zestawie aparatów PVT firmy Vinci, Chandler i Ruska;
- modelowanie procesu wypierania ropy gazem na fizycznym modelu złoża tzw. „cienka rurka”;
- pomiar lepkości ropy wiskozymetrem kulkowym lub kapilarnym w warunkach PT;
- optymalizacja procesów powierzchniowej separacji ropy naftowej;
- laboratoryjne i symulacyjne badania warunków wytrącania się parafin, asfaltenów w ropie oraz tworzenia się hydratów w gazie;
- badanie skuteczności działania chemicznych środków zapobiegających tworzeniu się hydratów;
- laboratoryjne modelowanie procesów wypierania ropy gazem w warunkach zmieszania faz;
- badanie procesów sekwestracji CO₂ w solankowych poziomach wodonośnych, nasyconych gazem ziemnym;
- badania na długich rdzeniach wiertniczych dla oceny efektywności metod zwiększenia stopnia odzysku ropy – Enhanced Oil Recovery (EOR).



Kierownik: dr inż. Marcin Warnecki Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436 89 41 w. 5226, 5231, 5224 Faks: 13 436 79 71 E-mail: marcin.warnecki@inig.pl

 INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy