

Systemy geotermalne CO₂-EGS – projekt EnerGizerS



Anna
Sowizdzał



Anna
Chmielowska



CO₂-EGS geothermal systems – EnerGizerS Project

Abstract

CO₂-EGS geothermal systems are unconventional geothermal systems (Enhanced Geothermal Systems; EGS) using carbon dioxide (CO₂) as the operating fluid. These systems combine aspects of extracting clean and environmentally friendly energy from the Earth's interior along with sequestering carbon dioxide (Carbon Capture and Storage; CCS) originating from the combustion of fossil fuels. Due to the excellent thermodynamic properties of CO₂ and the need to reduce its emissions to the atmosphere, EGS using CO₂ (instead of water) as a working fluid has become a subject of interest for researchers around the world, including Poland. Within the EnerGizerS project: *CO₂-Enhanced Geothermal Systems for Climate Neutral Energy Supply*, the Polish-Norwegian team of scientists is conducting research on the efficiency of CO₂-EGS systems in partner countries. The first stage of the work has made it possible to develop a methodology and identify parameters important for selecting the location of a potential CO₂-EGS system offshore (Norway) and inland (Poland). As a result, the Gorzów block and the region of the Mogilno-Łódź Trough (Krośniewice-Kutno region) were indicated as the most prospective areas for such a system in Poland, while in Norway the Åre formation in the Norwegian Sea was selected the most favourable. Then, petrophysical, thermal and mechanical properties have been characterized for the selected reservoir formations. Currently, the work to experimentally determine the properties of carbon dioxide as a working fluid and to perform advanced models of the rock medium and energy systems is ongoing. The technical-economic and environmental evaluation of the CO₂-EGS installation in the proposed locations will be the final stage of the project.

Streszczenie

Systemy geotermalne CO₂ – EGS to niekonwencjonalne systemy geotermalne (ang. Enhanced Geothermal Systems; EGS) wykorzystujące

dwutlenek węgla (CO₂) jako medium robocze. Systemy te łączą aspekty pozyskiwania czystej i ekologicznej energii wnętrza Ziemi oraz sekwestracji dwutlenku węgla (ang. Carbon Capture and Storage; CCS) pochodzącego ze spalania paliw kopalnych. Ze względu na doskonałe właściwości termodynamiczne CO₂ i potrzebę zmniejszenia jego emisji do atmosfery, system EGS wykorzystujący CO₂ (zamiast wody) jako płyn roboczy stał się przedmiotem zainteresowań naukowców na całym świecie, również w Polsce. W ramach projektu EnerGizerS: *Niekonwencjonalne systemy geotermalne CO₂-EGS jako systemy energetyczne neutralne dla klimatu*, polsko-norweski zespół naukowców prowadzi badania nad efektywnością funkcjonowania systemów CO₂-EGS w krajach partnerskich. Pierwszy etap prac umożliwił opracowanie metodyki i wskazanie parametrów istotnych pod względem doboru lokalizacji potencjalnego systemu CO₂-EGS w warunkach morskich (Norwegia) i lądowych (Polska). W efekcie, jako obszar najbardziej perspektywiczny dla tego systemu w Polsce wskazano blok Gorzowa oraz rejon niecki mogileńsko-łódzkiej (Krośniewice-Kutno), natomiast w Norwegii wytypowano formację Åre na Morzu Norweskim. Dla wytypowanych formacji zbiornikowych dokonano charakterystyki właściwości petrofizycznych, termicznych i mechanicznych. Obecnie trwają prace nad eksperymentalnym określeniem właściwości dwutlenku węgla jako płynu roboczego oraz zaawansowanym modelowaniem ośrodka skalnego i systemów energetycznych. Ocena techniczno-ekonomiczna i środowiskowa instalacji CO₂-EGS w zaproponowanych lokalizacjach będzie końcowym etapem projektu.

Wprowadzenie

W dobie dynamicznej transformacji energetycznej oraz poszukiwania efektywnych i czystych technologii produkcji energii, szczególnego znaczenia nabierają działania ukierunkowane na komercyjne wykorzystanie energii geotermalnej. Równie istotną kwestią stanowi konieczność ograniczenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery, w tym antro-

pogenicznego dwutlenku węgla. Odpowiedzią na te wyzwania są systemy geotermalne CO₂-EGS, które łączą aspekty pozyskiwania czystej i ekologicznej energii wnętrza Ziemi oraz sekwestracji dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliw kopalnych. Systemy CO₂-EGS to innowacyjne rozwiązanie bazujące na idei wspomaganym systemów geotermalnych (ang. Enhanced Geothermal Systems; EGS) i wykorzystaniu dwutlenku węgla (CO₂) jako nośnika energii. Sama koncepcja wspomaganym systemów geotermalnych (EGS), wywodzi się z Los Alamos National Laboratory (LANL) w Stanach Zjednoczonych i została określona w patencie złożonym w 1974 roku (Olosolo i in., 2016; Brown, 2000). W przeciwieństwie do systemów hydrotermalnych, gdzie energia jest pozyskiwana z wód/par geotermalnych, systemy EGS pozyskują energię z formacji skalnych (suchych lub niezawierających odpowiedniej ilości wody). Odbyna się to poprzez sztuczne zwiększenie pojemności hydraulicznej zbiornika geotermalnego, wprowadzenie do niego płynu roboczego będącego nośnikiem energii, a następnie doprowadzenie go na powierzchnię (do elektrowni) w celu wytworzenia energii (Fig. 1).

W systemach EGS stosowane są dwa płyny robocze (Moeck, 2014): pierwszym i najczęściej stosowanym jest woda, natomiast drugim dwutlenek węgla (CO₂). Choć pierwsze rozwiązanie jest zdecydowanie bardziej powszechne, to wspomagane systemy geotermalne wykorzystujące CO₂ zamiast wody jako płyn roboczy są bardzo interesujące (Fig. 1), ze względu na swoje doskonałe właściwości termodynamiczne, transportowe i niską aktywność chemiczną (Pruess i in., 2006; Olosolo i in., 2016; Brown 2000; Aminu i in., 2017) oraz konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Efekt ten można osiągnąć poprzez geologiczne składowanie CO₂ w trakcie procesu wytwarzania energii, ponieważ część zatłoczonego do zbiornika dwutlenku węgla pozostaje trwale zmagazynowana w formacji skalnej. Nie mniej jednak, pomimo iż na świecie działa kilkanaście in-

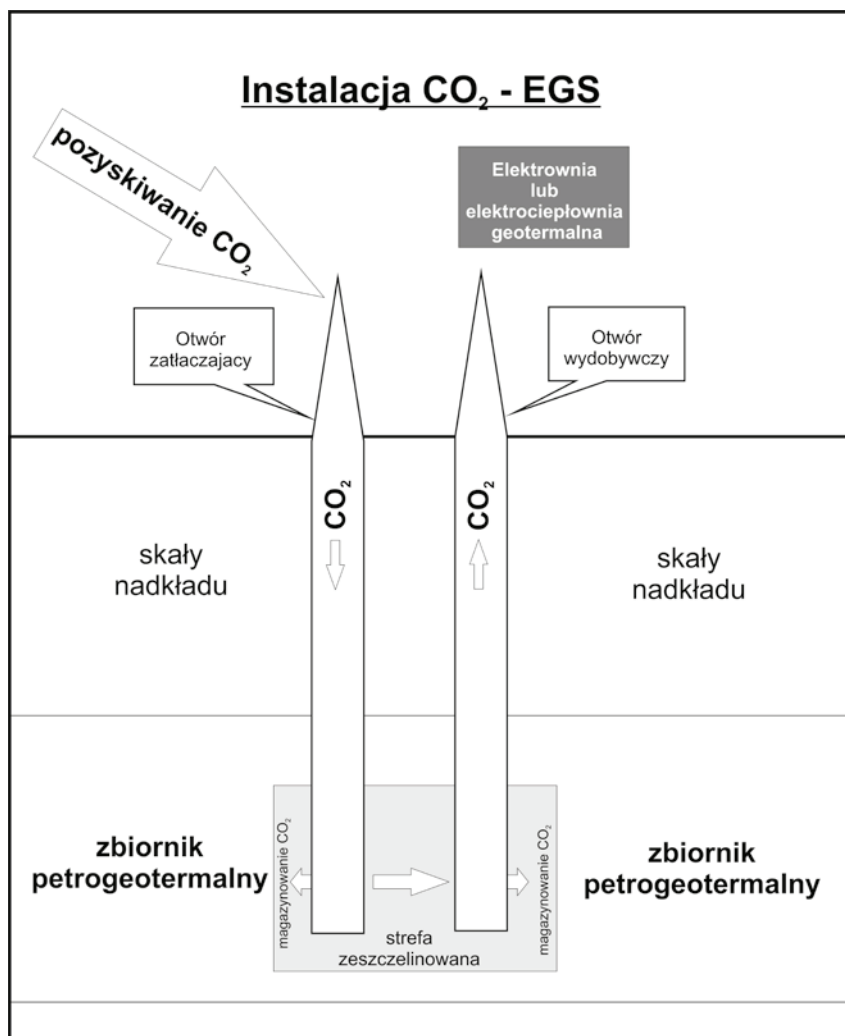


Fig. 1. Schemat systemu CO_2 -EGS

stacji EGS (Shyi-Min, 2018, Sowizdżał i in., 2022), a koncepcja CO_2 -EGS została zaproponowana już w roku 2000 (Brown, 2000), dotychczas nie użyto dwutlenku węgla jako cieczy roboczej na skalę komercyjną. Eksperymentalne działanie systemu CO_2 -EGS zostało przeprowadzone ponad dekadę temu w Ogachi w Japonii czego efektem końcowym było stworzenie modelu zatłaczania dwutlenku węgla do złoża (Shyi-Min, 2018). Ze względu na dodatkową korzyść środowiskową i ekonomiczną wynikającą z możliwości geologicznego składowania CO_2 podczas procesu konwersji energii wnętrza Ziemi do energii użytecznej wzbudzają one na świecie duże zainteresowanie. Ciągłe pozostaje jednak wiele nierozwiązanych zagadnień wynikających z wykorzystania CO_2 jako nośnika energii w systemach EGS, wśród nich należy wymienić m.in. zachowanie dwutlenku węgla w kontakcie ze skałą możliwe zanieczyszczenia cieczy roboczej innymi substancjami czy działanie instalacji podziemnej i napowierzchniowej. Analiza funkcjonowania systemów CO_2 -EGS jest głównym celem projektu EnerGizerS.

Badania nad efektywnością funkcjonowania systemów CO_2 -EGS w Polsce i Norwegii - projekt EnerGizerS

W październiku 2020 roku zespół naukowców z Polski i Norwegii rozpoczął realizację projektu pn. *Niekonwencjonalne systemy geotermalne CO_2 -EGS jako systemy energetyczne neutralne dla klimatu (CO_2 -Enhanced Geothermal Systems for Climate Neutral Energy Supply)*, akronim EnerGizerS. Przez 36 miesięcy konsorcjum w składzie: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie (Promotor projektu; Kraków, Polska), Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk (Kraków, Polska), SINTEF Energi AS (Trondheim, Norwegia), Norwegian University of Science and Technology (Trondheim, Norwegia) oraz EXERGON Spółka z o. o. (Gliwice, Polska), będzie realizować zagadnienia mające na celu analizę efektywności działania systemów EGS wykorzystujących dwutlenek węgla w stanie nadkrytycznym (sCO_2) jako medium robocze. Prowadzone badania są ukierunkowane na identyfikację

i szczegółową charakterystykę struktur geologicznych dla lokalizacji systemów CO_2 -EGS w Polsce i Norwegii, łącząc wymagania technologii wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) oraz sekwestracji CO_2 w skałach złożowych (CCS). Ponadto pomogą także określić zasadność połączenia technologii EGS i CCS w celu zrównoważonego wytwarzania energii i łagodzenia antropogenicznych zmian klimatu. Niezwykle istotnym aspektem projektu EnerGizerS jest również wymiana wiedzy i cennych doświadczeń w zakresie wykorzystania energii geotermalnej i geologicznego składowania dwutlenku węgla, a także intensyfikacja współpracy międzynarodowej.

Pierwszy etap podjętych prac umożliwił wskazanie parametrów istotnych dla lokalizacji systemów CO_2 -EGS w warunkach lądowych (Polska) i na morzu (Norwegia) poprzez wykorzystanie metody strukturalnej analizy danych Cross Impact. Ocenie wpływów krzyżowych poddano 49 parametrów, z których ostatecznie 8 uznano za kluczowe dla określenia lokalizacji potencjalnego systemu CO_2 -EGS. Te kluczowe parametry to: dostępność technologii czy źródeł CO_2 , stopień rozpoznania geologicznego, dostępność danych geologicznych, parametry złożowe, odległość od sieci elektroenergetycznej, odległość od odbiorców ciepła oraz głębokość występowania struktur geologicznych. Przeprowadzone analizy kluczowych parametrów (Pająk i in., 2021) oraz lokalnych uwarunkowań geologicznych i geotermalnych umożliwiły wskazanie struktur geologicznych dogodnych dla lokalizacji potencjalnych instalacji CO_2 -EGS w Polsce i Norwegii (Sowizdżał i in., 2021). Jako najbardziej perspektywiczny obszar w Polsce wybrano blok Gorzowa (Fig. 2) wskazując skały wulkaniczne czerwonego spągowca jako potencjalny zbiornik petrogeotermalny oraz podkreślając możliwą analogię do sąsiedzkiej instalacji EGS działającej w Groß Schönebeck (Niemcy). Drugim interesującym obszarem w kontekście perspektywicznej lokalizacji instalacji CO_2 -EGS jest rejon Krośniewice-Kutno (niecka mogileńsko-łódzka; Fig. 2), który był już wcześniej rozważany jako potencjalna lokalizacja systemu EGS bazującego na wodzie (Wójcicki i in. (red.), 2013). W tym przypadku jako potencjalny zbiornik petrogeotermalny rozważane są skały osadowe triasu dolnego. Z kolei w Norwegii wytypowano trzy formacje mezozoiczne: Åre na Morzu Norweskim oraz Ula i Skagerrak na Morzu Północnym, jako optymalne dla budowy potencjalnej instalacji CO_2 -EGS w Norwegii. Ostatecznie, jako najbardziej perspektywiczną dla przeprowadzenia dalszych badań, wskazano formację Åre na Morzu Norweskim (Fig. 2).



Fig. 2. Wytypowane lokalizacje dla potencjalnych systemów CO₂-EGS w Polsce i Norwegii wraz z przykładowymi zdjęciami prób skalnych pobranych do badań laboratoryjnych

W celu wykonania charakterystyki zbiorników petrogeotermalnych w Polsce i Norwegii przeprowadzono szczegółowe badania laboratoryjne na rdzeniach wiertniczych pochodzących z wytypowanych lokalizacji. Zestaw kompleksowych badań obejmował:

- analizę składu mineralnego skał metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (ang. X-ray Diffraction; XRD);
- analizę przestrzeni porowej metodą porozymetrii ręciowej (ang. Mercury Injection Capillary Pressure; MICP) oraz metodą spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego (ang. Nuclear Magnetic Resonance; NMR);
- analizę właściwości termicznych skał - pomiary przewodności cieplnej przy użyciu zestawu FOX50;
- analizę właściwości mechanicznych skał - badania parametrów sprężystych i mechanicznych skał.

Do badań wybrano skały osadowe oraz wulkaniczne czerwonego spagowca z otworu

Ośno-IG2 (Blok Gorzowa) oraz utwory mezoizoiczne formacji Skagerrak i Ula z rejonu Morza Północnego oraz Are na Morzu Norweskim. Z obszaru Norwegii przebadano łącznie 10 próbek rdzeni wiertniczych pobranych z głębokości 2804 - 5231 m ppt pochodzących z tych trzech wskazanych formacji mezozoicznych zlokalizowanych na morzu. Z otworu Ośno IG-2 pobrano 42 próbki rdzeni wiertniczych z przedziału głębokości od 3212 do 3659 m ppt reprezentujących trzy różne typy skał, piaskowce, zlepieńce i wulkanity. Charakterystyka petrofizyczna wybranych zbiorników petrogeotermalnych na obszarze Polski oraz Norwegii wskazała, że możliwe jest połączenie dwóch technologii EGS (Enhanced Geothermal System) oraz CCS (Carbon Capture & Storage), zarówno w celu ograniczenia emisji dwutlenku węgla, jak i produkcji energii elektrycznej i ciepła użytkowego. Wyniki analiz przestrzeni porowej pozwoliły na określenie m.in. takich parametrów skały jak: porowatość efektywna, przepuszczalność, gęstość nasypowa i gęstość szkieletowa. Badania

parametrów sprężystych i mechanicznych skał mają szczególne znaczenie w kontekście szczelinowania hydraulicznego zbiornika, a badania właściwości termicznych skał dostarczają informacji o potencjale energetycznym zbiornika.

Uzyskane wyniki prac laboratoryjnych zostały wykorzystane przy budowie modeli strukturalno-parametrycznych dla Bloku Gorzowa oraz rejonu Krośniewice – Kutno. Modelowanie strukturalno-parametryczne przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Petrel firmy Schlumberger, który umożliwia płynne przejście od map 2D do modeli 3D (Fig. 3). Istotnym elementem projektu jest opracowanie numerycznego modelu strefy szczelinowanej. Stworzono także uproszczony model matematyczny części złożowej systemu CO₂-EGS ze szczególnym uwzględnieniem wydajności odwiertów zatłaczających i eksploatacyjnych wykorzystujących CO₂ jako płyn roboczy. Model umożliwia uwzględnienie różnych zmiennych parametrów w celu odwzorowania wielu możliwych wariantów eksploatacji systemu. Przeprowadzenie setek scenariuszy pozwoliło wybrać te parametry, które są krytyczne dla działania CO₂-EGS, w szczególności dla utrzymania efektu termosyfonu pomiędzy otworami zatłaczającymi i produkcyjnymi.

Oprócz modelowania części podziemnej, prowadzone są prace związane z modelowaniem matematycznym kogeneracyjnych systemów energetycznych pracujących z wykorzystaniem dwutlenku węgla. W tym celu opracowano koncepcję modelu oraz przeprowadzono analizy dla cykli energetycznych CO₂-EGS: bezpośredniego oraz układu ORC z różnymi płynami roboczymi. Uproszczony model przepływu i wymiany ciepła w otworze i zbiorniku umożliwił ocenę różnych rozwiązań dla systemów napowierzchniowych w celu maksymalizacji produkcji energii netto.

Jak już wcześniej wspomniano najczęściej stosowanym płynem roboczym w instalacjach EGS jest woda (Moeck, 2014). Stosowanie dwutlenku węgla jako cieczy roboczej niesie ze sobą wiele zalet, które wynikają z doskonałych właściwości termodynamicznych, transportowych czy niskiej aktywności chemicznej CO₂ (Olasolo i in., 2016; Brown, 2000; Aminu i in., 2017). Jednak dotychczas nie wykorzystuje się dwutlenku węgla jako płynu roboczego w instalacjach EGS na skalę przemysłową. Jednym z celów cząstkowych projektu EnerGizerS jest dostarczenie wysokiej jakości danych eksperymentalnych dotyczących zachowania fazowego oraz właściwości (głównie lepkości i gęstości) dwutlenku węgla jako medium we wspomaganych systemach geotermalnych. Kampania eksperymentalna prowadzona jest z wykorzystaniem infrastruktury laboratoryjnej zlokalizowanej w SINTEF Energi AS (Trondheim, Norwegia), we współdziałaniu z młodym naukowcem z Akademii Górniczo-Hut-

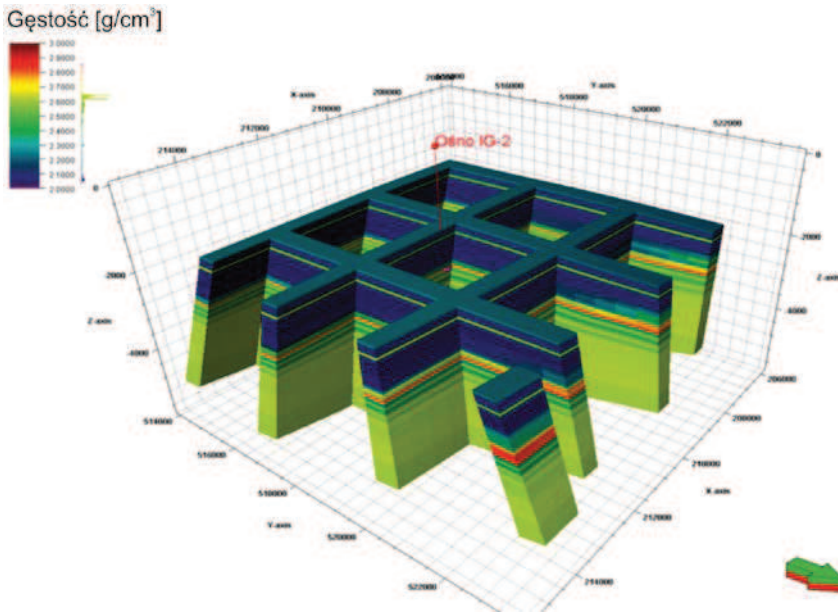


Fig. 3. Lokalny model parametryczny 3D (rozkład gęstości) dla Bloku Gorzowa opracowany w ramach projektu EnerGizerS (Autorzy modelu: B.Papiernik, G.Ząbek).

niczej, realizującego staż naukowy w jednostce SINTEF. Uzyskane dane eksperymentalne umożliwią bezpośrednią weryfikację stanów pracy systemu CO₂-EGS, ale także zostaną dopasowane i wykorzystane do walidacji istniejących modeli płynów roboczych.

Realizacja wszystkich zaplanowanych działań zostanie zwięźczona opracowaniem ram i wytycznych techniczno-ekonomicznych, zgodnie z najlepszymi praktykami stosowanymi w badaniach i przemyśle. Zgodnie z odpowiednimi normami ISO (ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006) opracowane zostaną ramy oceny środowiskowej, w zakresie zarządzania środowiskiem – ocena cyklu życia (LCA). Efekty tych prac, zwłaszcza analiz ekonomicznych, są niezwykle istotne w kontekście rosnących obecnie cen energii i zawirowań na rynkach energetycznych.

Podsumowanie

Eksploatacja energii wnętrza Ziemi kojarzona jest głównie z wykorzystaniem gorących wód i par. Jednak w wielu miejscach świata jest ona utrudniona lub niemożliwa ze względu na niewystarczające zasoby hydrogeologiczne. Alternatywą mogą być systemy wykorzystujące potencjał energetyczny suchych (lub prawie suchych) gorących formacji skalnych – wspomagane systemy geotermalne (Enhanced Geothermal System; EGS). Płyn zatłaczany pod powierzchnię terenu (powszechnie woda) cyrkuluje przez strukturę gorącej skały odbierając od niej ciepło a następnie jest eksploatowany na powierzchni terenu i kierowany do elektrowni. Innowacyjną technologią pozyskiwania energii w sposób przyjazny dla środowiska są wspomagane systemy geotermalne wykorzystujące jako czynnik

roboczy dwutlenek węgla (CO₂-EGS). Obecnie technologia ta nie jest komercyjnie wykorzystywana na świecie a jej wdrożenie wymaga realizacji serii badań naukowych. Zagadnieniem systemów CO₂-EGS zajęli się naukowcy z Polski i Norwegii podejmując realizację projektu EnerGizerS: *CO₂-Enhanced Geothermal Systems for Climate Neutral Energy Supply*. Głównym celem projektu jest rozwój technologii wspomaganych systemów geotermalnych wykorzystujących nadkrytyczny dwutlenek węgla jako medium robocze, umożliwiające jej wdrożenie na skalę komercyjną. Proponowane rozwiązanie ma na celu nie tylko zaspokojenie potrzeb energetycznych, ale również ochronę klimatu poprzez eliminację antropogenicznej emisji dwutlenku węgla. Dodatkowym atutem realizowanych prac badawczych jest intensyfikacja współpracy międzynarodowej. Bieżące wydarzenia oraz postęp prac można śledzić na stronie internetowej projektu: www.energizers.agh.edu.pl. Ostateczne wyniki projektu będą znane jesienią 2023 roku.

Źródło finansowania badań

Prace zrealizowano w ramach polsko-norweskiego projektu *Niekonwencjonalne systemy geotermalne CO₂-EGS jako systemy energetyczne neutralne dla klimatu, akronim EnerGizerS* numer rejestracyjny NOR/POLNOR/EnerGizerS/0036/2019 dofinansowanego z Funduszy Norweskich 2014-2021 za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Bibliografia:

- Aminu M.D., Nabavi S.A., Rochelle C.A., Manovic V., 2019. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy* 2017, 208: 1389–1419.

- Brown D. W., 2000. A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept Utilizing Supercritical CO₂ Instead of Water. *Proceedings, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, January 2000.
- Moeck I.S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37: 867–882.
- Olasolo P., Juárez M. C., Morales M. P., D`Amico S., Liarte I. A. 2016. Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56: 133-144.
- Pająk L., Sowizdżał A., Gładysz P., Tomaszewska B., Miecznik M., Andresen T., Frengstad B.S., Chmielowska A. 2021. Multi-Criteria Studies and Assessment Supporting the Selection of Locations and Technologies Used in CO₂-EGS Systems. *Energies*, 14: 7683. <https://doi.org/10.3390/en14227683>.
- Pruess K. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid — A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon, 2006. *Geothermics*, 25: 351-367.
- Shyi-Min, L. A global review of enhanced geothermal system (EGS), 2018. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 2902-2921.
- Sowizdżał A., Gładysz P., Andresen T., Miecznik M., Frengstad B.S., Liszka M., Chmielowska A., Gawron M., Løvseth S.W., Pająk L., Stenvik L.A., Tomaszewska B. 2021. CO₂-Enhanced Geothermal Systems for Climate Neutral Energy Supply. *TCCS-11 Trondheim Conference on CO₂-Capture, Transport and Storage*, Trondheim, Norway, June 21-23, 2021.
- Sowizdżał A., Starczewska M., Papiernik B., 2022. Future Technology Mix—Enhanced Geothermal System (EGS) and Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) - An Overview of Selected Projects as an Example for Future Investments in Poland. *Energies*, 15(10): 3505. <https://doi.org/10.3390/en15103505>.
- Wójcicki A., Sowizdżał A., Bujakowski W. (red.), 2013. Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (Hot Dry Rocks) w Polsce. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Anna Sowizdżał,

Anna Chmielowska

Akademia Górniczo-Hutnicza
im. St. Staszica w Krakowie,
Wydział Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska,
Katedra Surowców
Energetycznych,
Kraków