

Koordynator: Tomasz ŚLIWA

Anna CHMIEŁOWSKA (3, 4), Virginie HARCOUET-MENOU (5), Michał KACZMARCZYK (1, 6), Tomasz KOWALSKI (1), Wojciech LUBOŃ (7.1), Grzegorz PEŁKA (7.1.), Aneta SAPIŃSKA-ŚLIWA (1, 2), Mario SILVA (5), Anna SOWIŹDŹAŁ (1, 3, 4), Krzysztof SZCZOTKA (7.2, 7.3), Tomasz ŚLIWA (1, 2), Barbara TOMASZEWSKA (1), Ola VESTAVIK (5), Magnus WANGEN (5), Paweł WOJNAROWSKI (1, 5)

IV. Geotermia i pompy ciepła

Abstrakt: W artykule przedstawiono współczesne trendy i wyzwania w obszarze dostaw ciepła i chłodu w kontekście rozwoju „inteligentnych” sieci grzewczych i grzewczo-chłodniczych (*smart grids*) oraz rozwoju ciepłownictwa (energetyki) rozproszonego. Autorzy artykułu dzielą się doświadczeniami z prac naukowo-badawczych, eksperymentalno-rozwojowych oraz dydaktycznych wykonywanych w ramach krajowych i międzynarodowych projektów. W artykule omówiono kompleksowy zakres działalności zespołów badawczych Katedry Surowców Energetycznych AGH.

Słowa kluczowe: geotermia, geoenergetyka, systemy geotermalne, rozproszone zasoby ciepła i/lub chłodu, inteligentne sieci ciepłownicze

Budynki mieszkalne w Polsce mają duży potencjał redukcji emisji dwutlenku węgla ze względu na ich silne uzależnienie od najbardziej emisyjnego paliwa kopalnego – węgla. W gospodarstwach domowych w UE najwięcej całego węgla spalanego do ogrzewania przypadało właśnie na Polaków (2019 r.). W rzeczywistości węgiel stanowi 75–85% paliw zużywanych w systemach ciepłowniczych (IEA 2022) i 25% końcowego zużycia energii przez gospodarstwa domowe (GUS 2020). Ponieważ 23,5% wszystkich gospodarstw domowych jest podłączonych do sieci ciepłowniczych (GUS 2022), prawie połowa gospodarstw domowych jest ogrzewana węglem. W związku z tym polska polityka energetyczna (PEP2040) zakłada zakaz ogrzewania opartego na węglu na obszarach miejskich do 2030 r. oraz na obszarach wiejskich do 2040 r. (Rada Ministrów 2021). PEP2040 ma również na celu osiągnięcie 100% ogrzewania gospodarstw domowych, które będzie dostarczane przez sieci ciepłownicze lub

systemy zero-/niskoemisyjne do 2040 r. Aby osiągnąć ten ambitny cel, konieczne będzie włożenie znacznego wysiłku w dekarbonizację energii, szczególnie w sektorze budynków mieszkalnych. Zakończenie uzależnienia od węgla jest w dużej mierze postrzegane jako przejście na systemy grzewcze niskoemisyjne (tj. gazowe i pompy ciepła oraz geotermalne), a także renowacje budynków (IEA 2022).

Jednak niestabilne warunki geopolityczne, niepewność energetyczna i zakłócenia w dostawach, których ostatnio doświadczone (Hiszpania 2025), uwydatniły potrzebę solidnej strategii przyspieszenia przejścia na zieloną energię i zmniejszenia zależności od paliw kopalnych. To może stanowić odpowiedź na pytanie, dlaczego pompy ciepła i geotermia zyskują na popularności wśród Polaków. Biorąc pod uwagę, że ceny węgla stale rosną, konieczność unikania paliw kopalnych zapewnia intensywne wsparcie finansowe w ramach programu Czyste Powietrze.

Chociaż energia geotermalna oferuje znaczny potencjał do produkcji ogrzewania i do chłodzenia, jej popularność wciąż jest bardzo niska. Aby przyspieszyć elektryfikację ciepłownictwa z wykorzystaniem pomp ciepła, należy akcentować atrakcyjność tej technologii (np. jej korzystny wpływ na koszty ogrzewania) oraz budować do niej zaufanie. Dlatego też badanie technicznej wykonalności i opłacalności geotermii jest niezbędne do określenia jej konkurencyjności, wpływu ekonomicznego i wydajności.

Geotermia jest uważana za źródło czystej i niezawodnej energii. Jej połączenie z pompami ciepła może w znaczącym stopniu pomóc w dekarbonizacji sektora ogrzewania i chłodzenia. Ponadto gruntowe i geotermalne pompy ciepła o sprawności (COP) do 500% mogłyby przyczynić się do osiągnięcia celów efektywności energetycznej. Jednak wysokie koszty instalacji (głównie otworów geotermalnych) ograniczyły ich powszechne przyjęcie w porównaniu z innymi niskoemisyjnymi alternatywami grzewczymi (głównie z gazem ziemnym).

Jedną z najkosztowniejszych części systemów geotermalnych są otwory i wymienniki ciepła w otworach wiertniczych. W ciągu ostatnich dziesięciu lat wielu naukowców opublikowało analizy techniczno-ekonomiczne gruntowych i geotermalnych pomp ciepła. Opublikowano ważne spostrzeżenia na temat płytkiej geotermii i wymaganych osiągnięć z punktu widzenia ekonomicznego. Odbyło się wiele debat na temat konkurencyjności geotermii i pomp ciepła oraz zwrotu z inwestycji przy odchodzeniu od ogrzewania węglowego.

1. Zespoły i grupy badawcze

1.1. Zespół badawczy

Laboratorium Geoenergetyki

Zakres prac naukowych zespołu koncentruje się na badaniach otworowych wymienników ciepła, wykonywaniu i interpretacji testów reakcji termicznej. Zespół opracowuje podziemne magazyny ciepła oraz koncepcje geotermalnego ucieplownienia gmin, a także konstrukcje otworów geotermalnych w dubletach; analizuje rozmieszczenia, głębokości i liczby otworowych wymienników ciepła; prognozuje eksploatację wód geotermalnych; prowadzi konsultacje wiertnicze w geotermii i geoenergetyce; wykonuje badania zaczynów uszczelniających w geoenergetyce i geotermii; bada i analizuje działania w geotermii i geoenergetyce; proponuje zaawansowane systemy geotermalne/geoenergetyczne.

Ostatnie projekty badawcze:

- a) Innowacje w podziemnym magazynowaniu ciepła za pośrednictwem otworowych wymienników ciepła, numer kontraktu NOR/POLNOR/BHEsINNO/0018/2019-00.
- b) Głęboki otworowy wymiennik ciepła na bazie wybranego negatywnego otworu geotermalnego, numer kontraktu SKN/SP/495846/2021.

Szczegółowy opis badań, analiz i opracowań zespołu przedstawia się następująco.

- Testy Reakcji Termicznej (TRT)

Określanie efektywnej przewodności cieplnej λ_{eff} w otworowych wymiennikach ciepła oraz ich oporności termicznej R_b w celu zaprojektowania tzw. liczby i rozmieszczenia otworów (tzw. dolnego źródła ciepła) gruntowej pompy ciepła. Projektowanie TRT, wykonanie oraz interpretacja wyników.

- Dyspersyjne Testy Reakcji Termicznej (DTRT)

Opracowanie testów TRT z pomiarem i rejestracją wartości temperatur w otworze na różnych głębokościach otworowego wymiennika ciepła z założonym symetrycznym interwałem. Zaprojektowanie DTRT, wykonanie oraz interpretacja wyników.

- Testy Przewodnictwa oraz Testy Rezystancji

Opracowanie testów TP oraz TR otworowych wymienników ciepła dla bardzo dużych pól wymienników – testy umożliwiają optymalizację eksploatacji otworowych wymienników ciepła o bardzo dużej ich liczbie, definiując różnicę między parametrami wymienników otworowych a technologiami ich eksploatacji. Pozwala to na obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Obydwa testy (TP i TR) bazują na kilku testach reakcji termicznej TRT. Zaprojektowanie TP i TR, wykonanie oraz interpretacja wyników.

- Profilowanie temperatury otworów

Działanie badawcze umożliwia określenie średniej temperatury w otworze wiertniczym oraz rozkładu temperatury na całej długości/głębokości, a także wskazanie dynamiki zmian temperatury w otworze w takich momentach jak np. zakończenie wiercenia i uszczelnianie.

- Testy hydrauliczne

Określanie teoretycznej i rzeczywistej charakterystyki hydraulicznej otworowych wymienników ciepła o różnych konstrukcjach.

- Analizy geoenergetyczne

Określanie koncepcji dolnego źródła ciepła z wymiennikami otworowymi (projekt) na podstawie własności termicznych skał lub za pomocą otworu badawczego; zaprojektowanie liczby potrzebnych otworowych wymienników ciepła, ich głębokości, odległości pomiędzy nimi, konstrukcji, trajektorii osi otworów oraz ich rozmieszczenia. Parametry zależą od wielkości zapotrzebowania na ciepło/chłód oraz specyfiki obciążenia.

Wskazanie potencjalnych osiągnięć energetycznych dolnego źródła ciepła z wymiennikami otworowymi na podstawie projektu. Projekt określa własności termiczne skał lub parametry otworu badawczego, szacuje liczbę otworowych wymienników ciepła, ich głębokości, odległości pomiędzy nimi, konstrukcję, trajektorie osi otworów oraz ich rozmieszczenie. Analiza wskazuje możliwe obciążenia grzewcze/chłodnicze i możliwości ich sezonowego rozkładu.

Wytyczenie: potencjalnych osiągnięć energetycznych dolnego źródła ciepła z otworowymi wymiennikami ciepła (tj. mocy grzewczych/chłodniczych i ilości wymienianego ciepła); możliwych wariantów sezonowego obciążania otworowych wymienników ciepła; doboru źródeł dodatkowych przy niedoborach ciepła/chłodu dla obciążeń chwilowych albo do magazynowania energii w górotworze (ciepła/chłodu); własności termicznych skał lub parametrów otworu badawczego (efektywnej przewodności cieplnej w otworze i oporności termicznej wymiennika otworowego na bazie wykonanych testów lub dostarczonych wyników testów); liczby otworów, wymaganej głębokości, odległości pomiędzy nimi, konstrukcji, trajektorii osi otworów oraz ich rozmieszczenia; parametrów eksploatacyjnych pojedynczego otworowego wymiennika ciepła albo całego pola otworów.

- Wsparcie inwestorów

Dotyczy zwłaszcza samorządów, w zakresie: projektowania, wiertnictwa, wyboru wykonawców, konsultacji, a także opracowania SWZ (specyfikacja warunków zamówienia).

- Prace kontrolne

Wykonywanie prac kontrolnych obejmujących prawidłowość wykonania projektów i prac wiertniczych dotyczących geotermii i podziemnego magazynowania energii (ciepła/chłodu).

- Ekspertyzy specjalistyczne

Opracowanie ekspertyz specjalistycznych w zakresie geotermii i podziemnego magazynowania energii (ciepła/chłodu).

- Opracowywanie koncepcji/projektów

Działania badawcze w zakresie opiniowania, udostępniania i wykorzystania ciepła niskotemperaturowego w postaci wód podziemnych, otworowych wymienników ciepła, ciepła odpadowego oraz antropogenicznego, a także magazynowania takiego ciepła.

1.2. Zespół badawczy Geoenergia –

Laboratorium Zaawansowanych Metod Wydobycia Węglowodorów i Magazynowania Energii

Zespół wykonuje badania laboratoryjne i modelowe związane z badaniem procesów przepływu płynów w ośrodku porowatym oraz własności płynów w warunkach złożowych, a także dotyczące zrównoważonego i optymalnego wydobycia węglowodorów, eksploatacji złóż geotermalnych oraz procesów zatłaczania płynów i magazynowania energii w strukturach geologicznych. Zespół posiada wieloletnie doświadczenie w badaniach laboratoryjnych i modelowych, zdobyte w trakcie realizacji grantów badawczych oraz prac badawczych dla przemysłu i potwierdzone publikacjami naukowymi.

W ramach badań naukowych zespół wykonuje: badania procesów przepływu płynów w ośrodku porowatym; badania własności płynów złożowych oraz płynów technologicznych wykorzystywanych w eksploatacji węglowodorów, złóż geotermalnych i procesach zatłaczania płynów do struktur geologicznych; analizy wykorzystania wyników badań laboratoryjnych w procesach optymalizacji wydobywania.

1.3. Grupa badawcza Odnawialne Źródła Energii

Obszary działalności grupy badawczej Odnawialne Źródła Energii koncentrują się na zagadnieniach związanych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, i uwzględnieniem energii geotermalnej oraz pomp ciepła. Szczególną uwagę poświęca się lokalnemu rozpoznaniu możliwości efektywnego wykorzystania geotermii głębokiej i płytkiej, a także wdrażaniu innowacyjnych technologii w tym zakresie.

W ramach realizowanych projektów badawczych grupa prowadzi prace dotyczące oceny potencjału geotermalnego wybranych obszarów Polski oraz wskazywania lokalizacji szczególnie predysponowanych do zagospodarowania wód i energii geotermalnej. Określa także spodziewane efekty energetyczne i ekologiczne funkcjonowania planowanych instalacji.

Grupa prowadzi analizy efektywności pracy pomp ciepła w różnych warunkach oraz dobór odpowiednich rozwiązań technologicznych do warunków rzeczywistych. Testuje i ocenia systemy integrujące różne instalacje oparte na lokalnych odnawialnych źródłach energii, z uwzględnieniem potrzeby ograniczania zagrożeń środowiskowych, społecznych i ekonomicznych.

Działalność grupy obejmuje również ocenę potencjału energetycznego odnawialnych źródeł energii dla odbiorców indywidualnych, jednostek samorządu terytorialnego oraz szerszych społeczności. W jej kręgu zainteresowań badawczych znajduje się analiza oraz opracowywanie innowacyjnych rozwiązań technologicznych w zakresie OZE, ich promocja i upowszechnianie, a także działania na rzecz poprawy stanu środowiska naturalnego.

W ramach prac badawczych realizowane są analizy możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w wybranych lokalizacjach, oceny ich potencjału energetycznego oraz określenie efektów ekologicznych i ekonomicznych ich zastosowania. Zakres działań obejmuje również edukację, promocję i popularyzację wiedzy na temat OZE.

Grupa prowadzi także badania nad geotermią głęboką i płytką, projektowaniem instalacji geotermalnych, dobozem pomp ciepła oraz tworzeniem systemów opartych na tych technologiach. Szczególny nacisk kładzie na wdrażanie innowacyjnych rozwiązań oraz integrację różnych nośników energii – w tym odnawialnych – z wykorzystaniem metod geofizycznych i modelowań numerycznych do rozpoznania i analizy systemów geotermalnych.

1.4. Grupa badawcza Zrównoważone Zarządzanie Wodą i Energią

Obszar działalności grupy badawczej Zrównoważone Zarządzanie Wodą i Energią koncentruje się na zagadnieniach racjonalnego i efektywnego wykorzystania zasobów wodnych w kontekście surowcowym i energetycznym, ze szczególnym uwzględnieniem wód leczniczych i geotermalnych oraz wód powierzchniowych i podziemnych stosowanych zarówno w energetyce konwencjonalnej, jak i odnawialnej (geotermia, hydroenergetyka).

Zakres podejmowanych prac badawczo-naukowych obejmuje modelowanie hydrodynamiczne i geochemiczne głębokich struktur wodonośnych, uwzględniające modele o zasięgu regionalnym. Zastosowanie znajdują także metody geofizyczne wykorzystywane w analizach hydrogeologicznych i hydrogeotermalnych. Szczególną rolę odgrywa wykorzystanie narzędzi i funkcjonalności systemów GIS, jak również prowadzenie badań układu woda-skała w kontekście prognozowania wytrącania osadów wtórnych w instalacjach geotermalnych, co pozwala na przewidywanie zjawisk scalingu i kolmatacji.

W ramach prac grupa uwzględnia również podejście *life cycle assessment* (LCA) w analizach środowiskowych, a także opracowywanie koncepcji racjonalnego wykorzystania wód i energii geotermalnej w systemach kaskadowych. Prowadzi badania nad zastosowaniem technik membranowych w uzdatnianiu wód geotermalnych w celu uzyskania wody przeznaczonej do spożycia oraz dla celów gospodarczych.

Grupa dużą wagę przywiązuje do opracowywania rozwiązań technologicznych umożliwiających pozyskanie produktów użytkowych na bazie wód leczniczych i geotermalnych, takich jak koncentraty, sole lecznicze, czy produkty wykorzystywane w kosmologii, balneologii i rekreacji. Analizuje również możliwości odzysku pierwiastków użytecznych z wód geotermalnych oraz zastosowania odnawialnych źródeł energii w procesach ich uzdatniania, ze szczególnym naciskiem na ocenę potencjału geotermii niskotemperaturowej.

Dodatkowo grupa prowadzi badania nad efektywnym usuwaniem niepożądanych składników chemicznych, takich jak arsen i bor, a także nad oceną stabilności eksploatacji zasobów wód leczniczych i geotermalnych. Prace obejmują również analizę efektywności energetycznej systemów geotermalnych oraz procesów uzdatniania wód, a także ocenę potencjału wykorzystania wód i energii geotermalnej w rolnictwie.

Ważnym aspektem badań jest poprawa i konsolidacja systemów zarządzania zasobami wodnymi w sposób odporny na zmiany klimatu oraz integracja rozwiązań w zakresie zarządzania wodą i energią w celu wspierania procesów adaptacyjnych. Uwzględniana jest także problematyka zwiększania efektywności magazynowania wody i energii.

Grupa realizuje swoje prace badawcze, bazując na modelowaniu numerycznym, badaniach laboratoryjnych oraz pilotażowych, z wykorzystaniem zaplecza aparaturowego WGGiOŚ AGH oraz we współpracy z jednostkami naukowo-badawczymi, takimi jak Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Politechnika Śląska oraz Politechnika Wrocławska. W ramach projektów komercyjnych zespół realizuje analizy studialne, ekspertyzy oraz badania obejmujące projektowanie i dokumentowanie zasobów eksploatacyjnych ujęć wód i zasobów dyspozycyjnych rozpatrywanych struktur geologicznych, typowanie miejsc do eksploatacji zasobów, badania hydrodynamiczne i hydrogeochemiczne, energetyczne i środowiskowe, w tym LCA. Grupa prowadzi szeroki zakres prac, od badań podstawowych do projektów badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych, popartych

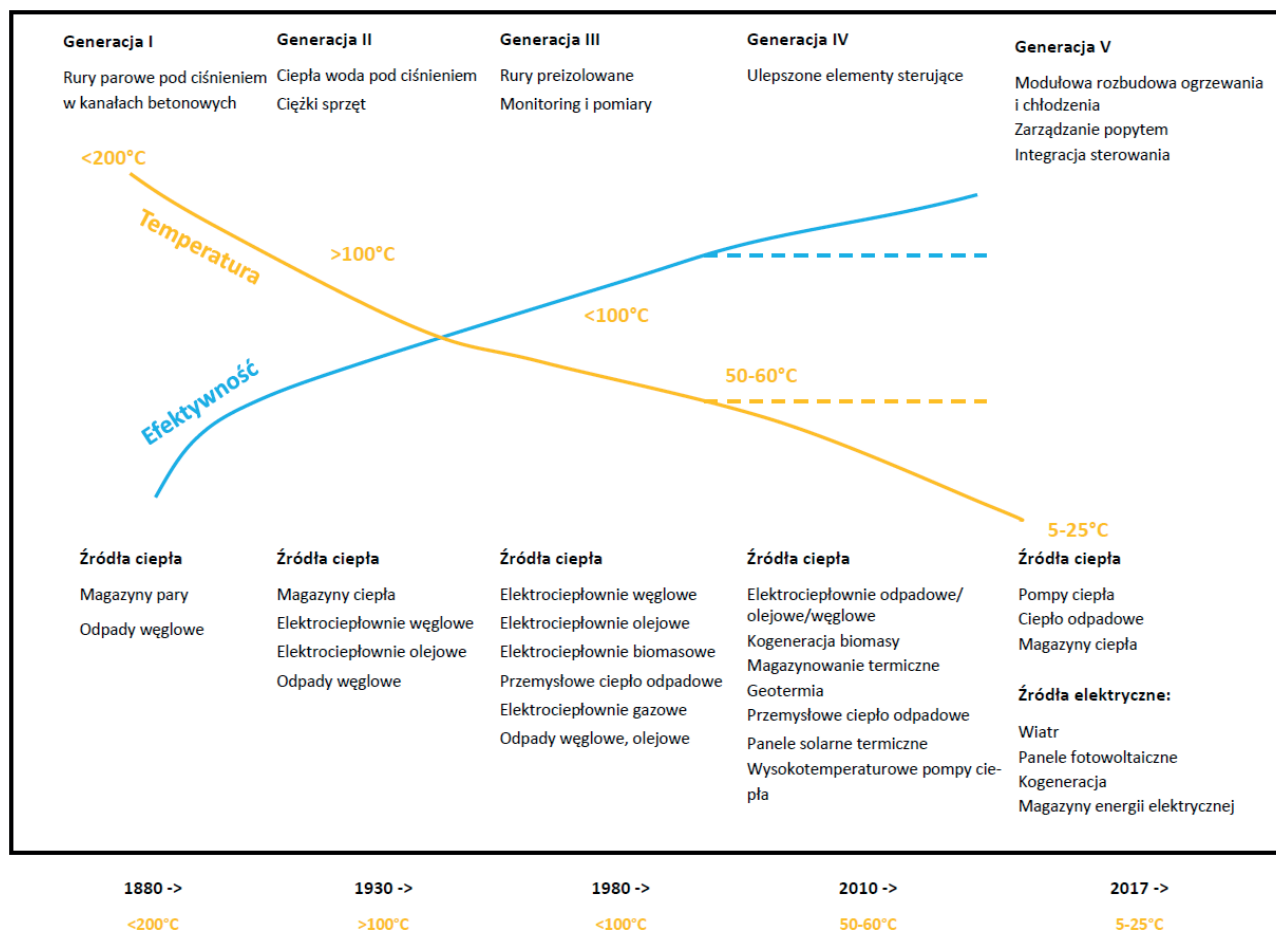
opracowaniem koncepcji technologicznych i oceną efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych inwestycji.

2. Geotermia w systemach inteligentnych sieci ciepłowniczych piątej generacji

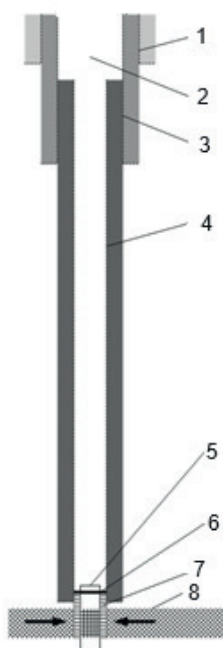
Opisane poniżej badania naukowe dotyczą optymalizacji konstrukcji oraz eksploatacji wód podziemnych – w tym przede wszystkim geotermalnych (pow. 20 °C) – utrzymania chłonności otworów iniekcyjnych, mineralizacji wód, wytrącania minerałów wtórnych, korozji, a także możliwości uwzględnienia w konstrukcjach otworów poszukiwawczych różnych złóż elementów ułatwiających (redukujących koszty) przekwalifikowanie na otwór geotermalny (produkcyjny i/lub chłonny).

Inteligentne sieci ciepłownicze piątej generacji umożliwiają równoczesne ogrzewanie i chłodzenie (klimatyzację) obiektów (Rys. 1). Ich realizacja może być rozpoczęta w dowolnym miejscu istniejącej sieci, niezależnie od jej generacji, pod warunkiem, że odbiorcy będą przystosowani do sieci piątej generacji. Główną funkcją węzłów ciepłych u takich odbiorców jest możliwość pozyskiwania ciepła niskotemperaturowego z sieci do ogrzewania i chłodu do klimatyzacji. Oznacza to, że odbiorcy muszą posiadać rewersyjne pompy ciepła lub pompy ciepła jednokierunkowe, gdy wymagane jest tylko ogrzewanie lub chłodzenie. Ciepło pobierane z sieci jest równocześnie „wprowadzaniem do niej chłodu”, i odwrotnie, pobierany chłód jest wprowadzaniem ciepła. Integralnym elementem sieci muszą być magazyny ciepła i chłodu, znane jako magazyny ciepła. Najbardziej sensowne są wielkoskalowe podziemne magazyny ciepła.

Przykładem działającej sieci piątej generacji jest ogrzewanie u odbiorców ciepła w Kazimierzy Wielkiej i w Cudzynowicach (woj. świętokrzyskie). Dublet otworów geotermalnych umożliwia pozyskiwanie i zatłaczanie wód o temperaturze 29 °C z utworów cenomańskich (górna kreda). Przykład typowego geotermalnego otworu produkcyjnego został przedstawiony na Rys. 2.



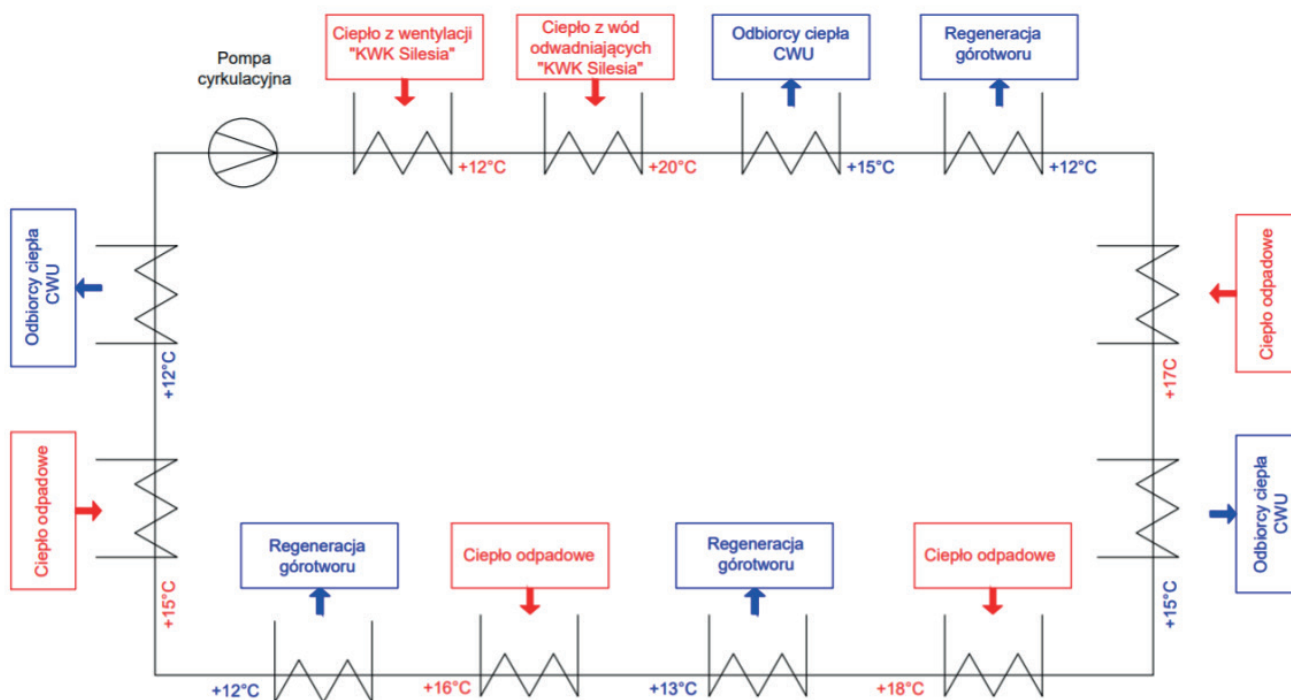
Rys. 1. Ewolucja sieci ciepłowniczych



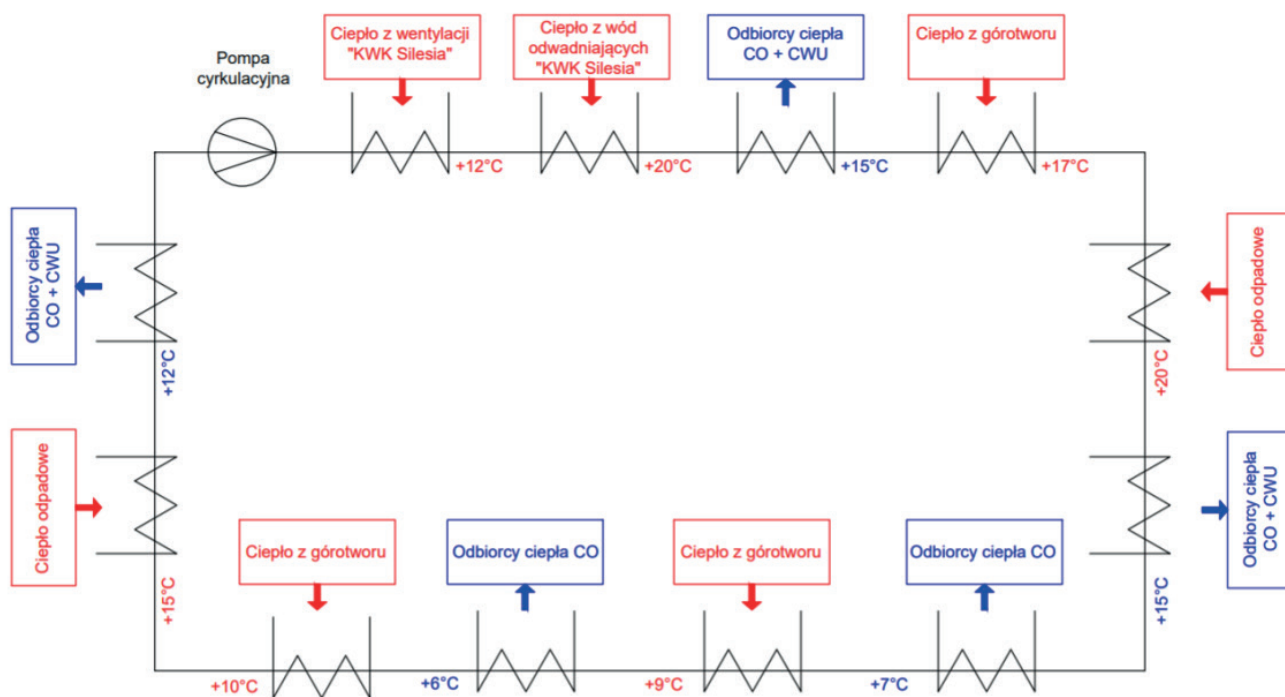
Rys. 2. Schemat konstrukcji otworu geotermalnego (eksploatacyjnego): 1 – kolumna wstępna, 2 – komora pompowa, 3 – kolumna przewodnikowa, 4 – kolumna techniczna, 5 – filtr, 6 – paker z wieszakiem, 7 – obsypka żwirowa, 8 – warstwa geotermalna (Sapińska-Śliwa et al. 2017)

Innym przykładem zastosowania sieci piątej generacji jest koncepcja opracowana dla ogrzewania i klimatyzacji

miasta Czechowice-Dziedzice. Na Rys. 3 pokazano przykład działania systemu w lecie, a na Rys. 4 zimą.



Rys. 3. Uproszczony (poglądowy) schemat pracy sieci 5G DHC i działania w lecie (DHC – district heating-cooling) (Śliwa et al. 2022)



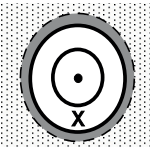
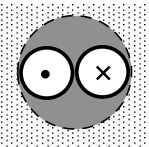
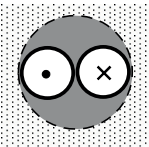
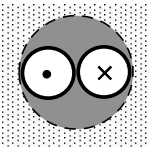
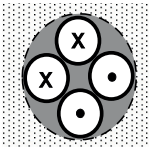
Rys. 4. Uproszczony (poglądowy) schemat pracy sieci 5G DHC i działania w zimie (DHC – district heating-cooling) (Śliwa et al. 2022)

Jedynym układem sieci 5G w Polsce jest układ (na razie w skali mikro) działający na bazie utworów Cudzynowice GT-1 oraz Cudzynowice GT-2. Intensywnie promowany projekt zwany Ciepłownia Przyszłości (m.in. przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska) w Lidzbarku Warmińskim jest układem czwartej generacji. Należy zadbać o większą promocję instalacji w Świętokrzyskiem. W grudniu 2025 r. odbędzie się uroczyste otwarcie instalacji połączone z pierwszą Barbórką geotermalną w Polsce w ramach V seminarium „Geoenergetyka i Geotermalne Pompy Ciepła”.

Mikrosiecią wysokiej generacji (z roztworem glikolu monopropylenowego krążącego w rurach, z temperaturami spadającymi poniżej 0 °C) jest

Laboratorium Geoenergetyki AGH. W systemie działa wiele otworowych wymienników ciepła o konstrukcjach pokazanych w Tab. 1–4. Dodatkowo pracuje dublet studni z wodą o temperaturze 12 °C. Układ cyrkulacyjny poza otworami i wodą podziemną zawiera pompy ciepła (Rys. 5), kolektory słoneczne (Rys. 6) oraz układ odśnieżania parkingu o powierzchni 250 m² (Rys. 7) pełniący w lecie rolę kolektora słonecznego i termowentylator (Rys. 8) pełniący funkcję dry coolera. Ciepło/chłód są wykorzystywane do ogrzewania i klimatyzacji sali audytoryjnej na 150 osób w pawilonie A4 oraz korytarzy w pawilonie D2. Otwory w Młoszowej będą wykorzystane w obiektach zespołu pałacowo-parkowego.

Tab. 1. Konstrukcje otworowych wymienników ciepła na polu badawczym A w Krakowie (rok wykonania 2008)

Parametr	Nazwa otworowego wymiennika ciepła				
	LG-1a	LG-2a	LG-3a	LG-4a	LG-5a
Konstrukcja	rura okładzinowa PE o średnicy 90 mm i grubości ścianki 5,4 mm, rura wewnętrzna PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	pojedyncza U-rurka PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	pojedyncza U-rurka PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	pojedyncza U-rurka PE o średnicy 40 mm i grubości ścianki 2,4 mm	podwójna U-rurka PE o średnicy 32 mm i grubości ścianki 2,4 mm
Konstrukcja (zobrazowanie)					
Głębokość otworowego wymiennika ciepła, m	78	82	78	78	78
Głębokość zapuszczenia rurek wymiennika, m	78	78	78	78	78
Wypełnienie (uszczelnienie) otworu	zaczyn uszczelniający na bazie cementu	zaczyn uszczelniający na bazie cementu	zaczyn uszczelniający (ThermoCem) na bazie cementu o podwyższonej przewodności cieplnej	żwir o granulacji od 8 do 16 mm oraz dwa korki itowe – Compactonit	zaczyn uszczelniający na bazie cementu
Przewodność cieplna materiału wypełniającego, W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	$\lambda = 1,2$	$\lambda = 1,2$	$\lambda = 2,0$	$\lambda = 1,8$	$\lambda = 1,2$



Rys. 5. Gruntowe pompy ciepła obsługujące część A Laboratorium Geoenergetyki (fot. Tomasz Śliwa)



Rys. 6. Kolektory słoneczne na polu A Laboratorium Geoenergetyki służące regeneracji zasobów ciepła w górotworze (fot. Tomasz Śliwa)



Rys. 7. Układ odsnieżania parkingu; a) montaż i rozmieszczenie rurek; b) konstrukcja parkingu; c) system połączeń umożliwiający łączenie pętli szeregowo, równoległe i w układzie Tichelmana (fot. Albert Złotkowski, Tomasz Śliwa)



Rys. 8. Termowentylator w funkcji dry coolera (fot. Tomasz Śliwa)

Tab. 2. Konstrukcje otworowych wymienników ciepła na polu badawczym B w Krakowie (rok wykonania 2017, Rys. 9–10)

Nr BHE	Konstrukcja OWC	Rodzaj rury	Uszczelnienie
1	2 × U $\varnothing$ 32	rura tradycyjna	TermorotaS
2	1 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector	TermorotaS
3	2 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector	TermorotaS
4	2 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector	TermorotaS
5	1 × U $\varnothing$ 40	rura tradycyjna	TermorotaS
6	1 × U $\varnothing$ 40	TurboCollector	TermorotaS
7	1 × U $\varnothing$ 45	TurboCollector	TermorotaS
8	1 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector + dystansowniki	TermorotaS
9	1 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector	20 m od góry TermorotaS
10	1 × U $\varnothing$ 40 3 rury (2+1)	TurboCollector	TermorotaS
11	1 × U $\varnothing$ 40 3 rury (2+1)	TurboCollector	zaprawa
12	1 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector	cement
13	pierwsza U-rurka: - $\varnothing$ 32 – TurboCollector - $\varnothing$ 40 – TurboCollector druga U-rurka: - $\varnothing$ 32 – kolektor tradycyjny - $\varnothing$ 40 – kolektor tradycyjny		TermorotaS
14	1 × U $\varnothing$ 32	TurboCollector	TermorotaS z grafitem

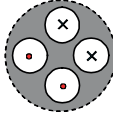
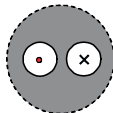
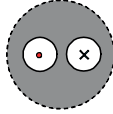
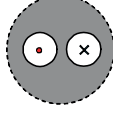


Rys. 9. Wiertnica podczas wiercenia otworów na polu B Laboratorium Geoenergetyki w Krakowie (fot. Tomasz Śliwa)

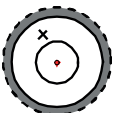
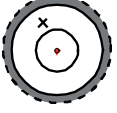
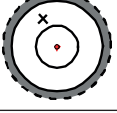
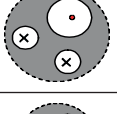
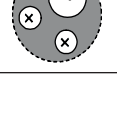


Rys. 10. Rozmieszczenie otworowych wymienników ciepła na polu B Laboratorium Geoenergetyki wierconych ukośnie (kąt początkowy do 13° w stosunku do pionu) (fot. Tomasz Śliwa)

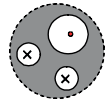
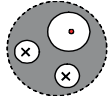
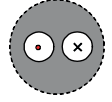
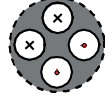
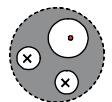
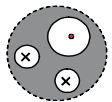
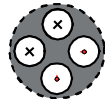
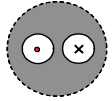
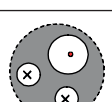
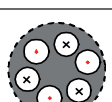
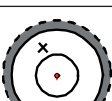
Tab. 3. Konstrukcje otworowych wymienników ciepła na polu badawczym B w Krakowie (rok wykonania 2023)

Nazwa otworu	Konstrukcja	Uszczelnienie	Zewnętrzna średnica U-rury/ przewodność cieplna/gęstość/ciepło właściwe/materiał/producent	Uwagi	Grubość ściany	Głębokość/ długość	Średnica świdra
	-	-	[mm]/[W/(mK)]/[kg/m³]/ [J/(kg K)]/symbol/nazwa	-	mm/mm	m	mm
LG-15b		Beton	1U: 10 (w dół) i 12 (w górę)/390/8940/385/Cu/brak danych 2U: 40/0,42/959/brak danych/PE/ brak danych	Bezpośrednie parowanie (Cu) oraz pomiar (PE)	1U: 1/2U: 3	30/30	Brak danych
LG-16b		Beton	10 (w dół) i 12 (w górę)/390/8940/385/Cu/brak danych	Bezpośrednie parowanie	1	30/30	Brak danych
LG-17b		Bentonit	45/0,42/959/brak danych/PE100 RC/PRAWTECH	Wymiennik horyzontalny - HDD	Brak danych	2/117	Brak danych
LG-18b		Powietrze	45/0,42/959/brak danych/PE100 RC/PRAWTECH	Wymiennik horyzontalny - w kanale	Brak danych	2/40	Brak danych

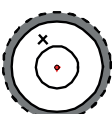
Tab. 4. Konstrukcje otworowych wymienników ciepła na polu badawczym C w Młoszowej (rok wykonania 2022/23)

Nazwa otworu	Konstrukcja	Uszczelnienie	Zewnętrzna średnica rury 1/przewodność cieplna/ gęstość/ciepło właściwe/ materiał/producent	Zewnętrzna średnica rury 2/przewodność cieplna/ gęstość/ciepło właściwe/ materiał/producent	Wall thickness, pipe 1/ pipe 2	BHE depth	Borehole (drillbit) diameter
	-	-	[mm]/[W/(mK)]/[kg/m³]/ [J/(kg K)]/symbol/nazwa	[mm]/[W/(mK)]/[kg/m³]/ [J/(kg K)]/symbol/nazwa	mm/mm	m	mm
LG-1c		TermorotaS	90/0,42/brak danych/brak danych/PE100/ZINPLAST	63/brak danych/brak danych/ brak danych/PE100RC/ ZINPLAST + 40/brak danych/ brak danych/brak danych/ PE100RC SDR 13,6 PN 12,5/ InstalPlast	5,4 + 3,8 + 3,0	77	140
LG-2c		Rehau	91/0,4/1800/ brak danych / fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/brak danych/ PVC/MuoviTech	2,7/4,6	82	140
LG-3c		MuoviTerm	91/0,4/1800/ brak danych / fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/brak danych/ PVC/MuoviTech	2,7 + 4,6	87,5	140
LG-4c		TermorotaS 2,0	91/0,4/1800/ brak danych / fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/brak danych/ PVC/MuoviTech	2,7 + 4,6	83,5	140
LG-5c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	1 × 45 + 2 × 32/brak danych	-	4,1 + 2 × 3,0	90	140
LG-8c		TermorotaS	3 × 40/PE100RC/brak danych	-	2,4 + 2 × 3,7	85	140

Tab. 4. cd.

LG-9c		TermorotaS	3 × 40/PE100RC/brak danych	-	3,7 + 2 × 2,4	87	140
LG-10c		TermoCem	3 × 40/PE100RC/brak danych	-	3,0 + 3,7 + 3,7	88	140
LG-12c		TermorotaS	2 × 50/brak danych	-	2 × 3,0	75	140
LG-13c		TermoCem	4 × 32/brak danych	-	4 × 3,0	82	140
LG-14c		MuoviTerm	90/PE100/brak danych	50/brak danych/brak danych/ brak danych/PE100RC	5,4 + 3,0	85	140
LG-15c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	1 × 45 + 2 × 32/brak danych	-	4,1 + 2 × 3,0	90	140
LG-16c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	1 × 45 + 2 × 40/brak danych	-	4,1 + 2 × 3,7	93	140
LG-17c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	4 × 32/brak danych	-	4 × 3,0	97	140
LG-18c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	2 × 40/brak danych	-	2 × 3,7	100	140
LG-19c		TermoCem	90/PE100/brak danych	32/brak danych/brak danych/ brak danych/PE100RC	5,4 + 3,0	97	140
LG-20c		TermorotaS (450 kg)	90/PE100/brak danych	63/brak danych/brak danych/ brak danych/PE100RC	5,4 + 5,8	85	140
LG-21c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	1 × 50 + 2 × 32/brak danych	-	4,1 + 2 × 3,7	90	140
LG-22c		MuoviTerm	6 × 32/brak danych	-	6 × 3,0	84	140
LG-23c		TermorotaS	90/brak danych/PE100	40/brak danych/brak danych/ brak danych/PE100RC	5,4 + 3,0	90	140

Tab. 4. cd.

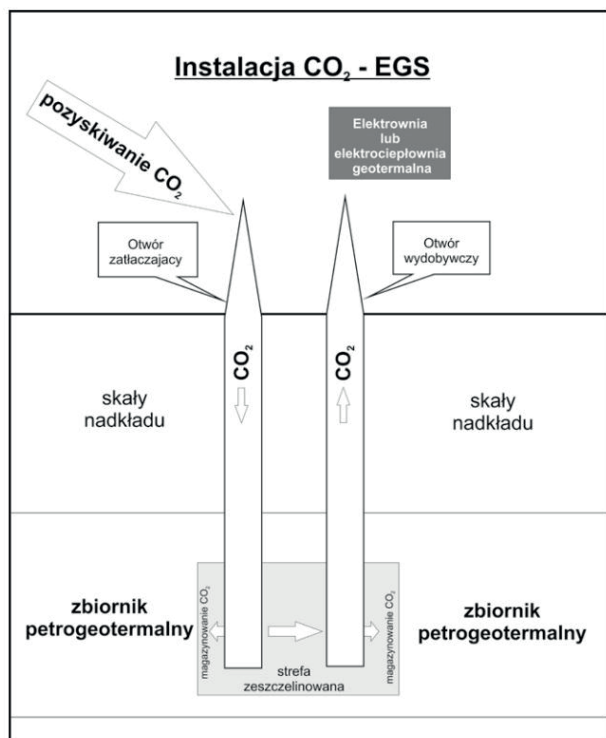
Nazwa otworu	Konstrukcja	Uszczelnienie	Zewnętrzna średnica rury 1/przewodność cieplna/gęstość/ciepło właściwe/materiał/producent	Zewnętrzna średnica rury 2/przewodność cieplna/gęstość/ciepło właściwe/materiał/producent	Wall thickness, pipe 1/pipe 2	BHE depth	Borehole (drillbit) diameter
LG-25c		TermoCem	90/brak danych/PE100	50/brak danych/brak danych/brak danych/PE100RC + 32/brak danych/brak danych/brak danych/PE100RC	5,4 + 3,0 + 3,0	71	140
LG-31c		TermorotaS	91/0,4/1800/brak danych/fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/brak danych/PVC	2,7 + 4,6	96,5	168,3/140
LG-34c		Rehau	90/brak danych/PE100	50/brak danych/PE100RC	5,4 + 3,0	84	140
LG-35c	GRD 9 otworów	Hekoterm	63/brak danych/	32/bak danych/	3,8 + 2,4	30-50 (razem 400)	114,3 (4 ½'') i 92,1 (3 5/8'')

3. Innowacyjne technologie geotermalne – CO₂-EGS

Systemy geotermalne CO₂-EGS to innowacyjne rozwiązanie bazujące na idei wspomaganych systemów geotermalnych (*enhanced geothermal systems*, EGS), jednak w tym przypadku to dwutlenek węgla (nie woda) jest nośnikiem energii. Koncepcja wspomaganych systemów geotermalnych zrodziła się w 1974 r. w Los Alamos National Laboratory w Stanach Zjednoczonych (Olasolo et al. 2016). W przeciwieństwie do powszechnie znanych systemów hydrotermalnych, gdzie energia jest pozyskiwana z gorących wód i/lub par geotermalnych, systemy wspomagane pozyskują energię z gorących formacji skalnych suchych lub niezawierających odpowiedniej ilości wody. Zabiegiem umożliwiającym pozyskanie energii ze zbiornika skalnego jest sztuczne zwiększenie pojemności hydraulicznej zbiornika (wytworzenie sieci spękań, które umożliwią migrację czynnika roboczego przez ośrodek skalny i jego ogrzewanie), kolejno wprowadzenie do danej formacji skalnej medium roboczego będącego nośnikiem energii (w tym przypadku dwutlenku węgla;

najczęściej stosuje się wodę), a następnie doprowadzenie go na powierzchnię w celu wytworzenia energii (Rys. 11).

Systemy CO₂-EGS budzą na świecie duże zainteresowanie, chociażby ze względu na możliwość geologicznego składowania dwutlenku węgla w trakcie procesu wytwarzania energii (część zatłoczonego do zbiornika dwutlenku węgla zostaje trwale zmagazynowana w formacji skalnej), co przekłada się na potencjalne korzyści środowiskowe i ekonomiczne (Olasolo et al. 2016). Na świecie działa obecnie kilkanaście instalacji EGS, a mimo to dotychczas nie wykorzystano dwutlenku węgla jako nośnika energii na skalę komercyjną. Nie mniej jednak, eksperymentalne działanie systemu CO₂-EGS zostało przeprowadzone w Ogachi w Japonii, gdzie dostarczono model zatłaczania dwutlenku węgla do formacji skalnej (Shyi-Min 2018). Ciągłe pozostaje jednak wiele niepewności wynikających z wykorzystania dwutlenku węgla jako medium roboczego we wspomaganych systemach geotermalnych. Niektóre z nich postanowiono rozstrzygnąć w ramach projektu EnerGizerS, którego głównym celem była analiza funkcjonowania systemów CO₂-EGS.

Rys. 11. Schemat systemu CO₂-EGS

Projekt CO₂-Enhanced Geothermal Systems for Climate Neutral Energy Supply, akronim EnerGizerS, numer rejestracyjny NOR/POLNOR/EnerGizerS/0036/2019 uzyskał dofinansowanie w ramach polsko-norweskich projektów badawczych POLNOR 2019 finansowanych z programu Norweskiego Mechanizmu Finansowego. Realizację projektu „EnerGizerS: Niekonwencjonalne systemy geotermalne CO₂-EGS jako systemy energetyczne neutralne dla klimatu” rozpoczęto w październiku 2020 r. Zespół naukowców z polskich i norweskich ośrodków – tj. Akademia Górniczo-Hutnicza 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 Sp. z o.o. (Gliwice, Polska) – przez 42 miesiące analizował możliwości i efektywność funkcjonowania wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) wykorzystujących dwutlenek węgla w stanie nadkrytycznym (sCO₂) jako medium robocze.

Badania przeprowadzone w ramach projektu miały na celu identyfikację i dokonanie szczegółowej

charakterystyki struktur geologicznych potencjalnych dla lokalizacji systemów CO₂-EGS w krajach partnerskich, łącząc wymagania technologii wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) oraz sekwestracji dwutlenku węgla (CCS). W ramach sześciu pakietów roboczych przeprowadzone zostały kompleksowe badania laboratoryjne na próbkach rdzeni wiertniczych pobranych z odpowiednich struktur geologicznych; modelowanie matematyczne ośrodka skalnego; eksperymentalne określenie właściwości i sposobu zachowania się płynów roboczych (CO₂), a także modelowanie matematyczne bazujących na CO₂ systemów napowierzchniowych do produkcji ciepła i energii. Wszystkie przeprowadzone testy i analizy stanowiły podstawę do przeprowadzenia oceny techniczno-ekonomicznej i środowiskowej proponowanej technologii.

Główne cele projektu zakładały rozwój wspomaganych systemów geotermalnych wykorzystujących nadkrytyczny dwutlenek węgla jako płyn roboczy w kierunku jego praktycznego wdrożenia oraz ocenę zasadności połączenia dwóch analizowanych technologii (EGS i CCS) w celu łagodzenia antropogenicznych zmian klimatu, przy jednoczesnym zaspokojeniu potrzeb energetycznych.

Niezwykle istotnym aspektem była również wymiana wiedzy i cennych doświadczeń w zakresie wykorzystania energii geotermalnej i sekwestracji dwutlenku węgla między partnerami projektu, w celu określenia najlepszych ram dla technologii CO₂-EGS oraz ograniczenia ryzyka dla przyszłych inwestycji geotermalnych, a także intensyfikacja współpracy międzynarodowej z perspektywą podejmowania wspólnych inicjatyw na rzecz rozwoju energetyki geotermalnej w przyszłości. Projekt EnerGizerS zakończył się z sukcesem w marcu 2024 r., a uzyskane wyniki stały się przedmiotem licznych publikacji naukowych (Gładysz et al. 2024, Miecznik et al. 2024, Pająk et al. 2021, Sowizdżał et al. 2022, 2023, Stang et al. 2024, Starczewska et al. 2025, Strojny et al. 2024, Tagliaferri et al. 2022).

Efekty projektu EnerGizerS przybliżają wdrożenie technologii CO₂-EGS, co było głównym celem

przedsięwzięcia. Jako rezultat końcowy polsko-norweskie konsorcjum dostarczyło kompleksową analizę funkcjonowania instalacji CO₂-EGS, łączącą aspekty produkcji czystej energii geotermalnej z sekwestracją dwutlenku węgla. Przeprowadzone badania laboratoryjne – zarówno w zakresie określenia parametrów skał zbiornikowych, jak i zachowania CO₂ – dostarczyły cennych danych do modelowania, a jednocześnie wzbogaciły aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie. Wyniki wykazały efektywność energetyczną, ekonomiczną i ekologiczną instalacji CO₂-EGS w Polsce i Norwegii, dostarczając wiedzy niezbędnej do rozwoju technologii wspomaganych systemów geotermalnych z wykorzystaniem nadkrytycznego dwutlenku węgla jako medium roboczego (CO₂-EGS) i przybliżając budowę pilotażowych instalacji CO₂-EGS dzięki identyfikacji konkretnych lokalizacji testowych: w Polsce – lokalizacja lądowa – blok Gorzów (skały wulkaniczne dolnego permu na głębokości 4100–4300 m p.p.t. i temperaturze 145 °C) oraz w Norwegii – lokalizacja morska – formacja Åre na Morzu Norweskim (skały osadowe na głębokości 4600–4800 m p.p.t. i temperaturze 166 °C). Zaproponowane i przebadane przypadki z punktu widzenia oceny ekonomicznej otwierają nową perspektywę dla rozwoju i oceny tych nowatorskich systemów pozyskania energii geotermalnej. Dla wybranych lokalizacji przeprowadzono ocenę techniczno-ekonomiczną i środowiskową, a także modelowanie zbiorników geologicznych oraz systemów powierzchniowych bazujących na CO₂ do produkcji ciepła i energii elektrycznej. W tym celu wykorzystano wyniki kompleksowych badań laboratoryjnych skał zbiornikowych przeprowadzonych w laboratorium AGH oraz eksperymentów mających na celu określenie właściwości i zachowania płynów roboczych CO₂-EGS, przeprowadzonych w laboratoriach SINTEF. Wskazują one, że możliwe jest zbudowanie systemów CO₂-EGS o mocach od 0,4 MW_{el} do 12 MW_{el} oraz 9 MW_{th} przynoszących korzyści środowiskowe i ekonomiczne. Lokalizacja jest jednym z najważniejszych aspektów wpływających na rezultaty projektu. Pomimo pierwotnej koncepcji systemów CO₂-EGS jako

obiecującego źródła produkcji energii elektrycznej, główne źródła ich opłacalności ekonomicznej to sprzedaż ciepła lub sam proces magazynowania CO₂. Wyniki te mogą zostać wykorzystane do rozwoju zarówno sektora geotermalnego, jak i CCS (wychwytywania i składowania dwutlenku węgla), gdyż dostarczają wiedzy w kontekście pilotażowych instalacji CO₂-EGS w krajach partnerskich.

Szczegółowe wyniki prac zostały przedstawione w raportach projektowych, a kluczowe rezultaty ujęto w broszurze informacyjnej projektu EnerGizerS, która jest dostępna na stronie internetowej (Materiały informacyjne, Projekt EnerGizerS).

4. Głęboka geotermia

Energia geotermalna to czyste i ekologiczne źródło energii odnawialnej, którego wykorzystanie niesie ze sobą wiele korzyści. Efektywne zagospodarowanie zasobów geotermalnych wymaga przede wszystkim ich odpowiedniego rozpoznania oraz zastosowania technologii umożliwiających ekonomiczną produkcję energii użytecznej.

Historia rozwoju (wykorzystania) geotermii w Polsce ma już ponad 30 lat (nie licząc działalności uzdrowiskowej z ciepłymi wodami) – właśnie tyle doświadczeń zgromadził zespół pracowników Katedry Surowców Energetycznych Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej (KSE WGGiOŚ AGH), który od samego początku aktywnie uczestniczy w rozwoju tego sektora.

Tematyka geotermalna rozwijana jest w AGH od 1987 r., kiedy to na WGGiOŚ powołano Zakład Geotermii, skupiający interdyscyplinarną grupę specjalistów. Prowadzone wówczas badania podstawowe łączyły się z pracami nad praktycznym wykorzystaniem gorących wód podziemnych do celów użytkowych.

Obecnie pracownicy Katedry kontynuują rozwój geotermii głębokiej w Polsce, realizując projekty badawczo-rozwojowe oraz wdrożeniowe, przede wszystkim w ramach dwóch grup badawczych: Odnawialne Źródła Energii oraz Zrównoważone Zarządzanie

Wodą i Energią, będących częścią większego zespołu naukowego Geoenergia. Działalność naukowo-badawcza zespołu w zakresie geotermii głębokiej przyczyniła się do udostępnienia zasobów geotermalnych w wielu regionach Polski.

Oprócz działalności badawczej na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska prowadzona jest także praca dydaktyczna mającą na celu kształcenie kadr dla sektora geotermalnego w Polsce i za granicą (kierunek ekologiczne źródła energii). Prace badawcze i dydaktyczne prowadzone są m.in. w nowoczesnym specjalistycznym Centrum Zrównoważonego Rozwoju i Poszanowania Energii AGH WGGiOŚ w Miękinii wyposażonym w instalacje naukowo-dydaktyczne z zakresu odnawialnych i ekologicznych źródeł.

Od samego początku rozwoju sektora geotermii w Polsce w KSE realizowane są projekty badawczo-rozwojowe oraz wdrożeniowe dotyczące tematyki geotermalnej. Szczególne odzwierciedlenie w realizacji prac wdrożeniowych znalazła znana w całej Polsce i szeroko wykorzystywana seria atlasów geotermalnych (Górecki 2006a, 2006b, 2011, 2012, 2013). Stanowią one podstawowe źródło informacji o występowaniu oraz możliwościach eksploatacji wód termalnych na obszarze Niżu Polskiego, Karpat oraz zapadliska przedkarpackiego, a dzięki wskazaniu obszarów perspektywicznych w zakresie lokalizacji nowych instalacji geotermalnych także bodziec do podejmowania lokalnych działań inwestycyjnych pozwalających na udostępnienie energii geotermalnej (Górecki et al. 2015).

Atlasy wydane przez Katedrę Surowców Energetycznych stanowią posumowanie prac badawczych prowadzonych przez interdyscyplinarny zespół badawczy w Akademii Górniczo-Hutniczej, przy współpracy z wieloma instytucjami naukowymi w Polsce i na świecie. Zostały one docenione przez projektujących instalacje badawcze w Polsce poprzez wdrażanie rezultatów znajdujących się w atlasach do licznych prac realizowanych na obszarze Polski. Znajdują także potwierdzenie w efektach prac nad nowymi otworami geotermalnymi wierconymi obecnie w Polsce (Sowiżdżał et al. 2021a).

W kolejnych latach były podejmowane prace badawcze zmierzające do rozpoznania możliwości zagospodarowania polskich zasobów geotermalnych do produkcji energii elektrycznej zarówno przy wykorzystaniu zasobów hydrogeotermalnych (Bujakowski et al. 2014), jak i petrogeotermalnych (Wójcicki et al. 2013). Były to pierwsze w Polsce badania w tym zakresie realizowane przez konsorcja, w skład których wchodziły wiodące jednostki badawcze. Prace te są kontynuowane obecnie, a ich wyniki znajdują odzwierciedlenie w realizowanych działaniach (Gładysz et al. 2020, Sowiżdżał et al. 2021b) i projektach badawczych.

W ostatnich latach pracownicy Katedry Surowców Energetycznych byli lub nadal są zaangażowani w realizację krajowych oraz międzynarodowych projektów geotermalnych z udziałem partnerów krajowych i zagranicznych dotyczących zagadnień geotermalnych.

Wśród licznych projektów należy wymienić:

- Projekt EnerGizerS (2020–2024) – projekt międzynarodowy „CO₂-Enhanced Geothermal Systems for Climate Neutral Energy Supply”, akronim EnerGizerS, numer rejestracyjny NOR/POLNOR/EnerGizerS/0036/2019, realizowany w ramach polsko-norweskich projektów badawczych POLNOR 2019 finansowanych przez Fundusze Norweskie za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.
- Projekt LIFE-IP EKOMAŁOPOLSKA „Wdrażanie Regionalnego Planu Działań dla Klimatu i Energii dla województwa małopolskiego” LIFE19 IPC/PL/000005 – LIFE – IP EKOMAŁOPOLSKA, środki instrumentu finansowego LIFE w ramach środków Unii Europejskiej oraz środki z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej; okres realizacji: 2021–2030.
- Międzynarodowy Projekt Bilateralny POLSKO-TURECKI (NCBiR-TUBITAK) POLTUR3/Geo4Food/4/2019: Woda-energia-żywność: Wody geotermalne dla rolnictwa (*Water – Energy – Food Nexus: Geothermal Water for Agriculture*) (akronim Geo4Food); okres realizacji: 2019–2023.

- Międzynarodowy Projekt Bilateralny Polsko-Turecki – „Zagospodarowanie wód geotermalnych: odzysk energii oraz produkcja wody” (*Integrated Management of Geothermal Water: Recovery of Energy And Water*) (akronim: GEOTHERM), finansowany ze środków NCBiR oraz TÜBİTAK; nr projektu POL-TUR2/1/2017; okres realizacji: 2017–2021.

5. Nowe metody poszukiwań i wykorzystania zasobów geotermalnych – założenia projektów URGENT i HOCLOOP realizowanych w ramach Horizon Europe

Energia geotermalna zaliczana jest do odnawialnych źródeł ciepła o istotnym znaczeniu dla bezpośrednich zastosowań, takich jak ciepłownictwo, przetwórstwo przemysłowe, rolnictwo szklarniowe czy rekreacja. W przeciwieństwie do innych źródeł odnawialnych, systemy geotermalne oferują stałą moc ciepłą, co czyni je kluczowym elementem strategii dekarbonizacji sektorów intensywnie wykorzystujących ciepło. Jednak szersze wdrożenie energii geotermalnej jest blokowane przez ograniczoną dostępność złóż i wysokie koszty początkowe udostępnienia i eksploracji. W rezultacie postęp w zakresie obrazowania geofizycznego o wysokiej rozdzielczości i zintegrowanego modelowania geologiczno-złożowego stał się kluczowy dla zmniejszenia niepewności poszukiwań i poprawy przewidywalności potencjału geotermalnego. Równolegle innowacje techniczne w zakresie wierceń kierunkowych, stymulacji odwiertów i systemów pozyskiwania ciepła w obiegu zamkniętym rozszerzają zasięg technologii geotermalnych na regiony o niskiej przepuszczalności lub jej braku, a także niższych gradientach temperatury. Rozwój ten ma zasadnicze znaczenie dla umożliwienia opłacalnego wykorzystania ciepła geotermalnego. W kierunku te wpisują się projekty badawcze

realizowane w Katedrze Inżynierii Naftowej na Wydziale Wiertnictw, Nafty i Gazu AGH przez zespół badawczy Geoenergia – Laboratorium Zaawansowanych Metod Wydobycia Węglowodorów i Magazynowania Energii. Projekty te finansowane są w ramach programu Horizon Europe i realizowane wspólnie z partnerami z wiodących europejskich instytucji badawczych, a także małych i dużych przedsiębiorstw związanych z pozyskiwaniem energii geotermalnej.

5.1. Projekt URGENT – zrównoważona eksploracja geotermalna w terenach zurbanizowanych oparta na nowych technologiach

Na obszarach miejskich ciepło geotermalne może zasilać istniejące lub przyszłe sieci ciepłownicze, przyspieszając przejście na sieci najnowszej generacji i modernizację istniejących sieci wysokotemperaturowych. Niemniej jednak rozwiązanie to nie jest jeszcze powszechnie stosowane, głównie z powodu braku wiedzy na temat zasobów geotermalnych. Biorąc pod uwagę koszty rurociągów i straty ciepła, źródła geotermalne powinny być zlokalizowane blisko sieci ciepłowniczej i podłączonych do niej odbiorców. Wiąże się to z dobrą znajomością i zrozumieniem zasobów geotermalnych znajdujących się w pobliżu obszarów miejskich. Analiza głębokich struktur geotermalnych i ocena potencjału zasobów hydrotermalnych w basenach osadowych, które w dużej mierze występują w Europie, opiera się przede wszystkim na badaniach sejsmicznych. Te jednak rzadko były prowadzone na obszarach zurbanizowanych i w miastach, ze względu na cele poszukiwań (ropa i gaz) oraz z powodu ograniczeń związanych z wykorzystywanymi technikami akwizycji. Ograniczenia te skutkują nieoptymalną lub nawet niewystarczającą jakością danych na poziomie złoża i mogą utrudniać identyfikację uskoku. Brak dokładnej wiedzy na temat budowy geologicznej (m.in. występowanie uskoku i nieciągłości) ma konsekwencje dla wierceń i ryzyka finansowego projektów geotermalnych, a także niesie ryzyko sejsmiczności indukowanej zatłaczaniem wody do złoża. Kwestie te wpływają na społeczną akceptację geotermii.

Projekt URGENT ma na celu opracowanie zrównoważonego i przystępnego cenowo rozwiązania dla miejskich badań sejsmicznych zasobów geotermalnych. Projekt realizowany jest przez międzynarodowe konsorcjum, którego liderem jest niezależny flamandzki instytut naukowy Vito. Oprócz AGH w skład konsorcjum wchodzi firmy zajmujące się badaniami sejsmicznymi (Seismic Mechatronics B.V., Innoseis Sensor Technologies B.V., dGB Earth Sciences B.V. z Holandii, Realtime Seismic z Francji) oraz koncern MOL z Węgier. Konsorcjum wspierane jest przez firmę Euroquality SAS w zakresie zarządzania i oceny akceptacji społecznej wypracowanych rozwiązań. W ramach projektu zaprojektowane i zbudowane zostaną innowacyjne technologie badań sejsmicznych o niskim wpływie na otoczenie, składające się z elektrycznego źródła sejsmicznego i nowatorskich czujników opartych na MEMS zintegrowanych z autonomicznymi węzłami. Opracowane rozwiązania zostaną przetestowane w trzech lokalizacjach: Balmatt (Belgia), Konin (Polska) i Batta (Węgry). Wybrane lokalizacje obejmują szeroki zakres warunków geologicznych występujących w najistotniejszych europejskich zbiornikach geotermalnych. Uwzględniają także różne przewidywane zastosowania powierzchniowe, w tym produkcję energii elektrycznej lub ciepła. W Balmatt dublet odwiertów udostępnia głęboką szczelinową strukturę wapienną i dostarcza ciepło do lokalnej sieci ciepłowniczej. W Koninie odwierty udostępniają piaskowiec dolnojurajski w obszarze uskoku, który ma być źródłem ciepła dla lokalnej sieci ciepłowniczej. Na tym obszarze perspektywny jest również głębszy zbiornik triasowy, jednak liczba danych na jego temat jest bardzo ograniczona. Nowe badania sejsmiczne pozwoliłyby ocenić możliwość wykorzystania go jako źródła energii geotermalnej. Lokalizacja Batta znajduje się w środowisku miejsko-przemysłowym. Potencjał geotermalny w tej lokalizacji musi zostać zweryfikowany, aby umożliwić przyszłe dostarczanie energii elektrycznej i ciepła do rafinerii ropy naftowej Százhalombatta. Badania sejsmiczne 3D planowane są w Balmatt, w dwóch pozostałych lokalizacjach planowane są badania testowe 2D. W celu wydajniejszej analizy pozyskanych danych opracowane i przetestowane zostaną również metody

sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, które pomogą zautomatyzować wykrywanie uskoków i szczelin oraz optymalizację lokalizacji odwiertów. W rezultacie opracowany zostanie zestaw narzędzi do modelowania i optymalizacji udostępnienia oraz pracy zakładu geotermalnego pozwalających na maksymalizację pozyskiwania energii przy jednoczesnej minimalizacji ryzyka sejsmiczności indukowanej na uskoku. Modele złożowe THM zostaną połączone za pomocą skryptowej pętli sprzężenia zwrotnego z procedurami optymalizacji ML. URGENT przyczyni się do przyspieszenia wdrażania miejskich projektów geotermalnych poprzez procesy eksploracji dostosowane do tych środowisk, analizę absorpcji rynkowej i wzmocnioną akceptację społeczną.

5.2. Projekt HOCLOOP – przyjazna dla środowiska technologia pozyskiwania energii geotermalnej oparta na horyzontalnym wymienniku ciepła

Występowanie złóż hydrotermalnych o odpowiednich właściwościach fizycznych, umożliwiających ekonomicznie uzasadnioną eksploatację, jest ograniczone. Dodatkowo klasyczna eksploatacja wód geotermalnych bardzo często, w związku z ich wysoką mineralizacją, wiąże się z potencjalnymi problemami, takimi jak korozja i wytrącanie się osadów z wody, co skutkuje utratą chłonności. W niektórych przypadkach zatłaczanie wód wiąże się również z ryzykiem zanieczyszczenia wód gruntowych i indukowania zdarzeń sejsmicznych (np. przypadek Balmatt w Belgii). Alternatywnym rozwiązaniem może być system pozyskujący energię geotermalną za pomocą otworowego wymiennika ciepła.

Projekt HOCLOOP ma na celu opracowanie i przetestowanie nowatorskiej technologii wykonania otworowego wymiennika ciepła. Projekt realizuje międzynarodowe konsorcjum, którego liderem jest Institute for Energy Technology (IFE) z Norwegii. Oprócz AGH w skład konsorcjum wchodzi firmy zajmujące się technologiami wiertniczymi (Reelwell A.S. i Research, Science and Innovation – NORCE z Norwegii) oraz instytucje

naukowe (Technical University of Darmstadt, Vito N.V., IFP Energies Nouvelles, University of Florence i University of Bari). Konsorcjum wspierane jest przez University of Vaasa w zakresie zarządzania i oceny akceptacji społecznej wypracowanych rozwiązań. Innowacyjne rozwiązanie zaproponowane w projekcie bazuje na technologii DualPipe i zakłada wykonanie otworowego wymiennika ciepła z wykorzystaniem głębokiego odwiertu horyzontalnego. Horyzontalna część odwiertu jest prowadzona przy użyciu nowych narzędzi i procedur w celu zwiększenia zasięgu i poprawy odbioru ciepła. W końcowym etapie przewód wiertniczy jest przekształcany w izolowany otworowy wymiennik ciepła (BHE). Rozwiązanie to pozwala na wykorzystanie energii geotermalnej na nowych obszarach, gdzie nie występują złoża hydrotermalne, dając możliwość dostosowania realizacji do lokalnych potrzeb. Ponadto w projekcie przeanalizowana będzie możliwość wykorzystania alternatywnych dla wody płynów roboczych w BHE. Badania laboratoryjne dotyczą płynów na bazie CO₂ i cieczy jonowych. Efektywność systemu zostanie określona za pomocą symulacji numerycznych dla wytypowanych lokalizacji w Niemczech, Belgii, Francji, Włoszech i Polsce. W przypadku Polski analizowana jest możliwość lokalizacji otworowego wymiennika ciepła na strukturach solnych. Techniczna możliwość wykonania zaproponowanego rozwiązania zweryfikowana zostanie przez wykonanie pilotażowego systemu testowego.

5.3. Podsumowanie

Przewidywane wyniki realizowanych projektów pozwolą na znaczne zmniejszenie ryzyka wierceń i umożliwią bezpieczne i tańsze wykorzystanie energii geotermalnej. Rezultaty projektu URGENT pozwolą na wdrożenie zrównoważonych i przystępnych cenowo rozwiązań dla miejskich badań sejsmicznych złóż geotermalnych oraz opracowanie optymalnych strategii wydobywania zasobów geotermalnych. Projekt HOCLOOP dostarczy technologię pozwalającą na pozyskiwanie energii geotermalnej w obszarach, w których do tej pory takiej możliwości nie było ze względu na niekorzystne warunki geologiczne.

6. Ocena cyklu życia (LCA) w energetyce rozproszonej

Transformacja systemów energetycznych w kierunku odnawialnych źródeł energii i energetyki rozproszonej stawia wyzwania, a jednocześnie otwiera szanse w kontekście zrównoważonego rozwoju. Energetyka rozproszona oznacza zdecentralizowane wytwarzanie energii blisko odbiorców, co może zwiększać bezpieczeństwo energetyczne i angażować społeczności lokalne, a to bez wątpienia pożądane zmiany. Każda technologia energetyczna niesie jednak za sobą pewne koszty środowiskowe. Tradycyjnie ocena tych kosztów koncentruje się na fazie eksploatacji (np. emisji substancji zanieczyszczających towarzyszących procesom generowania energii cieplnej i elektrycznej do środowiska naturalnego), lecz coraz większego znaczenia nabiera pełna ocena cyklu życia (LCA) – a więc analiza wpływu na środowisko naturalne we wszystkich etapach istnienia instalacji: od wydobycia surowców, przez produkcję urządzeń, transport, budowę i eksploatację, aż po likwidację i utylizację. Tylko takie, holistyczne podejście pozwala stwierdzić, czy dana technologia faktycznie przyczynia się do redukcji całkowitego śladu środowiskowego, czy też jedynie przenosi pewne oddziaływania z jednego obszaru na inny.

Ślad węglowy oraz ślad wodny są określane jako kategorie wpływu na środowisko naturalne (Kaczmarczyk et al. 2024b). Ślad węglowy określa całkowitą emisję gazów cieplarnianych (w przeliczeniu na CO₂) przypadającą na jednostkę energii użytkowej (np. 1 kWh), uwzględniając wszystkie etapy cyklu życia danej technologii. Z kolei ślad wodny oznacza całkowitą objętość wody słodkiej zużytej pośrednio lub bezpośrednio na potrzeby wytworzenia energii. O ile ślad węglowy często pojawia się w różnego rodzaju analizach środowiskowo-energetycznych, tak pojęcie śladu wodnego powszechne nie jest. Z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju jest to jednak kluczowe zjawisko, gdyż rosnący udział OZE powinien być oceniany nie tylko pod kątem emisji gazów cieplarnianych, lecz także wpływu na zasoby wodne i inne elementy środowiska naturalnego.

Zrozumienie wpływu technologii OZE na środowisko w całym cyklu ich życia jest niezbędne, ponieważ zrównoważony rozwój i ochrona środowiska to zagadnienia wykraczające poza samo ograniczenie emisji gazów cieplarnianych (Kaczmarczyk et al. 2024a).

Zainteresowanie zastosowaniem LCA w energetyce znacząco wzrosło w ostatnich dwóch dekadach, co wiąże się z dążeniem do zrozumienia pełnych skutków środowiskowych transformacji w kierunku OZE. Coraz więcej uwagi poświęca się ocenie pełnych efektów transformacji energetycznej, w tym na poziomie lokalnym, a w kontekście energetyki rozproszonej szczególnie interesujące są prace analizujące systemy hybrydowe i lokalne mikrosieci łączące różne źródła OZE.

Pomimo rosnącej liczby publikacji, w literaturze wskazuje się także na pewne luki i potrzeby badawcze. Dla niektórych technologii rozproszonych (np. geotermia, mikrosieci hybrydowe) wciąż istnieje stosunkowo mało studiów LCA, a dostępne analizy często trudno ze sobą porównać z uwagi na odmienne założenia i warunki lokalne. Dlatego podkreśla się konieczność prowadzenia zindywidualizowanych ocen dla konkretnych projektów (*case-by-case*) oraz rozwijania baz danych dostosowanych do warunków krajowych. Mimo tych wyzwań, trend w literaturze jest wyraźny: LCA staje się nieodzownym narzędziem do oceny zrównoważenia rozproszonych systemów energetycznych, uzupełniając tradycyjne analizy techniczno-ekonomiczne o perspektywę środowiskową na etapie planowania i eksploatacji OZE.

6.1. Metodyka oceny cyklu życia w energetyce rozproszonej

Metodyka *life cycle assessment* (LCA) jest sformalizowana w serii norm ISO 14040 i 14044, które określają cztery główne fazy analizy: 1) zdefiniowanie celu i zakresu, 2) inwentaryzacja cyklu życia (LCI), 3) ocena wpływu (LCIA) oraz 4) interpretacja wyników. W kontekście energetyki rozproszonej zdefiniowanie celu i zakresu polega na wyraźnym określeniu, co podlegać będzie ocenie – np. czy celem będzie porównanie różnych technologii wytwarzania 1 kWh energii elektrycznej lub 1 GJ ciepła, czy ocena całego lokalnego

systemu zaopatrzenia w energię dla danej społeczności. Ustala się jednostkę funkcjonalną, czyli odniesienie ilościowe umożliwiające porównanie – zazwyczaj jest nią 1 kWh energii elektrycznej lub 1 GJ ciepła użytkowego dostarczonego odbiorcy (czasem 1 MWh, 1 TJ itp., zależnie od skali). Określa się także granice systemu, czyli to, jakie procesy będą uwzględniane (np. wydobycie i transport paliw, produkcja materiałów na turbiny/panele, budowa infrastruktury, wszystkie emisje w trakcie działania, demontaż i utylizacja). Dla rzetelności porównań istotne jest przyjęcie możliwie pełnych granic („od kołyski aż po grób”), chyba że analiza ma charakter skrócony (np. *well-to-wheel* dla paliw).

W fazie LCI zbierane są dane wejściowe i wyjściowe dla każdego procesu w łańcuchu życia produktu, dzięki czemu tworzony jest szczegółowy spis przepływów materiałów, energii i emisji. Pomagają w tym bazy danych (*Ecoinvent*, *Agri-footprint* itp.), które dostarczają uśrednionych informacji o jednostkowych procesach, oraz specjalistyczne oprogramowanie, które pozwala na wykonanie obliczeń i ich interpretację w dalszych fazach, jak np. *SimaPro*. W energetyce rozproszonej, zwłaszcza przy nowych technologiach, wyzwaniem bywa dostępność wiarygodnych danych – stąd często konieczność korzystania z literatury lub obliczeń własnych dla prototypowych rozwiązań.

LCIA to etap, w którym dane inwentaryzacyjne przekształca się na kategorie wpływu – w energetyce kluczowe są m.in. zmiana klimatu (GWP), zakwaszenie, eutrofizacja, toksyczność, ale także zużycie zasobów abiotycznych czy wspomniany ślad wodny. Ślad wodny bywa liczony osobno lub w ramach LCIA (np. jako wskaźnik wyczerpania zasobów wody). Według normy ISO 14046 jest on rozumiany jako wskaźnik zużycia wody obejmujący całą objętość wody słodkiej zużytej przez konsumenta lub producenta, bezpośrednio i pośrednio, w ciągu pełnego cyklu życia produktu/procesu. W praktyce obliczenie śladu wodnego polega na zsumowaniu wszystkich poborów wody w procesach. Warto zaznaczyć, że nie każdy pobór oznacza konsumpcję – część wody jest zwracana do obiegu (np. woda chłodząca oddana z powrotem do rzeki) – jednak w ocenie śladu wodnego uwaga

często skupia się na wodzie skonsumowanej (odparowanej, wbudowanej w produkt, zanieczyszczonej).

Kolejnym krokiem jest agregacja i ocena wyników – ten proces często sprowadza się do obliczenia łącznej emisji ekwiwalentu CO₂ na jednostkę funkcjonalną (dla kategorii globalnego ocieplenia) i analogicznych wskaźników dla innych kategorii (np. ekwiwalent SO₂ dla zakwaszenia itd.). Interpretacja wyników polega na zidentyfikowaniu, które etapy cyklu życia dominują w generowaniu poszczególnych wpływów oraz jakie działania mogą te wpływy zmniejszyć. Dla energetyki rozproszonej typowe jest, że dominuje wpływ etapów produkcji urządzeń i infrastruktury, podczas gdy faza eksploatacji (kiedy OZE nie emitują spalin) charakteryzuje się minimalnymi emisjami operacyjnymi.

Podsumowując metodykę, ocena cyklu życia w energetyce rozproszonej przebiega analogicznie jak w innych sektorach, zgodnie z wytycznymi ISO 14040/44 – kluczowe jest jednak odpowiednie dobranie granic i danych do specyfiki rozproszonych, często zróżnicowanych systemów. Należy też uwzględnić charakterystyczne wskaźniki zrównoważenia, jak ślad wodny (norma ISO 14046) czy wpływ na bioróżnorodność, zwłaszcza gdy technologie zajmują rozległe tereny (np. farmy słoneczne, wiatrowe). Dobrze przeprowadzona analiza LCA dostarcza decydentom kompleksowej informacji o tym, które rozwiązania lokalnej energetyki są najbardziej przyjazne środowisku, a gdzie ewentualnie występują procesy wymagające optymalizacji.

6.2. Prace badawczo-rozwojowe w zakresie LCA

Energetyka rozproszona bazująca na OZE ma ogromny potencjał przyczynienia się do zrównoważonego rozwoju. Należy jednak zwrócić uwagę na pewne kwestie i ograniczenia z nią związane. Po pierwsze, określenie „rozproszone” nie jest tożsame z brakiem oddziaływania na środowisko naturalne – mimo że ślad węglowy OZE jest stosunkowo niski, to ślad zasobowy (materiałowy) niekoniecznie. Wraz ze wzrostem skali energetyki rozproszonej zwiększa się zapotrzebowanie chociażby na takie surowce jak minerały ziem rzadkich. LCA

obejmuje co prawda zużycie zasobów, ale wyzwaniem staje się zapewnienie, by ich pozyskiwanie odbywało się w sposób zrównoważony (np. recykling metali, wydobywanie z minimalnym wpływem). Takie kwestie wychodzą poza standardowe wskaźniki, ale wpisują się w szerszą perspektywę LCA i analiz cyklu życia uwzględniających kategorie społeczne (np. warunki pracy przy wydobywaniu surowców). Kwestie te są już uwzględniane w raportowaniu ESG (*environmental social governance*).

Po drugie, interpretując LCA dla energetyki rozproszonej, trzeba pamiętać o efekcie skali i lokalizacji. Pewne technologie mogą mieć doskonałe wskaźniki w sprzyjających warunkach, a znacznie gorsze w innych. Kolejna kwestia to aspekty społeczne i zdrowotne, których klasyczne LCA nie obejmuje w pełni. Energetyka rozproszona wiąże się np. z akceptacją społeczną i kwestiami własności (spółdzielnie energetyczne) czy potencjalnymi korzyściami zdrowotnymi (czystsze powietrze dzięki redukcji lokalnych emisji). *Life cycle cost assessment* (LCC) czy *social life cycle assessment* (SLCA) wspomagają standardową metodykę LCA w tym zakresie. Przykładowo prace nad społeczną oceną cyklu życia instalacji OZE analizują wpływ na zatrudnienie, sprawiedliwość podziału korzyści itp. W dyskusji nad energetyką rozproszoną warto pamiętać, że najbardziej zrównoważony system to taki, który jest akceptowalny społecznie, opłacalny ekonomicznie i przyjazny środowisku. LCA dostarcza danych o środowisku, ale decyzje muszą uwzględniać także wspomniane aspekty ekonomiczne oraz społeczne.

Na poziomie polityki i regulacji widać rosnące zainteresowanie wykorzystaniem wyników LCA. Przykładowo Unia Europejska w ramach taksonomii zrównoważonego finansowania wymaga, by pewne inwestycje (np. w energetyce) spełniały kryteria niskiego śladu węglowego w cyklu życia. Normy budowlane również stopniowo mogą ewoluować od prostych wskaźników zużycia energii do uwzględniania śladu węglowego budynków w cyklu życia (co jest już praktykowane np. w ocenie budynków niemieszkalnych metodą BREEAM czy LEED). W tym kontekście prace takie jak (Kaczmarczyk 2024, 2025) są niezwykle cenne, ponieważ pokazują, że obecne uproszczone wskaźniki (jak

EP – energia pierwotna) nie zawsze korelują z realnym wpływem na klimat, co oznacza potrzebę włączenia np. rzeczywistych czynników emisji CO₂ (uwzględniających lokalny miks energetyczny) do ocen budynków.

6.3. Wnioski

Ocena cyklu życia (LCA) stanowi kluczowe narzędzie w ocenie zrównoważenia energetyki rozproszonej. Pozwala uwzględnić pełny ślad środowiskowy rozwiązań bazujących na odnawialnych źródłach energii. Zintegrowane podejście LCA+LCC+SLCA może pomóc znaleźć optymalne pod względem ekonomicznym, społecznym i ekologicznym strategię, np. podjąć decyzję, czy lepiej wcześniej wymienić urządzenie na nowsze i bardziej efektywne, czy eksploatować dłużej istniejące (co zmniejsza popyt na nowe materiały). Włączenie śladu wodnego do ocen pozwala natomiast wykryć potencjalne konflikty wykorzystania wody – co ma znaczenie zwłaszcza w regionach suchych.

Podsumowując, energetyka rozproszona oceniana w pełnym cyklu życia jawi się jako kierunek zdecydowanie korzystny środowiskowo i zgodny z ideą zrównoważonego rozwoju. Aby w pełni zrealizować jej potencjał, zaleca się:

- prowadzenie ocen LCA dla planowanych inwestycji rozproszonych – co umożliwi świadomy wybór najlepszych technologii i rozwiązań,
- doskonalenie baz danych i metod LCA dla nowych technologii (np. magazynów energii, mikro-sieci hybrydowych), aby analizy odzwierciedlały rzeczywiste warunki eksploatacji,
- uwzględnienie wyników LCA w polityce i regulacjach – np. premiowanie rozwiązań o najniższym śladzie węglowym/wodnym oraz
- edukację i zwiększanie świadomości interesariuszy (inwestorów, społeczności lokalnych) co do pełnych korzyści OZE ujmowanych w cyklu życia.

Są to powody dla których Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska realizuje prace B+R w tematyce LCA, bazując na doświadczeniu i kompetencjach kadry naukowej oraz specjalistycznym oprogramowaniu

z dostępem do aktualnych baz danych. Tylko przy takim holistycznym podejściu możemy mieć pewność, że transformacja energetyczna na poziomie lokalnym będzie przekładać się na realne korzyści globalne dla klimatu, środowiska oraz obecnych i przyszłych pokoleń.

7. Badania pomp ciepła

Pompy ciepła to urządzenia, które wykorzystują ciepło zakumulowane w materii do ogrzewania budynków oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. Ciepło niskotemperaturowe, najczęściej skumulowane w gruncie, wodzie, powietrzu, określane jest mianem dolnego źródła. Pompy ciepła mogą być stosowane do ogrzewania budynków zarówno niewielkich (np. domy jednorodzinne), jak i dużych (np. domy wielorodzinne), a także obiektów zbiorowego zamieszkania. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie około 75% energii za darmo ze środowiska (np. ciepło zmagazynowane w Ziemi) i ponoszenie opłaty jedynie za energię zużywaną do napędu sprężarki i pomp obiegowych. Zatem z 1 kWh energii elektrycznej otrzymuje się 4 kWh ciepła. Oznacza to, że pompy ciepła są urządzeniami, które służą do pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł energii.

Działalność zespołu badawczego w zakresie pomp ciepła rozpoczęła się w roku 2009 z inicjatywy ówczesnego kierownika Katedry Surowców Energetycznych, prof. dr. hab. inż. Wojciecha Góreckiego, który powołał zespół pracowników KSE. Na czele grupy stanął Jarosław Kotyza, którego zadaniem był nadzór nad przebudową dawnego budynku administracyjnego kopalni porfiru (wybudowanego w latach 1946–1950) na nowoczesne Laboratorium Edukacyjno-Badawcze Odnawialnych Źródeł i Poszanowania Energii AGH w Miękinii. Podstawowym założeniem przebudowy było maksymalne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii oraz innych technologii energooszczędnych. Podczas opracowania koncepcji modernizacji obiektu od samego początku zakładano wykorzystanie technologii pomp ciepła typu solanka-woda jako źródła stabilnego i efektywnego energetycznie. Pierwotnie obiekt miał służyć studentom jako zaplecze dydaktyczne,

dlatego też wyposażony został w urządzenia OZE (takie jak pompy ciepła z gruntowymi wymiennikami ciepła, kolektory słoneczne, moduły fotowoltaiczne oraz turbinę wiatrową) w sposób zapewniający dostarczanie energii do budynku, ale również dający możliwość prowadzenia badań i testów zarówno przez studentów, jak i członków zespołu badawczego.

7.1. Potencjał badawczy w zakresie pomp ciepła

Duże zainteresowanie obiektem w Miękinii oraz regularna współpraca z przemysłem pozwoliły na rozbudowę zespołu i zaplecza badawczego, a w konsekwencji na wyspecjalizowanie działalności badawczo-rozwojowej zespołu w kierunku testowania urządzeń i analizowania danych. Zespół posiada także doświadczenie w optymalizacji istniejących rozwiązań oraz tworzeniu nowych technologii gotowych do wdrożenia na rynek. Rozpoczęcie współpracy z polskimi producentami urządzeń grzewczych zaowocowało licznymi projektami badawczo-rozwojowymi, w ramach których zaprojektowano, zbudowano i przetestowano szereg prototypów, które później zostały wdrożone do produkcji, a obecnie cieszą się dużą popularnością na rynku pomp ciepła. Wśród projektów, które od wielu lat realizowane były przez zespół badawczy Katedry Surowców Energetycznych, można wymienić:

- „Opracowanie innowacyjnego systemu magazynowania chłodu wykorzystującego ciepło przemian fazowych wody, dedykowanego do współpracy z poligeneracyjnym systemem SES (*smart energy system*) firmy Energy Solutions”. Prace projektowe dotyczące systemu magazynowania chłodu dotyczyły optymalizacji produktu pod względem wielkości/modułowości, konstrukcji, pojemności chłodniczej oraz uniwersalności wobec źródła produkcji chłodu. Zakres prac badawczych objął również współpracę magazynu chłodu z poligeneracyjnym systemem SES dostarczanym przez firmę Energy Solutions, celem sprawdzenia działania urządzenia w warunkach rzeczywistych.
- „Opracowanie systemu elektronicznego nadzoru parametrów pracy dolnych źródeł ciepła dla firmy Aspol FV Sp. z o.o.”. W ramach projektu opracowano koncepcję systemu kontrolującego stan wymiennika ciepła, w tym wyznaczono parametry charakterystyczne dla pracy wymienników gruntowych oraz hydrotermalnych współpracujących z pompą ciepła typu solanka-woda. Wykonano analizę wpływu poszczególnych parametrów na zachowanie gruntowych i hydrotermalnych wymienników ciepła pracujących jako dolne źródło dla pompy ciepła typu solanka-woda. Opracowano algorytm działania systemu elektronicznego nadzoru parametrów pracy dolnych źródeł ciepła, na podstawie którego powstał prototyp urządzenia. Określono metodykę badawczą na potrzeby testowania urządzenia. Przeprowadzono testy stworzonego wcześniej systemu kontrolującego stan wymiennika gruntowego oraz hydrotermalnego – badania odbywały się w rzeczywistych warunkach pracy, tzn. na wymiennikach podłączonych do pracujących pomp ciepła typu solanka-woda.
- „Opracowanie innowacyjnej pompy ciepła o modulowanej mocy grzewczej od 3 kW do 8 kW przy parametrach A2W55 z ekologicznym czynnikiem chłodniczym R290 z funkcją chłodzenia”. W ramach projektu opracowano dokumentację techniczną innowacyjnej pompy ciepła o modulowanej mocy grzewczej od 3 kW do 8 kW przy parametrach A2W55 (A – temperatura powietrza, W – temperatura wody jako czynnika roboczego) z ekologicznym czynnikiem chłodniczym R290 (propan) z funkcją chłodzenia, opierając się na zasadach doboru poszczególnych komponentów układu chłodniczego. Na tej podstawie wykonano model 3D pompy ciepła. Opracowano algorytm sterowania pompą ciepła dla trybów grzania i chłodzenia. Zbudowano złożony układ chłodniczy, który w dalszej kolejności został poddany testom sprawnościowym, zarówno pod kątem efektywności energetycznej, jak i niezawodności działania algorytmu sterowania.

Zainteresowanie technologią pomp ciepła przez firmy, które przechodzą proces transformacji energetycznej, przyczyniło się do rozbudowy zaplecza badawczego oraz opracowania nowatorskich stanowisk do testowania pomp ciepła typu solanka-woda oraz powietrze-woda. Projektowanie urządzeń, takich jak pompy ciepła, i późniejsze ich wdrożenie na rynek wymaga testowania prototypów w zasymulowanych warunkach pracy (odpowiadających rzeczywistym) zgodnie ze specjalistycznymi normami PN-EN14511 oraz PN-EN14825. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom firm, które zainteresowane są wdrożeniem na rynek nowych pomp ciepła, członkowie zespołu opracowali koncepcje takich stanowisk, które następnie zostały zbudowane i od wielu lat są wykorzystywane na potrzeby testowania pomp ciepła typu solanka-woda oraz powietrze-woda. Stanowisko badawcze umożliwia testowanie pomp ciepła typu powietrze-woda oraz solanka-woda z czynnikami chłodniczymi zaliczanymi do grupy czynników o podwyższonej palności (A3 zgodnie z klasami bezpieczeństwa przedstawionymi w normie PN-EN378-1), do których należy propan (R290).

Podstawowe parametry stanowiska badawczego pompy ciepła obejmują: rejestrowane parametry (temperaturę zasilania, temperaturę powrotu, przepływ, moc grzewczą, moc elektryczną, pobór prądu przez urządzenie, współczynnik efektywności COP, temperaturę powietrza w komorze na wpływie do parownika, wilgotność względną powietrza w komorze na wpływie do parownika, temperaturę powietrza w komorze na wypływie z parownika, wilgotność względną powietrza w komorze na wypływie z parownika); stabilizację parametrów dolnego i górnego źródła pozwalającą na przetestowanie pompy ciepła w skrajnych parametrach (A-15W60 i A+20W60); archiwizację danych w trakcie pomiarów z częstotliwością zapisu co 10 sekund; generowanie raportów z przeprowadzonych badań, z możliwością generowania raportu z wcześniej przeprowadzonych badań; dokładność wykonywanych pomiarów zgodnie z normą PN-EN14511.

Stanowisko może być wykorzystywane do komercyjnego testowania urządzeń, jak również na potrzeby wykonywania testów nowych prototypów realizowanych w ramach prac badawczo-rozwojowych lub projektów studenckich.

Współpraca z przemysłem w obszarze pomp ciepła poszerza horyzonty badawcze w kierunku elementów towarzyszących pompom ciepła, do których zaliczyć można m.in. systemy dolnych źródeł. Do ważnych gałęzi działalności zespołu badawczego należy wykonywanie testów przewodnictwa cieplnego gruntu – TRT. Precyzyjnie jest to pomiar współczynnika efektywnego przewodnictwa cieplnego gruntu i wykonuje się go w celu prawidłowego oszacowania zdolności gruntu do przekazywania/przyjmowania ciepła. Przeprowadzenie testu jest wskazane w przypadku planowania dużych instalacji grzewczych, o mocy grzewczej powyżej 50 kW, np. dla obiektów przemysłowych/obiektów użyteczności publicznej, w których źródłem ciepła jest instalacja z gruntową pompą ciepła. Urządzenie do wykonywania takich testów wraz z logiką obliczeniową zostało opracowane przez zespół badawczy, a wyniki z przeprowadzonych testów zostały potwierdzone z dwoma innymi komercyjnymi urządzeniami produkcji niemieckiej. Urządzenie, którym dysponuje zespół badawczy, posiada możliwość zdalnego sterowania oraz odczytu parametrów, co ułatwia jego obsługę, szczególnie gdy jest zainstalowane w odległych miejscach. W Polsce funkcjonuje kilka podmiotów, które wykonują takie testy, w tym Państwowy Instytut Geologiczny, z którym potwierdzano wyniki analiz.

Spośród różnych zakresów działalności zespołu badawczego istotny jest również obszar wykonywania opracowań, koncepcji, dokumentacji czy też wydawania opinii w zakresie pomp ciepła oraz instalacji z nimi współpracujących. Na podstawie takich opracowań i we współpracy z innymi zespołami badawczymi Katedry Surowców Energetycznych powstają publikacje naukowe dotyczące problematyki OZE, w tym pomp ciepła (Hałaj et al. 2021), zarządzania energią (Kaczmarczyk et al. 2025), wykorzystania

biomasy (Jach-Nocoń et al. 2021, Nocoń et al. 2024, Pełka et al. 2023) czy efektywności instalacji fotowoltaicznych (Jachimowski et al. 2025, Luboń et al. 2020).

7.2. Badania pomp ciepła w celu poprawy ich efektywności energetycznej

Obecnie, aby sprostać zapotrzebowaniu ludzkości na energię, pozyskuje się ją głównie z paliw pochodzenia organicznego. Ich złoża są ograniczone i szybko się wyczerpują. Aktualnie najwięcej energii produkowanej w Polsce pochodzi z paliw konwencjonalnych, takich jak węgiel kamienny, brunatny, gaz ziemny czy ropa naftowa. Odnawialne źródła energii stanowią ważny element zrównoważonego rozwoju przynoszący wymierne efekty ekonomiczno-ekologiczne. Odchodzenie od paliw kopalnych na rzecz OZE stało się już globalnym trendem. Polska ma ogromny potencjał w rozwijaniu OZE. Wykorzystanie alternatywnych źródeł energii zamiast paliw kopalnych jest najbardziej efektywnym sposobem na ograniczenie emisji szkodliwych gazów cieplarnianych do atmosfery (Barwińska-Małajowicz et al. 2024, Zimny et al. 2015).

7.3. Zakres prowadzonych badań sprężarkowej powietrznej pompy ciepła

Proces termodynamiczny zachodzący w sprężarkowych pompach ciepła typu powietrze-woda, opisany za pomocą szczegółowo doprecyzowanych i określonych zmiennych (informacje o parametrach termodynamicznych i fizycznych procesu, tj.: temperatura, różnice temperatur, entalpia, gęstość, ciśnienia, natężenie przepływu i innych, istotnie wpływających na efektywność energetyczną urządzenia), można poddać optymalizacji względem ściśle określonych kryteriów (Górecka 1996). Problemem naukowym jest nadal poznanie i opis matematyczno-fizyczny wpływu istotnych parametrów cieplnych i przepływowych zachodzących w sprężarkowych

pompach ciepła na ich efektywność energetyczną (Kukiełka 2002, Polański 1984). Badania sprężarkowej pompy ciepła typu powietrze-woda przeprowadzono na dostosowanym do działań z wykorzystaniem teorii eksperymentu stanowisku do badań energetycznych, przepływowych i eksploatacyjnych o mocy grzewczej/chłodniczej 14 kW_t, opracowanym w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Stanowisko odzwierciedla instalację grzewczą/chłodniczą domu jednorodzinnego o powierzchni ok. 150 m². Umożliwia tworzenie charakterystyk przepływowych, termodynamicznych, energetycznych oraz pozwala na obliczenie podstawowych parametrów charakteryzujących pompy ciepła. Czynnikiem chłodniczym w sprężarkowej pompie ciepła był R410A. Dolnym źródłem sprężarkowej pompy ciepła było powietrze atmosferyczne, natomiast górnym źródłem – zbiornik akumulacyjny wypełniony mieszaniną wody i glikolu (PN-EN 14511, Szargut 2010).

Model matematyczny procesu, metodyka badań, metoda planowania doświadczeń

Model matematyczny badań rozpoznawczych (model I) (Polański 1984):

$$Y_k = b_0 + b_i X_i + b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

gdzie:

- Y_k – parametry wyjściowe (mierzone),
- b_0, b_i, b_{ij} – współczynniki regresji określające wpływ badanych czynników,
- X_i, X_j – czynniki badane, parametry wejściowe.

Na podstawie badań wstępnych – po przeprowadzeniu szczegółowej analizy czynnikowej, wraz z oceną istotności wpływu poszczególnych czynników badanych na parametry wyjściowe – określono parametry niezależne, najistotniejsze oraz ich zakresy zmienności, jako dane wejściowe do przeprowadzenia badań szczegółowych (model II) (Zimny 2012, 2015), zebrane w Tab. 5.

Tab. 5. Wartości liczbowe czynników badanych x_i

Zmienne kodowane	Czynniki badane (zmienne fizyczne x_i)				
	$x_1(t_{pps})$ [°C]	$x_2(t_{ppt})$ [°C]	$x_3(p_s)$ [bar]	$x_4(p_p)$ [bar]	$x_5(\dot{V}_{pp})$ [m³/h]
-2	35	-10	8	3	3500
-1	40	-5	13,5	4,75	4000
0	45	0	19	6,5	4500
+1	50	5	24,5	8,25	5000
+2	55	+10	30	10	5500

Zastosowano statystyczne planowanie eksperymentów drugiego stopnia, plan rotacyjno-uniformalny: PS/DS-P: λ (2.000/5×5), plan D-optimalny Kiefera (Polański 1984, Zimny et al. 2012). Model matematyczny badanego procesu można zapisać ogólnie w postaci równania:

$$Y_k = f(X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n) \quad (2)$$

Układ współrzędnych o osiach $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ określa przestrzeń czynnikową, w której zawarta jest „powierzchnia odpowiedzi”, tj. geometryczny obraz procesu badanego z wszystkimi punktami charakterystycznymi (maksimum, minimum). Celem procedury optymalizacyjnej było określenie punktów ekstremalnych. W przyjętym modelu statystyczno-doświadczalnym zrealizowano postulat opisanie funkcji odpowiedzi $Y_1 = f(COP)$ równaniem wiążącym jednocześnie wszystkie czynniki badane X_i :

$$(COP) = f(X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n) \quad (3)$$

Z przeprowadzonej analizy porównawczej wyników badań doświadczalnych i modelowych (COP) wynika, iż uzyskane zależności matematyczne adekwatnie weryfikują dane doświadczalne. Średni błąd procentowy porównania wartości doświadczalnych z modelowymi wyniósł 3,26%.

Poszukiwane równanie regresji $COP = f(t_{pps}, t_{ppt}, p_s, p_p, \dot{V}_{pp})$ po analizie matematycznej przyjmuje postać fizyczną:

$$\begin{aligned} COP = & 5,085 - 0,116t_{pps} - 0,344t_{ppt} + 0,117p_s \\ & - 0,312p_p + 0,001\dot{V}_{pp} + 0,007t_{pps}t_{ppt} \\ & - 0,001t_{pps}p_s + 0,011t_{pps}p_p + 0,002t_{ppt}^2 \\ & - 0,001t_{ppt}p_s + 0,006t_{ppt}p_p - 0,001p_s^2 \\ & - 0,008p_s p_p - 0,003p_p^2 \end{aligned} \quad (4)$$

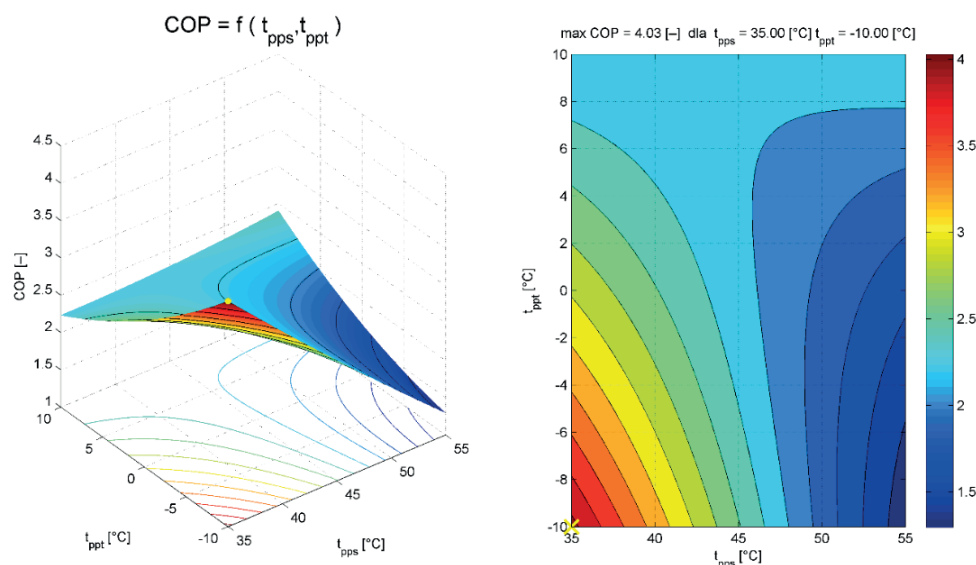
Na podstawie przedstawionej powyżej zależności można uporządkować czynniki badane X_i według istotności ich wpływu liniowego na parametr optymalizowany Y_1 (COP), co przedstawiono w uszeregowany sposób w Tab. 6.

Z powyższej analizy wynika, że decydujący wpływ (57,89%) na wartość efektywności energetycznej pompy ciepła COP ma parametr X_1 – temperatura czynnika roboczego na wpływie do skraplacza t_{pps} . Natomiast wpływ parametru X_5 – objętościowy strumień przepływu powietrza w parowniku $\dot{V}_{pp}$ jest znikomy, dlatego też nie został uwzględniony w dalszych analizach.

Na Rys. 12 pokazano graficzny obraz badanego procesu przedstawiający wpływ czynników badanych X_i na COP w układzie trzech zmiennych (grafika 3D, „powierzchnie odpowiedzi”).

Tab. 6. Uszeregowanie czynników badanych X_i według istotności ich wpływów liniowych na Y_1

Kolejność istotności wpływu	Czynnik badany	Wartości kodowane współczynników równania regresji	Udział procentowy czynników badanych
1.	X_1	- 0,088	57,89
2.	X_2	+ 0,042	27,63
3.	X_3	- 0,012	7,44
4.	X_4	+ 0,010	6,58
5.	X_5	+ 0,002	0,46



Rys. 12. Powierzchnie odpowiedzi zależności COP od temperatur parowania i skraplania

Wnioski praktyczne i podsumowanie

Z analizy badań wynika, że wraz ze wzrostem temperatury t_{pps} (35–55 °C) współczynnik efektywności energetycznej COP maleje w badanym przedziale zmienności, niezależnie od zmian pozostałych czynników badanych. Wyjątkiem jest wzrost efektywności energetycznej dla wartości temperatury na wlocie do parownika $t_{ppt} = 10$ °C. Współczynnik osiąga ekstrema na granicach przedziału zmienności. Wraz ze wzrostem temperatury na wlocie do parownika (t_{ppt}) w zakresie zmian wartości temperatury na wpływie do skraplacza (t_{pps}) w przedziale 35–45 °C, niezależnie od pozostałych czynników badanych, współczynnik efektywności energetycznej pompy ciepła maleje, natomiast w przedziale zmienności 45–55 °C rośnie. Zasadne zatem wydaje się utrzymywanie temperatury na wlocie do parownika w górnej granicy zakresu zmienności, ponieważ ma to pozytywny wpływ na wyższą wartość współczynnika efektywności energetycznej urządzenia. Ekstrema osiąga się na granicach przedziału zmienności. Jednoznacznie można potwierdzić, iż czynniki badane X_1 (57,89%) oraz X_2 (27,63%) mają istotny wpływ na zmiany parametru badanego Y_1 , jakim jest COP.

Przeprowadzone badania nad zagadnieniem poprawy wskaźników efektywności energetycznej sprężarkowych powietrznych pomp ciepła z uwzględnieniem

elementów funkcjonalnych i składowych, jak również analiza stosowanych czynników chłodniczych – ze względu na zwiększenie wydajności procesu oraz automatyzację pracy pompy ciepła – pozwalają w znaczący sposób zwiększyć jej efektywność energetyczną.

Bibliografia:

- Barwińska-Matajowicz A., Banaś M., Piecuch T., Pyrek R., Szczotka K., Szymiczek J. (2024), *Energy and Ecological Concept of a Zero-Emission Building Using Renewable Energy Sources – Case Study in Poland*, „Energies” 17: 1–23.
- Bujakowski W., Tomaszewska B. (red.) (2014), *Atlas of the Possible Use of Geothermal Waters for Combined Production of Electricity and Heat Using Binary System in Poland*, Wydawnictwo MEERI PAS.
- Gładysz P., Sowizdżał A., Miecznik M., Pająk L. (2020), *Carbon Dioxide-Enhanced Geothermal Systems for Heat and Electricity Production: Energy and Economic Analyses for Central Poland*, „Energy Conversion and Management” 220: 1–17.
- Gładysz P., Pająk L., Andresen T., Strojny M., Sowizdżał A. (2024), *Process Modeling and Optimization of Supercritical Carbon Dioxide - Enhanced Geothermal Systems in Poland*, „Energies” 17: 1–15.
- Górecka R. (1996), *Teoria i technika eksperymentu*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Górecki W. (red.) (2006a), *Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim – formacje mezozoiczne*, Wydawnictwo ZSE AGH w Krakowie.
- Górecki W. (red.) (2006b), *Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim – formacje paleozoiczne*, Wydawnictwo ZSE AGH w Krakowie.
- Górecki W. (red.) (2011), *Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat zachodnich*, Wydawnictwo KSE AGH w Krakowie.
- Górecki W. (red.) (2012), *Atlas geotermalny zapadliska przedkarpacciego*, Wydawnictwo KSE AGH w Krakowie.
- Górecki W. (red.) (2013), *Atlas geotermalny Karpat wschodnich*, Wydawnictwo KSE AGH w Krakowie.

- Górecki W., Sowizdżał A., Hajto M., Wachowicz-Pyzik A. (2015), *Atlases of Geothermal Waters and Energy Resources in Poland*, „Environmental Earth Sciences” 74 (12): 7487–7495.
- Hałaj E., Kotyza J., Hajto M., Pełka G., Luboń W., Jastrzębski P. (2021), *Upgrading a District Heating System by Means of the Integration of Modular Heat Pumps, Geothermal Waters, and PVs for Resilient and Sustainable Urban Energy*, „Energies” 14: 1–17.
- Jach-Nocoń M., Pełka G., Luboń W., Mirowski T., Nocoń A., Pachytel P. (2021), *An Assessment of the Efficiency and Emissions of a Pellet Boiler Combusting Multiple Pellet Types*, „Energies” 14: 1–15.
- Jachimowski A., Luboń W., Michłowicz Z., Dawiec D., Wygoda M., Paprocki M., Wyczęsany P., Pełka G., Jastrzębski P. (2025), *Renewable Energy Use for Conversion of Residential House into an Off-Grid Building – Case Study*, „Energies” 18: 1–24.
- Kaczmarczyk M. (2024), *Building Energy Characteristic Evaluation in Terms of Energy Efficiency and Ecology*, „Energy Conversion and Management” 306: 1–19.
- Kaczmarczyk M. (2025), *Energy Environmental Matrix for Buildings Energy Performance Certificate Evaluation*, „Energy and Buildings” 341: 1–11.
- Kaczmarczyk M., Mukti M., Ghaffour N., Soukane S., Bundschuh J., Tomaszewska B. (2024a), *Renewable Energy-Driven Membrane Distillation in the Context of Life Cycle Assessment*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 192: 1–20.
- Kaczmarczyk M., Sowizdżał A., Tomaszewska B. (2024b), *Life Cycle and Water Footprint Assessment in the Geothermal Energy Sector*, „Energies” 17: 1–23.
- Kaczmarczyk M., Książek R., Hałaj E., Gdowska K., Kapłan R., Pełka G., Luboń W. (2025), *Assessing Discrepancies in Heat Demand: A Case Study of Diverse Energy Management Systems Within the Energy Performance Certificate Framework in a Student's Dormitory*, „Energy and Buildings” 329: 1–12.
- Kukielka L. (2002), *Podstawy badań inżynierskich*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Luboń W., Pełka G., Janowski M., Pająk L., Stefaniuk M., Kotyza J., Reczek P. (2020), *Assessing the Impact of Water Cooling on PV Modules Efficiency*, „Energies” 13: 1–13.
- Materiały informacyjne, Projekt EnerGizerS, <https://www.energizers.agh.edu.pl/pl/materialy-informacyjne> [dostęp: 29.06.2025].
- Miecznik M., Tyszer M., Sowizdżał A., Andresen T., Frengstad B., Stenvik L., Pierzchała K., Gładysz P. (2024), *Numerical Modeling of a Potential CO₂-Supplied Enhanced Geothermal System (CO₂-EGS) in the Åsgard Field, Norway*, „Geology, Geophysics and Environment” 50 (2): 175–190.
- Nocoń A., Jachimowski A., Koniuch W., Pełka G., Luboń W., Jach-Nocoń M., Dawiec D. (2024), *Analysis of the Energy and Emission Performance of an Automatic Biomass Boiler in the Context of Efficient Heat Management*, „Energies” 17 (5885): 1–16.
- Olasolo P., Juarez 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., Chmielowska A. (2021), *Multi-Criteria Studies and Assessment Supporting the Selection of Locations and Technologies Used in CO₂-EGS Systems*, „Energies” 14 (7683): 1–18.
- Pełka G., Jach-Nocoń M., Paprocki M., Jachimowski A., Luboń W., Nocoń A., Wygoda M., Wyczęsany P., Pachytel P., Mirowski T. (2023), *Comparison of Emissions and Efficiency of Two Types of Burners when Burning Wood Pellets from Different Suppliers*, „Energies” 16 (1695): 1–18.
- Polański Z. (1984), *Metodyka badań doświadczalnych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Polska Norma PN-EN 14511-1:2023-02 (2023), *Klimatyzatory, agregaty chłodzące ciecz i pompy ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń oraz agregaty procesowe, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym. Część 1: Terminy i definicje*.
- Polska Norma PN-EN 14511-2:2023-02 (2023), *Klimatyzatory, agregaty chłodzące ciecz i pompy ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń oraz agregaty procesowe, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym. Część 2: Warunki badań*.
- Polska Norma PN-EN 14511-3:2023-02 (2023), *Klimatyzatory, agregaty chłodzące ciecz i pompy ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń oraz agregaty procesowe, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym. Część 3: Metody badań*.
- Polska Norma PN-EN 14511-4:2023-02 (2023), *Klimatyzatory, agregaty chłodzące ciecz i pompy ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń oraz agregaty procesowe, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym. Część 4: Wymagania*.
- Sapińska-Śliwa A., Wiglusz T., Kruszewski M., Śliwa T., Kowalski T. (2017), *Wiercenia geotermalne: Doświadczenia techniczne i technologiczne*, Wydawnictwo Fundacja Wiertnictwo-Nafta-Gaz, Nauka i Tradycja, Kraków.
- Shyi-Min L.A. (2018), *A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS)*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 81: 2902–2921.
- Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Jezuit Z., Koniszewski A., Szczytowski M., Bandura K., Rejman R. (2022), *Wstępna koncepcja udostępnienia ciepła Ziemi na potrzeby miasta Czechowice-Dziedzice*, Laboratorium Geoenergetyki AGH (materiał niepublikowany).
- Sowizdżał A., Chmielowska A. (2022), *Systemy geotermalne CO₂-EGS – projekt EnerGizerS*, „Wiadomości Naftowe i Gazownicze” 9 (284): 10–13.
- Sowizdżał A., Andresen T., Miecznik M., Frengstad B., Gładysz P., Pająk L., Chmielowska A., Tomaszewska B., Stenvik L., Szymanek M. (2023), *Possibilities of Using Geothermal Energy in CO₂-EGS Systems in Poland and Norway – the EnerGizerS Project*, Proceedings World Geothermal Congress, 17–21 kwietnia, Pekin.
- Sowizdżał A., Gładysz P., Pająk L. (2021a), *Sustainable Use of Petrothermal Resources – A Review of the Geological Conditions in Poland*, „Resources” 10 (8): 1–18.
- Sowizdżał A., Hajto M., Tomaszewska B., Kotyza J., Górecki W. (2021b), *Tematyka geotermalna w działalności naukowo-badawczej i dydaktycznej Katedry Surowców Energetycznych Wydziału Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w latach 2019–2021 i plany na przyszłość*, „Przegląd Geologiczny” 69 (9): 633–642.
- Sowizdżał A., Machowski G., Krzyżak A., Puskarczyk E., Krakowska-Madejska P., Chmielowska A. (2022), *Petrophysical Evaluation of the Lower Permian Formation as a Potential Reservoir for CO₂-EGS – Case Study from NW Poland*, „Journal of Cleaner Production” 379 (134768): 1–20.
- Stang J., Austegard A., Jooss Y., Szymanek M., Sowizdżał A. (2024), *New and Accurate Thermodynamic Property Data of CO₂-EGS Relevant Working Fluids with Data Fitted to Existing Thermodynamic Models*, „International Journal of Greenhouse Gas Control” 136 (104192): 1–10.
- Starczewska M., Strojny M., Sowizdżał A., Gładysz P., Pająk L. (2025), *Life Cycle Assessment of Enhanced Geothermal Systems with CO₂ as a Working Fluid – Polish Case Study*, „Clean Technologies and Environmental Policy” 27: 1863–1875.
- Strojny M., Gładysz P., Andresen T., Pająk L., Starczewska M., Sowizdżał A. (2024), *Environmental Impact of Enhanced Geothermal Systems with Supercritical Carbon Dioxide: A Comparative Life Cycle Analysis of Polish and Norwegian Cases*, „Energies” 17 (2077): 1–16.
- Szargut J. (2010), *Termodynamika techniczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Tagliaferri M., Gładysz P., Ungar P., Strojny M., Tallkuri L., Fiaschi D., Manfrida G., Andresen T., Sowizdżał A. (2022), *Techno-Economic Assessment of the Supercritical Carbon Dioxide Enhanced Geothermal Systems*, „Sustainability” 14 (16580): 1–20.

- Wójcicki A., Sowizdża A., Bujakowski W. (red.) (2013), *Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (HDR) w Polsce*, Wydawnictwo Ministerstwo Środowiska.
- Zimny J., Michalak P., Szczotka K. (2012), *Ecological Heating System of a School Building Hybrid Heating System with a Heat Pump – A Case Study*, „Rynek Energii” 5: 144–152.
- Zimny J., Michalak P., Szczotka K. (2015), *Polish Heat Pump Market between 2000 and 2013 – European Background, Current State and Development Prospects*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 48: 791–812.

Geothermal and heat pumps

Abstract: The article presents contemporary trends and challenges in the area of heat and cooling supply in the context of the development of "intelligent" heating and heating-cooling networks (smart grids) and the development of distributed heating (energy). The authors of the article share their experiences from scientific and research, experimental and development work and teaching carried out within the framework of national and international projects. The article discusses the comprehensive scope of activities of the Research Teams of the Department of Energy Resources at AGH.

Keywords: geothermal, geoenergetics, geothermal systems, distributed heat and/or cooling resources, smart heating networks

dr hab. inż. Tomasz Śliwa, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
sliwa@agh.edu.pl



Autorzy poszczególnych części:

1. Zespoły i grupy badawcze

prof. dr hab. inż. Barbara Tomaszewska,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
dr hab. inż. Michał Kaczmarczyk, prof. AGH,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
dr hab. inż. Aneta Sapińska-Śliwa, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH
dr hab. inż. Anna Sowizdża, prof. AGH,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
dr hab. inż. Tomasz Śliwa, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH
dr hab. inż. Paweł Wojnarowski, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH
Tomasz Kowalski,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

2. Geotermia w systemach inteligentnych sieci ciepłowniczych piątej generacji

dr hab. inż. Aneta Sapińska-Śliwa, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH
dr hab. inż. Tomasz Śliwa, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

3. Innowacyjne technologie geotermalne – CO₂-EGS

dr hab. inż. Anna Sowizdża, prof. AGH,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
Anna Chmielowska,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH

4. Głęboka geotermia

dr hab. inż. Anna Sowizdża, prof. AGH,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
Anna Chmielowska,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH

5. Nowe metody poszukiwań i wykorzystania zasobów geotermalnych – założenia projektów URGENT i HOCLOOP realizowanych w ramach Horizon Europe

dr hab. inż. Paweł Wojnarowski, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH
Virginie Harcouet-Menou,
Vito NV, Mol, Belgia
Mario Silva,
Institute for Energy Technology, Kjeller, Norwegia
Magnus Wangen,
Institute for Energy Technology, Kjeller, Norwegia
Ola Vestavik,
Reelwell AS, Sola, Norwegia

6. Ocena cyklu życia (LCA) w energetyce rozproszonej

dr hab. inż. Michał Kaczmarczyk, prof. AGH,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH

7. Badania pomp ciepła

7.1: dr inż. Wojciech Luboń,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
7.1: dr inż. Grzegorz Pełka,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH
7.2, 7.3: dr inż. Krzysztof Szczotka,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH