

Wykorzystanie potencjału energetycznego wód geotermalnych kompleksu jurajskiego w północno-zachodnim rejonie Tarnowa

Jan Adam Soboń¹, Andrzej Bezkorowajny²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków

² A&B Flint Andrzej Bezkorowajny, Konsulting geologiczny i hydrogeologiczny, Brzesko

Streszczenie: Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania potencjału energetycznego wód geotermalnych z kompleksu jurajskiego z uwzględnieniem warunków geologiczno-złożowych kompleksu i parametrów eksploatacyjnych sieci ciepłowniczej z rejonu miasta Tarnowa. Przedstawiono obliczenia dotyczące możliwej do pozyskania energii cieplnej z wody geotermalnej, wykorzystanej w układzie sieci ciepłowniczej skojarzonej z konwencjonalną ciepłownią.

Warunki geologiczno-złożowe omówiono z uwzględnieniem północno-zachodniego rejonu Tarnowa. Potencjał energetyczny zagospodarowanej wody geotermalnej obliczono na podstawie zasobów hydrotermalnych eksploatacyjnych kompleksu jurajskiego oraz warunków temperaturowych istniejącej sieci ciepłowniczej. Został on wyznaczony dla wariantów wydatków eksploatowanej wody geotermalnej oraz temperatury jej schłodzenia w instalacji odbioru ciepła. Parametry temperatury wydobywanej wody ustalono na podstawie wyników pomiarów temperatury w otworach wiertniczych w rejonie Tarnowa. Temperaturę schłodzenia wody geotermalnej określono zarówno dla układu konwencjonalnych wymienników ciepła, jak i przy zastosowaniu pomp ciepła. Ustalono udział energii cieplnej możliwej do pozyskania z wody geotermalnej i porównano go z ilością ciepła z ciepłowni konwencjonalnej o mocy podobnej do pracującej w rozpatrywanym rejonie.

Słowa kluczowe: geotermia, warunki geologiczne, potencjał energetyczny wód geotermalnych, utwory jury w rejonie Tarnowa, zagospodarowanie wody geotermalnej

UTILIZATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF GEOTHERMAL WATERS FROM THE JURASSIC COMPLEX IN THE NORTHWESTERN REGION OF THE CITY OF TARNÓW

Abstract: The article presents the possibility of utilizing the energy potential of geothermal waters from the Jurassic complex, taking into account the geological and deposit conditions of the complex and the operational parameters of the district heating network in the Tarnów area. It includes calculations of the possible thermal energy that can be obtained from geothermal water used in a district heating system combined with a conventional heating plant.

The geological and deposit conditions are presented with a focus on the northwestern part of Tarnów. The energy potential of the extracted geothermal water was calculated based on the hydrothermal resources of the Jurassic complex and the temperature conditions of the existing district heating network. The energy potential was determined for various scenarios of geothermal water extraction rates and temperature parameters of its cooling in the heat recovery system. The temperature parameters of the extracted water were adopted based on temperature measurements in drilling wells in the Tarnów area. The cooling temperature of the geothermal water was assumed for both conventional heat exchangers and the use of heat pumps. The share of thermal energy that can be obtained from geothermal water was determined and compared to the amount of heat from a conventional heating plant of comparable capacity operating in the analyzed area.

Keywords: geothermal energy, geological conditions, energy potential of geothermal waters, Jurassic formations in the Tarnów region, utilization of geothermal water

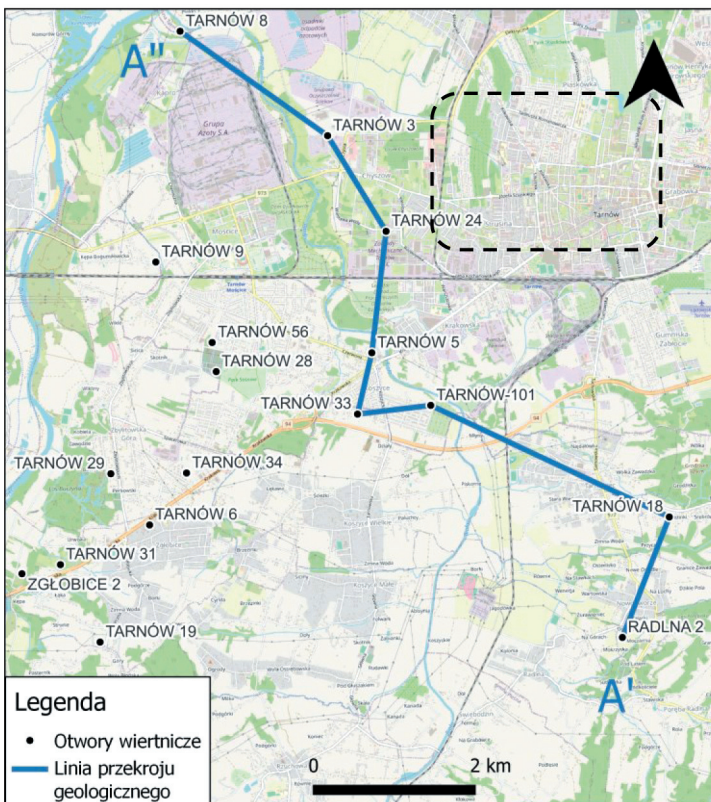
1. Wprowadzenie

Zwiększające się wykorzystanie odnawialnych źródeł energii wynikające ze społecznej świadomości ekologicznej oraz światowej sytuacji surowcowej i gospodarczej przyczynia się do rosnącego zainteresowania wykorzystaniem energii geotermalnej. Energia geotermalna z głębokich formacji geologicznych ze względu na parametry temperaturowe może być wykorzystana jako podstawowe źródło energii cieplnej lub źródło wspomagające konwencjonalne sieci ciepłownicze. Dostarczanie znaczących ilości energii cieplnej do sieci ciepłowniczych przez ciepłownie konwencjonalne od dziesiątek tysięcy do setek tysięcy gigadzuli [GJ] w sezonach grzewczych wymaga zużycia znacznych ilości paliwa kopalnego. Przejście ciepłowni konwencjonalnych na zasilanie źródłami odnawialnymi wymaga oceny potencjału energetycznego wybranych formacji geologicznych, które mogą stanowić potencjalne źródło pozyskania energii cieplnej. Należy przy tym uwzględnić warunki temperaturowe i metodę pozyskania energii cieplnej. W Polsce wykorzystywanym dotychczas źródłem energii cieplnej z formacji geologicznych jest woda geotermalna, która zaliczana do źródła energii hydrotermalnej. Ze względu na zróżnicowaną budowę geologiczną Polski zastosowanie wody geotermalnej jako odnawialnego źródła energii cieplnej wymaga charakteryzowania warunków geologiczno-złożowych formacji geologicznych. Istotne jest określenie temperatury i przewidywanego wydatku eksploatacyjnego wody geotermalnej w celu wyznaczenia potencjalnych zasobów hydrotermalnych. Wyznaczenie głębokości występowania poziomów zbiornikowych jest istotne ze względu na koszty wykonania otworów wiertniczych udostępniających horyzonty zbiornikowe. Ustalenie potencjału energetycznego zbiorników hydrotermalnych w zadanym rejonie nie zawsze tworzy podstawę do kwalifikowania danego rejonu jako miejsca na instalację geotermalną wspomagającą lub zastępującą konwencjonalne źródło energii cieplnej. Możliwość budowy instalacji geotermalnej weryfikują najczęściej obliczenia potencjału energetycznego wody geotermalnej, możliwego do zagospodarowania w konwencjonalnych sieciach ciepłowniczych opartych na parametrach wysokotemperaturowych rzędu 105–115°C w sezonie grzewczym i około 65°C w sezonie letnim. Ilość pierwotnej energii cieplnej uzyskanej z wody geotermalnej ma znaczenie z punktu widzenia analizy ekonomicznej oraz wykorzystania energii pierwotnej źródła odnawialnego. Analiza ekonomiczna oparta na obliczeniach energii cieplnej z wody geotermalnej może wskazywać kierunek zagospodarowania wody geotermalnej lub zakres budowy instalacji geotermalnej, np. na układ kaskadowy. W przedstawianym artykule zaprezentowano lokalizację instalacji geotermalnej w rejonie północno-zachodnim Tarnowa, dla którego scharakteryzowano warunki geologiczne i przeprowadzono obliczenia pozwalające na określenie ilości energii cieplnej możliwej do wykorzystania w sieci ciepłowniczej zasilanej konwencjonalnym

źródłem ciepła. Przedstawiono warianty obliczeniowe dla wydatków przepływu i temperatur dopływu wody geotermalnej do układu odbioru ciepła w odniesieniu do prognozowanych parametrów eksploatacyjnej wody geotermalnej.

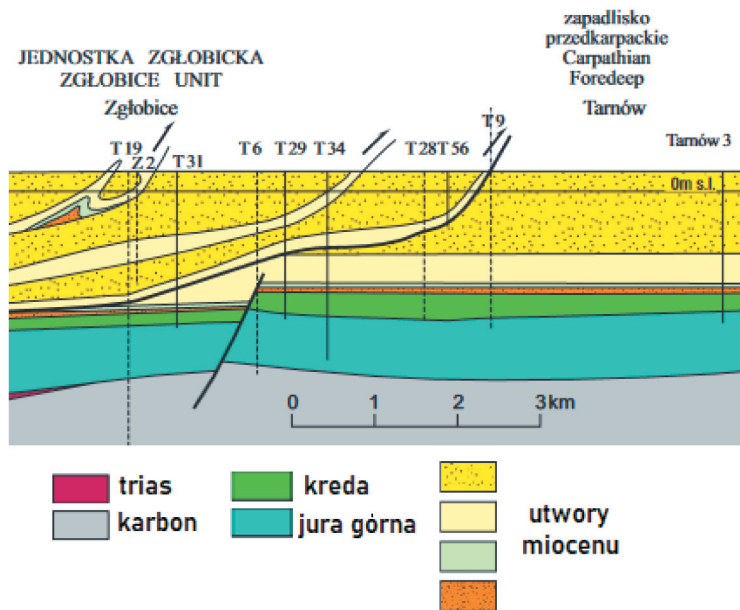
2. Położenie i charakterystyka geologiczna rejonu badań

Geograficznie miasto Tarnów położone jest na Płaskowyżu Tarnowskim należącym do południowego obrzeża Kotliny Sandomierskiej. Zgodnie z podziałem na jednostki fizyczno-geograficzne (Kondracki 2002) zawartym w Centralnej Bazie Danych Geologicznych (CBDG) omawiany teren znajduje się w granicach prowincji Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem Zachodnim i Północnym. Na tle głównych jednostek tektonicznych Polski (Żelaźniewicz i in. 2011) obszar Tarnowa znajduje się częściowo w środkowej części zapadliska przedkarpackiego i częściowo w brzeżnej strefie Karpat zewnętrznych (Oszczypko 2001, 2006).



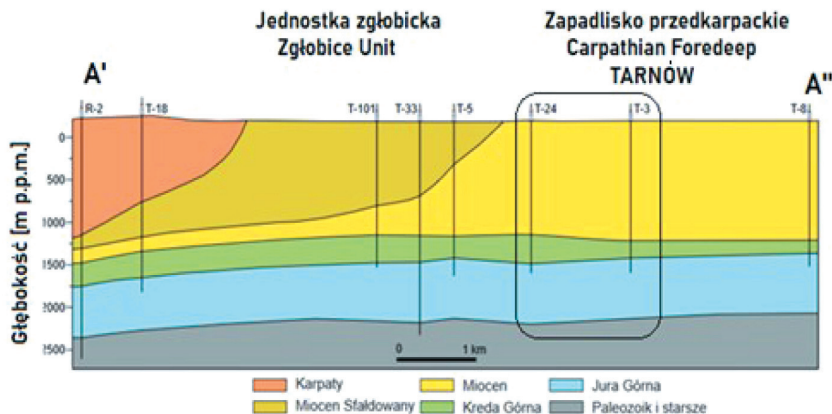
Rys. 1. Miejsce prowadzenia badań na terenie Tarnowa oraz linia przekroju geologicznego A'-A''

W obrębie analizowanego obszaru i w pobliżu rejonu badań (lokalizacji przewidywanego otworu geotermalnego) przechodzi linia nasunięcia karpackiego. Strefa nasunięcia zbudowana jest z utworów miocenu sfałdowanego, w której wyróżnia się jednostkę zgłobicką i występujące w jej obrębie pasmo łusek (rys. 2). Poza linią nasunięcia w kierunku północnym zalegają prawie poziomo utwory miocenu autochtonicznego oraz warstwy jego podłoża (rys. 2 i 3). Podłoże stanowią utwory kredy górnej, pod którymi zalega miąższy kompleks jurajski. Utwory miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego raczej nie stanowią istotnej perspektywy pozyskania energii hydrotermalnej. Na obszarze badań w znacznej części warstwy miocenu autochtonicznego reprezentowane są przez utwory klastyczne zaliczone do formacji skawińskiej (Peryt i Piwocki 2004, Urbaniec i in. 2021). Utwory te budują iłowce i mułowce miejscami częściowo margliste zawierające przewarstwienia piaskowcowe. Niejednorodność wykształcenia litofacjalnego nie stanowi dobrej podstawy do szacowania stabilnych wydatków wydobycia i iniekcji wód wykorzystanych w instalacjach odbioru ciepła.



Rys. 2. Część północna przekroju geologicznego Olszyny–Tarnów
Źródło: Oszczytko (2001)

W rejonie Tarnowa w podłożu utworów miocenu autochtonicznego zalegają utwory górnokredowe (rys. 2 i 3), mające lokalnie korzystne własności zbiornikowe (Heller i Moryc 1984, Górecki 2012). Poniżej występuje kompleks jurajski, który prawie w całości wypełniają utwory górnej jury. Na północ i wschód od Tarnowa lokalnie występują utwory jury środkowej, jednak w analizowanym rejonie w otworach wiertniczych (rys. 2 i 3) nie stwierdzono obecności tej formacji geologicznej.



Rys. 3. Przekrój geologiczny (A'-A'') Radlna 2 – Tarnów 8 i rzut rejonu badań
Źródło: Samojułk i Soboń (2024)

Utwory górnej jury stanowią główny poziom zbiornikowy zapadliska przedkarpackiego, w którym przewidywane są znaczne zasoby hydrotermalne. Istotnego znaczenia nabiera możliwość iniekcji wody po odprowadzeniu z niej ciepła w przypadku eksploatacji z wydatkami umożliwiającymi jej wykorzystanie w celach ciepłowniczych, wynoszącymi 20–100 m³/h. Na podstawie przeprowadzonej analizy warunków geologicznych, hydrogeologicznych i złożowych z materiałów archiwalnych oraz materiałów publikowanych (Gliniak i in. 2004, Górecki 2012, Miziołek i in. 2023) w utworach jury górnej można założyć dobre warunki do wydobywania wody geotermalnej. Zintegrowana analiza badań sejsmicznych z badaniami rdzeni wiertniczych kompleksu jurajskiego na rozpatrywanym obszarze, w aspekcie rozwoju zjawisk krasowych, niewątpliwie zwiększy trafność prognoz dotyczących możliwości iniekcji wykorzystanych wód geotermalnych.

Przeprowadzone opróbowania w otworach wiertniczych i analiza wartości porowatości na obszarze (Miziołek i in. 2023) obejmującym omawiany rejon wskazują na najwyższe porowatości w górnym interwale jury górnej. Podobna sytuacja jest w innych rejonach Karpat, co wiąże się z procesami szczelinowatości i zjawiskami krasowymi (Miziołek i Filar 2019, Miziołek i in. 2022). Występowanie interwałów szczelinowych, przewidywane w omawianym rejonie, znacznie zwiększa możliwości wykorzystania wydobywanej wody geotermalnej zwłaszcza w celach ciepłowniczych, co związane jest z procesem iniekcji wód po odbiorze ciepła.

3. Warunki geologiczno-złożowe piętra górnourajskiego na obrzeżach Tarnowa

Piętro górnourajskie budują utwory węglanowe. W górnej części profilu występują znacznie zróżnicowane litologicznie i facjalnie osady wapienne, dolomityczne i margliste (Peryt i Piwocki 2004, Gutowski i in. 2005, Urbaniec 2021a). Wodoność tych

skał jest przede wszystkim uzależniona od rozwoju szczelin i kawern. Wapienie skaliste nieuławiczone są pocięte szczelinami często pionowymi, a w uławicznych wapieniach skalistych i płytowych sieć spękań pionowych jest uzupełniona wypełnieniami międzylawicowymi, odgrywającymi ważną rolę w kształtowaniu warunków przepływu wody podziemnej w tych skałach. Istotną rolę w przewodzeniu wody podziemnej odgrywają również kanały krasowe. Strefa głębokiego zasięgu krasu wapieni nie jest jednak wystarczająco rozpoznana. Rejon północnej części miasta Tarnowa pod względem wodonośności skał jurajskich jest słabo rozpoznany. W otworach naftowych Zaczarnie 3 i Zaczarnie 6, znajdujących się na wschód (ENE) od Tarnowa, po nawierceniu utworów jury stwierdzono jej zawodnienie (Bujakowski i Barbacki 2016). W utworach jury górnej ze względu na rozwój litologiczny zauważa się trójdzielność. W wyższej części profilu występują skały wapienne, wapienie margliste i margle.

Wapienie zazwyczaj charakteryzuje porowatość w zakresie 3–8% i niska przepuszczalność. Wartość porowatości rzędu 3,2–8,5% uzyskano z formacji przewierconych otworami Radłów 1 i Radłów 4 (Bujakowski i Barbacki 2016). Wapienie i wapienie dolomityczne z otworu Radłów 4 z interwału głębokościowego 1251–1257 m charakteryzują się porowatością rzędu 8–16,3%. W otworze Radłów 1 w wapieniach z głębokości 1233–1246 m stwierdzono porowatość w zakresie 18,7–19,9% i przepuszczalność 6 mD. Podczas opróbowania interwału 1240–1250 m w otworze Radłów 4 uzyskano przyływ solanki o wydajności 0,2 m³/h (Bujakowski i Barbacki 2016). Profil środkowej części jury górnej wykazuje zwiększoną zawartość frakcji ilastej. Słabo związane margle i wapienie margliste wykazują porowatości rzędu 1–7%. Brak przepuszczalności kwalifikuje te osady do grupy skał o bardzo słabych własnościach zbiornikowych. W dolnej części profilu jury górnej występują na ogół związane wapienie, wapienie margliste oraz dolomity (Bujakowski i Barbacki 2016).

W otworze Biadoliny 9 opróbowano dolną część kompleksu górnourajskiego uzyskano jedynie niewielkie przykławy solanki. Korzystniejsze właściwości zbiornikowe mają serie zdolomityzowane stwierdzone w otworze Bobrowniki 1. Na podstawie analiz laboratoryjnych (Bujakowski i Barbacki 2016) stwierdzono porowatość dochodzącą do 14,11% i przepuszczalność do 19,99 mD. Badania wykazały, że węglany (skały węglanowe, osady węglanowe) z głębokości rzędu 1500–1600 m charakteryzują się wysoką porowatością osiągającą wartości do 11,3% oraz przepuszczalnością do 23 mD. Uzyskano dopływy wody złożowej z wydatkiem około 12 m³/h (Bujakowski i Barbacki 2016).

Pod utworami jury górnej w otworach Pawężów 5 i Radłów 1 przewiercono warstwy jury środkowej. W przewierconym profilu przeważają osady piaszczyste o wysokiej porowatości rzędu 13% i dobrej przepuszczalności. W otworze Radłów 1 podczas opróbowania warstw jury środkowej w interwale głębokościowym 1981–2004 m uzyskano przyływ solanki o wydajności 2,5 m³/h (Bujakowski i Barbacki 2016).

Na obszarze przedgórza Karpat duże znaczenie ma obecność budowli organicznych w utworach późnojurajskich. W obiektach tego typu występują bardzo dobre parametry petrofizyczne pozwalające sklasyfikować te utwory jako bardzo dobre skały zbiornikowe o porowatości efektywnej do 25% i przepuszczalności absolutnej do 700 mD (Gliniak i in. 2005).

Zbiornik górnourajski (rys. 2 i 3) w północnej części Tarnowa charakteryzuje się stosunkowo jednolitą miąższością wynoszącą 450–750 m (rys. 3). Omawiane utwory charakteryzują się zróżnicowanymi parametrami zbiornikowymi (Gliniak i in. 2004, 2005, Gutowski i in. 2007, Bujakowski i Barbacki 2016, Miziołek i in. 2022, 2023):

- przepuszczalność od 2,4 mD do 700 mD,
- porowatość od 1,75% do 25%.

Przeprowadzona analiza parametrów petrofizycznych i przewodnościowych utworów górnourajskich wskazuje na perspektywę uzyskania przyływu wody geotermalnej o wydajności wystarczającej do jej wykorzystania w celach ciepłowniczych.

W obrębie kompleksu jury górnej przewiduje się występowanie kilku horyzontów wodonośnych. Wydajność wód może się różnić w zależności od porowatości, szczelinowatości i zjawisk krasowych.

Przewiduje się, że temperatury przyływu wód złożowych z utworów węglanowych jury górnej północnej części miasta Tarnowa z interwału 1500–2250 m p.p.m. (rys. 3) według szacowanego stopnia geotermicznego 41–34 m/deg będą w zakresie 44–67°C. Temperatury zmierzone w otworach wiertniczych w rejonie udokumentowanego złoża gazu ziemnego Tarnów (Miziołek i in. 2023) w interwale głębokościowym 1655–1760 m wynosiły 55,85–58, 85°C. W interwale strefy zawadnionej na głębokości 1833 m i 1791,5 m temperatura wynosiła odpowiednio 61°C i 56°C. W otworze Tarnów 31 (T-31) (rys. 1) znajdującym się około 6500 m od analizowanego rejonu stwierdzono na głębokości 1870,6 m temperaturę 54°C. Pomiaru temperatury w utworach jury górnej na obszarach przyległych do analizowanego rejonu Tarnowa wykonano m.in. w otworach (Bujakowski i Barbacki 2016):

- Bobrowniki 1: stwierdzono 58°C na głębokości 1900 m,
- Bogumiłowice 4: stwierdzono 55°C na głębokości 1568 m,
- Bogumiłowice 5: stwierdzono 51°C na głębokości 1600 m,
- Łętowice 18: stwierdzono 46°C na głębokości 1600 m,
- Łętowice 19: stwierdzono 56°C na głębokości 1597 m,
- Łętowice 20: stwierdzono 59°C na głębokości 1867 m,
- Wierzchosławice 16: stwierdzono 53°C na głębokości 1647 m,
- Wierzchosławice 16: stwierdzono 59°C na głębokości 1904 m.

Przyjęto interwały głębokościowe zalegania utworów kompleksu jurajskiego w analizowanym rejonie Tarnowa z przekroju A'-A'' (rys. 3) odpowiednio dla otworów:

- Tarnów 24 (T-24) strop nawiercony 1683 m p.p.m., spąg około 2200 m p.p.m.,
- Tarnów 3 (T-3) strop nawiercony 1613 m p.p.m., spąg około 2100 m p.p.m.

Z uwagi na proces zatłaczania wykorzystanych (schłodzonych) wód geotermalnych i wyznaczenie parametrów gęstości i lepkości wody należy określić przewidywaną mineralizację i skład chemiczny. W rozpatrywanym rejonie (rys. 3) brak jest otworów wiertniczych i określenie mineralizacji i charakteru hydrochemicznego wód z poziomu hydrotermalnego jury górnej przewiduje się na podstawie rejonów przyległych, w których pobrano próby wody z otworów wiertniczych. Mineralizacja wód złożowych z otworów na złożu gazu Tarnów (jura) wynosi średnio $104,8 \text{ g/dm}^3$. Mineralizacja ogólna wód złożowych z utworów górnej jury jest bardzo zmienna (Bujakowski i Barbacki 2016, Miziołek i in. 2023) i wynosi od $83,7$ do $222,35 \text{ g/dm}^3$ w części obszaru na północny zachód od Tarnowa, a ich gęstość zawiera się w przedziale $1,06\text{--}1,20 \text{ g/l}$. Mineralizacja w utworach jurajskich w zakresie ww. rozpatrywanych otworów (Bujakowski i Barbacki 2016) jest zróżnicowana w przedziale $86,43\text{--}172,53 \text{ g/dm}^3$ i nie wykazuje znaczącego trendu wzrostu wraz z głębokością. Typ genetyczny wód według klasyfikacji Sulina jest jednolity: chlorkowo-wapniowy (Bujakowski i Barbacki 2016).

W składzie chemicznym wody z otworów rejonu złoża gazu ziemnego Tarnów (jura) największe wartości koncentracji jonów stwierdzono (Miziołek i in. 2023): dla jonu chlorkowego Cl^- ($59,86 \text{ g/dm}^3$) i Na^+ ($36,05 \text{ g/dm}^3$), następnie: Ca^{2+} ($3,35 \text{ g/dm}^3$), SO_4^{2-} ($1,87 \text{ g/dm}^3$), HCO_3^- ($1,16 \text{ g/dm}^3$), Fe^{3+} ($0,3 \text{ g/dm}^3$), Br ($0,12 \text{ g/dm}^3$), jony SiO_2^- i J^- odnotowują wartości poniżej $0,1 \text{ g/dm}^3$.

4. Przewidywane ciśnienia złożowe, kierunki przepływu, wydajności i temperatura wody geotermalnej

Przedstawione dane wskazują, że najważniejsze zasoby hydrotermalne w charakteryzowanym rejonie są związane głównie z utworami górnej jury, co pozwala na prognozowanie warunków ciśnieniowych w najbardziej korzystnej strefie.

Ciśnienie złożowe w rejonie Tarnowa mierzone w otworze Pogórska Wola 15 osiągnęło wartość 26 MPa , natomiast zakres zmian ciśnienia w utworach górnej jury wynosi $15,19\text{--}32,89 \text{ MPa}$ (Miziołek i in. 2023). W rozpatrywanym rejonie przewidywane jest występowanie gradientu ciśnienia złożowego w pobliżu górnej granicy ciśnienia normalnego lub nieco podwyższonego. Zasilanie i kierunki przepływów są związane z wychodniami jury. Generalnie przyjmuje się, że zasilanie i odpływ występują na wychodniach w obrębie Jury Krakowsko-Częstochowskiej i na obrzeżu Gór Świętokrzyskich, czyli kierunki przepływu w utworach jury w omawianym terenie zawierają się pomiędzy kierunkami WN i N.

W rozpatrywanym rejonie zależnie od parametrów przewodnościowych oraz głębokości położenia horyzontu wodonośnego przewidywane są następujące wartości wydajności i temperatury wody geotermalnej:

- jura górna:
 - wydajność od 20 do ponad 100 m³/h,
 - temperatura w zakresie 49–65°C;
- jura środkowa:
 - wydajność w zakresie 20–60 m³/h,
 - temperatura 50–65°C;
- połączone horyzonty:
 - wydajność rzędu 40–100 m³/h,
 - temperatura 50–65°C.

5. Potencjał energetyczny wody geotermalnej

Potencjał energetyczny wody geotermalnej wyznaczono na podstawie energii cieplnej strumienia wody geotermalnej w zadanym przedziale czasu przy uwzględnieniu jej mineralizacji:

$$E = \dot{m} \cdot C_{w\dot{s}.w.f(T_{sr})} \cdot (T_z - T_w) \cdot \theta \quad (1)$$

gdzie:

- E – energia cieplna strumienia wody geotermalnej [J],
- \dot{m} – strumień masy wody geotermalnej [kg/s],
- $C_{w\dot{s}.w.f(T_{sr})}$ – ciepło właściwe wody geotermalnej przy $(T_z + T_w)/2$,
- θ – czas przepływu [s].

Moc strumienia:

$$P = \frac{E}{\theta} \quad (2)$$

gdzie P – moc strumienia cieplnego [W].

Moc cieplna instalacji odbioru ciepła z wody geotermalnej o temperaturze 50°C i wydatku przepływu 60 m³/h oraz mineralizacji 105 g/l, wydobywanej z poziomów zbiornikowych jury górnej, przy schłodzeniu do 11°C (tj. średnia temperatura wód powierzchniowych) może osiągnąć wartość 2,91 MW, a przy odbiorze ciepła powodującego schłodzenie wód geotermalnych do poziomu 25°C byłaby to moc 1,85 MW. Potencjał energetyczny eksploatowanej wody geotermalnej obliczono na podstawie parametrów

złożowych prognozowanych w północno-zachodnim rejonie miasta Tarnowa. Przeprowadzona analiza parametrów zbiornikowych, miąższości oraz zasobów hydrotermalnych eksploatacyjnych dla utworów jurajskich (Górecki 2012) pozwala na prognozowanie wydajności przyływu wody geotermalnej do 100 m³/h. Uzyskanie dużych wydajności eksploatacyjnych wymaga zastosowania odpowiedniej konstrukcji otworu przy długich interwałach dopływu oraz systemu eksploatacji dostosowanego do warunków ciśnieniowych (Soboń 2020). W przypadku kompleksu górnej jury lub jury górnej i środkowej łączna miąższość udostępnionych warstw o korzystanych parametrach zbiornikowych może osiągać wartość ponad 250 m.

Analizowano wydajności eksploatacyjne oraz temperatury wypływu wody geotermalnej w otworze wiertniczym w analizowanym rejonie i przeprowadzono obliczenia w układzie dwóch wariantów temperaturowych i trzech natężeń wypływu. Prognoza parametrów eksploatacyjnych została odniesiona do warunków powierzchniowych. Analizowano przypadki od wariantu, gdy temperatura wypływu wody geotermalnej z otworu wynosi 60°C i wydatek wypływu 60 m³/h, do wariantu, gdy temperatura wypływu wody geotermalnej wynosi 45°C i wydatek wypływu 20 m³/h. Przeprowadzono również obliczenia dla temperatury wód 50°C i 60°C i natężenia wypływu 100 m³/h, które odnoszą się do przewidywanego udostępnienia do eksploatacji kompleksu jury górnej o znacznej miąższości i korzystnych własnościach zbiornikowych.

Tabela 1

Energia cieplna z wody geotermalnej w sezonie letnim
i udział w całkowitej ilości ciepła dostarczanego do sieci ciepłowniczej

Sezon letni, m-ce VI–IX (4 m-ce = 122 doby)								
Wariant	Q wody geotermalnej	T_1	T_2	T_3	$\rho_{w.geot.}(M = 105 \text{ g/dm}^3)$	$C_{w.geot.}$	$E_{geot.}$	$\%E_{geot.}$
[-]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[J/(kg·deg)]	[GJ]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
w-I	100	49	22	26,7	1066,78	4220	35 193	38,2
w-Ia	100	59	25	33	1061,69	4267	43 772	47,5
w-II	60	49	22	26,7	1066,78	4220	21 116	22,9
w-IIa	60	59	25	33	1061,69	4267	26 263	28,5
w-III	20	49	22	26,7	1066,78	4220	7038	7,6
w-IIIa	20	59	25	33	1061,69	4267	8754	9,5
w-IV	100	44	19	24,8	1069,27	4206	32 657	35,4
w-V	60	44	19	24,8	1069,27	4206	19 594	21,3
w-VI	20	44	19	24,8	1069,27	4206	6531	7,1

Tabela 2

Energia cieplna z wody geotermalnej w sezonie grzewczym
i udział w całkowitej ilości ciepła dostarczanego do sieci ciepłowniczej

Sezon grzewczy, m-ce X–V (8 m-cy = 243 doby)								
Wariant	Q wody geotermal.	T_1	T_2	T_3	$\rho_{w.geot.}(M = 105 \text{ g/dm}^3)$	$C_{w.geot.}$	$E_{geot.}$	$\%E_{geot.}$
[-]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[J/(kg·deg)]	[GJ]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
w-I	100	49	40	8,9	1066,78	4220	23 366	2,8
w-Ia	100	59	40	18,6	1061,69	4263	49 095	5,9
w-II	60	49	40	8,9	1066,78	4220	14 019	1,7
w-IIa	60	59	40	18,6	1061,69	4263	29 457	3,5
w-III	20	49	40	8,9	1066,78	4220	4 673	0,6
w-IIIa	20	59	40	18,6	1061,69	4263	9 819	1,2

Objaśnienia:

- Q – natężenie przepływu,
 $T_z = T_1$ – temperatura wody geotermalnej na dopływie do wymiennika,
 $T_w = T_2$ – temperatura wody geotermalnej na wypływie z wymiennika,
 $T_3 = (T_1 - T_2) - T_{str.wym.}$ – temperatura obliczeniowa,
 $T_{str.wym.}$ – straty na wymienniku ciepła,
 $C_{wsf}(T_{gr}) = C_{w.geot.}$ – ciepło właściwe wody geotermalnej przy $(T_1 + T_2)/2$ (Raźniewicz 1964),
 $\rho_{w.geot.}$ – gęstość wody geotermalnej przy $(T_1 + T_2)/2$ i mineralizacji 105 [g/dm³],
 $E_{geot.}$ – energia cieplna z wody geotermalnej,
 $\%E_{geot.}$ – udział procentowy energii geotermalnej w energii cieplnej dostarczanej do sieci ciepłowniczej.

Pozyskanie energii cieplnej z wód geotermalnych, tj. czystej energii geotermalnej, przeprowadzono w odniesieniu do układu technologicznego przy zastosowaniu wymienników ciepła i pomp ciepła. Założono, że ciepłownia, w której będzie zagospodarowywane ciepło wód geotermalnych w okresie letnim, dostarcza do sieci ciepłowniczej wodę o temperaturze 65–70°C, natomiast temperatura wody powrotnej wynosi 43°C. W okresie zimowym temperatura wody dostarczanej do sieci ciepłowniczej wynosi 110–115°C, a temperatura wody powrotnej z układu sieci ciepłowniczej 63°C.

Rozpatrywano warianty temperaturowe dolnego źródła i przewidywane wydatki eksploatacyjnej wody geotermalnej. Pomiędzy otworem wydobywczym a ciepłownią założono obniżenie temperatury wody geotermalnej o $\Delta T = 1^\circ\text{C}$. Całkowita produkcja ciepła uzyskiwana z zastosowanych pomp ciepła jest wyższa zazwyczaj w zakresie 20–30% (Eco-Pris 2023) przy uwzględnieniu dostarczanej energii elektrycznej oraz zależy od parametrów pracy pompy ciepła. Zbilansowanie całkowitej produkcji energii cieplnej uzyskanej z pomp ciepła będzie możliwe po wyznaczeniu współczynników

COP (*Coefficient of Performance*), oznaczającego stosunek ilości dostarczonego ciepła do ilości energii elektrycznej zużytej przez pompę, i SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*), będącego wskaźnikiem efektywności określającym stosunek ilości ciepła wyprodukowanego w danym sezonie grzewczym do pobranej w tym czasie energii elektrycznej. Wyznaczenie współczynników do pomp ciepła dobranych do parametrów wód geotermalnych uzyskanych z wykonanego otworu pozwoli na powiększenie uzyskiwanego efektu energetycznego o dostarczoną energię, a w przypadku zastosowania zasilania solarne zostanie powiększony bilans energii ze źródeł odnawialnych.

6. Dyskusja

Analiza warunków geologicznych, hydrogeologicznych i parametrów złożowych została oparta na wynikach badań z otworów wiertniczych z rejonów przyległych, jednak z uwagi na stosunkowo niezaburzoną tektonikę analizowanego rejonu, co przedstawiono na rysunkach 2 i 3, można wnioskować na temat warunków występowania wód geotermalnych w analizowanym rejonie. Sprawą dyskusyjną jest występowanie jury środkowej, w której stwierdzono lokalnie korzystne warunki zbiornikowe. Przeprowadzona analiza obejmuje możliwość nawiercenia tych utworów. Charakterystyka wykształcenia litologicznego utworów jury środkowej w formie serii piaszczystych może stwarzać korzystne warunki do eksploatacji wody geotermalnej. Osiągnięcie większych wydajności eksploatacyjnych raczej nie jest możliwe ze względu na nieduże miąższości tych utworów. Nawiercenie utworów jury środkowej i stwierdzenie korzystnych warunków hydrotermalnych stwarza możliwość eksploatacji z horyzontów zbiornikowych środkowej i górnej jury. Podobnie jest w przypadku utworów kredy i ewentualnej eksploatacji wody z tych utworów. Ze względu na znaczną miąższość kompleksu górnej jury oraz możliwość występowania zawodnionych horyzontów o dużych miąższościach w kilku interwałach głębokościowych, kompleks górnej jury jest brany pod uwagę jako miejsce utworzenia głównego zbiornika hydrotermalnego.

Wykorzystanie potencjału cieplnego wody geotermalnej oparto na obliczeniach ilości ciepła możliwego do uzyskania ze strumienia wodnego. Ilość pozyskiwanego ciepła zależy od temperatury wody dopływającej do układu odbioru ciepła i przewidywanej temperatury schłodzenia, tj. temperatury wody wypływającej z układu odbioru ciepła. Ze względu na wyższą temperaturę wody dostarczanej z ciepłowni do sieci ciepłowniczej w porównaniu z temperaturą eksploatowanej wody geotermalnej wymagane jest zastosowanie pomp ciepła.

Ilość pozyskanego ciepła odnosi się do temperatury schłodzenia wody geotermalnej w pompie ciepła, przy czym efektywnie będzie to nieco wyższa wartość w wyniku uwzględnienia współczynników COP i SCOP. Dodatkowy wzrost ilości pozyskanego

ciepła można osiągnąć przez budowę kaskadowego układu odbioru ciepła, co umożliwia lepsze wykorzystanie dostępnego potencjału energetycznego.

7. Wnioski

- Analiza warunków geologicznych, hydrogeologicznych i złożowych pozwala wnioskować, że w północno-zachodniej części miasta Tarnowa, w utworach jury górnej istnieją korzystne warunki geologiczno-złożowe dla wydobycia wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych.
- Przewidywane parametry zbiornikowe w obrębie kompleksu jurajskiego oraz jego miąższość stwarzają możliwość uzyskania wydajności przyływu wody geotermalnej do 100 m³/h. Uzyskanie takiego wydatku pozwala na zagospodarowanie wody geotermalnej dla celów ciepłowniczych i zwiększa udział energii geotermalnej w bilansie dostarczanej energii cieplnej do sieci ciepłowniczej w zakresie 38,2–47,5% w okresie letnim i 2,8–5,9% w okresie zimowym, co dość znacząco podkreśla udział energii odnawialnej w bilansie energetycznym ciepłowni dostarczającej energię cieplną.
- Optymalnym okresem zagospodarowania energii geotermalnej jest czteromiesięczny sezon letni (od czerwca do września), gdzie praca pomp ciepła w znacznym stopniu może pokryć zapotrzebowanie na energię cieplną. Energia elektryczna dostarczana z paneli fotowoltaicznych może ograniczyć koszty zasilania pomp ciepła i koszty iniekcji wody, co dodatkowo zwiększa udział energii odnawialnej w bilansie energetycznym.
- Zmniejszenie wydatku dopływu wody geotermalnej ze 100 m³/h do 60 m³/h, czyli o 40% skutkuje zmniejszeniem procentowego udziału zagospodarowanej energii geotermalnej w okresie letnim o 40% przy temperaturze wody geotermalnej 59°C i również o 40% przy temperaturze wody geotermalnej 49°C, podobna analogia występuje w okresie zimowym. Obliczone wielkości produkcji ciepła i wyznaczone wskaźniki procentowe pozwalają na ocenę ekonomiczną pozyskania energii cieplnej z wydobywanej wody geotermalnej i na wyznaczenie kosztów energii cieplnej dostarczanej do sieci ciepłowniczej.

Literatura

- Bujakowski W., Barbacki A., 2016, *Triasowy zbiornik wód termalnych w północnej strefie Tarnowa – parametry hydrogeotermalne i perspektywy wykorzystania*, Zeszyty Naukowe. IGSMiE PAN, nr 92.
- Eco-Prius, 2023, *Przemysłowe pompy ciepła*, <https://ecoprius.pl/pl/przemyslowne-pompy-ciepła.html> [dostęp: 15.10.2024].

- Gliniak P., Gutowski J., Urbaniec A., 2005, *Budowle organiczne w utworach górnej jury przedgórze Karpat – aktualny stan rozpoznania na podstawie interpretacji materiałów sejsmicznych i wiertniczych w kontekście poszukiwań złóż węglowodorów*, Tomy Jurajskie, t. 3, s. 29–43.
- Gliniak P., Laskowicz R., Urbaniec A., Lesniak G., Such P., 2004, *The facies development and reservoir properties in Late Jurassic carbonate sediments in the central Carpathian foreland*, [w:] R. Swennen, F. Roure, J.W. Granath (eds.), *Deformation, Fluid Flow, and Reservoir Appraisal in Foreland Fold and Thrust Belts*, AAPG Hedberg Series, s. 347–355.
- Górecki W. (red.), 2012, *Atlas geotermalny Zapadliska Przedkarpacciego*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków.
- Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek I., Świetlik B., Gliniak P., 2007, *Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, t. 426, s. 1–26.
- Heller I., Moryc W., 1984, *Stratygrafia utworów kredy górnej przedgórze Karpat*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, t. 346, s. 63–108.
- Kondracki J., 2002, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Miziołek M., Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., Bartoń R., Filar B., Moska A., Kwilosz T., 2023, *Potencjał geotermalny utworów węglanowych górnej jury w rejonie Tarnowa*, Nafta-Gaz, nr 5, s. 300–315, <https://doi.org/10.18668/NG.2023.05.0>.
- Miziołek M., Filar B., 2019, *Paleokras w utworach górnej jury podłoża zapadliska przedkarpacciego i jego znaczenie złożowe*, Nafta-Gaz, nr 75(6), s. 330–343.
- Miziołek M., Filipowska-Jeziorek K., Urbaniec A., Filar B., Łaba-Biel A., 2022, *Możliwości identyfikacji stref rozwoju paleokrasu w rejonach złóż węglowodorów z obszaru przedgórze Karpat*, Nafta-Gaz, nr 7, s. 485–502, <http://dx.doi.org/10.18668/NG.2022.07.01>.
- Oszczypko N., 2001, *Rozwój zapadliska przedkarpacciego w miocenie*, Przegląd Geologiczny, t. 49, nr 8, s. 717–723.
- Oszczypko N., 2006, *Powstanie i rozwój polskiej części zapadliska przedkarpacciego*, Przegląd Geologiczny, vol. 54, nr 6, s. 396–403.
- Peryt M., Piwocki M., 2004, *Budowa geologiczna Polski*, t. 1: *Stratygrafia*, cz. 3a: *Kenozooid, paleogen i neogen*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Raźniewicz K., 1964, *Tablice cieplne z wykresami*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Samojłuk J., Soboń J., 2024, *Przekrój geologiczny (A'-A'') Radlna 2 – Tarnów 8 i rzut rejonu lokalizacji otworu [źródło własne]*.

- Soboń J.A., 2020, *Geological hydrogeological and technological conditions of the use of production-injection systems in the Lower Jurassic (Liassic) reservoir horizons of the Polish Lowland*, [w:] Wróbel M., Jewiarz M., Szlęk A. (eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer Proceedings in Energy*, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_60 [materiały konferencyjne].
- Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., Bartoń R., Wilk A., 2021, *Charakterystyka serii zlepieńcowo-olistostromowej z obszaru paleodoliny Szczurowej-Wojnicza na podstawie interpretacji obrazu sejsmicznego*, *Nafta-Gaz*, nr 11, s. 709–724, <http://dx.doi.org/10.18668/NG.2021.11.01>.
- Urbaniec A., 2021a, *Charakterystyka litofacyjna utworów jury górnej i kredy dolnej w rejonie Dąbrowa Tarnowska – Dębica w oparciu o interpretacje danych sejsmicznych i otworowych*, *Prace Naukowe INiG-PIB*, nr 232, <https://doi.org/10.18668/PN2021.232>.
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczytko N., Ślęczka A., Żaba J., Żytko K., 2011, *Regionalizacja tektoniczna Polski*, Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław.