

Anna WACHOWICZ-PYZIK<sup>1</sup>, Anna SOWIŹDŹAŁ<sup>1</sup>, Leszek PAJĄK<sup>2</sup>

## OPTIMALIZACJA WARUNKÓW PRACY DUBLETU GEOTERMALNEGO W REJONIE KALISZA PRZY ZASTOSOWANIU MODELOWANIA NUMERYCZNEGO

### STRESZCZENIE

W ramach niniejszego artykułu, przy wykorzystaniu symulatora TOUGH2, podjęto próbę optymalizacji warunków pracy dubletu geotermalnego dla potencjalnej instalacji geotermalnej zlokalizowanej w rejonie Kalisza. Założono, że rozwiązaniem optymalnym będzie najmniejsza odległość między otworami gwarantująca bezpieczną, długoterminową jego pracę. Miarą bezpieczeństwa pracy systemu był brak obserwacji zjawiska tzw. przebicia frontu chłodnego, które polega na spadku temperatury w otworze produkcyjnym spowodowanym dopływem chłodniejszej wody, zatłaczanej otworem chłonnym. Poziom zbiornikowy w analizowanym rejonie budują piaszczyste utwory dolnej kredy i dolnej jury charakteryzujące się bardzo dobrymi parametrami geotermalnymi. Modelowanie przeprowadzono przy założeniu wykorzystania istniejącego odwiertu Zakrzyn IG-1 jako otwór produkcyjny dla potencjalnej instalacji dubletu geotermalnego ujmującego wody podziemne jury dolnej. Analizie poddano różne odległości, od 500 do 3000 m, pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym. W celu określenia minimalnego dystansu pomiędzy otworami dla każdej odległości testowano te same przedziały wydajności w zakresie od 50 do 150 m<sup>3</sup>/h. W każdym analizowanym przypadku weryfikacji podlegały wyniki wartości ciśnienia i temperatury w strefie głowicy otworu produkcyjnego i zatłaczającego. Na podstawie otrzymanych wyników możliwy był dobór optymalnej odległości, dla której przyjęty zakres wydajności zapewnił brak wpływu otworu chłonnego na temperaturę medium złożowego w założonym horyzoncie czasowym.

### SŁOWA KLUCZOWE

Modelowanie numeryczne, energia geotermalna, jura dolna, Kalisz

---

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

## WPROWADZENIE

Modelowanie numeryczne, wykorzystywane coraz częściej w zagadnieniach geotermalnych, pomaga we wstępnej ocenie wartości głównych parametrów eksploatacyjnych horyzontu zbiornikowego. Modele poprzez graficzną wizualizację pozwalają również na przestrzenne odwzorowanie zarówno danych geologicznych jak i strukturalnych analizowanego ośrodka (Miecznik i in. 2015). Jednak najważniejszym zadaniem modeli oraz symulacji numerycznych jest możliwość odtworzenia zachodzących w analizowanym ośrodku procesów w wyniku poboru medium złożowego i związanego z nim przepływu energii (Bujakowski i in. 2015; Miecznik 2010; Chowaniec 2009; Sowizdzał 2009, 2010; Sowizdzał i in. 2013, 2015). Dzięki możliwości wstępnego oszacowania parametrów wpływających istotnie na warunki pracy sytemu geotermalnego możliwa jest realna ocena kosztów eksploatacyjnych, które w dłuższej perspektywie powinny zrekompensować wysokie nakłady inwestycyjne. W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych możliwa jest optymalizacja konfiguracji ujęcia poprzez odpowiedni dobór lokalizacji otworów, co może przełożyć się na zmniejszenie ryzyka związanego z wykonaniem kosztownych prac wiertniczych. Modele numeryczne umożliwiają również oszacowanie wpływu parametrów eksploatacyjnych, tj. wydajność, temperaturę czy ciśnienie poboru i zatłaczania medium złożowego dla potencjalnej inwestycji.

Modelowanie numeryczne ujęć geotermalnych przeprowadzane jest przy wykorzystaniu różnych algorytmów obliczeniowych opartych głównie na dwóch metodach: różnic skończonych bądź elementów skończonych (Dąbrowski i in. 2010; Dendys i in. 2014). Dostępne dziś na rynku symulatory numeryczne pozwalają zarówno na oszacowanie geotermalnego potencjału, jak i optymalizację kluczowych parametrów zapewniających długoletnią pracę systemu (Dendys i in. 2014; 2015; Zdechlik i in. 2015; Sowizdzał 2014).

Symulacje numeryczne wykonane na etapie wstępnych analiz umożliwiają m.in. dobór lokalizacji odwiertów, a także ich konfigurację, w tym optymalną odległość pomiędzy odwiertami (Wachowicz-Pyzik i in. 2016). Otrzymywane wyniki obarczone są jednak błędami, które wynikają głównie z zastosowanych w trakcie symulacji uproszczeń. Numeryczny model wykonany w oparciu o dostępne dane umożliwia wyciągnięcie ilościowych wniosków, przy czym należy podkreślić, iż modele oparte na błędnych założeniach nie dostarczą poprawnych informacji. Wielkość błędów związana jest więc w dużej mierze z poprawną interpretacją danych geologicznych, geofizycznych oraz innych danych wykorzystanych do konstrukcji modelu koncepcyjnego. Również dobór właściwego oprogramowania, metody numerycznej wykorzystywanej do symulacji, a także sama jakość dyskretyzacji analizowanego obszaru, czy odpowiedni dobór warunków brzegowych modelu determinują poprawność otrzymanych wyników (Wachowicz-Pyzik i in. 2016).

W ramach niniejszego artykułu przeprowadzono serię symulacji numerycznych dla rejonu Kalisz–Malanów przy wykorzystaniu symulatora TOUGH2, bazującego na metodzie różnic skończonych. Przeprowadzone symulacje miały na celu dobór optymalnej odległości otworów produkcyjnego i chłonnego, dla której zmiany wydatku eksploatacyjnego nie wy-

wołałyby spadku temperatury w strefie głowicy otworu produkcyjnego, gwarantując tym samym długoletnią i bezpieczną pracę całego systemu. Dublet geotermalny zlokalizowany został w bliskim sąsiedztwie miasta Kalisz, którego mieszkańcy stanowią potencjalnego odbiorcę energii cieplnej. Otwór Zakrzyn IG-1 został wybrany jako otwór produkcyjny.

W przypadku miasta Kalisz energia ciepła dostarczana jest przez miejski system ciepłowniczy i zasila ok. 53% mieszkańców miasta. Źródłami ciepła w mieście są: elektrociepłownia w Kaliszu o mocy 119 MW (w szczycie 123,4 MW), na którą składają się kotły wodne o mocy 87 MW oraz wymienniki para/woda o mocy 32 MW (w szczycie 36,3 MW), ciepłownia Rejonowa o mocy 58,15 MW zaopatrzona w kotły węglowe oraz kotłownie gazowe należące do PEC o mocy 11,47 MW, co łącznie daje 189 MW. W roku 2009 wielkość zapotrzebowania na energię ciepłą w Kaliszu wyniosła 105,46 MW (Wojdyga i in. 2011). W ramach ograniczenia zanieczyszczenia powietrza w mieście korzystne byłoby zmniejszenie wielkości produkcji energii w ciepłowni Rejonowej korzystającej z kotłów węglowych, które w dalszym ciągu mogły by stanowić szczytowe źródło ciepła.

## 1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

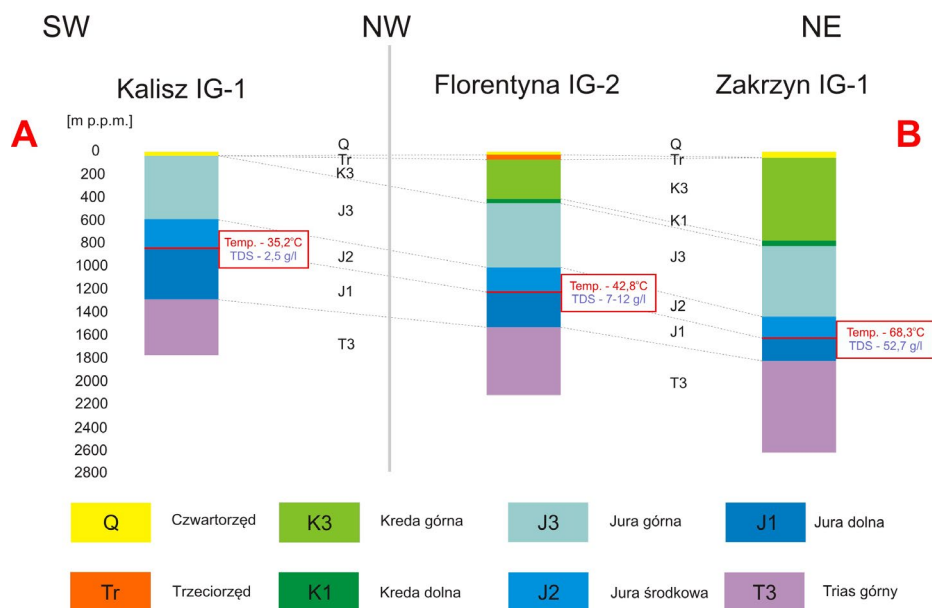
Obszar badań położony jest w centralnej Polsce w bliskim sąsiedztwie miasta Kalisz. Geologicznie rejon ten zlokalizowany jest na granicy niecki łódzkiej i monokliny przedsudeckiej w obrębie Nizy Polskiego (rys. 1). Biorąc pod uwagę geotermalny potencjał, jaki został oszacowany na przestrzeni ostatnich lat na terenie niecki łódzkiej, największe perspektywy wykorzystania zasobów geotermalnych związane są w tym rejonie z piaskowcami dolnej kredy i dolnej jury (Sowiżdżał i in. 2017; Górecki i in. 2006; 2015). Budowa geologiczna niecki łódzkiej jest skomplikowana poprzez liczne wysady solne występujące w jej obrębie. Niecka łódzka wraz z sąsiadującą z nią niecką mogileńską stanowi większą strukturę geologiczną nazywaną niecką mogileńsko-łódzką bądź niecką szczecińsko-łódzko-miechowską, w obrębie której występują największe w Polsce miąższości osadów kredy dolnej (ok. 3000 m) (Stupnicka 1997; Żelaźniewicz i in. 2011). Natomiast monoklina przedsudecka stanowi południowo-zachodnie skrzydło niecki szczecińsko-łódzko-miechowskiej i ograniczona jest od południowego zachodu uskokiem Odry, a od południowego wschodu przechodzi w monoklinę krakowsko-częstochowską. Charakterystyczną cechą monokliny jest mała miąższość osadów permu i triasu, a także wyklinowanie utworów permsko-mezozoicznych w kierunku południowo-wschodnim (Sokołowski 1974; Stupnicka 1997).

W rejonie objętym analizą zlokalizowane są 4 głębokie otwory wiertnicze: Kalisz IG-1 (w strefie monokliny przedsudeckiej), Florentyna IG-2 i Zakrzyn IG-1 (na granicy monokliny przedsudeckiej i niecki łódzkiej) oraz Malanów 1 (na obszarze niecki łódzkiej). We wszystkich otworach nawiercone zostały utwory jury dolnej, które zapadają w kierunku północno-wschodnim osiągając głębokość ok. 2,5 km na wchód od Malanowa. Natomiast utwory kredy dolnej nie zostały nawiercone w otworze Kalisz IG-1, co potwierdza wyklinowujący się charakter utworów kredy w kierunku południowo-wschodnim (rys. 2).



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle głównych jednostek tektonicznych Polski (podział jednostek oznaczono przerywaną linią)

Fig. 1. Location of the research area with the main Polish tectonic units (the division of units was marked by a dotted line)



Rys. 2. Korelacja profili stratygraficznych (wzdłuż przekroju na rys. 1) głębokich otworów wiertniczych w rejonie Kalisza wraz wartościami temperatury i mineralizacji (TSD) w stropie zbiornika jury dolnej (na podstawie danych CBDG 2017; Wachowicz-Pyzik i in., w druku)

Fig. 2. Stratigraphic profile correlation (through the cross-section from Fig. 1) of deep boreholes localization in Kalisza area with temperature and TDS values in the top of Lower Jurassic aquifer (based on CBDG; Wachowicz-Pyzik et. al., in press)

## 2. CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW HYDROGEOLOGICZNYCH JURY DOLNEJ

Gęstość strumienia cieplnego w rejonie badań waha się w zakresie od 70 do 100 mW/m<sup>2</sup> (Szewczyk i Hajto 2006). Wielkość strumienia cieplnego przekłada się na temperaturę wód podziemnych, która dla analizowanego rejonu, pomierzona w warunkach ustalonych w otworze Zakrzyn IG-1, wyniosła w obrębie zbiornika dolnojurajskiego prawie 70°C (na głębokości 1692 m p.p.m.). Wzrost temperatury obserwowany jest w kierunku osiowej części niecki łódzkiej osiągając w rejonie Konina temperaturę ok. 97°C na głębokości 2660 m p.p.m. (otwory jury dolnej nawiercone w otworze Konin IG-1), przy czym maksymalne wartości temperatury zbiornika jurajskiego (ok. 120°C) występują w kierunku północno-wschodnim od Konina (Sowizdział 2017; Hajto 2008). Wraz ze wzrostem temperatury rośnie mineralizacja wód, która dla zbiornika jury dolnej mieści się w zakresie od kilkudziesięciu do 125 g/l, wzrastając w osiowej części niecki łódzkiej powyżej 200 g/l (Hajto 2008; Sowizdział 2017). Wzrost mineralizacji w kierunku osi niecki łódzkiej potwierdziły pomiary głębokich otworów wiertniczych, w których wartości mineralizacji dla poziomu jury dolnej mieszczą się w zakresie od 2,5 g/l w otworze Kalisz IG-1 do ponad 50 g/l w otworze Zakrzyn IG-1 (CBDG 2017). Wielkości porowatości (15–21%) oraz przepuszczalności (w zakresie od kilku do ok. 900 mD) w rejonie badań potwierdzają dobre parametry hydrogeotermalne zbiornika jury dolnej w obrębie analizowanego rejonu. Biorąc pod uwagę perspektywiczne wielkości parametrów tj. temperaturę wód, porowatość, przepuszczalność, a także wielkość potencjalnych wydajności dubletów geotermalnych, która w rejonie Kalisz–Malanów mieści się w zakresie od 50 do ok. 100 m<sup>3</sup>/h (Sowizdział 2017), modelowanie numeryczne wykonano przy założeniu eksploatacji wody ze zbiornika jury dolnej.

## 3. NUMERYCZNY MODEL REJONU KALISZ–MALANÓW

Model rejonu Kalisz–Malanów objął zasięgiem obszar 100 km<sup>2</sup>. W pierwszej kolejności w oparciu o dostępne dane geologiczne i geofizyczne utworzono model koncepcyjny stanowiący podstawę do konstrukcji osnowy geometrycznej modelu numerycznego. Model podzielono łącznie na sześć wydzieleń stratygraficznych (tab. 1).

Każdej zdefiniowanej warstwie, przy wykorzystaniu dostępnych archiwalnych danych pochodzących głównie z głębokich otworów wiertniczych zlokalizowanych w analizowanym rejonie (CBDG 2017), przypisano parametry, tj. gęstość [kg/m<sup>3</sup>], porowatość efektywną [%] i przepuszczalność [mD] (w trzech kierunkach XYZ), a także współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)] i ciepło właściwe [J/(kg·K)] zgodnie z tabelą 2.

Przed przeprowadzeniem symulacji eksploatacji dubletu w pierwszej kolejności na model nałożono prostopadłościenną siatkę obliczeniową. Warstwom przypowierzchniowej i dennej przypisano warunek brzegowy I rodzaju (Dirichleta) (ciśnienie = *constant*, temperatura = *constant*). Kalibrację modelu przeprowadzono w odniesieniu do profilu temperatury otworu Zakrzyn IG-1, wykonanego podczas prac wiertniczych w warunkach ustalonych. W związ-

Tabela 1

## Horyzonty stratygraficzne modelu koncepcyjnego

Table 1

## Stratigraphic horizons of the conceptual model

Nr	Stratygrafia	Strop [m p.p.m.]	Spąg [m p.p.m.]
1.	Utwory kenozoiczne, kredowe i utwory jury górnej	0	825,0
2.	Utwory jury środkowej	825,0	1 624,5
3.	Utwory jury dolnej reprezentowane przez toars	1 624,5	1 692,0
4.	Utwory jury dolnej reprezentowane przez pliensbach	1 692,0	1 790,0
5.	Utwory jury dolnej reprezentowane przez synemur	1 790,0	1 824,5
6.	Utwory triasu	1 824,5	2 600,0

Tabela 2

## Parametry modelu numerycznego rejonu Kalisz–Malanów (CBDG 2017)

Table 2

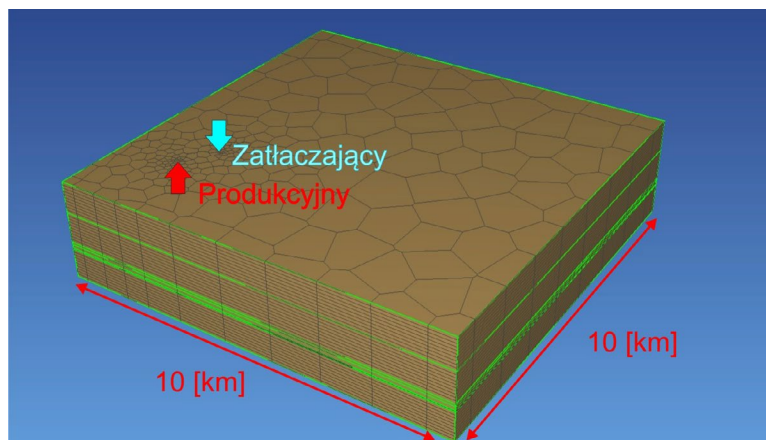
## Parameters of the numerical model of the Kalisz–Malanów region (CBDG 2017)

Lp.	Wydzielenie geologiczne	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość [%]	Przepuszczalność [mD] w kierunkach X; Y; Z	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]	Ciepło właściwe [J/(kg·K)]
1	Kenozoik + kreda	2600,0	1,0	50; 50; 5	2,0	1000
2	Jura środkowa	2600,0	2,0	0,01; 0,01; 0,001	2,0	1000
3	Toars	2600,0	7,0	50; 50; 5	3,5	1000
4	Pliensbach	2600,0	12,0	250; 250; 25	3,5	1000
5	Synemur	2600,0	12,0	250; 250; 25	3,5	1000
6	Trias	2600,0	0,1	0,01; 0,01; 0,001	3,5	1000

ku z brakiem pomiaru ciśnienia w otworze Zakrzyn IG-1 kalibracji dokonano wyłącznie w oparciu o pomiar temperatury. Proces kalibracji obejmował korekty przyjętych założeń odnoszących się do warunków brzegowych (wartości ciśnienia i temperatury) (Wachowicz-Pyzik i in., w druku). Po otrzymaniu zadowalającego dopasowania krzywej modelowej do danych pomierzonych w otworze Zakrzyn IG-1, do modelu wprowadzono otwory wiertnicze, a na model ponownie nałożono siatkę obliczeniową (rys. 3).

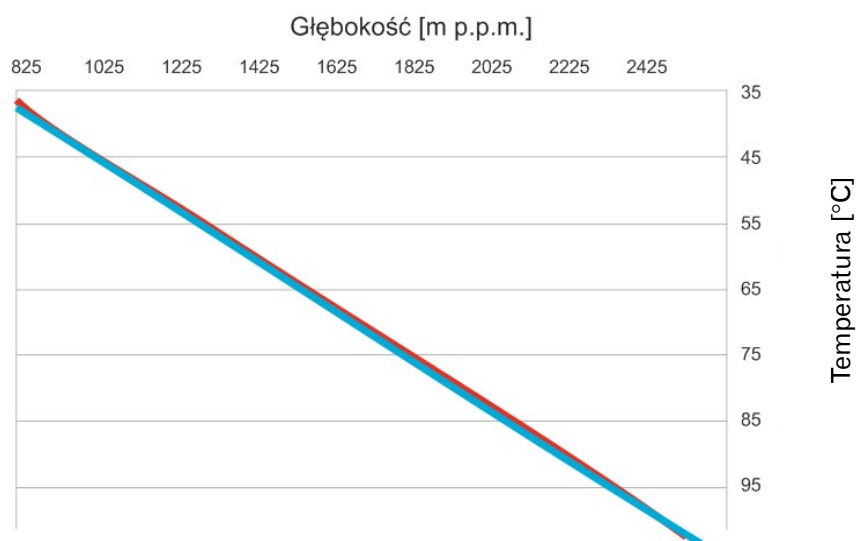
W celu zwiększenia dokładności uzyskiwanych wyników wybrano siatkę poligonalną umożliwiającą zagęszczenie węzłów siatki w bliskiej odległości od odwiertów. Po zmianie siatki model poddano ponownie procesowi kalibracji (rys. 4).

Podczas symulacji otwór Zakrzyn IG-1 pełnił rolę otworu produkcyjnego, natomiast otwór zatłaczający zlokalizowano w jego sąsiedztwie, przy założeniu konieczności wykonania go jako nowego odwiertu. Symulacje numeryczne przeprowadzono lokalizując poziom



Rys. 3. Osnowa strukturalna modelu numerycznego

Fig. 3. The structural groundwork of the numerical model



Rys. 4. Wyniki kalibracji w interwale głębokości 825–2600 m p.p.m.

Fig. 4. Calibration results in a depth interval of 825–2600 m b.s.l.

zbiornikowy na głębokości 1700 m p.p.m., dzięki czemu otwór produkcyjny ujął wody jury dolnej (pliensbachu). W celu zapewnienia zamkniętego obiegu wód zbiornika liasu otwór zatłaczający zaprojektowano tak, aby zatłaczał on eksploatowane wody do tej samej warstwy wodonośnej.

#### 4. OPTIMALIZACJA PRACY DUBLETU GEOTERMALNEGO

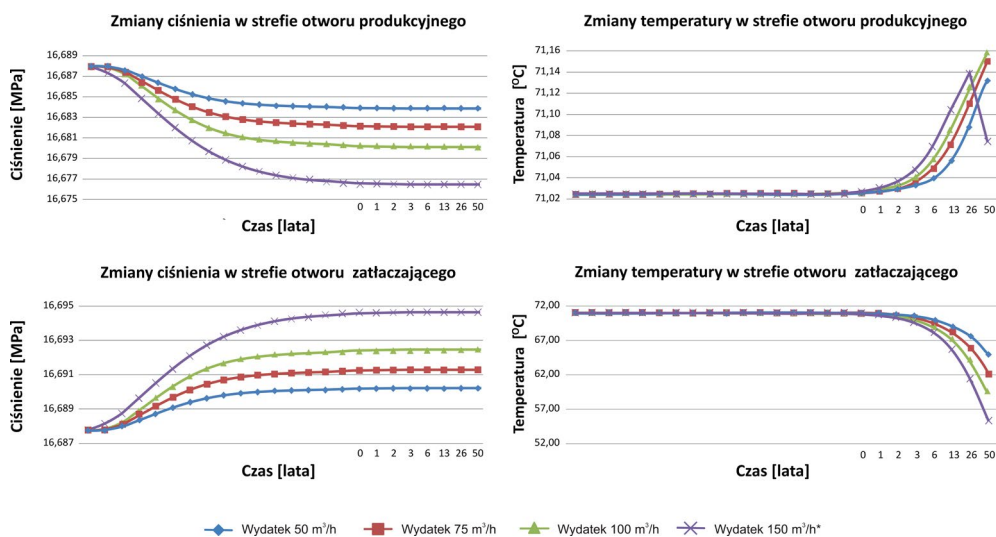
W celu optymalizacji pracy systemu analizie poddano odległości pomiędzy otworem produkcyjnym i chłonnym dla wartości: 500 m i od 1000 do 3000 m (z krokiem 1000 m). Dla każdej z rozpatrywanych odległości przeprowadzono symulacje pracy przy założeniu zróżnicowanych wydajności ujęcia: 50, 75, 100 i 150 m<sup>3</sup>/h. Przy czym wartość 150 m<sup>3</sup>/h, przekraczając oszacowany potencjał wydajności dubletów geotermalnych w tym rejonie, przyjęto w celu obserwacji tzw. przebicia frontu chłodnego w horyzoncie wodonośnym przy zmianach odległości pomiędzy odwiertami. Oba analizowane czynniki mają kluczowe znaczenie dla potencjalnych inwestycji geotermalnych. W przypadku lokalizacji otworów w zbyt bliskiej odległości od siebie może dochodzić do spadku temperatury w horyzoncie wodonośnym, co bezpośrednio przekłada się na spadek mocy instalacji geotermalnej. Zbyt duża odległość między odwiertami wymusza natomiast wykonanie długiego odcinka łączącego odwierty, co przekłada się na wzrost kosztów inwestycji. Dobór zbyt dużego wydatku eksploatacyjnego ujęcia, znacznie przekraczającego potencjalną wielkość wydajności zbiornika geotermalnego, może w konsekwencji doprowadzić do wychłodzenia się wód w sąsiedztwie otworu produkcyjnego, a także przyczynić się do wzrostu ciśnienia na głowicach odwiertów. Zbyt niski wydatek przekłada się natomiast na zmniejszenie mocy systemu, która może okazać się zbyt mała w stosunku do potrzeb odbiorców. Optymalizowaną funkcją celu była zatem wydajność cieplna (moc cieplna) ujęcia geotermalnego w funkcji wydajności i odległości między otworami. Za wydajność optymalną uznano wydajność pozwalającą osiągnąć maksymalną przy minimalnej odległości między otworami. Założono, że moc ujęcia musi gwarantować stabilność pracy instalacji w czasie 50 lat, który uznano za znacznie przekraczający żywotność elementów dubletu i towarzyszącej mu infrastruktury.

Podczas każdej z przeprowadzonych symulacji przyjęto temperaturę zatłaczanych wód na poziomie 25°C przez okres 50 lat pracy systemu. Symulacje przeprowadzono w programie TOUGH2, krok obliczeniowy dobrany został automatycznie przez algorytm programu. Analizie poddawano zmiany ciśnienia i temperatury w otworach produkcyjnym i chłonnym. Wyniki przeprowadzonych symulacji dla odległości 500 i 1000 m przy zmiennej wielkości eksploatacji w zakresie od 50 do 150 m<sup>3</sup>/h przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

#### 5. DYSKUSJA

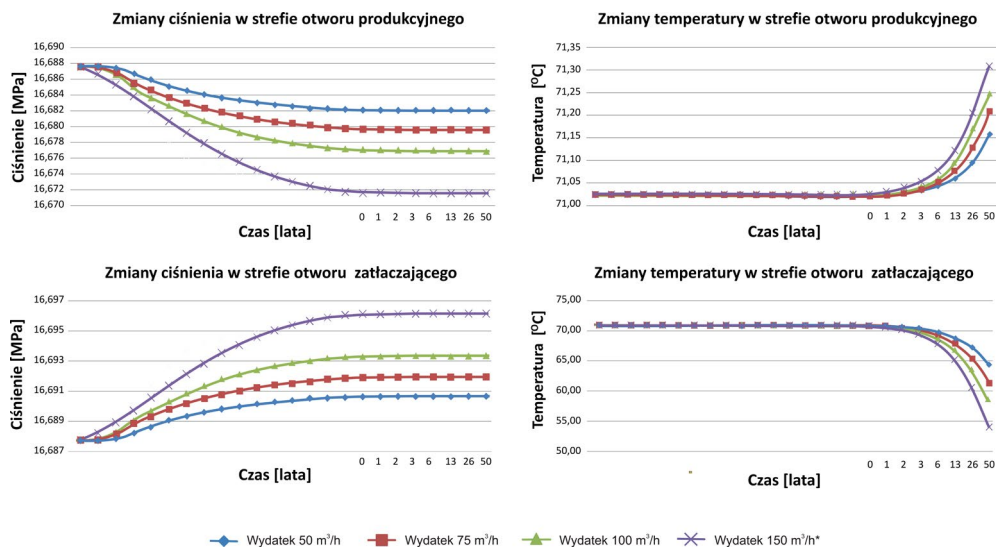
We wszystkich analizowanych przypadkach zmiany ciśnienia w bloku obliczeniowym obejmującym otwór produkcyjny stabilizują się po niespełna roku eksploatacji systemu, podobnie w przypadku zmian ciśnienia w bloku obliczeniowym obejmującym otwór chłonnym, które stabilizuje się z końcem pierwszego roku eksploatacji. W przypadku wielkości temperatury po około 2 latach eksploatacji w strefie otworu produkcyjnego obserwowany jest nieznaczny wzrost temperatury, który związany może być z procesem eksploatacji i dopływem cieplejszych wód z głębszych partii horyzontu wodonośnego. Wzrost temperatury





Rys. 5. Zmiany ciśnienia i temperatury dla systemu dubletu geotermalnego przy zmiennej wielkości eksploatacji przy odległości 500 m pomiędzy odwiertem produkcyjnym a chłonnym

Fig. 5. Pressure and temperature changes in the geothermal doublet with variable size of exploitation at a distance of 500 m between production and injection boreholes



Rys. 6. Zmiany ciśnienia i temperatury dla systemu dubletu geotermalnego przy zmiennej wielkości eksploatacji przy odległości 1000 m pomiędzy odwiertem produkcyjnym a chłonnym

Fig. 6. Pressure and temperature changes in the geothermal doublet with variable size of exploitation at a distance of 1000 m between production and injection boreholes

jest proporcjonalny do wzrostu wydajności ujęcia. Jedynie dla odległości 500 m zaobserwować można nieznaczny spadek temperatury (o  $0,06^{\circ}\text{C}$ ) w przypadku najwyższej z analizowanych wydajności, świadczący o przebicciu frontu chłodnego, spadek ten nastąpił po 26 latach od rozpoczęcia pracy systemu. W przypadku pozostałych analizowanych odległości spadku temperatury nie zaobserwowano dla każdej z analizowanych wartości wydajności. Zmiany temperatury w strefie otworu chłonnego obserwuje się, jak w przypadku strefy otworu produkcyjnego, również po 2 roku eksploatacji przy czym temperatura, dla każdego z analizowanych wariantów utrzymuje się powyżej  $50^{\circ}\text{C}$ .

## PODSUMOWANIE

W artykule podjęto próbę optymalizacji odległości odwiertów wiertniczych dubletu geotermalnego oraz wielkości eksploatacji potencjalnej inwestycji geotermalnej w rejonie Kalisza, maksymalizując uzyskiwaną moc ujęcia przy minimalizacji odległości między otworami. W trakcie prac modelowych ilościowej ocenie poddawano zmiany ciśnienia oraz temperatury w bloku obejmującym otwory: produkcyjny i chłonny. W przypadku najmniejszej z rozpatrywanych odległości otworów (500 m) po 50 latach eksploatacji systemu przy wydajności  $150\text{ m}^3/\text{h}$  obserwowany jest niewielki spadek temperatury w strefie otworu produkcyjnego o  $0,06^{\circ}\text{C}$ . Obserwowany spadek świadczy o przebicciu frontu chłodnego, jednakże przyjęta wydajność  $150\text{ m}^3/\text{h}$  znacznie przekracza wielkość potencjalnej wydajności dla zbiornika jury dolnej w tym rejonie. W przypadku analizowanych wydajności w zakresie od 50 do  $100\text{ m}^3/\text{h}$  nie obserwuje się spadku temperatury w strefie filtra otworu produkcyjnego w żadnym z analizowanych wariantów odległości od 500 do 3000 m. W przypadku zmian ciśnienia w pierwszych miesiącach eksploatacji obserwuje się niewielkie fluktuacje, zarówno w strefie otworu produkcyjnego, jak i chłonnego, które po upływie niespełna roku eksploatacji zanikają. Względy bezpieczeństwa pracy systemu sugerują wykluczenie 500 m rozstawu otworów, bowiem biorąc pod uwagę wysokie zapotrzebowanie potencjalnego odbiorcy jakim jest miasto Kalisz wydajności poniżej  $100\text{ m}^3/\text{h}$  nie sprostająby wymaganiom odbiorców. W przypadku kolejnych testowanych odległości: 1000, 2000, i 3000 m nie zaobserwowano spadku temperatury w otworze produkcyjnym, co potwierdziło bezpieczeństwo pracy dubletu w analizowanym przedziale czasu dla wszystkich testowych wydajności. Zgodnie z przyjętym kryterium za optymalny rozstaw dla rozpatrywanego dubletu geotermalnego uznano odległość 1000 m między odwiertem produkcyjnym a zatłaczającym.

W przeprowadzonych symulacjach numerycznych jako otwór produkcyjny wykorzystano archiwalny odwiert Zakrzyn IG-1 zlokalizowany w bliskim sąsiedztwie miasta Kalisza. Nie podjęto jednak analizy możliwości ewentualnej rekonstrukcji otworu, która może okazać się zbyt kosztowna i uniemożliwić wykorzystanie odwiertu jak przyjęto w opisanym wyżej modelu, wymuszając tym samym konieczność wykonania dwóch nowych otworów: produkcyjnego i chłonnego.

Biorąc pod uwagę lokalizację rejonu badań, potencjalna inwestycja mogłaby zostać wykorzystania do zaopatrywania w energię ciepłą sąsiadujących gmin. Ewentualnym odbiorcą mogło by być również miasto Kalisz, jednak w związku z dużą odległością odwiertu Zakrzyn IG-1 niezbędny byłby rozwój infrastruktury, której koszt mógłby znacznie przewyższyć możliwości pozyskania energii cieplnej przez system. Nie mniej budowa ciepłowni w tym obszarze stanowi alternatywę w stosunku do konwencjonalnych źródeł energii i może pozytywnie wpływać na ograniczenie wielkości zanieczyszczeń w regionie.

Praca została przygotowana w ramach grantu AGH nr 11.11.140.031 i 11.11.150.008.

## LITERATURA

- Bujakowski i in. 2015 – Bujakowski, W., Barbacki, A., Miecznik, M., Pajak, L., Skrzypczak, R. i Sowizdzał, A. 2015. Modelling geothermal and operating parameters of EGS installations in the lower triassic sedimentary formations of the central Poland area. *Renewable Energy* vol. 80, s. 441–453.
- Chowaniec, J. 2009. Studium hydrogeologii zachodniej części Karpat polskich. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* t. 58, s. 762–773.
- Dąbrowski i in. 2010 – Dąbrowski, S., Kapuściński, J., Nowicki, K., Przybyłek, J. i Szczepański, A. 2010. Metodyka Modelowania Matematycznego W Badaniach I Obliczeniach. Hydrogeologicznych. *Poradnik*, s. 306.
- Deczkowski, Z., 1984. *Dokumentacja wynikowa otworu badawczego: ZAKRZYN IG-1. SW/SZ/505*, PGNiG S.A., Warszawa; 129223, CAG, PiG.
- Dendys i in. 2014 – Dendys, M., Tomaszewska, B. i Pajak, L. 2014. Modelowanie numeryczne jako narzędzie wspomagające badania systemów geotermalnych. [W:] A. Krawc, I. Jamorowska, 2014 – *Modelowanie w Hydrogeologii*. Wyd. Nauk. Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, s. 199–206.
- Dendys i in. 2015 – Dendys, M., Tomaszewska, B. i Pajak, L. 2015. Numerical modelling in research on geothermal systems. *Bulletin of Geography, Physical Geography Series* no. 9, s. 39–44.
- Górecki W. i in. *Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim*. ZSE, AGH, Kraków, s. 484
- Górecki i in. 2015 – Górecki, W., Sowizdzał, A., Hajto, M. i Wachowicz-Pyzik, A. 2015. Atlases of geothermal waters and energy resources in Poland. *Environmental Earth Sciences* vol. 74, i. 12, s. 7487–7495
- Hajto, M. 2008. Baza zasobowa wód termalnych na niżu polskim – geologiczne i hydrogeologiczne uwarunkowania lokalizacji obszarów perspektywicznych. *Geologia* t. 34, z. 3, s. 503–526.
- Miecznik, M. 2010. Problematyka modelowania numerycznego 3D złóż geotermalnych. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia Zrównoważony Rozwój* nr 1–2, s. 61–73 s.
- Miecznik i in. 2015 – Miecznik, M., Sowizdzał, A., Tomaszewska, B. i Pajak, L. 2015. Modelling geothermal conditions in part of the Szczecin Trough – the Chociwel area. *Geologos* 21, 3, s. 187–196.
- Sokołowski, J., 1974. Obszar przedsudecki. [W:] *Budowa geologiczna Polski* T. IV, P. 1. Wyd. Geol. Warszawa, s. 101.

- Sowizdzał, A. 2009. Perspektywy wykorzystania zasobów geotermalnych jury dolnej w północno-zachodniej części Polski do celów ciepłowniczych, balneologicznych i rekreacyjnych. *Przegląd Geologiczny* t. 57, nr 8, s. 660–661.
- Sowizdzał, A. 2010. Perspektywy wykorzystania zasobów wód termalnych jury dolnej z regionu niecki szczecińskiej (północno-zachodnia Polska) w ciepłownictwie, balneologii i rekreacji. *Przegląd Geologiczny* t. 58, s. 613–621.
- Sowizdzał, A. 2014. Zastosowanie technik cyfrowej kartografii wgłębnej do rozpoznania potencjału geotermalnego zapadliska Przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny* t. 62, nr 12, s. 842–845.
- Sowizdzał i in. 2017 – Sowizdzał, A., Hajto, M., Papiernik, B., Mitan, K. i Hałaj, E. 2017. Możliwości rozwoju sektora geotermii w centralnej Polsce w świetle pogłębionej analizy strukturalno-parametrycznej rejonu niecki mogileńsko-lódzkie. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia Zrównoważony Rozwój* nr 2, s. 15–27.
- Sowizdzał i in. 2015 – Sowizdzał, A., Papiernik, B. i Machowski, G. 2015. Rola modelowania strukturalno-parametrycznego w procesie typowania potencjalnej lokalizacji zamkniętych systemów geotermicznych w skałach osadowych. *Przegląd Geologiczny* t. 62, nr 6, s. 303–307.
- Sowizdzał i in. 2013 – Sowizdzał, A., Papiernik, B., Machowski, G. i Hajto, M. 2013. Characterization of petrophysical parameters of the Lower Triassic deposits in prospective location for Enhanced Geothermal System (central Poland). *Geological Quarterly* 57, s. 729–744.
- Stupnicka, E. 1997. *Geologia regionalna Polski*. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, s. 205
- Szewczyk, J. i Hajto, M. 2006. Strumień ciepły a temperatury wgłębne na obszarze Nizy Polskiego. Heat flow versus sub-surface temperatures in the Polish Lowlands. [W:] W. Górecki (red.), 2006 – *Atlas zasobów geotermalnych na Nizy Polskim. Formacje mezozoiku*, MŚ, NFOŚiGW, AGH, PIG, Kraków, s. 143–148; s. 149–151.
- Wachowicz-Pyzik i in. 2016 – Wachowicz-Pyzik, A., Sowizdzał, A. i Pająk, L. 2016. Wykorzystanie modelowania numerycznego do określenia wpływu konfiguracji otworów na parametry eksploatacyjne dla dubletu geotermalnego w rejonie Choszczna. *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury* t. 33, z. 63, nr 4, s. 553–564.
- Wachowicz-Pyzik i in., w druku – Wachowicz-Pyzik, A., Sowizdzał, A. i Pająk, L., w druku. Prediction of capacity of geothermal doublet located in the vicinity of Kalisz using the numerical modeling. *Open Access Proceedings E3S Web of Conferences*.
- Wojdyga i in. 2011 – Wojdyga, K., Chorzelski, M., Niemyjski, O., Szadkowski, W., Kwestarz, M. i Mirrosz, L. 2011. *Założenia do planu zapotrzebowania miasta Kalisza na ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe*. Uczelniane Centrum Badawcze Energetyki i Ochrony Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa, s. 132.
- Zdechlik i in. 2015 – Zdechlik, R., Tomaszewska, B., Dendys, M. i Pająk, L. 2015. Przegląd oprogramowania do numerycznego modelowania procesów środowiskowych w systemach geotermalnych. *Przegląd Geologiczny* nr 10/2, t. 63, s. 1150–1154.
- Żelaźniewicz i in. 2011 – Żelaźniewicz, A., Aleksandrowski, P., Buła, Z., Karnkowski, P.H., Konon, A., Oszczyk, N., Ślęczka, A. i Żaba, J. 2011. *Regionalizacja tektoniczna Polski*. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław, s. 66.

# OPTIMIZATION OF WORKING CONDITIONS FOR THE GEOTHERMAL DOUBLET IN THE KALISZ AREA USING NUMERICAL MODELING

## ABSTRACT

The optimization of working conditions for a potential geothermal doublet located in the area of Kalisz was made using the TOUGH2 simulator. It was assumed that the smallest distance between boreholes in a geothermal doublet would be an optimal solution and guarantees the safe and long-term operation of the doublet. The measure of the system's safety was lack of phenomenon so-called *breakthrough of the cold front* observed in simulation results, which consists of a temperature drop in the production borehole caused by the inflow of cooler water, injected by the injection borehole. The level of the reservoir in the analyzed area is built of the lower Cretaceous and lower Jurassic deposits, which are characterized by very good geothermal parameters. The simulations were carried out assuming the use of the existing Zakrzyn IG-1 borehole, as a production well for the potential geothermal doublet, which capture the underground waters of the lower Jurassic aquifer. Different distances from 500 to 3000 m between the production and injection boreholes, were analyzed. In order to determine the minimum distance between boreholes for each distance, the same ranges of the yield from 50 to 150 m<sup>3</sup>/h, were tested. In each analyzed case, the results of the pressure and temperature values on the head of the production and injection boreholes, were verified. Based on the obtained results, it was possible to select the optimal distance for which the assumed efficiency range ensured that the injection borehole did not influence the temperature of the aquifer in the assumed time horizon.

## KEYWORDS

Numerical modeling, geothermal energy, lower Jurassic, Kalisz

