

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 3 (49), 2010: 63–74
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 3 (49), 2010)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 3 (49), 2010: 63–74
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 3 (49), 2010)

Filip BUJAKOWSKI

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Modelowanie równowagi termodynamicznych wód z horyzontu dolnojurskiego ujętych w odwiercie geotermalnym Gostynin GT-1 Thermodynamic equilibrium modelling of groundwater from Lower Jurassic aquifer explored in Gostynin GT-1 geothermal borehole

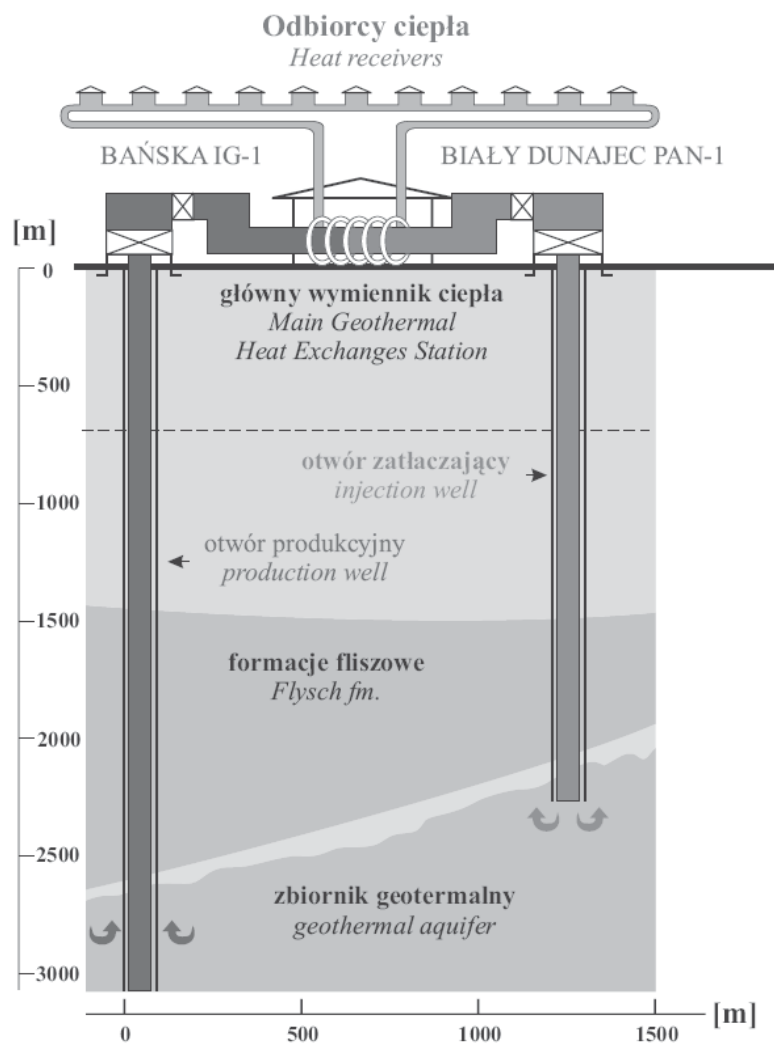
Słowa kluczowe: wody termalne, energia geotermalna, modelowanie hydrochemiczne, termodynamika, wskaźnik nasycenia
Key words: thermal water, geothermal energy, hydrochemical modelling, thermodynamics, saturation index

Wprowadzenie

W ostatnich latach zarówno w Polsce, jak i na świecie odnotowujemy wzrost liczby instalacji wykorzystujących energię geotermalną do produkcji ciepła sieciowego i energii elektrycznej. Najpopularniejszą metodą eksploatacji energii geotermalnej na skalę przemysłową jest ujęcie otworami studziennymi warstwy wodonośnej, zalegającej na tyle głęboko (w Polsce średnio powyżej 1500 m, za wyjątkiem wyniesienia ma-

zursko-suwańskiego), iż występujące w niej wody charakteryzują się wysoką temperaturą, nierzadko przekraczającą 100°C (Bujakowski 2009). Na terenie Polski eksploatacja wód termalnych odbywa się najczęściej w systemie dubletowym. Woda ujęta jednym otworem wypompowywana jest na powierzchnię, następnie oddaje swoje ciepło w układzie wymienników ciepłych, po czym zatłaczana jest ponownie do górotworu drugim otworem (Bujakowski 2000). Schemat klasycznego układu geotermalnego przedstawiono na rysunku 1.

Obecnie na terenie Polski funkcjonuje wiele instalacji opartych na klasycznym dublecie geotermalnym. Energia z nich pozyskana wykorzystywana jest w układach centralnego ogrzewania w Pyrzycach, Stargardzie Szczecińskim,



RYSUNEK 1. Schemat klasycznego dubletu geotermalnego, na przykładzie instalacji w Bańskiej Niznej na Podhalu (Górecki 2006)

FIGURE 1. Classic geothermal doublet such as instalation in Bańska Nizna

Zakopanem, Uniejowie i Mszczonowie – instalacja jednootworowa. Trwają prace nad kolejnymi instalacjami (Bujakowski 2000). Ilość substancji rozpuszczonych w wodach podziemnych zazwyczaj zwiększa się wraz z głębokością. Odnotowuje się pionowy gradient mineralizacji, którego średnia wartość dla terenu

Polski wynosi $0,13 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{m}$ (Paczyński i Sadurski 2007). O ilości rozpuszczonych w wodzie składników decydują głównie: czas kontaktu wody z minerałami podlegającymi ługowaniu, temperatura i ciśnienie układu oraz charakter fizykochemiczny powierzchni podlegającej rozpuszczaniu. Procesy rozpuszczania

i wytrącania zależą ściśle od równowagi termodynamicznej panującej w roztworze. Stany równowagi między fazą stałą a rozpuszczalnikiem opisywane są za pomocą wskaźnika SI (Macioszczyk i Dobrzyński 2002).

Wskaźnik SI (saturation index, disequilibrium indice) jest jednym z częściej stosowanych w literaturze parametrów, określających stan nasycenia wody w stosunku do faz stałych (minerały) i gazowych, pozostających z nimi w kontakcie. Wartość wskaźnika SI definiowana jest według wzoru:

$$SI = \log \frac{IAP}{KT}$$

gdzie:

IAP – iloczyn aktywności form (ion activity product), obliczony na podstawie rzeczywistych aktywności w wodzie jonów, biorących udział w reakcji; aktywność ta zależna jest odwrotnie proporcjonalnie od ich stężenia w roztworze oraz wprost proporcjonalnie od ogólnej mineralizacji roztworu,

KT – stała równowagi reakcji w danej temperaturze.

Ocena stanu równowagi polega zatem na porównaniu iloczynu aktywności form, biorących udział w reakcji w rzeczywistym roztworze, z iloczynem aktywności tych form w warunkach równowagi. Wartość wskaźnika SI bliska zeru ($0,00 \pm 5\%$ bądź $\pm 0,5$) opisuje stan równowagi ciała mineralnego z roztworem (Macioszczyk i Dobrzyński 2002). Oznacza to, że procesy wytrącania i rozpuszczania równoważą się. Wartości SI mniejsze od zera opisują stan, w którym przeważać będzie rozpuszczanie. Im bardziej wartość wskaźnika

odbiega od wartości zerowej, tym agresywniejsze będzie zachowanie roztworu w stosunku do określonej substancji, tendencja do rozpuszczania wzrasta wraz ze zmniejszeniem wartości wskaźnika SI. Wartości wskaźnika SI większe od zera opisują stan przesylenia. W momencie zwiększenia wartości wskaźnika powyżej zera roztwór będzie wykazywał tendencje do wytrącania faz mineralnych, mogących stanowić poważne zagrożenie dla prawidłowego funkcjonowania instalacji geotermalnej (Biernat i in. 2009).

Wody termalne w naturalnym dla nich środowisku głębokich warstw wodonośnych znajdują się w specyficznym, „subtelny” stanie równowagi z minerałami wchodzącymi w skład otoczenia skalnego. Stan ten jest bardzo wrażliwy na zmianę jakichkolwiek parametrów. Wytrącenie jednego składnika ze stanu nasycenia może implikować zaburzenie równowagi dla pozostałych składników. Eksploatacja wody, odbiór ciepła w instalacji powierzchniowej, a następnie ponowne zatłoczenie wody do złoża zmienia wszystkie najważniejsze parametry układu, takie jak: temperatura, ciśnienie i skład chemiczny otoczenia (Biernat i in. 2009). W związku z tym poszczególne składniki wody wytrącone zostają ze swej naturalnej równowagi. Pojawiają się tendencje do rozpuszczania lub wytrącania poszczególnych składników. Z doświadczeń operatorów siłowni pracujących na terenie Polski wynika, iż wytrącanie zachodzi najintensywniej na filtrze i w strefie okołowfiltrowej otworu zatłaczającego, prowadząc do zmniejszenia parametrów chłonnych tego otworu (Witczak 1996). Zastosowanie narzędzia informatycznego, pozwalają-

cego na obliczenie wskaźników nasycenia SI dla poszczególnych minerałów w wodzie o znanym składzie chemicznym, w określonych warunkach fizycznych, umożliwić może odtworzenie warunków prowadzących do wytrącania się osadów (Deuch 1997).

Celem pracy jest określenie przydatności ogólnodostępnych programów komputerowych do numerycznego modelowania równowagi termodynamicznej roztworów wodnych w aspekcie zmian temperatury i zawartości tlenu rozpuszczonego. Zmianom takim poddawana jest woda termalna w trakcie obiegu w dubletowej instalacji geotermalnej (Witczak 1996).

Material i metody

Podstawą przeprowadzonych testów numerycznych była woda z ujęcia Gostynin GT-1, wykonanego w 2007 roku w mieście Gostynin, w zachodniej części województwa mazowieckiego. Otwór zaprojektowany został w celu ujęcia dolno-jurajskiego horyzontu wodonośnego położonego w interwale głębokościowym 2538,0–2734,0 m (Biernat i in. 2008). Obiekt badań wytypowany został z uwagi na podobieństwo budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych do siłowni geotermalnej w Pyrzycach. Siłownia ta jest najdłużej działającym zakładem tego typu na Niżu Polskim. W trakcie jej eksploatacji wielokrotnie napotymano na problem spadku chłonności otworu zatłaczającego spowodowany m.in. kolmatacją strefy okołowfiltrkowej. Analizując warunki panujące w Gostyninie, spodziewać się można problemów o podobnym charakterze. W związku z powyższym podjęto próbę określenia

równowagi termodynamicznej panującej w wodzie wydobytej z otworu Gostynin GT-1 przy zastosowaniu narzędzi numerycznego modelowania. Podobne analizy przeprowadzone zostały w 1996 roku dla instalacji w Pyrzycach (Górecki 2006), a ich wyniki były pomocne w wyjaśnieniu problemu kolmatacji użytkowanych tam otworów.

Aktualnie dostępnych jest wiele komercyjnych aplikacji komputerowych, służących obliczaniu równowagi termodynamicznej dla poszczególnych składników roztworu. Ogólnodostępnymi aplikacjami komputerowymi są m.in.: PHREEQC, PHREEQCI, SEAWAT, HYDROTHERM, WATEQ4F (Macioszczyk i Dobrzyński 2002). Z uwagi na względną prostotę obsługi oraz możliwość zastosowania różnych baz danych termodynamicznych w procesie modelowania hydrochemicznego omówionego w dalszej części artykułu zdecydowano się zastosować program PHREEQCI w wersji 2.14.3.2411. Aplikacja PHREEQCI informacje wykorzystywane do tworzenia modelu pobiera z domyślnej bazy danych o nazwie phreeqc.dat. Baza ta okazała się jednak niedostosowana do wód o tak dużym zasoleniu, jak te występujące w otworze geotermalnym Gostynin GT-1. Dodatkowo zakres zawartych w niej składników jest zbyt ograniczony dla prawidłowej analizy procesów zachodzących w instalacji geotermalnej w Gostyninie. Do testów numerycznych wykorzystano więc inną bazę.

Wraz z wersją instalacyjną programu PHREEQCI dostępne jest 8 baz danych: ISO.dat, llnl.dat, minteq.dat, minteq.v4.dat, phreeqc.dat, phreeqd.dat, pitzer.dat, wateq4f.dat. Dane obliczeniowe, zawarte w większości z wymienionych baz, oparte są na teorii Debye'a Hückela,

opracowanej dla wód o niskiej mineralizacji (Parkhurst i Apello 1999). Baza pitzer.dat oparta jest na teorii Pitzera (Pitzer 1979), dostosowanej dla wód o wysokiej mineralizacji. Niestety z uwagi na małą ilość minerałów zawartych w bazie pitzer.dat w modelowaniu procesów wytrącania osadów w instalacjach geotermalnych nie znajduje ona zastosowania. W związku z tym oraz z brakiem dostępu do „szerokiej” bazy opartej na teorii Pitzera i kompatybilnej zarazem z aplikacją PHREEQCI (Parkhurst i Apello 1999) powstała konieczność przetestowania i zastosowania w procesie modelowania jednej z baz opartych na teorii Debye’a Hückela, wykorzystującej następującą zależność empiryczną (Parkhurst i Apello 1999):

$$\log (f) = \frac{-0,509z_i^2\sqrt{I}}{1 + Ba\sqrt{I}}$$

gdzie :

$f(\gamma)$ – współczynnik aktywności,

$I(\mu)$ – siła jonowa,

$z_i (|z_+ z_-|)$ – ładunek jonu,

a – dana tablicowa (efektywna średnica jonu w angstromach),

A i B – stałe o wartościach $A = 0,5085$ (często też $A = 0,509$) i $B = 0,3281$ w temperaturze 25°C w wodzie.

Do analiz testowych wybrano 2 bazy: wateq4f.dat oraz llnl.dat, z uwagi na szerokie spektrum minerałów w nich zawartych. W celu wyboru najlepszej bazy do dalszych prac porównano wyniki uzyskane za pomocą baz: pitzer.dat, wateq4f.dat oraz llnl.dat. Wyniki uzyskane za pomocą bazy wateq4f.dat w całym zakresie modelowanej temperatury mają podobny charakter jak w przypadku bazy pitzer.dat dostosowanej do sola-

nek. Poszczególne wartości odbiegają co prawda od siebie, lecz ogólny trend jest zachowany, co umożliwi wprowadzenie prostej korekty na rozbieżność dla poszczególnych wartości w całym spektrum temperatury i określenie zbliżonych do rzeczywistych wartości wskaźnika SI na potrzeby bardziej szczegółowych analiz. Z uwagi na powyższy fakt w dalszej części pracy, poświęconej instalacji geotermalnej w Gostyninie, modelowanie przeprowadzone zostało za pomocą bazy wateq4f.dat.

Przy użyciu aplikacji PHREEQCI, połączonej z bazą danych wateq4f.dat, przeprowadzono modelowane specyjalne próbki wody pobranej w trakcie próbnego pompowania w dniu 19.01.2008 roku. Analizy hydrochemiczne przeprowadzone zostały w Laboratorium Badania Wód Polgeol S.A. Wyniki zaczerpnięto z „Dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia wód termalnych z utworów jury dolnej w otworze Gostynin GT-1” (Biernat i in. 2008). Wyniki zestawione zostały w tabeli 1.

Modelowanie obejmuje zakres temperatury, jaką może osiągnąć woda termalna na całej drodze obiegu w instalacji geotermalnej. Pomiar zawartości tlenu przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, nie mogą być zatem traktowany jako miarodajne. Z uwagi na powyższy fakt modelowano zawartość tlenu w szerszym niż pomierzony zakresie. Zamieszczone wykresy (rys. 2–6) przedstawiają minerały, które mogą się wytrącać. Pominięto minerały z grupy krzemianów pierwotnych, które nie mają szans na wytrącenie z wody w skali czasu życia ludzkiego, oraz minerały, których wskaźniki nasycenia w całym modelowanym zakresie temperatury przyjmują wartości ujemne.

TABELA 1. Analiza składu wody eksploatowanej z otworu Gostynin GT-1 (Biernat i in. 2008)
 TABLE 1. Chemical composition analysis of water exploited from Gostynin GT-1 borehole (Biernat i in. 2008)

Wyszczególnienie Specification	Jednostka miary Chain	Wartość pomierzona Value	Norma – procedura badawcza Standards – research procedure
1	2	3	4
Temperatura na głowicy otworu Temperature in the top of borehole	°C	62,00	–
Mętność / Diffuseness	mg SiO ₂ ·dm ⁻³	24,10	PGLB -03:wyd.2 z dn. 0 1 .09.2003
Barwa / Hue	mg SiO ₂ ·dm ⁻³	10,00	–
Zapach / Smell		akceptowalny	PGLB- 13 : 30.04.2003
Odczyn pH / pH value		6,28	PGLB-04: wyd.3 z dn. 16. 10.2006
Twardość ogólna Toughness total	mmol·dm ⁻³	9500,00	PN-ISO6059: 1999
Zasadowość ogólna Alkalinity total	mmol·dm ⁻³	5,10	PN-EN ISO 9963-1: 200 1+IGLB-03: wyd.3 zdn.02.03.2004
Kwasowość ogólna min Acidity total	mmol·dm ⁻³	4,7/0,0	PN-90/C-04540.03 + IGLB-02wyd.2 zdn.03.09.2003
Żelazo ogólne Iron total	mmol·dm ⁻³	29,25	PN-ISO 6332 : 2001 + IGLB - 01 : wyd.2 z dn. 03.09.2003
Mangan / Manganese	mmol·dm ⁻³	0,54	PN-92/C-04590.02
Wapń / Calcium	mmol·dm ⁻³	2725,00	PN-ISO 6058: 1999
Magnez / Magnesium	mmol·dm ⁻³	656,80	PN-C/04554 -4 : 1999 Żal A
Sód / Sodium	mmol·dm ⁻³	40 243,00	PN-ISO 9964- 1 : 1 994 + IGLB - 04 : wyd.2 z dn.05.09.2003
Potas / Potassium	mmol·dm ⁻³	397,00	PN-ISO 9964 -3 : 1 994 + IGLB - 05 : wyd.3 z dn.25.05.2004
Chlorki / Chlorides	mmol·dm ⁻³	69 133,00	PN-ISO 9297: 1994
Jodki / Iodide	mmol·dm ⁻³	0,04	PN-75/C-04599/01
Amoniak / Ammonia	mmol·dm ⁻³	27,43	PN-C-04576^:1994 + IGLB-08 :wyd.2 z dn. 03.09.2003
Azotyny Nitrite nitrogen	mmol·dm ⁻³	0,03	PN-EN 26777: 1999
Azotany Nitrate nitrogen	mmol·dm ⁻³	15,53	PN-82/C-04576.08
Siarkowodór Hydrogen sulphite	mmol·dm ⁻³	0,00	PGLB-09: 2 1.08.2003
Siarczany / Sulphate	mmol·dm ⁻³	808,00	PGLB-10: 10.06.2003
Fosforany / Phosphate	mmol·dm ⁻³	0,00	HACH LANGE
Dwutlenek węgla wolny Free carbon dioxide	mmol·dm ⁻³	161,50	PN-74/C-04547.01

cd. tabeli 1
Table 1, cont.

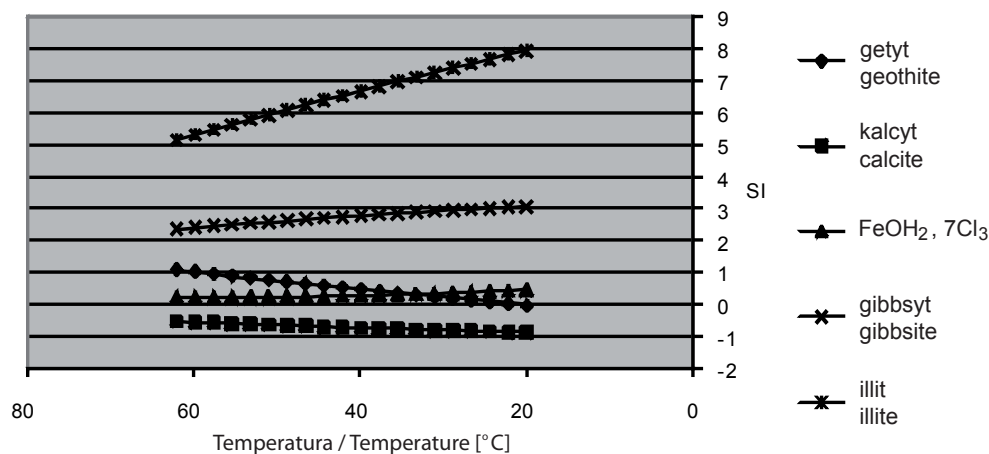
1	2	3	4
Tlen ogólny Oxygen total	mmol·dm ⁻³	0,34	PN-EN 258 14: 1999
Utlenialność / COD	mmol·dm ⁻³	23,00	PGLB-14: 19.08.2003
Sucha pozostałość Dry residue	mg·dm ⁻³	143 559,00	PGLB - 0 1 : wyd.3 z dn. 1 1 .04.2005
Dwutlenek węgla agresywny Aggressive carbon dioxide	mg·dm ⁻³	52,70	PGLB - 05 : wyd.2 z dn.03.09.2003
Wodorowęglany Hydrocarbonate	mg·dm ⁻³	311,10	PN-EN ISO 9963-1 : 2001 Zał. A
Krzemionka Silica	mg·dm ⁻³	23,02	HACH LANGE
Glin / Aluminium	mg·dm ⁻³	0,48	HACH LANGE

Wyniki

Z przeprowadzonych za pomocą aplikacji komputerowej analiz wynika, iż tendencją do wytrącania z roztworu wykazują: gibbsyt, minerały żelaza oraz znaczna część grupy minerałów ilastych reprezentowana na rycinach przez illit (rys. 2). Zaznaczyć należy, że w wy-

nikach analizy petrograficznej rdzeni wiertniczych z poziomu wodonośnego opisano jedynie śladowe ilości minerałów ilastych, pozostałych związków nie wykryto (Biernat i in. 2008). Ich pojawienie się w obrębie instalacji będzie zatem przydatne dla weryfikacji modelu.

Do bardziej szczegółowych analiz wybrano minerały, mogące powstawać



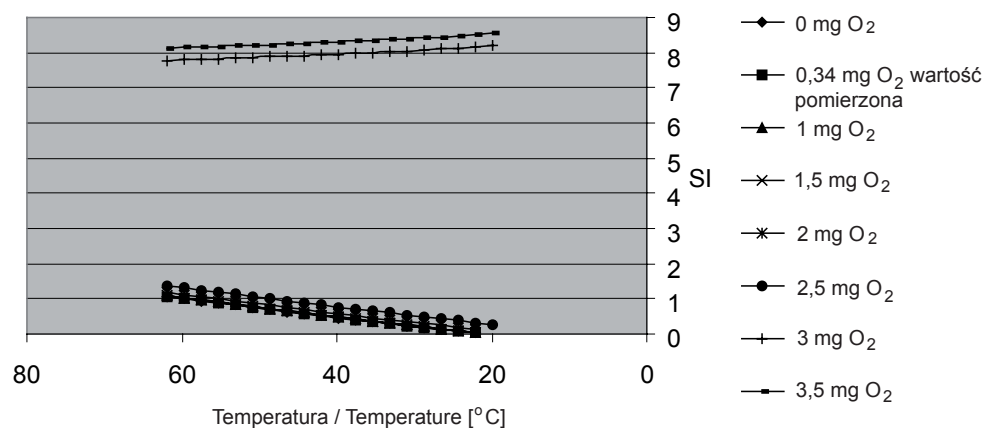
RYSUNEK 2. Zależność wartości SI od temperatury dla wody eksploatowanej z otworu Gostynin
FIGURE 2. GT-1 Dependence value SI on temperature for water exploited from GT-1 borehole

w środowisku instalacji geotermalnej i strefy okołowiertrowej otworu zatłaczającego. Kolejne rysunki ilustrują zależność stanu termodynamicznego danej fazy mineralnej od temperatury w zakresie od 62°C (temperatura udokumentowana w trakcie próbnego pompowania) do 20°C (przybliżona projektowana temperatura zatłaczania – Biernat i in. 2008) oraz w zakresie zawartości tlenu 0–3,5 mg·dm⁻³, przy czym wartość 3,5 mg·dm⁻³ jest spotykana w wodach powierzchniowych i wodach strefy aktywnej wymiany. Stanowi ona wartość hipotetyczną, symulującą znaczną nieszczelność układu w warunkach zatrzymanego obiegu (np. prace remontowe). Analizy mają na celu określenie, czy i w jaki sposób eksploatacja wody termalnej i następnie spadek jej temperatury w wymiennikach ciepła wpływają na równowagę termodynamiczną panującą w roztworze.

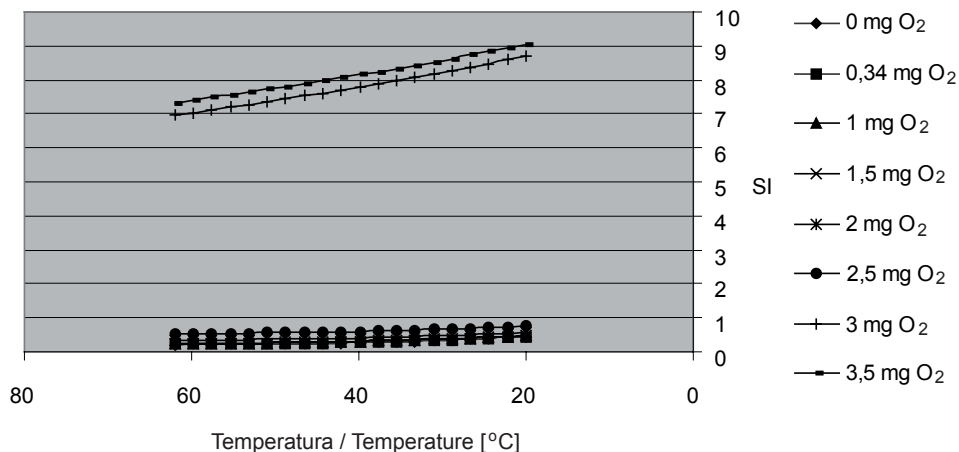
Wraz ze spadkiem temperatury zmniejsza się tendencja do wytrącania getytu (rys. 3), natomiast tendencja do wytrącania FeOH_{2,7}Cl₃ nie zmienia się (rys. 4) w zależności od temperatu-

ry. Prawidłowość ta zachowana jest dla ilości tlenu w zakresie 0–2,5 mg·dm⁻³, w tym przypadku wartości wskaźnika nasycenia w zależności od temperatury są do siebie zbliżone. W zakresie 2,5–3 mg·dm⁻³ zawartości wolnego tlenu w wodzie odnotowuje się gwałtowny wzrost tendencji do wytrącania związków żelaza. Punkt zmiany trendu jest trudny do ustalenia z dokładnością większą niż 0,5 mg·dm⁻³ z uwagi na dużą ilość zmiennych. Temperatura w tym przypadku ma drugorzędne znaczenie. Zaznaczyć należy iż FeOH_{2,7}Cl₃ użyty został jedynie w celach porównawczych. Jego obecności nie stwierdzono w żadnej z funkcjonujących na terenie Polski instalacji, natomiast występuje w publikowanych w latach dziewięćdziesiątych modelach dla instalacji w Pyrzycach (Witczak 1996). Obecność pozostałych 3 analizowanych związków udokumentowano w osadzie pobranym z filtra zakolmatowanego otworu Pyrzyce GT-2 w trakcie prac intensyfikujących w 1995 roku.

W przypadku gibsytu główny wpływ na stan jego równowagi w roz-



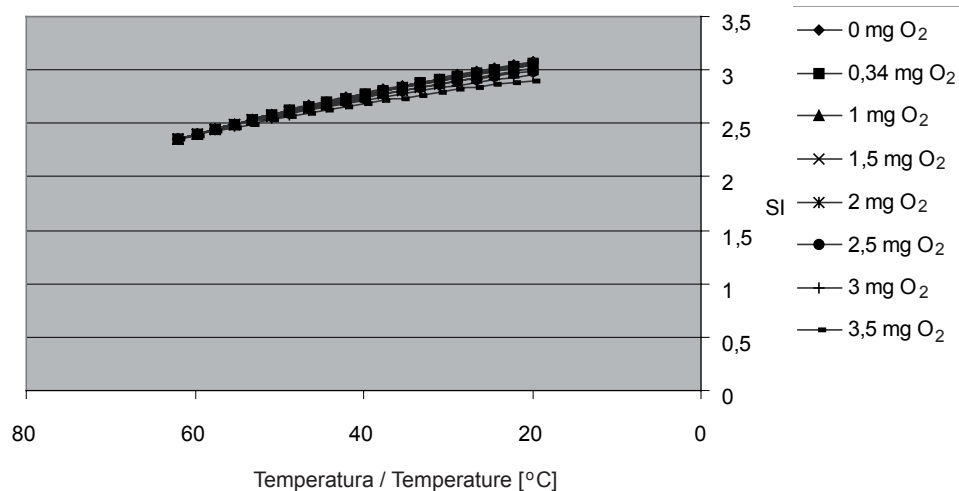
RYSUNEK 3. Wartość SI dla getytu dla wody eksploatowanej z otworu Gostynin GT-1
 FIGURE 3. SI value for goethite in water exploited from GT-1 hole



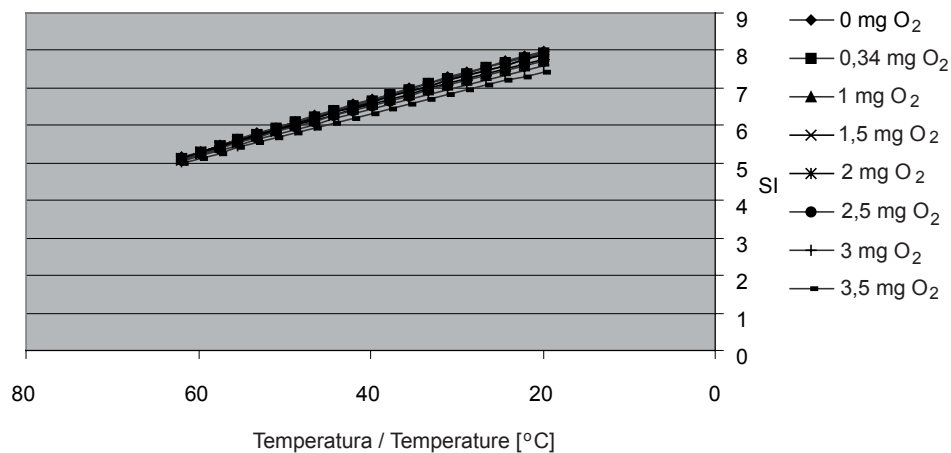
RYSUNEK 4. Wartość SI dla FeOH_{2,7}Cl₃ dla wody eksploatowanej z otworu Gostynin GT-1
 FIGURE 4. SI value for FeOH_{2,7}Cl₃ in water exploited from GT-1 hole

tworze wywiera temperatura (rys. 5). Nie obserwuje się znacznych wpływów zmian zawartości tlenu w zakresie 0–3,5 mg·dm⁻³. Występuje natomiast zależność od zmian temperatury. W zakresie od 62 do 20°C wartość SI zmienia się o jednostkę. Z praktycznego punktu widzenia nie są to zmiany istotne, gdyż w całym zakresie wartość SI przekracza 2,

co sygnalizuje ciągłą tendencję gibbsytu do wytrącania się. Z mineralogicznego punktu widzenia powstawanie gibbsytu w formie krystalicznej w instalacjach geotermalnych jest trudne, jeżeli niewykluczone. Mineral ten powstaje w przyrodzie na drodze wietrzenia krzemianów pierwotnych w klimacie tropikalnym suchym. W stanie równowagi termody-



RYSUNEK 5. Wartość SI dla gibbsytu dla wody eksploatowanej z otworu Gostynin GT-1
 FIGURE 5. SI value for gibbsite in water exploited from GT-1 hole



RYSUNEK 6. Wartość SI dla illitu dla wody eksploatowanej z otworu Gostynin GT-1
 FIGURE 6. SI value for illite in water exploited from GT-1 hole

namicznej, panującej w roztworze, nie jest natomiast wykluczone wytrącanie $\text{Al}(\text{OH})_3$ w formie bezpostaciowej.

W zadanym zakresie temperatury oraz zawartości tlenu w odniesieniu do wskaźnika nasycenia SI illit zachowuje się w podobny sposób jak gibbsyt (rys. 6).

Podsumowanie i wnioski

Zaznacza się wyraźny wpływ zmian temperatury i zawartości tlenu rozpuszczonego na równowagę termodynamiczną panującą w roztworze. W celu weryfikacji uzyskanych wyników niezbędne wydają się dalsze prace modelowe z zastosowaniem innych baz danych termodynamicznych. Wykorzystane narzędzia dostosowane zostały do wód o małej sile jonowej $I \approx 0,5$. W algorytmie obliczeniowym pominięte zostało kompleksowanie i tworzenie się par jonowych, zachodzące często w roztworach o wyso-

kiej mineralizacji. W dalszej części prac badawczych planuje się modyfikację bazy danych pitzer.dat i jej adaptację do warunków panujących w wodzie z otworu Gostynin GT-1. Szczególny nacisk położony zostanie na uwzględnienie w niej faz mineralnych, mogących kolmatować otwór. Dalsze prace modelowe prowadzone będą na aplikacji PHRQPITZ przystosowanej do współpracy z bazą pitzer.dat. Dotyczy ono badania wód o bardzo wysokiej mineralizacji i uwzględnia kompleksowanie. Wyniki uzyskane przy użyciu tak skonfigurowanego narzędzia będą lepiej odzwierciedlać rzeczywisty stan roztworu geotermalnego. Planowane jest ponadto przeanalizowanie wpływu zmian ciśnienia, odczynu oraz potencjału redox, jakie zachodzą w wodzie w trakcie jej obiegu w instalacji geotermalnej. Symulacje takie możliwe będą przy zastosowaniu pakietu GWB Professional w wersji 8.0. Oprogramowanie to pozwoli także na obliczenia kinetyki reakcji. Na podstawie uzyskanych

wyników wytypowane zostaną fazy mineralne, na których przeprowadzane będą w dalszej kolejności doświadczenia laboratoryjne, potwierdzające bądź wykluczające wytrącanie osadów mineralnych w danych warunkach. W przypadku uzyskania osadu w warunkach laboratoryjnych możliwe będzie określenie ilości, składu chemicznego i tempa jego powstawania, co umożliwi kalibrację modelu oraz określenie szybkości potencjalnej kolmatacji otworów już na etapie prac związanych z projektem zagospodarowania złoża. Badania laboratoryjne są celowe i nieodzowne z uwagi na fakt, iż dodatnie wartości wskaźnika SI dla poszczególnych minerałów wcale nie muszą świadczyć o faktycznym wytrącaniu z roztworu, obrazują jedynie ogólną tendencję występującą w roztworze (Witczak 1999). Uzasadnione jest także prowadzenie ciągłego monitoringu składu jonowego wody oraz zawartości gazów rozpuszczonych w celu okresowej kontroli wskaźników nasycenia SI dla poszczególnych faz mineralnych w trakcie pracy instalacji.

Zaproponowana metoda określania stanu nasycenia wody w stosunku do poszczególnych faz mineralnych stanowić może znakomitą podstawę teoretyczną do projektowania dalszych badań, mających na celu opracowanie skutecznych metod przeciwdziałania kolmatacji. Wykorzystanie modelowania komputerowego umożliwi wytypowanie minerałów, które mogą stanowić zagrożenie. Wytypowane potencjalnie niebezpieczne minerały mogą być następnie poddane modelowaniu fizycznemu w specjalnie zaprojektowanym układzie, odwzorującym w skali układ stosowany w instalacjach geotermalnych. Aktualnie

na Wydziale Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW trwa budowa instalacji do modelowania procesów wytrącania Struwitu w zamkniętych obiegach ciśnieniowych oczyszczalni ścieków. Po niewielkich modyfikacjach układ ten zastosowany może być do weryfikacji modeli numerycznych przedstawionych powyżej. W najbliższym czasie natomiast planowane jest przeprowadzenie dalszych prac modelowych dla wody z ujęcia w Gostyninie z zastosowaniem innych aplikacji komputerowych oraz innych baz danych. Ewentualne wykorzystanie i konfiguracja instalacji modelowej uzależniona będzie od wyników tych testów.

Literatura

- BIERNAT H., BENTKOWSKI A., POSYNIAK A. 2008: Dokumentacja hydrogeologiczna ujęcia wód termalnych z utworów jury dolnej w otworze Gostynin GT-1. Sprawozdanie z pierwszego etapu prac objętych koncesją nr 7/2007/p (niepublikowane). Przedsiębiorstwo Geologiczne „Polgeol”, Warszawa.
- BIERNAT H., KULIG S., NOGA B. 2009: Możliwości pozyskania energii geotermalnej i problemy związane z eksploatacją ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. II Ogólnopolski Kongres Geotermalny. 23–25 września 2009, Bukowina Tatrzańska.
- BUJAKOWSKI W. 2000: Przegląd wybranych zakładów geotermalnych i projektów w Polsce. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- BUJAKOWSKI F. 2009: Charakterystyka hydrogeologiczna poziomów wodonośnych wykorzystywanych przez pracujące w Polsce ciepłownie geotermalne. Praca magisterska. Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- DEUCH W.J. 1997: Groundwater geochemistry. Fundamentals and applications to contamination. CRC Press, Boca Raton, Floryda, USA

- GÓRECKI W. 2006: Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- MACIOSZCZYK A., DOBRZYŃSKI D. 2002: Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- PACZYŃSKI B., SADURSKIA A. 2007: Hydrogeologia regionalna Polski. T. II. Wody mineralne, lecznicze, termalne i kopalniane. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PARKHURST L., APELLO C.A.J. 1999: Users's Guide to PHREEQC (Version 2). Denver, USA.
- PITZER K.S. 1979: Theory-Ion, approach. In: Activity Coefficients in electrolyte solutions. T. I. Ed. R.M. Pytkowicz. CRC Press, Inc. Boca Rotan, Florida, USA: 157–208.
- WITCZAK S. 1996: Badania ciągłego składu chemicznego wody geotermalnej, procesów korozyjności oraz warunków powstawania osadów. Raport z wykonania prac objętych projektem celowym pod nazwą „Ciepłownia geotermalna w Pyrzycach”. Przedsiębiorstwo Geologiczne „Polgeol”, Warszawa.
- WITCZAK S. 1999: Analiza i interpretacja składu fizykochemicznego wód eksploatowanych w Białym Dunajcu i Bańskiej pod kątem poznawania systemu geotermalnego Podhala. PAN, Kraków.

Summary

Thermodynamic equilibrium modeling of groundwater from Lower Jurassic aquifer explored in Gostynin GT-1 geothermal borehole. By using komputer application PHREEQCI connected to wateq4f.dat database conducted numerical spetiation modelling for sample of water picked up during documentary work on Gostynin GT-1 borehole. From models raised, that in fiz-chem conditions occure in instalation in Gostynin during it works thermal sollution destabilized from thermodinamical poin of view. Tendency to precipitate or dessolve particular minerals illustrated on the drawing, appear that oxygen is noteworty, it content in water can impact thermodynamical stabilization of solution.

Author's address:

Filip Bujakowski
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Geoinżynierii – Zakład Hydrogeologii
 ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
 Poland
 e-mail: filip_bujakowski@sggw.pl