

Efektywność zatłaczania do górotworu wód termalnych o zmodyfikowanych właściwościach fizykochemicznych

The effectiveness of injection into the formation geothermal waters with modified physico-chemical properties



Dr hab. inż. Barbara Tomaszewska^{)}*



Dr inż. Bogusław Bielec^{)}*



Mgr Aleksandra Kasztelewicz^{)}*

Treść: Otwory Skierniewice GT-1 (gł. 3001 m) i Skierniewice GT-2 (gł. 2900 m) zlokalizowane są w południowo-zachodniej części niecki warszawskiej, stanowiącej środkowy fragment niecki brzeżnej. Otworami udokumentowane zostały zasoby wód termalnych w utworach jury dolnej, cechujące się wysoką mineralizacją, powyżej 120 g/dm³. Tak wysokie zasolenie wód implikuje trudności z ich wtłaczaniem z powrotem do górotworu. W pracy przedstawiono wyniki modelowań geochemicznych prognozujących skaling i kolmatację otworu w trakcie zatłaczania do górotworu. W efekcie zaproponowano rozcieńczenie wód termalnych wodami odsolonymi i realizację testów dla określenia efektów związanych z ich wtłaczaniem. Wyniki przeprowadzonego testu wykazały, iż rozcieńczenie wtłaczanych wód ograniczyło ilość wytrącanego węglanu wapnia, przez co wtłaczanie wód ochłodzonych było bardziej wydajne. Indeks chłonności wrócił do poprzedniego stanu, niezwłocznie po powrocie do wtłaczania wód o niezmiennym składzie.

Abstract: Skierniewice GT-1 (3001 m deep) and Skierniewice GT-2 (2900 m deep) are located in the south-western part of the Warsaw Trough, which is the central portion of the Marginal Synclinorium. Thermal water resources in Lower Jurassic formation have been documented in both wells, with a mineralization above 120 g/dm³. Such a high salinity implies difficulties with their injection back into the reservoir. This paper presents the results of geochemical modeling predicting scaling and clogging of the well during the water injection into the rock formation. As a result, proposed dilution of the thermal and desalinated waters, and executing tests to determine their effects associated with the injection. The results of the test showed that dilution of the injected waters reduced the amount of precipitated calcium carbonate, and made injection of cooled water more efficient. Absorbency index returned to its previous state immediately after returning to the injection of water with unchanged composition.

Słowa kluczowe:

wody termalne, zatłaczanie wód, geotermia, modelowanie geochemiczne

Key words:

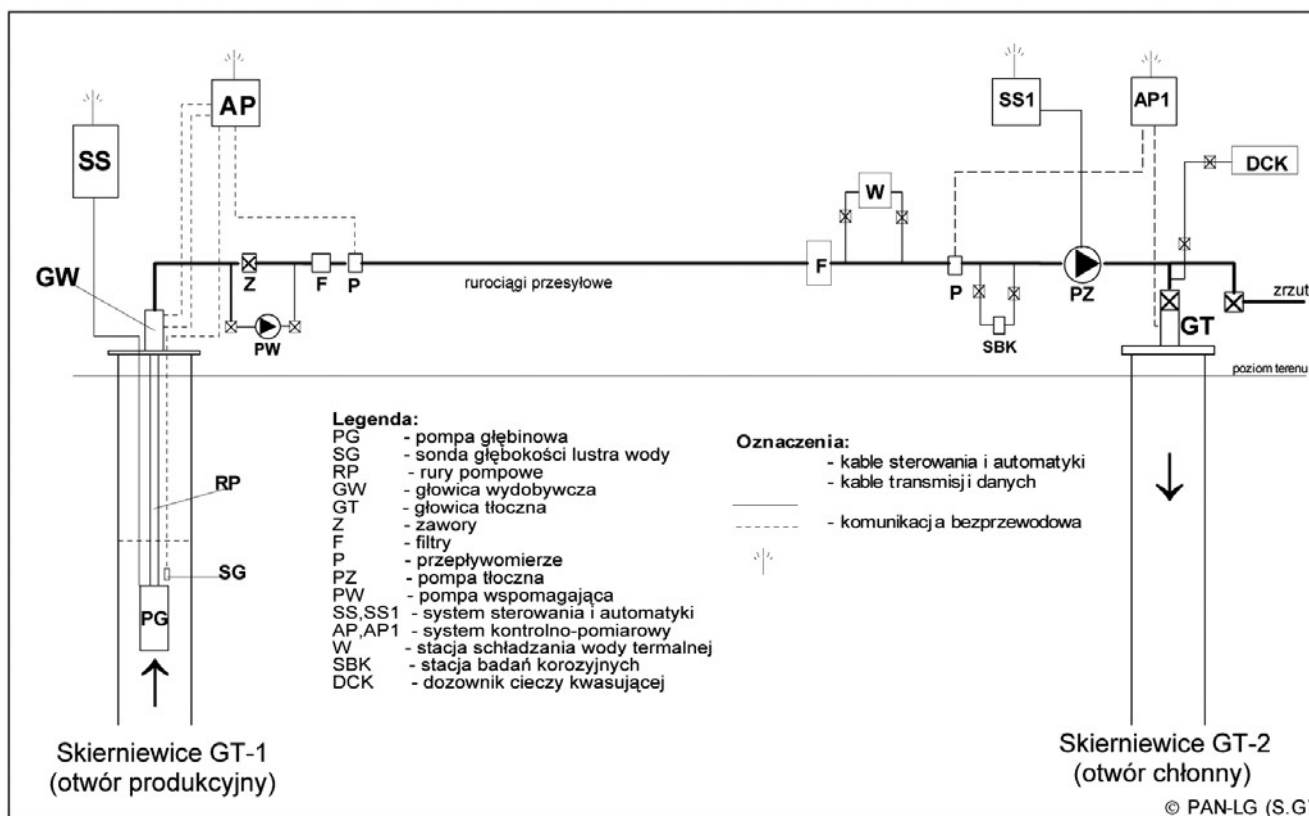
thermal waters, water injection, geothermics, geochemical modeling

1. Wprowadzenie

Trudności z zatłaczaniem wysoko zmineralizowanych wód termalnych do górotworu implikują niejednokrotnie konieczność podejmowania różnorodnych zabiegów technicznych i chemicznych dla usprawnienia tego procesu [3]. Działania polegające m.in. na realizacji testów miękkiego kwasowania wykonane zostały na dublecie otworów Skierniewice GT-1

i Skierniewice GT-2, w 2011 r. Ich wyniki zostały szerzej opisane w pracy Kępińskiej i in. [1]. Przygotowana infrastruktura i stanowisko badawcze wykorzystane zostało do zrealizowania dodatkowych testów, polegających na ocenie efektów wynikających z wtłaczania schłodzonych wód, ale w postaci rozcieńczonej wodami odsolonymi w procesach membranowych. W pracy przedstawiono wyniki testów wykonanych na otworze chłonnym Skierniewice GT-2. Do otworu zatłoczono wodę zmineralizowaną pozyskaną otworem Skierniewice GT-1, zmieszaną z wodą odsoloną. System technologiczny wraz z instalacją wydobywczo-zatłaczającą przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

^{*)} IGSMiE PAN w Krakowie ^{**)} Górnicza Izba Przemysłowo-Handlowa, Katowice



Rys. 1. Schemat układu badawczego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 (na podstawie [1])
 Fig. 1. Diagram of the Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 test system (based on [1])

2. Metodyka badań - modelowanie geochemiczne

Tendencję do skaligu wstępnie oszacowano na podstawie wartości Stiff & Davis Stability Index (S&DSI). W odliczeniach, poza stężeniem Ca, mineralizacją, zasadowością, odczynem pH, temperaturą (wskaźniki wymagane w obliczeniach indeksu Langeliera LSI lub Ryznara RSI) uwzględniono molowe stężenie jonów głównych występujących w wodzie, a w szczególności: Ca, Mg, Na, K, HCO₃⁻, SO₄⁻² i Cl. Wykorzystując program Phreeqc Interactive [2] obliczono następnie indeksy saturacji (*Saturation Index*) dla wody z otworu Skierniewice GT-1 (tab. 1).

3. Aparatura

Otwór Skierniewice GT-1, pełnił role otworu wydobywczego, a otwór Skierniewice GT-2 - chłonnego [1, 4]. Otwory wyposażone zostały w odpowiednie głowice (wydobywczą i tłoczna) oraz aparaturę sterującą i kontrolno-pomiarową. W otworze Skierniewice GT-1 zamontowana została pompa głębinowa. Wspomagająco, przed głowicą tłoczna otworu Skierniewice GT-2 (rys. 2 a, b), zamontowana została pompa obiegowa ssąco-tłoczająca (rys. 3 b), która miała za zadanie wspomóc proces zatłaczania w przypadku wzrostu ciśnienia w rurociągu. Na rurociągu zamontowany został separator fazy stałej, tj. filtr workowo-magnetyczny (rys. 3 a). Konstrukcja głowicy tłocznej otworu Skierniewice GT-2 umożliwiała podłączenia aparatury służącej do dozowania cieczy kwasującej (rys. 2 c, d), wykorzystywanej w testach stymulacyjnych lub wody odsolonej w trakcie testów zatłaczania wód rozcieńczonych.

Tablica 1. Właściwości fizykochemiczne wody geotermalnej z otworu Skierniewice GT-1, zatłaczanej do otworu Skierniewice GT-2

Table 1. Physical-chemical properties of the thermal water from the Skierniewice GT-1 well, injected into the Skierniewice GT-2 well

Wskaźnik	Jednostka	Skierniewice GT-1
pH -	-	6,20
Temp.	°C	56
SiO ₂	mg/dm ³	21,00
Twardość ogólna	mg CaCO ₃ /dm ³	12431
Na ⁺	mg/dm ³	35800
K ⁺	mg/dm ³	281,8
Li	mg/dm ³	2,427
Ca ⁺²	mg/dm ³	3826
Mg ⁺²	mg/dm ³	707,2
Ba	mg/dm ³	0,956
Sr	mg/dm ³	150,5
Fe ²⁺	mg/dm ³	29,89
Mn	mg/dm ³	1,003
Ag ⁺	mg/dm ³	-
Zn	mg/dm ³	0,024
Al	mg/dm ³	<0,010
Σ kationy	mg/dm ³	40789,8
Cl ⁻	mg/dm ³	65724
SO ₄ ⁻	mg/dm ³	580,7
HCO ₃ ⁻	mg/dm ³	202,7
PO ₄ ⁻	mg/dm ³	3,94
Σ aniony	mg/dm ³	66592
Mineralizacja	mg/dm ³	107382



Rys. 2. Instalacja systemu geotermalnego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2; uzbrojenie głowicy otworu Skierniewice GT-2 (a, b) oraz aparatura do dozowania cieczy kwasującej (c, d) (fot. B. Bielec, na podstawie [1])

Fig. 2. Geothermal installation of Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 wells; equipment of Skierniewice GT-2 (a,b), system for acidizing the fluid's dosage (c, d) (fot. By B. Bielec, based on [1])



Rys. 3. Instalacja systemu geotermalnego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2; filtr workowo-magnetyczny (a) i pompa obiegowa (b) (fot. B. Bielec, na podstawie Kępińska i in., 2011)

Fig. 3. Installation of Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 geothermal system; a bag-magnetic filter (a) and circulating pump (b) (fot. B. Bielec, based on [1])

4. Wyniki badań

Wyniki obliczeń teoretycznych, Indeksu Stiffa & Davisa (S&DSI) dla wody z otworu Skierniewice GT-1 przedstawiono w tabeli 2.

gdzie: $S\&DSI < 0$ - Woda jest niedosycona w odniesieniu do węglanu wapnia. Ma ona charakter agresywny, wykazuje również tendencję do usuwania istniejących powłok ochronnych z węglanu wapnia w rurociągach i urządzeniach

$S\&DSI = 0$ Woda jest stabilna i nie wykazuje tendencji do wytrącania osadów oraz nie ma charakteru agresywnego

$S\&DSI > 0$ Woda jest przesycona w stosunku do węglanu wapnia i może tworzyć skaling.

Wykorzystując program PhreeqC Interactive, obliczono indeksy saturacji (*Saturation Index*) wody z otworu Skierniewice GT-1 względem faz mineralnych, celem ustalenia ewentualnej tendencji do wytrącania osadów z wody. W obliczeniach przyjęto pH wody 6,45, $Eh = -515$ mV, $T = 52$ oC. Dodatnie wartości indeksu saturacji (tendencję do wytrącania osadów) woda wykazała w odniesieniu do m.in. węglanowych, żelazistych, fosforanowych i krzemionkowych form mineralnych (tab. 3).

Uwzględniając twardość węglanową wody z otworu Skierniewice GT-1: 214,5 mgCaCO₃/L, przy natężeniu prze-

Tablica 2. Indeks S&DSI dla wody z otworu Skierniewice GT-1 (pH = 6,46, T=50°C)**Table 2. S&DSI index for water from Skierniewice GT-1 well (pH = 6,46, T=50°C)**

Woda z otworu Skierniewice GT-1	S&DSI
Analiza wody z III depresji przy pomp. pomiar.	0,116
Analiza wody z dnia 23.05.2011, (próbka pobrana dnia 21.04.2011)	-0,08

Tablica 3. Wyniki modelowania geochemicznego dla wody z ujęcia Skierniewice GT-1**Table 3. The results of geochemical modeling for water from the Skierniewice GT-1 well**

Forma mineralna	Indeks Saturacji
Aragonit	0,42
Kalcyt	0,55
Chalcedon	0,07
Dolomit	1,01
Fluoryt	0,47
Hematyt	1,47
Hydroksyapatyt	4,18
Kwarc	0,42
Syderyt	0,41
Indeks saturacji dla CO ₂ wynosi -1,24 (jest to indeks saturacji CO ₂ wynikający z równowagi węglanowej, nie uwzględnia naturalnej zawartości CO ₂ w wodzie)	

plywu 25 m³/h do złoża dostaje się ok. 5 kg rozpuszczonego węglanu wapnia, a przy natężeniu 50 m³/h dwa razy więcej, tj. ok. 10 kg węglanu wapnia w ciągu godziny. Nie oznacza to, że może się wytrącić całkowita masa tej soli. Jednakże zakładając, że 10% rozpuszczonego w wodzie CaCO₃ wytrąci się na etapie zatłaczania wody termalnej do górotworu, będzie to stanowiło ok. 1 kg w ciągu godziny. Podjęto więc próbę obniżenia indeksu saturacji wody względem wymienionych w tabeli 3 minerałów, poprzez próbę rozcieńczenia wody termalnej wodą odsoloną. Na podstawie właściwości fizykochemicznych wody termalnej eksploatowanej otworem Skierniewice GT-1 oraz właściwości fizykochemicznych wody odsolonej w instalacji odsalania wód termalnych IGSMiE PAN przeprowadzono badania z zakresu modelowania geochemicznego i wskazano optymalny skład mieszaniny zatłaczanej do złoża. Zdecydowano, że do złoża zatłaczana będzie woda termalna (solanka) zmieszana z wodą odsoloną w proporcjach: 60% solanki i 40% wody odsolonej (60/40).

Woda termalna odsolona w Laboratorium Geotermalnym IGSMiE PAN dostarczona została do Skierniewic cysterną, w ilości 20 m³. Założono, że zatłaczanie mieszaniny prowadzone będzie do otworu Skierniewice GT-2 z wydajnością ok. 5-10 m³/h.

Wodę zgromadzono w dwóch zbiornikach o poj. 6 i 14 m³. Wydajność zatłaczania wody odsolonej została dobrana do wydajności zatłaczania wody termalnej. Zatłaczanie wody odsolonej odbywało się podczas grawitacyjnego zatłaczania wody termalnej. Wydatek wody termalnej przed rozpoczęciem testu wynosił 7,5 m³/h. Aby zachować proporcję mieszania 60/40 (przy niezmiennym ogólnym wydatku zatłaczania) obniżono wydajność zatłaczania wody termalnej do 4,5 m³/h i dotłoczono 3 m³/h wody odsolonej. W pierwszej kolejności zatłoczono 9 m³ wody odsolonej. Po zatłoczeniu tej ilości, przepompowano wodę ze zbiornika o poj. 6 m³ do zbiornika o poj. 14 m³. Operacja ta trwała ok. 1 h. W tym czasie utrzymywano wydatek wody termalnej na poziomie ok. 7 m³/h. Następnie rozpoczęto zatłaczanie pozostałej części wody odsolonej (11 m³). W tym celu obniżony został wydatek wody termalnej do 4 m³/h i dotłoczono 2,6 m³/h odsolonej. Po zakończeniu podawania wody odsolonej prowadzono obserwacje ciśnienia

przy wydajności zatłaczania wody termalnej ok. 6,5 m³/h.

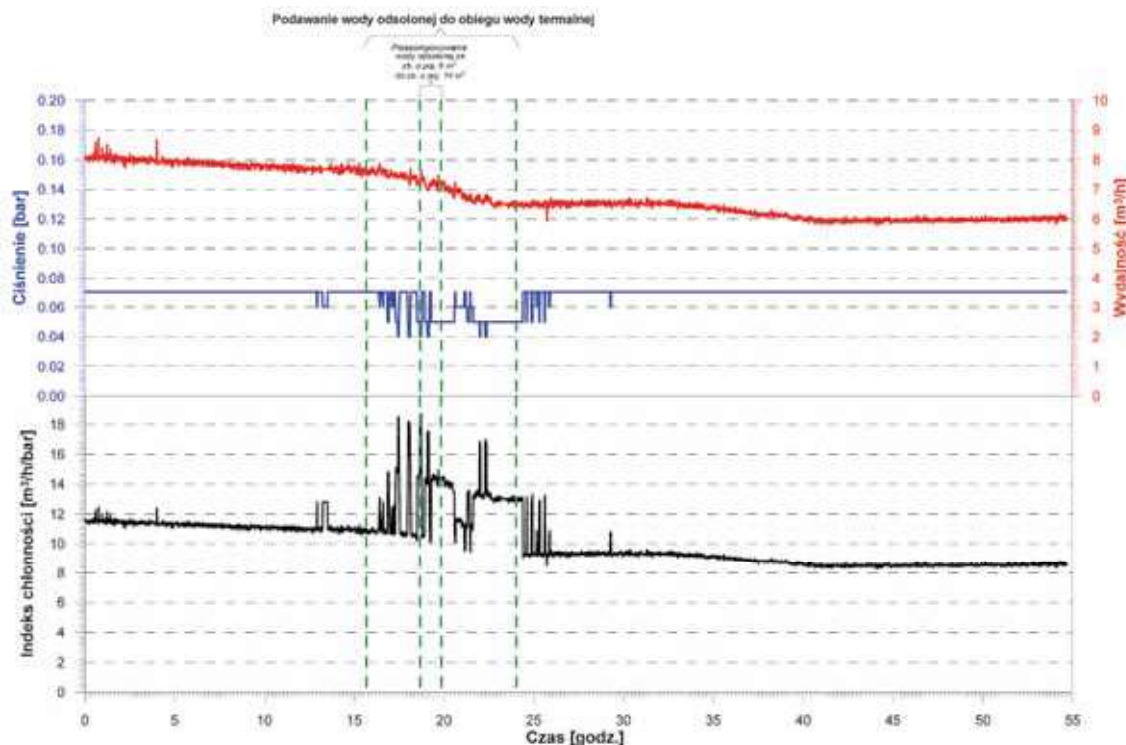
Czas trwania testu:

- rozpoczęcie wtłaczania wody odsolonej - 07.10.2011 godz. 11:00
 - zakończenie wtłaczania wody odsolonej - 07.10.2011 godz. 19:20
 - zakończenie prowadzenia obserwacji - 09.10.2011 godz. 02:00.
- Parametry początkowe:
- wydajność zatłaczania wody termalnej - 4,5 m³/h
 - ciśnienie - 0,07 MPa
 - wydajność zatłaczania wody odsolonej - 3,0 dm³/h.

Test przebiegał bez zakłóceń. Po 1 godzinie od rozpoczęcia badań zaobserwowano obniżenie się ciśnienia zatłaczania od 0,07 MPa do 0,06 MPa, a następnie, po kolejnej godzinie chwilowy spadek ciśnienia do ok. 0,04 MPa. Pod koniec testu (po 8 godzinach) osiągnęło wartość 0,05 MPa. W czasie zatłaczania wydajność wody termalnej obniżyła się o ok. 1 m³/h, z 7,5 do 6,5 m³/h. Po 2 godzinach od zakończenia wtłaczania wody zmieszanych wód (60/40) ciśnienie wzrosło do pierwotnej wartości 0,07 MPa, zaś po 10 godzinach wydajność zatłaczania wody termalnej zaczęła stopniowo spadać i w ciągu 7 kolejnych godzin obniżyła się do 6 m³/h. Taka wartość utrzymała się do końca obserwacji.

Domieszka wody odsolonej dodana do obiegu wody termalnej spowodowała jej rozcieńczenie, co przyczyniło się do ograniczania wtórnego wytrącania osadów wtórnych z wody i chwilowego zahamowania tego procesu, co odegrało korzystną rolę w zapobieganiu kolmatacji strefy czynnej otworu chłonnego. Po zaprzestaniu podawania wody odsolonej do obiegu, i przystąpieniu do zatłaczania wyłącznie wody termalnej z otworu Skierniewice GT-1, ciśnienie zatłaczania ponownie zaczęło rosnąć, a wydajność zatłaczania spadać. Na rysunku 4 przedstawiono zmienność ciśnienia, wydatku i indeksu chłonności w trakcie realizacji testu.

Wyniki przeprowadzonego testu pokazały, że rozcieńczenie wysoko zasolonych wód termalnych może ograniczyć tendencję do wytrącania osadów wtórnych, zwłaszcza węglanu wapnia. Efekt zatłaczania okazał się znacznie bardziej



Rys. 4. Zmienność parametrów hydrodynamicznych w trakcie mieszania wody termalnej zatłaczanej do otworu Skierniewice GT-2 z wodą odsoloną

Fig. 4. Variation of hydrodynamic parameters during mixing of geothermal and desalinated water injected into the Skierniewice GT-2 well

wydajny. Jednakże indeks chłonności wrócił do poprzedniego stanu, niezwłocznie po powrocie do włączania wód o niezmiennym składzie.

5. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały korzystne zjawisko związane z poprawą warunków zatłaczania wody termalnej do górotworu po jej rozcieńczeniu wodą odsoloną. Rozcieńczenie wysoko zasolonych wód termalnych może ograniczyć tendencję do wytrącania osadów wtórnych, zwłaszcza węgla wapnia. Efekt zatłaczania okazał się znacznie bardziej wydajny. Jednakże realizacja tego typu działań na większą, techniczną skalę wymaga dodatkowego rozpoznania, zwłaszcza w kontekście zabezpieczenia możliwości długotrwałej i niezawodnej eksploatacji zasobów wraz z adekwatną do potrzeb chłonnością złoża w trakcie włączania wykorzystanych wód do górotworu.

Literatura

1. *Kepińska B.* (red. nauk.), *W. Bujakowski* (red. nauk.), *Bielec B.*, *Tomaszewska B.*, *Banaś J.*, *Solarski W.*, *Mazurkiewicz B.*, *Pawlikowski M.*, *Pająk L.*, *Miecznik M.*, *Balcer M.*, *Holujuch G.*, Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych, Wyd. EJB, Ministerstwo Środowiska, 177-183, Kraków 2011.
2. *Parkhurst D. L.*, *Appelo C. A. J.*: User's guide to PHREEQCI (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimension transport and inverse geochemical calculations: U.S Geological Survey Water-Resources Investigation Report, 1999, 97-4259.
3. *Tomaszewska B.*, *Pająk L.*: Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the Polish Lowland. *Archives of Environmental Protection* 38/3, 2012, 103-117.
4. *Bielec B.*, *Kepińska B.*: Testowanie badawcze „miękkiego kwasowania” w geotermalnych otworach chłonnych. „Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN” 2012, nr 82, 71-87.