

Effect of hydrogen and brine on the tightness of hardened cement slurry for underground hydrogen storage in salt caverns

Wpływ wodoru oraz solanki na szczelność stwardniałego zaczynu cementowego przeznaczonego do podziemnych magazynów wodoru w kawernach solnych

DOI: 10.15199/62.2024.1.11

Hardened cement cores, conditioned in a satd. brine soln. for 2, 4 or 6 months, under a H₂ pressure of 100 bar and at 40°C, were subjected to a H₂ tightness test and compared with the tightness of unconditioned cores. The av. H₂ flow through the core and the total gas vol. were detd. An increase in H₂ migration through the hardened cement slurry previously conditioned in brine compared to the unconditioned one was obsd.

Keywords: hardened cement slurry, salt caverns, hydrogen storage

Zaczyn cementowy uszczelniający rury okładzinowe jest narażony na stałe oddziaływanie solanki oraz wodoru. Wpływ tych czynników na parametry płaszcza cementowego jest istotnym zagadnieniem przy magazynowaniu gazu w kawernach solnych. Określono wpływ wodoru na cement w środowisku solanki w pełnym nasyceniu i przeprowadzono prace badawcze, które pozwoliły określić jakość stwardniałego zaczynu cementowego w kontakcie z wodorem i solanką.

Słowa kluczowe: stwardniały zaczyn cementowy, kawerny solne, przechowywanie wodoru

Energia ze źródeł odnawialnych odgrywa obecnie na świecie coraz ważniejszą rolę, a wodór może w przyszłości stanowić kluczowe znaczenie w bezemisyjnej produkcji energii. Energia produkowana z wodoru wydaje się być obiecującym rozwiązaniem, ponieważ jest bezpieczna dla środowiska i nie powoduje jego zanieczyszczenia, a jednocześnie jest niemalże niewyczerpalna. Wodór wytworzony w procesie elektrolizy, a następnie magazynowany w podziemnych magazynach energii może w dalszej kolejności być wykorzystywany jako paliwo w transporcie i energetyce oraz w innych gałęziach przemysłu. Zaletami kawern solnych są wyjątkowo wysoka szczelność górotworu solnego, niskie jednostkowe koszty budowy oraz niewielka powierzchnia zabudowy. Kawerny solne są jednym ze sposobów przechowywania wodoru, ponieważ sól jest obojętna

w stosunku do wodoru, podobnie jak w przypadku gazu ziemnego.

Podziemne magazynowanie wodoru jest jedną z opcji magazynowania energii, w której wodór stanowi atrakcyjny, choć dzisiaj jeszcze trudny do pełnego wykorzystania nośnik energii. Dotychczasowe doświadczenia magazynowania wodoru wskazują, że sposób ten może stać się w przyszłości (w perspektywie kilkunastu lat) korzystnym rozwiązaniem dla magazynowania nadmiaru energii elektrycznej związanej z nieregularnością dostaw ze źródeł odnawialnych, a struktury geologiczne mogą zapewnić możliwości magazynowania energii w średnio- i długoterminowej skali czasowej¹⁾. Podziemne magazynowanie energii w postaci ciepła, sprężonego powietrza lub wodoru (np. elektrownie szczytowo-pompowe), magazynowanie



Mgr inż. Jerzy KUŚNIERCZYK (ORCID: 0000-0002-6579-605X) w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Obecnie jest starszym specjalistą badawczo-technicznym w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Specjalność – inżynieria złożowa, eksploatacja, badania właściwości fazowych płynów złożowych (PVT) oraz symulacje procesów złożowych.



Mgr inż. Sławomir SZUFLITA (ORCID: 0000-0001-7776-4656) w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu i na Wydziale Paliw i Energii AGH w Krakowie. Obecnie jest asystentem w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Specjalność – inżynieria złożowa, eksploatacja, badania właściwości fazowych płynów złożowych (PVT), symulacje procesów złożowych oraz problematyka depozycji stałej fazy parafinowej.

* Adres do korespondencji:

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków, tel.: (13) 434-96-40, fax: (13) 436-79-71, e-mail: kusnierczyk@inig.pl

Table 1. Composition and basic parameters of cement slurry no. 3

Tabela 1. Skład oraz podstawowe parametry zaczynu cementowego nr 3

Skład zaczynu nr 3		Parametry zaczynu cementowego		
Solanka 1,2 g/cm ³	w/c* = 0,59	Gęstość, g/cm ³	1,90	
Dodatek odpieniający, %	0,5	Rozlewność, mm	220	
Dodatek upłynniający, %	0,3	Odstój wody, %	0,0	
Dodatek antyfiltracyjny, %	0,1	Lepkość plastyczna, mPa·s	69,0	
Mikrocement, %	5,0	Granica płynięcia, Pa	5,3	
Cement G, %	100,0	Porowatość, %	36,03	
Dodatek spęczniający, %	0,15	Czas gęstnienia, h (45°C, 18 MPa)	100 Bc	> 7,5
Gips modelowy, %	5,0			

*współczynnik wodno-cementowy

Table 2. Composition and basic parameters of cement slurry no. 7

Tabela 2. Skład oraz podstawowe parametry zaczynu cementowego nr 7

Skład zaczynu nr 7		Parametry zaczynu cementowego		
Solanka 1,2 g/cm ³	w/c* = 0,59	Gęstość, g/cm ³	1,91	
Dodatek odpieniający, %	0,5	Rozlewność, mm	230	
Dodatek upłynniający, %	0,4	Odstój wody, %	0,0	
Dodatek antyfiltracyjny, %	0,1	Lepkość plastyczna, mPa·s	81,0	
Mikrocement, %	10,0	Granica płynięcia, Pa	3,8	
Cement G, %	100,0	Porowatość, %	33,90	
Dodatek spęczniający, %	0,15	Czas gęstnienia, h (45°C, 18 MPa)	100 Bc	> 7,5
Gips modelowy, %	5,0			

*współczynnik wodno-cementowy

sprężonego powietrza (*compressed air energy storage*, CAES), magazynowanie energii cieplnej (*underground thermal energy storage*, UTES, *aquifer thermal energy storage*, ATES, *borehole thermal energy storage*, BTES) oraz podziemne magazynowanie wodoru (*hydrogen underground storage*, HUS) pozwala na jej przechowywanie w zróżnicowanej ilości przez godziny, tygodnie, a nawet miesiące. Jest ono dzisiaj uznawane za kluczowy element nowoczesnego łańcucha dostaw energii. Przyczynia się do zwiększenia stabilności sieci energetycznych, zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE), poprawy wydajności systemów energetycznych, ochrony kopalnych źródeł energii i zmniejszenia wpływu produkcji energii na środowisko²⁻⁸). Możliwe jest magazynowanie wodoru pod powierzchnią ziemi, w głębokich strukturach geologicznych, pod bardzo słabo przepuszczalnymi skałami nadkładu. Rozważane są trzy warianty (miejsca) podziemnego magazynowania wodoru (UHS): w kawernach

solnych, w szczypanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego oraz w głębokich poziomach wodonośnych⁹⁻¹²).

W przedstawionej przez Komisję Europejską Strategii Wodorowej (lipiec 2020 r.) nakreślono cel strategiczny polegający na zainstalowaniu w UE elektrolizerów do produkcji wodoru odnawialnego (tzw. zielonego) o mocy co najmniej 40 GW (wytwarzających co najmniej 5 Mt wodoru) na podstawie szacunkowego zapotrzebowania na zielony wodór na poziomie 10 Mt/r¹³).

Polska Strategia Wodorowa wspierająca globalne i europejskie działania na rzecz energii i klimatu nakreśliła wizję stworzenia gospodarki wodorowej opartej na pełnym łańcuchu wartości, czyli produkcji wodoru z niskoemisyjnych źródeł (lub z paliw kopalnych z wykorzystaniem CCS – *CO₂ capture and storage* lub CCU *carbon capture and utilization*), budowy sieci dystrybucji i magazynów wodoru oraz końcowego wykorzystania wodoru w przemyśle¹⁴).

Jednakże składowanie wodoru w kawernach solnych oraz jego przesył wiąże się również z licznymi problemami. Jednym z nich jest szczelność płaszcza cementowego, którym uszczelnia się rury zatłaczająco-wydobywcze. Zaczyn cementowy uszczelniający rury okładzinowe jest narażony na stałe oddziaływanie solanki oraz wodoru. Wpływ tych czynników na parametry płaszcza cementowego jest istotnym zagadnieniem przy magazynowaniu gazu w kawernach solnych.

Zasadniczym celem pracy było określenie wpływu wodoru na cement w środowisku solanki o pełnym nasyceniu i przeprowadzenie prac badawczych, które pozwoliły określić jakość stwardniałego zaczynu cementowego w kontakcie z wodorem i solanką.

Część doświadczalna

Materiały

Podstawowymi materiałami stosowanymi do badań szczelności były wyselekcjonowane próbki cementu, czyli stwardniałego zaczynu cementowego, w postaci walców o średnicy 1", dostarczone przez Zakład Technologii Wiercenia



Dr inż. Mirosław WOJNICKI (ORCID: 0000-0001-7505-7560) w roku 2013 ukończył studia geologiczne na Uniwersytecie Jagiellońskim, a w 2015 r. studia górniczo-geologiczne na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. W 2021 r. uzyskał stopień doktora nauk inżynierjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Politechnice Śląskiej. Od 2016 r. jest związany z Instytutem Nafty i Gazu – Państwowym Instytutem Badawczym, gdzie do 2022 r. pracował w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu, a obecnie jest adiunktem w Zakładzie Inżynierii Naftowej. Specjalność – inżynieria złożowa, w szczególności zagadnienia związane z zatłaczaniem CO₂ do górotworu (CCS/CO₂-EOR).



Dr inż. Marcin WARNECKI (ORCID: 0000-0002-1200-7678) w roku 2000 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. W 2016 r. uzyskał stopień doktora nauk o ziemi w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Jest adiunktem w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie O/Krosno, gdzie kieruje Zakładem Badania Złóż Ropy i Gazu. Specjalność – inżynieria złożowa, eksploatacja, badania właściwości fazowych płynów złożowych (PVT), wspomaganie wydobycia ropy (EOR), sekwestracja CO₂ (CCS/CCUS), symulacje procesów złożowych na symulatorze komputerowym oraz na fizycznych modelach złoża.

INiG-PIB. Podstawowe parametry wybranych zaczynów cementowych przedstawiono w tabelach 1 i 2^{15, 16}.

Metodyka badań

Badania nad wpływem wodoru na właściwości stwardniałego zaczynu cementowego prowadzono z wykorzystaniem bezręciowej aparatury PVT do badania właściwości fazowych płynów złożonych¹⁷. Dla realizacji tych badań zestaw PVT został odpowiednio rozbudowany o połączenia wysokociśnieniowe i komorę rdzeniową, utrzymującą próbki kamienia cementowego w zadanych warunkach *PT*. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 1.

Zgodnie z zaleceniem Zakładu Technologii Wiercenia każda próbka była przez cały czas zanurzona w solance. Dopiero przed samym badaniem wyjmowano ją z solanki i przystępowano do badań. Wszystkie badania szczelności zaczynu cementowego prowadzono w temp. 40°C i pod ciśnieniem 100 bar.

Badania prowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie sprawdzono szczelność wszystkich rdzeni na przenikalność wodoru. Z jednej strony rdzenia przykładano ciśnienie, natomiast z drugiej odbierano wodór na wolny wypływ przy ciśnieniu atmosferycznym do gazomierza, mierząc jego objętość. Odczyty prowadzono co 15 min do ustabilizowania się przepływu. Na podstawie wszystkich pomiarów wyliczano średni przepływ wodoru przez rdzeń.

Po zakończeniu pierwszego etapu badań wszystkie rdzenie umieszczano w specjalnie zaprojektowanej i wykonanej komorze ciśnieniowej, do której wlewano nasycony roztwór solanki (rys. 2). Komora składała się z rury cylindrycznej zaczopowanej z dwóch stron mufami. W górnej części umieszczono zawory wraz z podłączeniem oraz manometrem, aby można było kontrolować ciśnienie w układzie. Stwardniały zaczyn cementowy w postaci rdzeni został umieszczony wewnątrz komory, w której znajdowała się wcześniej przygotowana solanka. Zakręcono górną część komory i podłączono butlę z wodorem. Wtłoczono wodór do układu, a ciśnienie ustabilizowano na poziomie 100 bar. Gdy gaz rozpuszczał się w solance, następował spadek ciśnienia i wtedy dotłączano wodór z butli, tym samym utrzymując stałe ciśnienie. W celu uzyskania odpowiedniej temperatury badania, komora rdzeniowa została szczelnie owinięta matami grzejnymi, przy których umieszczono czuj-

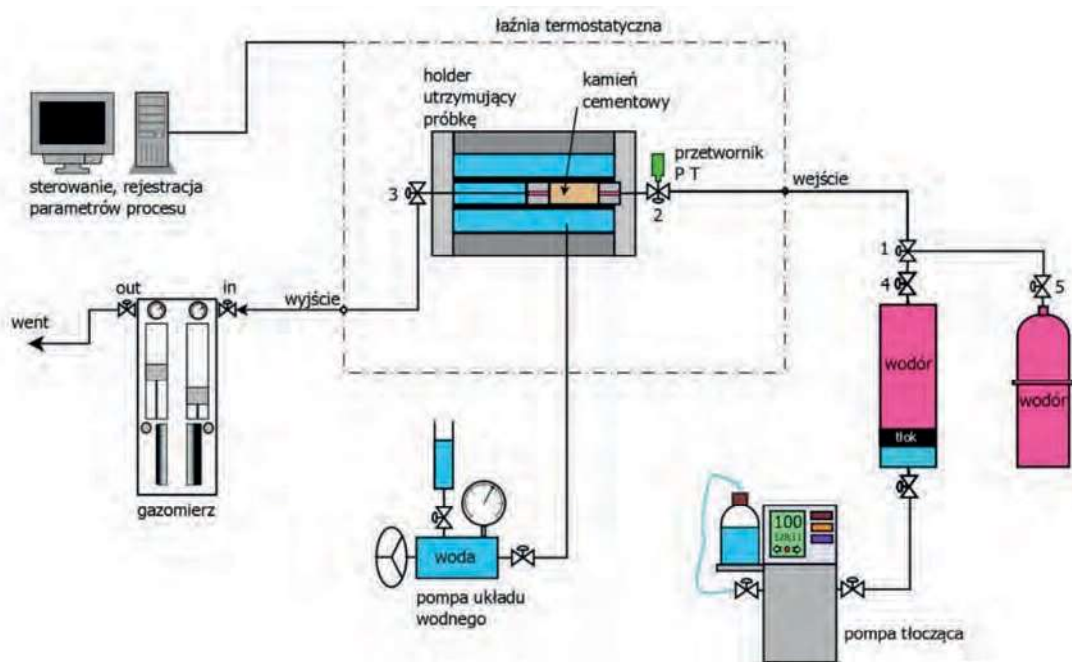


Fig. 1. Scheme of measurement stand

Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

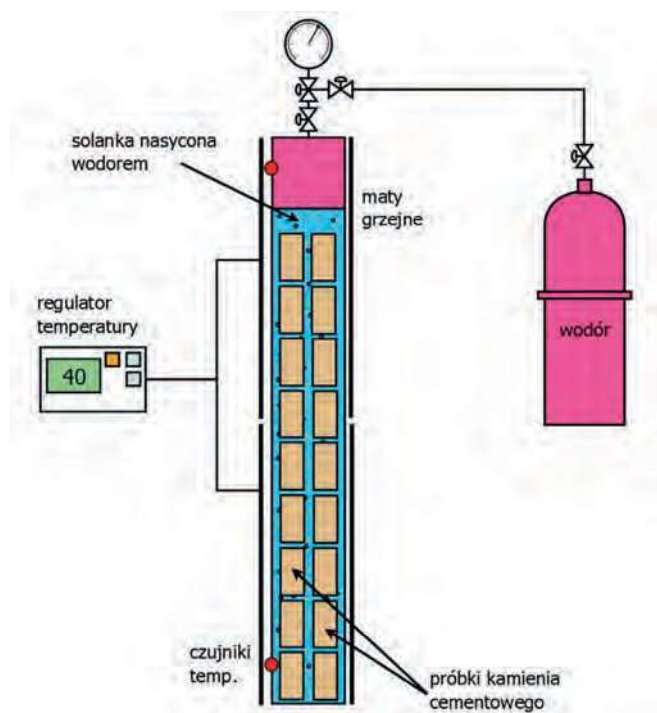


Fig. 2. Diagram of the pressure chamber

Rys. 2. Schemat komory ciśnieniowej

niki. Dzięki temu w całym układzie ciepło rozchodziło się równomiernie. Utrzymywanie parametrów na odpowiednim poziomie uzyskano za pomocą regulatora połączonego z matami grzejnymi oraz czujnikami. Po umieszczeniu wszystkich sześciu próbek cementów i ustabilizowaniu warunków *PT* w komorze, następowało kondycjonowanie stwardniałych zaczynów cementowych przez określony czas. Zgodnie z założeniami rdzenie wyjmowano odpowiednio po 2, 4 oraz 6 miesiącach, a następnie poddawano

Table 3. Comparative test results for cement slurry no. 3

Tabela 3. Porównawcze wyniki badań szczelności dla zaczynu cementowego nr 3

Lp.	Numer zaczynu cementowego/rdzenia	Czas oddziaływania wodoru, miesiące	Czas badania, min	Sumaryczna objętość gazu, cm ³	Średni przepływ gazu, cm ³ /min
1	3B	-	270	57	0,21
2		2	510	22 190	43,51
3	3D	-	270	84	0,33
4		4	495	4779	9,65
5	3C	-	270	4,5	0,02
6		6	540	111	0,21

Table 4. Comparative test results for cement slurry no. 7

Tabela 4. Porównawcze wyniki badań szczelności dla zaczynu cementowego nr 7

Lp.	Numer zaczynu cementowego/rdzenia	Czas oddziaływania wodoru, miesiące	Czas badania, min	Sumaryczna objętość gazu, cm ³	Średni przepływ gazu, cm ³ /min
1	7D	-	1515	100	0,07
2		2	615	838	1,36
3	7F	-	1380	126	0,09
4		4	540	258	0,48
5	7B	-	1110	11,2	0,01
6		6	540	598	1,11

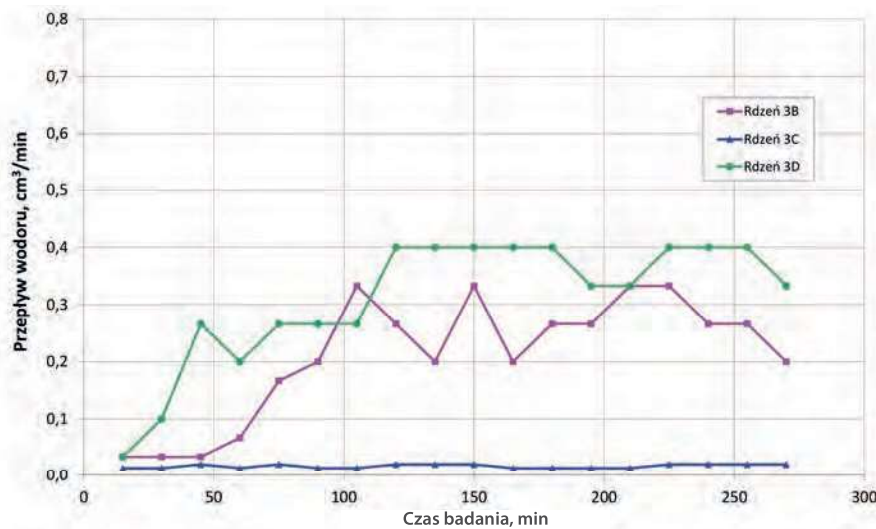


Fig. 3. Hydrogen flow through the cement core before conditioning for slurry no. 3

Rys. 3. Przepływ wodoru przez rdzeń cementowy przed kondycjonowaniem dla zaczynu nr 3

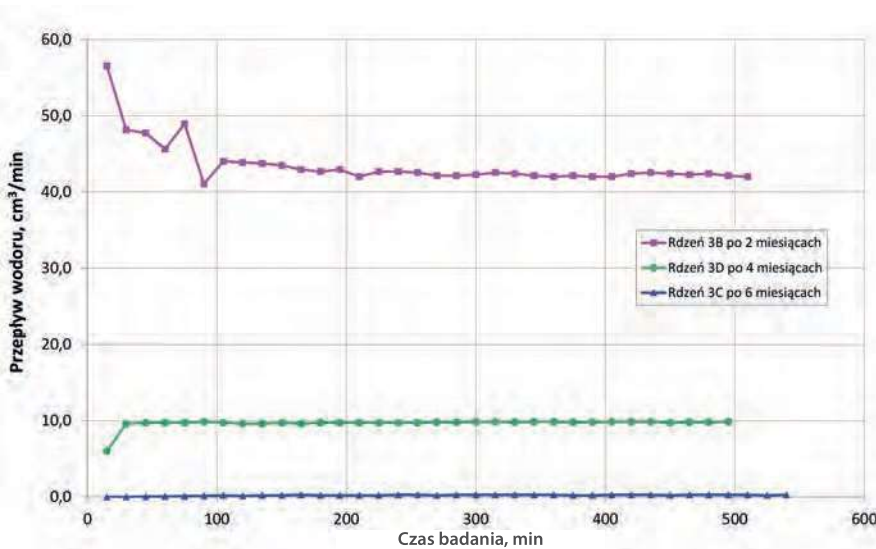


Fig. 4. Hydrogen flow through the cement core after conditioning for slurry no. 3

Rys. 4. Przepływ wodoru przez rdzeń cementowy po określonym czasie kondycjonowania dla zaczynu nr 3

je takim samym pomiarem szczelności jak wcześniej. Po szczelnym zamknięciu komory podłączono butlę z wodorem, otwarto zawór i wypełniono cały układ gazem do ciśnienia 100 bar.

Wyniki badań

Po założonym czasie (2, 4 i 6 miesiącach) wyjęto rdzenie i poddano ponownie pomiarom szczelności. W sumie przeprowadzono pomiary dla dwóch zaczynów, z których przygotowano po trzy próbki. Każda z próbek została przebadana dwukrotnie, przed oraz po kondycjonowaniu. Wyniki przeprowadzonych testów pierwotnych oraz po kondycjonowaniu zestawiono w tabelach 3 i 4 oraz przedstawiono na rys. 3–10.

W przypadku stwardniałego zaczynu cementowego nr 3 wodór miał bardzo niekorzystny wpływ (rys. 4, tabela 3). Wszystkie próbki, bez względu na czas kondycjonowania, pogorszyły swoje parametry. Jak można zauważyć na rys. 3, przepływ wodoru przez rdzeń zawierał się pierwotnie (przed kondycjonowaniem) w przedziale 0,02–0,33 cm³/min, a po wyjęciu rdzeni z solanki przepływ wahał się w granicach 0,21–43,51 cm³/min. Był to znaczny wzrost migracji wodoru przez cement, co oznacza znaczny spadek szczelności w porównaniu z pierwotnymi badaniami. Sumaryczna objętość gazu, który przeniknął przez próbkę 3D przed kondycjonowaniem wynosiła niecałe 100 cm³ (rys. 5). Po kondycjonowaniu

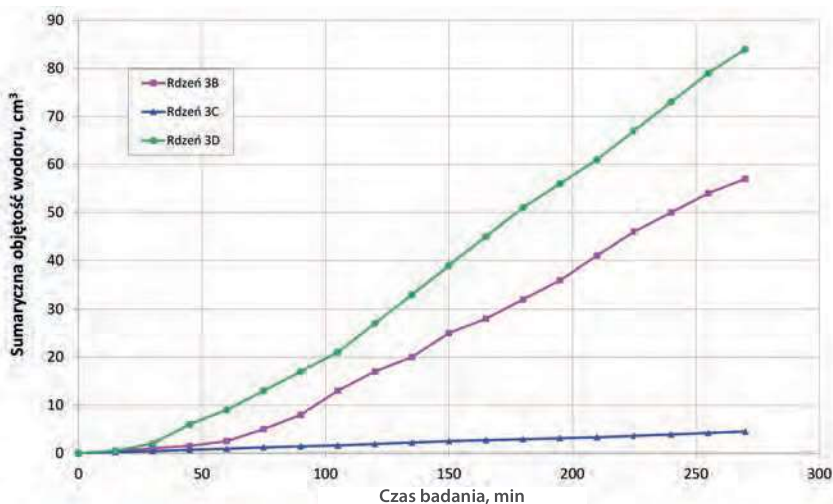


Fig. 5. Total volume of hydrogen forced through the cement core for slurry no. 3 before conditioning

Rys. 5. Sumaryczna objętość gazu przetłoczona przez rdzeń cementowy dla zaczynu nr 3 przed kondycjonowaniem

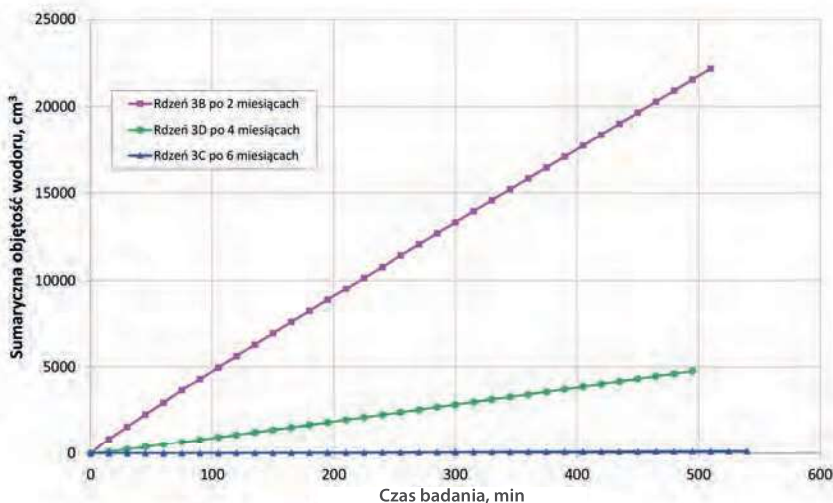


Fig. 6. Total volume of hydrogen forced through the cement core for slurry no. 3 after conditioning

Rys. 6. Sumaryczna objętość gazu przetłoczona przez rdzeń cementowy po określonym czasie kondycjonowania dla zaczynu nr 3

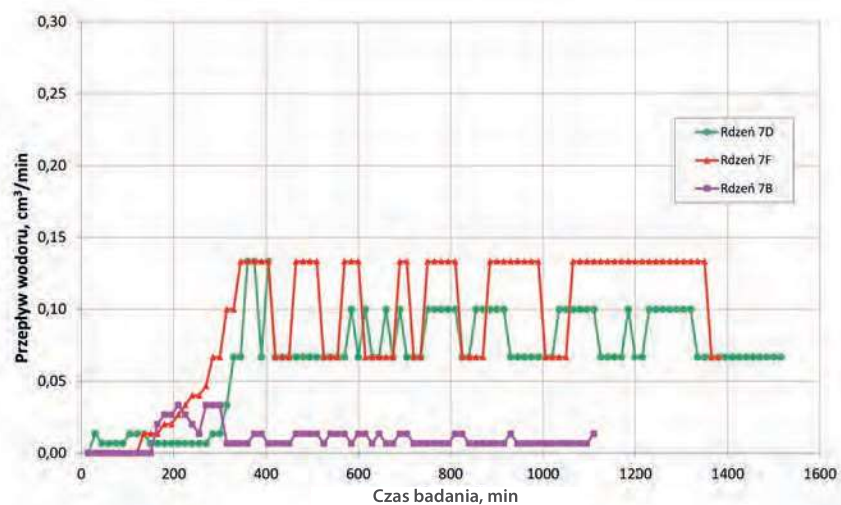


Fig. 7. Hydrogen flow through the cement core before conditioning for slurry no. 7

Rys. 7. Przepływ wodoru przez rdzeń cementowy przed kondycjonowaniem dla zaczynu nr 7

rdzeni wartość ta zwiększyła się niemalże do ok. 22 000 cm³ dla rdzenia 3B (rys. 6). Stwierdzono, że najlepszą szczelność wykazywał rdzeń badany po 6 miesiącach kondycjonowania, natomiast najgorszą próbka wyjęta po zaledwie 2 miesiącach.

W trakcie pierwotnych badań lepszymi parametrami szczelności charakteryzował się zaczyn nr 7. Wszystkie przebadane próbki wykazały się mniejszym przepływem wodoru niż w przypadku zaczynu nr 3. W związku z tym czas prowadzenia pomiarów znacznie się wydłużył, gdyż oczekiwano na stabilizację przepływu oraz zwiększenie objętości gazu, który przeniknął przez próbkę. Przepływ wodoru przez stwardniały zaczyn cementowy pierwotnie wynosił ok. 0,015 cm³/min (rys. 7). Po kondycjonowaniu próbek pod ciśnieniem 100 bar oraz w temp. 40°C wartości te znacznie się zwiększyły, średnio do 1,20 cm³/min (rys. 8). Jedynie rdzeń 7F po 4 miesiącach charakteryzował się znacznie mniejszą zmianą szczelności. Sumaryczna objętość gazu przepływającego przez próbki początkowo wahała się w granicach 20–130 cm³ w czasie 1400 min (rys. 9). Jednakże po kondycjonowaniu próbek wartości te zwiększyły się średnio do ok. 600 cm³, ale już w trakcie tylko 600 min (rys. 10). Jest to znaczna różnica, która pokazuje negatywny wpływ wodoru na próbki stwardniałego zaczynu cementowego w nasyconym roztworze solanki.

Podsumowanie

W ramach wykonanych prac badawczych nad określeniem wpływu wodoru oraz solanki na właściwości stwardniałego zaczynu cementowego zaprojektowano i wykonano nowe stanowisko badawcze. Dzięki zastosowaniu aparatury do badań PVT możliwy był szeroki zakres ustalania warunków ciśnienia i temperatury pomiaru. Badania szczelności rdzeni cementowych wobec wodoru w zadanych warunkach ciśnienia i temperatury wykonano przed i po umieszczeniu ich w komorze ciśnieniowej. Stwierdzono, że wpływ wodoru na stwardniały zaczyn cementowy w obecności roztworu nasyconego solanki jest niekorzystny. Wszystkie badania szczelności stwardniałych zaczynów cementowych prowadzono do momentu ustabilizowania się

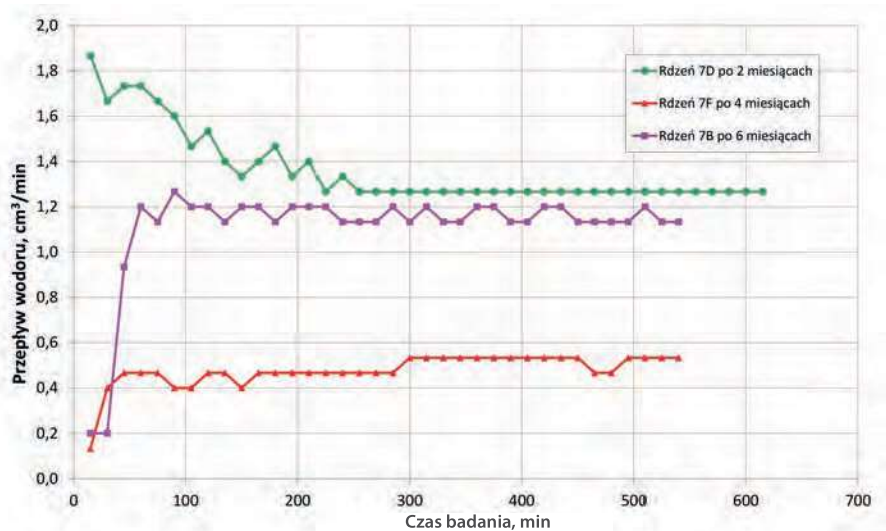


Fig. 8. Hydrogen flow through the cement core after conditioning for slurry no. 7

Rys. 8. Przepływ wodoru przez rdzeń cementowy po określonym czasie kondycjonowania dla zaczynu nr 7

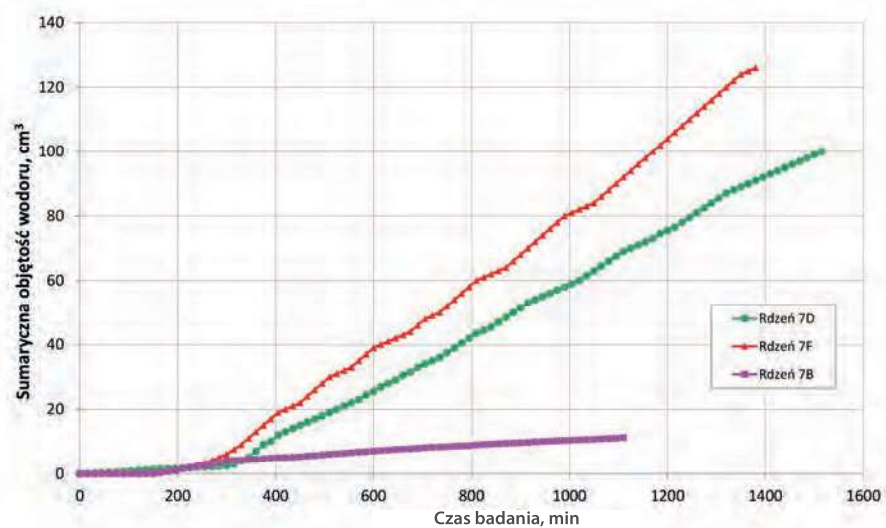


Fig. 9. Total volume of hydrogen forced through the cement core for slurry no. 7 after conditioning

Rys. 9. Sumaryczna objętość gazu przetłoczona przez rdzeń cementowy dla zaczynu nr 7 przed kondycjonowaniem

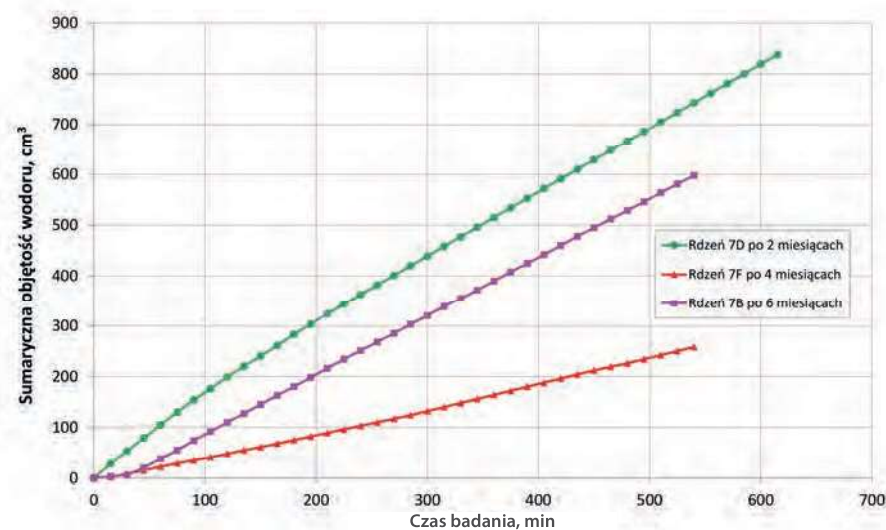


Fig. 10. Total volume of hydrogen forced through the cement core for slurry no. 7 after conditioning

Rys. 10. Sumaryczna objętość gazu przetłoczona przez rdzeń cementowy dla zaczynu nr 7 po określonym czasie kondycjonowania

przepływu wodoru przez rdzeń. Niemalże w każdym przypadku cement pogorszył swoje parametry. Stanowi to znaczny problem oraz wyzwanie dla przyszłości składowania wodoru w kawernach solnych. Należy przeprowadzać dalsze prace badawcze nad migracją wodoru poprzez płaszcz cementowy w różnych warunkach ciśnienia i temperatury w celu polepszenia receptur obecnych zaczynów cementowych. Przedstawiono badania wstępne, które posłużą do znalezienia najlepszego składu stwardniających zaczynów cementowych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. „Wpływ wodoru na właściwości kamienia cementowego do zastosowań w podziemnych magazynach” – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0017/KB/22, nr archiwalny: DK-4100-5/22

Otrzymano: 24-11-2023

LITERATURA

- [1] http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.1_Overview-of-all-known-underground-storage-technologies.pdf, dostęp 23.08.2023 r.
- [2] E. Mokrzycki (red.), *Rozproszone zasoby energii w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2011.
- [3] L.-M. Jacquelin, A.-G. Bader, *Geosciences* 2013, **17**, 100.
- [4] T. Mirowski, E. Mokrzycki, *Energetyka wiatrowa – stan obecny i perspektywy rozwoju*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2015.
- [5] Ch. Delmastro, E. Lavagno, L. Schranz, *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016, **55**, 96.
- [6] M. Miecznik, *Przegl. Geol.* 2016, **7**, 464.
- [7] A. Sgobbi, W. Nijs, D.R. Miglio, A. Chiodi, M. Gargiulo, Ch. Thiel, *Int. J. Hydrog. Energy* 2016, **41**, 19.
- [8] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, J. Maddy, *Int. J. Hydrog. Energy* 2016, **41**, nr 33, 14535.
- [9] M. Panfilov, *Transp. Porous Media* 2010, **85**, nr 3, 841, DOI: 10.1007/s11242-010-9595-7.
- [10] A. Ebigbo, F. Golfier, M. Quintard, *Adv. Water Resour.* 2013, **61**, 74, DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.09.004.
- [11] M. Bai, K. Song, Y. Sun, M. He, Y. Li, J. Sun, *J. Pet. Sci. Eng.* 2014, **124**, 132, DOI: 10.1016/j.petrol.2014.09.037.
- [12] I. Iordache, D. Schitea, A.V. Gheorghie, M. Iordache, *Int. J. Hydrog. Energy* 2014, **39**, 11071, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.067.
- [13] B. Breitschopf, L. Zheng, M. Plaisir et al., *The role of renewable H₂ import & storage to scale up the EU deployment of renewable H₂ – Report*, Publications Office of the EU, 2022, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/727785>.
- [14] Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040, Ministerstwo Klimatu i Środowiska 2021.
- [15] M. Kędziński, M. Rzepka, *Nafta-Gaz* 2022, nr 2, 120.
- [16] M. Kędziński, M. Rzepka, *Nafta-Gaz* 2023, nr 2, 96.
- [17] M. Warnecki, *Nafta-Gaz* 2010, nr 1, 19.