

The impact of CO₂ saturation on the dynamic elastic parameters of rocks in carbon capture and storage process

Wpływ nasycenia ditlenkiem węgla na dynamiczne parametry sprężystości skał podczas geologicznej sekwestracji CO₂



DOI: 10.15199/62.2026.4.6

Laboratory-based anal. of P- and S-wave velocities in fine-grained sandstone during progressive brine displacement by supercrit. CO₂ was presented. The results indicate a significant initial decline in wave velocities after the injection of 0.25 pore vols. (PV), followed by a slower rate of change as CO₂ satn. increased. After injecting 5.0 PV of CO₂, a 10.9% decrease in P-wave velocity and an 8.8% decrease in S-wave velocity were obsd, as well as a 20.0% decrease in Young's modulus and a 26.5% decrease in bulk modulus compared to the initial conditions. A significant attenuation of P-wave amplitude, up to 78%, was recorded following brine displacement.

Przedstawiono charakterystykę zmian prędkości fal sprężystych P i S w piaskowcu drobnziarnistym, podczas wypierania solanki nadkrytycznym ditlenkiem węgla, wyznaczoną na podstawie badań laboratoryjnych. Odnotowano spadek prędkości obydwu rodzajów fal w pierwszej fazie zatłaczania, czyli po przetłoczeniu 0,25 objętości porowej modelu, co wpłynęło na obniżenie parametrów sprężystości, a następnie spowolnienie tempa tego spadku wraz z kontynuacją zatłaczania CO₂. Po przetłoczeniu 5,0 obj. porowych CO₂ zaobserwowano spadek prędkości fal P i S o odpowiednio 10,9% i 8,8%, a modułów Younga i odkształcenia objętości o odpowiednio 20,0% i 26,5% w stosunku do wartości referencyjnych. Odnotowano także znaczny spadek amplitudy fali P po wyparciu solanki, dochodzący do 78%. Uzyskane wyniki są zgodne z dostępnymi danymi literaturowymi i mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia zmienności parametrów sprężystości skał w kontakcie z CO₂, a także być użyteczne w rozwoju sejsmicznego monitoringu 4D podczas sekwestracji.

Keywords: carbon capture and storage (CCS), petrophysical parameters, dynamic elastic moduli, laboratory testing, microseismic monitoring

Słowa kluczowe: sekwestracja CO₂, parametry petrofizyczne, dynamiczne moduły sprężystości, badania laboratoryjne, monitoring mikrosejsmiczny

W ostatnich latach w krajach europejskich obserwowany jest wzrost niepewności na rynku produkcji energii. Dążenie Unii Europejskiej do neutralności klimatycznej w obszarze energetyki oraz trwające konflikty w Ukrainie i na Bliskim Wschodzie powodują przyspieszenie dywer-

syfikacji w obszarach produkcji energii oraz zintensyfikowanie wdrażania systemów niskoemisyjnych, takich jak energetyka słoneczna, wiatrowa oraz oparta na spalaniu biomasy. Oczekiwanym celem tych działań jest zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, przede



Dr Rafał MOSKA (ORCID: 0000-0002-6353-9287) w roku 2012 ukończył studia na kierunku geologia, a w 2013 r. na kierunku geofizyka na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. W 2026 r. uzyskał stopień doktora nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest starszym specjalistą badawczo-technicznym w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego w Krakowie. Specjalność – intensyfikacja wydobywania węglowodorów, geomechanika, geotermia niekonwencjonalna.



Dr inż. Mateusz MASŁOWSKI (ORCID: 0000-0003-1181-8804) w roku 2003 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie na kierunku górnictwo i geologia, specjalność gazownictwo ziemne. W 2022 r. uzyskał stopień doktora nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest adiunktem w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie. Specjalność – intensyfikacja wydobywania węglowodorów oraz korozja.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno, tel.: (13) 436-89-41 wew. 5133, fax: (13) 436-79-71, e-mail: moska@inig.pl

wszystkim ditlenku węgla oraz metanu. Coraz śmieiej rozwijane są również technologie zmniejszenia ilości tych gazów w atmosferze, wśród których przoduje wychwyt i składowanie CO₂ (CCS, *carbon capture and storage*)¹⁾. Intensywne prace trwają przede wszystkim nad rozwojem geologicznej sekwestracji CO₂ powiązanej ze wspomaganym wydobyciem ropy naftowej (CO₂-EOR, *enhanced oil recovery*)²⁾, składowaniem ditlenku węgla w poziomach wodonośnych³⁾, integracją geologicznej sekwestracji i geotermii⁴⁾ oraz mineralizacją CO₂ *in situ*⁵⁻⁸⁾.

Geologiczna sekwestracja CO₂ polega na zdeponowaniu gazu w taki sposób, żeby został on trwale zatrzymany w górotworze i nie przedostawał się do atmosfery. Dokonuje się tego najczęściej poprzez zatłoczenie gazu do wyeksploatowanych pułapek złożowych ropy, gazu ziemnego lub do głębokich poziomów wodonośnych. Wprowadzenie CO₂ w strukturę porową skały wiąże się z szeregiem zjawisk mających wpływ na jej właściwości. Wyparcie wody z przestrzeni porowej formacji wodonośnej podczas zatłaczania CO₂ powoduje spadek gęstości objętościowej oraz wytrzymałości układu szkielet skalny-medium porowe. Wynika to ze spadku modułu odkształcalności objętości (K) tego układu. Zmiany te mogą powodować lokalne zaburzenia ciśnienia efektywnego, zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej formacji, obniżenie parametrów sprężystości, takich jak moduł Younga oraz współczynnik Poissona, co może być niekorzystne dla stateczności otworów wiertniczych. Podczas sekwestracji występują również inne zjawiska mogące w dłuższej perspektywie czasu zmniejszać funkcję uszczelniającą skał nadkładu, do których można zaliczyć pęknięcie hydrauliczne związane z zaburzeniem ciśnienia efektywnego w górotworze, reaktywację uskoków, zakwaszanie wody w skałach nadkładu i rozpuszczanie minerałów oraz przebicie kapilarne i adwekcję CO₂⁹⁻¹¹⁾. Do mapowania migracji chmury CO₂ podczas sekwestracji używane są techniki sejsmiki poklatkowej 4D (*4D time-lapse seismic*). Wykorzystują one zjawiska zmian impedancji akustycznej oraz amplitudy warstwy nasyconej CO₂, zmniejszenia prędkości fali P oraz zwiększenia kontrastu akustycznego między warstwami. Podczas monitoringu wykonuje się obrazowania sejsmiczne 3D w tych samych lokalizacjach oraz z podobnymi parametrami pomiarowymi, ale w różnych odstępach czasu, np. przed zatłoczeniem CO₂, a następnie co pewien czas po zatłoczeniu ($4D = 3D + \text{czas}$)^{12, 13)}.



Dr inż. Marek CZUPSKI (ORCID: 0000-0002-6151-8044) w roku 1997 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. W 2008 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Jest kierownikiem Zakładu Stymulacji Wydobycia Węglowodorów w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego w Krakowie. Specjalność – intensyfikacja wydobycia węglowodorów.

W pracy dokonano charakterystyki parametrów sprężystości (Younga, Poissona, objętości i postaci) próbek piaskowca drobnoziarnistego nasyconych solanką, w zależności od zawartości CO₂ w ich przestrzeniach porowych oraz ilości CO₂ przez nie przetłoczonej. Celem pracy była odpowiedź na pytanie, w jaki sposób parametry sprężystości skały zmieniają się na skutek wprowadzenia do przestrzeni porowej próbki ditlenku węgla w zadanej ilości, w odniesieniu do całkowitej objętości przestrzeni porowej nasyconej solanką próbki.

Zależność prędkości fal od ciśnienia efektywnego i nasycenia

Prędkość fal sprężystych w skale jest wypadkową prędkości w szkielecie skalnym oraz w medium wypełniającym jej pory. Zależna jest więc od stopnia konsolidacji próbki oraz liczby szczelin i spękań. Prędkości fal P i S zwiększają się wraz ze wzrostem ciśnienia efektywnego w próbce. Im większa liczba płaszczyzn nieciągłości w skale, tym bardziej zwiększa się prędkość fali wraz ze wzrostem ciśnienia efektywnego. Fala S jest praktycznie niewrażliwa na obecność wody w przestrzeni porowej. Jest ona także niewrażliwa na obecność powietrza oraz innych gazów, ponieważ zarówno ciecze, jak i gazy nie przenoszą sił ścinających. Zatem zmiana prędkości fali S w próbce po nasyceniu wodą wynika jedynie ze zmiany gęstości objętościowej próbki. Zmniejszenie prędkości fali S po zwiększeniu gęstości przebiega zgodnie ze wzorem (1):

$$v = \sqrt{\frac{M}{p}} \quad (1)$$

w którym v oznacza prędkość fali, m/s, M moduł sprężystości, Pa, a p gęstość próbki, kg/cm³.

Dla danego ciśnienia próbka sucha jest mniej sztywna niż nasycona. W próbce nasyconej ściśliwość wody stawia opór ciśnieniu i zwiększa moduł sprężystości. Powyżej progu ciśnienia, w którym prędkość jest stała, efekt wody i powietrza stają się równoważne. Zatem prędkość fali P w częściowo nasyconym piaskowcu jest mniejsza niż w suchym, ponieważ w pierwszym etapie podczas nasycania zwiększa się jedynie gęstość próbki. To częściowe nasycenie nie ma wpływu na sztywność układu, pozostaje ona taka jak w próbce suchej, ponieważ w przestrzeni porowej nadal występuje gaz. W próbce nasyconej w pełni, gdy ilość gazu w próbce jest niewielka, pory stają się trudniejsze do ściśnięcia, a prędkość fali P wzrasta powyżej wartości prędkości dla próbki suchej¹⁴⁾.

Wpływ nasycenia CO₂ na parametry geomechaniczne skał

Badania efektu związanego z nasyceniem próbek CO₂ są prowadzone od wielu lat¹⁵⁻¹⁸⁾. Procedura eksperymentalna w takich badaniach zwykle polega na wykonaniu pomiarów

Table 1. Summary of the main findings from selected laboratory studies on the impact of CO₂ on elastic wave velocities in rocks

Tabela 1. Zestawienie głównych wniosków wybranych badań laboratoryjnych wpływu CO₂ na prędkości fal sprężystych w skałach

Literatura	Warunki badań	Wnioski
19	wypieranie wody CO ₂ w stanie gazowym, ciekłym i nadkrytycznym; piaskowiec Tako	zmniejszenie prędkości fali P: 4,3–6,5% w stanie gazowym, 4,9–9,5% w stanie ciekłym, 6,1–10,6% w stanie nadkrytycznym; zwiększenie prędkości po nasyceniu wodą w stosunku do próbki suchej 5,6–7,5%
17	wypieranie solanki CO ₂ w stanie nadkrytycznym; piaskowiec Leuser	zmniejszenie prędkości fali P o 3,5% po zatłoczeniu 2 obj. porowych CO ₂ ; potwierdzenie dopasowania teorii Biota i Gassmanna
23, 25	wypieranie wody CO ₂ w stanie nadkrytycznym; piaskowiec Berea	zmniejszenie prędkości fali P i stała prędkość fali S; potwierdzenie dopasowania teorii Biota i Gassmanna
20	zróżnicowane nasycenie: woda 100%, CO ₂ 2–10%; piaskowiec Castlegate; częstotliwości ultradźwiękowa i sejsmiczna	znaczne zmniejszenie prędkości fali P w częstotliwościach sejsmicznych, a niewielkie w ultradźwiękowych; w częstotliwości ultradźwiękowej zanotowano znaczące tłumienie fali; obecność CO ₂ zwiększa dyspersję
26	wypieranie solanki ciekłym CO ₂ ; piaskowiec ze szczelinami syntetycznymi	różnice w prędkości fal P i S w okresach nasycania próbki i jej drenażu, odpowiadające nierównomiernemu rozkładowi płynu w próbce
24	zatłaczanie solanki oraz wypieranie jej nadkrytycznym CO ₂ w próbkach skał węglanowych	spadek prędkości fali P ze względu na efekt wzrostu gęstości przy tłoczeniu solanki; wzrost prędkości fali P ze wzrostem zawartości CO ₂ ; brak zmian w zachowaniu fali S

referencyjnych na próbkach suchych, następnie nasyceniu ich cieczą oraz wyparciui cieczy przez CO₂ do pewnego stopnia i pomiarze finalnym. Zatem przestrzeń porowa jest zajmowana częściowo przez ciecz (woda związana), a częściowo przez CO₂, przy czym dystrybucja CO₂ w próbce nie jest dokładnie znana.

Większość dostępnych badań literaturowych potwierdza zmniejszenie prędkości fali P po zatłoczeniu CO₂ do skały w stosunku do wartości uzyskanych dla skały w pełni nasyconej wodą lub solanką. Spadki są odnotowywane bez względu na to, w jakim stanie skupienia tłoczony jest CO₂, przy czym dla stanu nadkrytycznego notowane spadki są największe¹⁹). Zmniejszenie prędkości fali P odzwierciedla się w obniżonych modułach Younga oraz modułach sprężystości objętości. Spada również amplituda fal. Istotnym aspektem jest także wzrost dyspersji wraz ze wzrostem zawartości CO₂ w porach. Większy spadek prędkości fali P jest obserwowany dla częstotliwości sejsmicznych, a mniejszy dla ultradźwiękowych²⁰). W tabeli 1 zestawiono główne wnioski z wybranych badań wpływu CO₂ na prędkość fal sprężystych w skałach.

Część doświadczalna

Materiał skalny

Skałą wykorzystaną do badań był piaskowiec karpacki pobrany z jednej z kopalń odkrywkowych w okolicach Krosna. Charakteryzuje się on niewielką zmiennością paramentów petrofizycznych w obrębie warstwy, przez co poszczególne wypreparowane z niego próbki mają bardzo zbliżone gęstości objętościowe (średnio 2,31 g/cm³), współczynniki porowatości efektywnej (średnio 16,9%) oraz przepuszczalności absolutnej (średnio 8,9 mD). Z bloku

skalnego wycięto próbki w formie walców o średnicy 3,81 cm (1,5") oraz długości ok. 8 cm.

Aparatura

Badania geomechaniczne wykonywano za pomocą urządzenia AVS-700 firmy Vinci Technologies służącego do wyznaczania dynamicznych parametrów sprężystości skał. Urządzenie oblicza dynamiczne parametry sprężystości na podstawie zależności (2)–(5)¹⁹:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2} \quad (2)$$

w której ν oznacza współczynnik Poissona, bezwymiarowy, V_S prędkość propagacji fali S, m/s, i V_P prędkość propagacji fali P, m/s;

$$E = \rho \frac{V_P^2(1+\nu)(1-\nu)}{(1-\nu)} \quad (3)$$

w której E oznacza moduł Younga, Pa, ν współczynnik Poissona, bezwymiarowy, a ρ gęstość objętościową, kg/m³;

$$G = \rho V_S^2 \quad (4)$$

w której G oznacza moduł sprężystości postaci (ścianiania), Pa;

$$K = \rho \left(V_P^2 - \frac{3}{4} V_S^2 \right) \quad (5)$$

w której K oznacza moduł sprężystości objętości, Pa.

Stanowisko badawcze zostało zmodyfikowane tak, aby było możliwe wykonywanie badań ultradźwiękowych podczas wypierania jednego medium drugim. Szczegóły

stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.

Metodyka badań ultradźwiękowych

Próbkę rdzeniową nasycano solanką 2-proc. KCl w komorze próżniowej przez 24 h, a następnie montowano do komory rdzeniowej urządzenia AVS-700, po czym zadawano ciśnienie uszczelnienia 35 bar w układzie hydrostatycznym. Przez próbkę przetłaczano 1 obj. porową solanki, a następnie podnoszono przeciwcisnienie do 15 bar i przetłaczano 3 obj. porowe solanki. Podnoszono temperaturę do 38°C, a następnie zwiększano ciśnienie uszczelnienia do 100 bar i przeciwcisnienie do 80 bar. W takich warunkach przetłaczano przez próbkę dodatkowo 1 obj. porową solanki. Wykonywano pomiar referencyjny czasów pierwszych wstąpień fal P i S , po czym wyrównywano ciśnienie w linii CO_2 do ciśnienia w komorze rdzeniowej. Następnie przetłaczano 5 obj. porowych ditlenku węgla przez próbkę, rejestrując ilość wypartej solanki oraz czasy pierwszych wstąpień fal P i S dla następujących objętości porowych próbki: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 i 5,0. CO_2 tłoczono z wydajnością 1 mL/min. Na podstawie ilości wypartej solanki z próbki obliczano gęstość objętościową układu w każdym punkcie pomiarowym, przyjmując gęstość solanki równą 0,993 g/cm³ oraz gęstość ditlenku węgla w stanie nadkrytycznym wynoszącą 0,281 g/cm³ [22]. Eksperyment przeprowadzono dla 4 próbek rdzeniowych piaskowca, w takich samych warunkach ciśnienia i temperatury.

Wyniki badań i ich omówienie

Na rys. 2 przedstawiono średnie prędkości propagacji fal P i S podczas eksperymentów wypierania wody ditlenkiem węgla w stanie nadkrytycznym, a na rys. 3 zmiany parametrów sprężystości zanotowane w tych eksperymentach. Na rys. 4 przedstawiono procentowe spadki mierzonych parametrów w poszczególnych punktach pomiarowych.

Na rys. 2 widoczny jest wyraźny spadek prędkości fal P i S w pierwszej fazie przetłaczania CO_2 . Już po przetłoczeniu 0,25 obj. porowej prędkość fali P zmniejszyła się o 6,2%, a fali S o 5,1% (rys. 4). Po przetłoczeniu 1,0 obj. porowej CO_2 prędkość fali P spadła o 10,0% w stosunku do wartości pierwotnej, a fali S o 7,9%. Dalsze przetłaczanie CO_2 powodowało znacznie wolniejszy spadek prędkości.

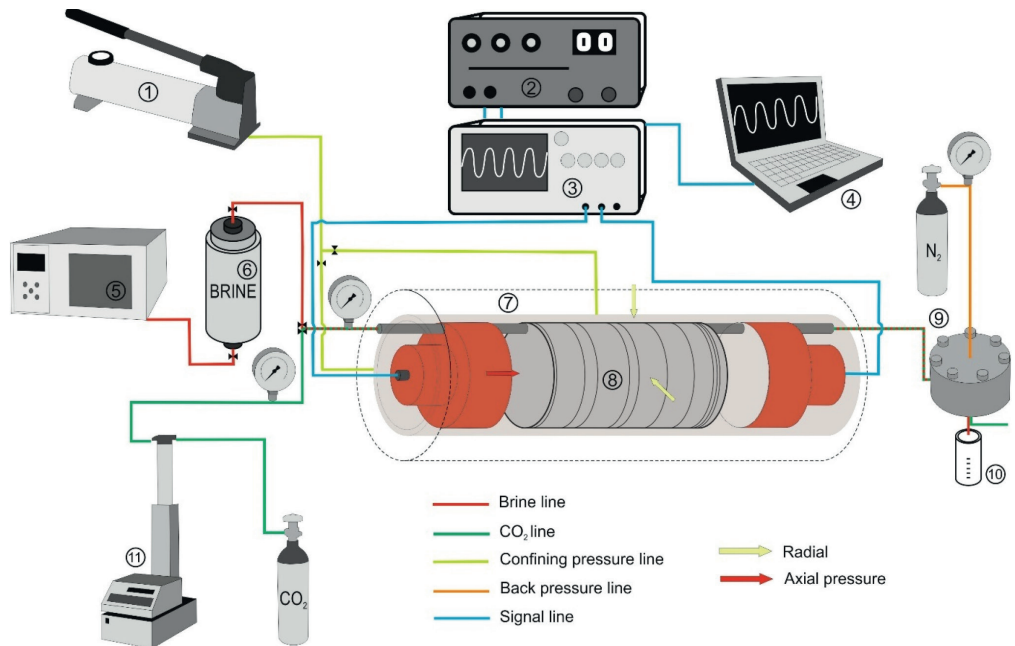


Fig. 1. Detailed schematic of the experimental setup for geomechanical measurements of rock samples saturated with CO_2 ; 1 – confining pressure pump, 2 – pulsar, 3 – oscilloscope, 4 – data acquisition system, 5 – brine pump, 6 – brine tank, 7 – core holder, 8 – core sample, 9 – back-pressure system, 10 – separator, 11 – CO_2 pump; line colors: red – brine, dark green – CO_2 , light green – confining pressure, orange – back-pressure, blue – electrical signal; arrow colors: light green – radial pressure, red – axial pressure

Rys. 1. Szczegółowy schemat stanowiska badawczego do pomiarów geomechanicznych próbek skalnych nasyconych CO_2 ; 1 – pompa ciśnienia uszczelnienia, 2 – pulsar, 3 – oscyloskop, 4 – akwizycja danych, 5 – pompa solanki, 6 – zbiornik solanki, 7 – uchwyt rdzeniowy, 8 – próbka rdzeniowa, 9 – układ przeciwcisnienia, 10 – separator, 11 – pompa CO_2 ; kolory linii: czerwony – solanka, ciemnozielony – CO_2 , jasnozielony – ciśnienie uszczelnienia, pomarańczowy – przeciwcisnienie, niebieski – sygnał elektryczny; kolory strzałek: jasnozielony – ciśnienie radialne, czerwony – ciśnienie osiowe

Po przetłoczeniu 5,0 PV (pore volume) CO_2 prędkości fal P i S zmniejszyły się o 10,9% i 8,8% w porównaniu z odpowiednimi wartościami pierwotnymi. Zmniejszenie prędkości fal przełożyło się na znaczące spadki parametrów sprężystości (rys. 2). W pierwszym punkcie pomiarowym,

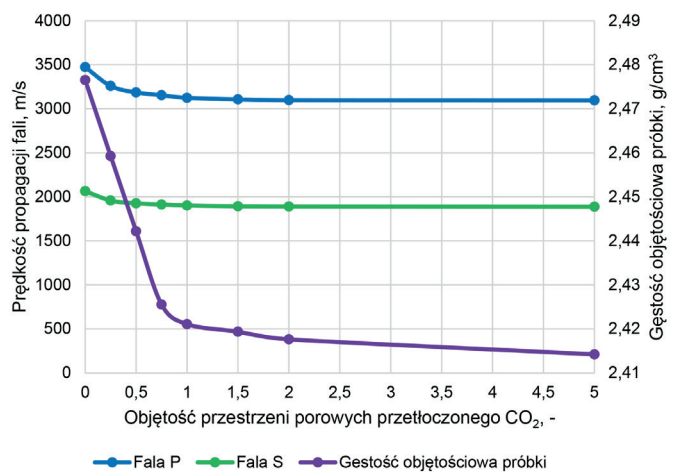


Fig. 2. Average relationships of P - and S -wave velocities and variability in bulk density as a function of the amount of injected pore volumes (PV) during tests of brine displacement by supercritical CO_2

Rys. 2. Średnie zależności prędkości propagacji fal P i S oraz zmian gęstości objętościowej od ilości przetłoczonych objętości porowych modelu w trakcie testów wypierania solanki przez CO_2 w stanie nadkrytycznym

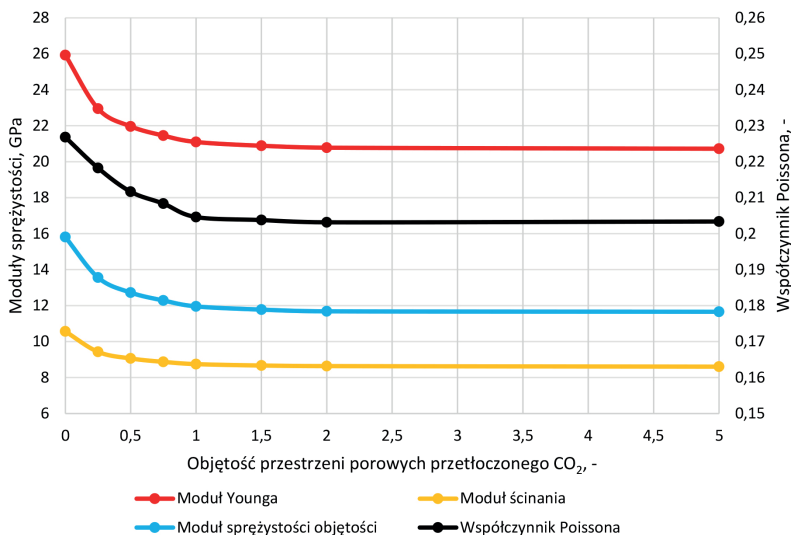


Fig. 3. Average relationships between the elastic parameters of the samples and the amount of injected pore volumes (PV) during tests of brine displacement by supercritical CO₂

Rys. 3. Średnie zależności parametrów sprężystości próbek od ilości przetłoczonych objętości porowych modeli w trakcie testów wypierania solanki przez CO₂ w stanie nadkrytycznym

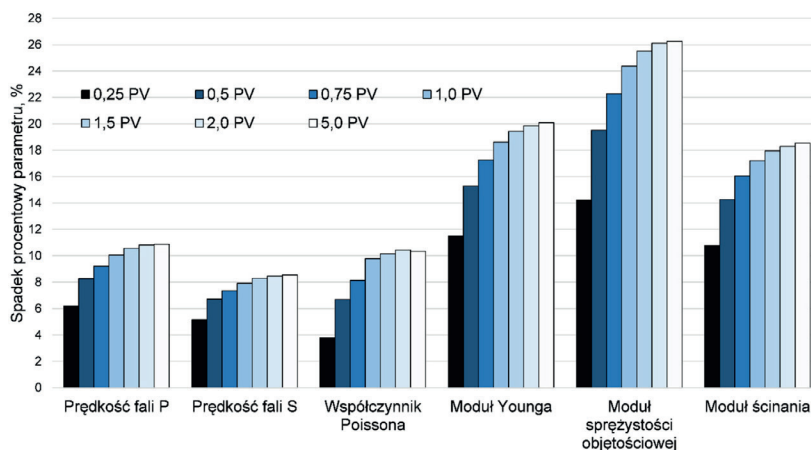


Fig. 4. Percentage decrease of the measured parameters as a function of injected pore volumes (PV) at individual measurement points

Rys. 4. Procentowy spadek mierzonych parametrów w zależności od przetłoczonych objętości porowych CO₂ (PV) w poszczególnych punktach pomiarowych

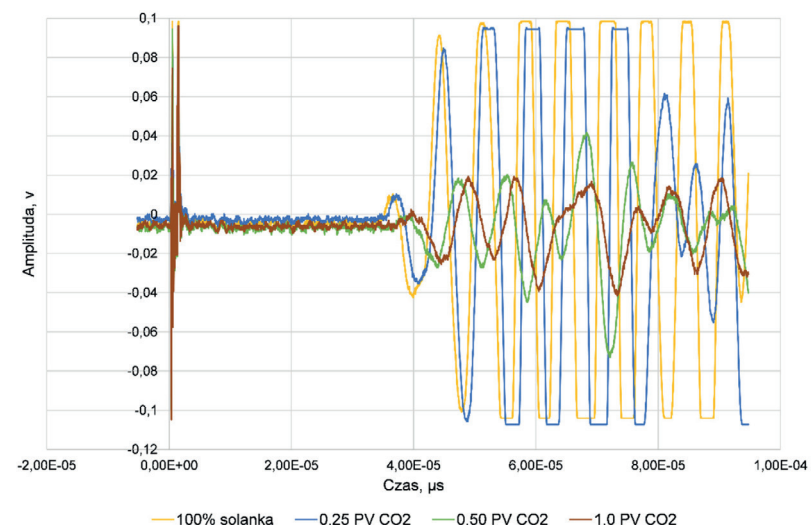


Fig. 5. Comparison of P-wave amplitude for different levels of CO₂ saturation in the pore space of the sample

Rys. 5. Porównanie amplitudy fali P dla różnych nasycen przestrzeni porowej próbki CO₂

po przetłoczeniu 0,25 obj. porowej próbki, moduł Younga w stosunku do wartości referencyjnej spadł o 11,5%, moduł odkształcenia objętości o 14,2%, postaci o 10,8%, a współczynnik Poissona o 3,8%. Po przetłoczeniu 1,0 obj. porowej parametry E , K , G i ν zmniejszyły się o odpowiednio 18,6; 24,3; 17,2 i 9,7%. W dalszym etapie przetłaczania tempo spadku ulegało stabilizacji. Przy 5,0 PV przetłoczonego CO₂ odnotowano spadek modułu E o 20%, K o 26,2%, G o 18,5%, a współczynnika ν o 10,3% (rys. 4). Przyczyną zmniejszenia prędkości fal, a co za tym idzie obniżenia dynamicznych parametrów sprężystości, była utrata sztywności próbki przy stopniowym zastępowaniu nieściślej cieczonej nadkrytycznym CO₂ o znacznie niższym module odkształcenia objętości. Należy przy tym zwrócić uwagę, że już stosunkowo niewielki procent zawartości CO₂ w próbce, a więc niewielka ilość solanki wyparta z rdzenia, powodowała duży spadek wytrzymałości mechanicznej skały, co było zgodne z publikowanymi wcześniej wynikami badań^{17, 19, 23, 24}. Odnotowano także silny spadek amplitudy fal P , postępujący wraz z zatłaczaniem CO₂ (rys. 5). Amplituda dla próbki nasyconej solanką, mierzona na drugim dodatnim pikcie maksimum fali, wynosiła ok. 0,09 V, a po przetłoczeniu 1 PV CO₂ ok. 0,02, co oznacza spadek o 78%. Efekt ten jest potwierdzony literaturowo^{20,25}) i znacząco utrudniał interpretację obrazów falowych skał nasyconych CO₂. Z drugiej jednak strony już samo obniżenie się amplitudy fali w skałę nasyconej CO₂ w stosunku do skały nasyconej solanką może być wskaźnikiem jakościowym monitoringu akustycznego przy sekwestracji CO₂.

Podsumowanie

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły, że obecność nawet stosunkowo niewielkiej ilości CO₂ w przestrzeni porowej skały nasyconej solanką w istotny sposób obniża jej parametry geomechaniczne. Zaobserwowano wyraźny spadek prędkości fal w pierwszej fazie przetłaczania CO₂ (czyli 0,25 obj. porowych modelu). Dalsze wypieranie powodowało zmniejszanie się prędkości fal, ale jego tempo było znacznie niższe. Po przetłoczeniu 5,0 obj. porowych CO₂ prędkości fal P i S zmniejszyły się o 10,9% i 8,8%, odnotowano także spadek

modułów: E o 20%, K o 26,2%, G o 18,5%, a współczynnika ν o 10,3%. Obserwowane zmiany prędkości fal oraz dynamicznych parametrów sprężystości są wynikiem utraty sztywności próbki przy stopniowym zastępowaniu nieściśliwej cieczy nadkrytycznym CO_2 o znacznie niższym module odkształcenia objętości. W badaniach odnotowano także silny spadek amplitudy fal P (tłumienie), postępujący wraz z zatłaczaniem CO_2 , dochodzący do 78% względem wartości początkowej. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane podczas interpretacji danych z monitoringu mikrosejsmicznego lub z badań geofizycznych w otworach obserwacyjnych, monitorujących migrację frontu CO_2 na obszarach jego sekwestracji.

Praca została zrealizowana dzięki środkom finansowym z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, komunikat MNiSW z dnia 26.05.2025 r. Nr zlec. wew. INiG 0034/KS/25.

Otrzymano: 18-03-2026

Zrecenzowano: 27-03-2026

Zaakceptowano: 27-03-2026

Opublikowano: 27-04-2026

LITERATURA

- [1] T.M. Thiedemann, M. Wark, *Processes* 2025, **13**, 283.
- [2] A. Bashir, M. Ali, S. Patil i in., *Earth-Sci. Rev.* 2024, **249**, 104672.
- [3] A. Izadpanahi, M.J. Blunt, N. Kumar i in., *Fuel* 2024, **369**, 131744.
- [4] I. Gunnarsson, E.S. Aradóttir, E.H. Oelkers i in., *Int. J. Greenh. Gas Con.* 2018, **79**, 117.
- [5] S.R. Gíslason, H. Sigurdardóttir, E.S. Aradóttir i in., *Energy Procedia* 2018, **146**, 103.
- [6] K. Kim, D. Kim, Y. Na i in., *Heliyon* 2023, **9**, e23135.
- [7] A. Martin, V. Becattini, C. Marieniinni, *Swiss J. Geosci.* 2025, **118**, 1.
- [8] S. Snæbjörnsdóttir, M.S. Blondes, C. Holdsworth i in., *Mat. konf. 17th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, October 2024, Calgary.
- [9] S. Rørheim, M.H. Bhuiyan, A. Bauer i in., *Energies* 2021, **14**, 5007.
- [10] R. Moska, *Nafta-Gaz* 2023, **3**, 199, DOI: 10.18668/NG.2023.03.06.
- [11] R. Moska, *Nafta-Gaz* 2024, **3**, 139.
- [12] C. Sambo, C.C. Iferobia, A.A. Babasafariinni, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2020, **80**, 103312.
- [13] O. Massarweh, A.S. Abushaikha, *Earth-Sci. Rev.* 2024, **253**, 104793.
- [14] T. Bourbié, O. Coussy, B. Zinszner, *Acoustics of porous media*, Editions Technip, Paris 1987.
- [15] Z. Wang, A.M. Nur, *SPE Res. Eng.* 1989, **4**, 429.
- [16] Z. Wang, M.E. Cates, R.T. Langan, *Geophysics* 1998, **63**, 1604.
- [17] M. Lebedev, M. Pervukhina, T. Dance i in., *SEG Tech. Program Exp. Abstr.* 2012, nr 0860.1.
- [18] M. Soldal, L.O. Omolo, T. Tran i in., *Mat. konf. 3rd International Workshop on Rock Physics*, 13–17.04.2015, Perth, Australia.
- [19] Z. Xue, T. Ohsumi, *Explor. Geophys.* 2004, **35**, 25.
- [20] N. Agofack, S. Lozovyi, A. Bauer, *Int. J. Greenh. Gas Con.* 2018, **78**, 388.
- [21] E. Fjaer, *Petroleum related rock mechanics*, Elsevier, Amsterdam 2008.
- [22] W. Cieńkowski, W. Duliński, I. Józefko, *Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce*, Wrocławskie Towarzystwo Naukowe, Wrocław 2002.
- [23] M. Gutierrez, D. Katsuki, A. Almrabat, *E3S Web Conf.* 2020, **205**, 02001.
- [24] A. Perbawa, V. Chandra, G. Gairola i in., *Mat. konf. Middle East Oil, Gas and Geosciences Show*, 19–23.02.2023 r., Bahrain.
- [25] M. Gutierrez, D. Katsuki, A. Almrabat, *Int. J. Geosci.* 2012, **03**, 908.
- [26] I.H. Falcon-Suarez, G. Papageorgiou, Z. Jin, *Geophys. Res. Lett.* 2020, **47**, e2020GL088439.

przemysł chemiczny
publikuj w trybie
OPEN ACCESS

KONTAKT Z NAMI

publikacje naukowe
www.przemyslchemiczny.com

redakcja czasopisma
przemyslchemiczny@sigma-not.pl