

# Wpływ temperatury na porowatość i przepuszczalność skał osadowych

## The effect of temperature on porosity and permeability of sedimentary rocks



*Dr inż. Anna Sygala<sup>\*)</sup>*



*Dr hab. Mirosława Bukowska<sup>\*\*)</sup>*

**Treść:** W artykule przedstawiono wyniki badań zmian porowatości otwartej i przepuszczalności karbońskich skał osadowych, poddanych działaniu temperatury 600 i 1000°C, w aspekcie prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla. Badania laboratoryjne przeprowadzono dla iłowców, które budują stropy bezpośrednie pokładów węgla w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i dla piaskowców, które również mogą lokalnie występować w stropach bezpośrednich karbonu produktywnego. Iłowce i piaskowce o różnym uziarnieniu, pobrano z obecnie eksploatowanych grup stratygraficznych karbonu produktywnego. Przed przystąpieniem do badań z każdej serii skał wydzielono próbki, na których eksperymenty przeprowadzono w stanie powietrzno-suchym, bez wcześniejszego ogrzewania. W celu dokonania analizy zmian porowatości i przepuszczalności skał, zdecydowano się na zastosowanie wartości znormalizowanej. Na podstawie wyników badań, stwierdzono wzrost omawianych parametrów. Działanie wybranych temperatur na badane próbki skalne spowodowało, generalnie, wzrost ich porowatości otwartej w porównaniu z jej wartością oznaczoną w stanie powietrzno-suchym. Największe wzrosty porowatości zaobserwowano dla skał o stosunkowo małej porowatości otwartej stwierdzonej w stanie powietrzno-suchym. Wzrost wartości współczynnika filtracji po działaniu temperatury 1000°C w przypadku iłowców nie spowodował zmian w charakterze ich przepuszczalności (próbki pozostały nieprzepuszczalne). Wśród piaskowców o różnym uziarnieniu obserwowano wzrost współczynnika filtracji do wartości przyporządkowującej im półprzepuszczalny charakter, bez względu na ich przepuszczalność określoną w warunkach temperatury pokojowej.

**Abstract:** This paper presents the results of research into changes in open porosity and permeability of sedimentary Carboniferous rocks subjected to the temperature of 600 and 1000°C, with respect to the process of underground coal gasification. Laboratory tests were conducted for claystones which form the immediate strata overlying coal seams in the Upper Silesian Coal Basin, and sandstones which may also occur locally in the immediate roof strata of productive Carboniferous. Claystones and sandstones of different grain size, were collected from the currently mined stratigraphic groups of productive Carboniferous. Before commencing the tests, samples from each of the rock series were selected to be tested in air-dry state without prior heating. To analyse changes in porosity and permeability of the rocks, it was decided to apply a normalized value. Basing on the test results, an increase in the discussed parameters was observed. Generally, influence of the selected temperature on the tested rock samples resulted in an increase in their open porosity, in comparison with its value measured in the air-dry state. The biggest increase in porosity was observed in rocks of relatively low open porosity in the air-dry state. In claystones an increase in the value of hydraulic conductivity, after heating to 1000°C, did not affect their permeability (the samples remained impermeable). In sandstones of different grain size, hydraulic conductivity rose to the value characteristic for semipermeable materials, independently on their original permeability determined at room temperature.

### **Słowa kluczowe:**

*wysoka temperatura, porowatość otwarta, przepuszczalność, podziemne zgazowanie węgla*

### **Key words:**

*high temperature, open porosity, permeability, underground coal gasification*

<sup>\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa, Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie  
Centrum Czystych Technologii Węglowych

<sup>\*\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa, Zakład Tapań i Mechaniki Górnotworu

## 1. Wprowadzenie

Podziemne zgazowanie węgla kamiennego (PZW) jest jedną z perspektywicznych metod jego wykorzystania, dającą możliwość zastosowania tego surowca do celów energetycznych, jak również do syntez chemicznych. Z uwagi jednak na skomplikowany charakter procesu PZW i trudność w jego realizacji wciąż trwają badania mające na celu umożliwienie tego przedsięwzięcia na skalę komercyjną. Jednym z istotnych problemów, wiążącym się z technologią podziemnego zgazowania węgla jest wpływ temperatury, rzędu kilkuset, a nawet przekraczających 1000°C, na otaczający górotwór. Na skutek działania wysokiej temperatury, skały otaczające zgazowywany pokład zmieniają swoją strukturę, a co za tym idzie, swoje właściwości fizyczne [2,10,12]. Istotny problem stanowi zmiana porowatości i przepuszczalności skał płonnych. Ze zmianą tych parametrów wiąże się migracja szkodliwych substancji w głąb górotworu, mogąca stanowić poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa ekologicznego procesu [1,4,5,11,13].

Ogólne trendy zmian porowatości i przepuszczalności skał poddanych działaniu podwyższonej temperatury wskazują na wzrost tych parametrów wraz ze wzrostem temperatury [3, 10,12]. Tian i inni [10] wiążą ten fakt z rozszerzalnością cieplną minerałów i zmianami w sieci mikrospekań lub rozprzestrzenianiem się uszkodzeń strukturalnych skał. Podobne spostrzeżenia odnotował Chaki i inni [3], badając zmiany porowatości otwartej i przepuszczalności próbek granitu w zakresie temperatury od 105 do 600°C. W przedziale od 105 do 500°C, badacze stwierdzili niewielki wzrost porowatości otwartej, co uzasadnili nieznacznymi zmianami strukturalnymi w tym zakresie temperatury, spowodowanymi otwarciem pierwotnych mikrospekań i/lub propagacją nowych pęknięć i szczelin i ich rozprzestrzenianiem się ze wzrostem temperatury. Większy wzrost porowatości został odnotowany po oddziaływaniu temperatury z zakresu od 500 do 600°C. Zjawisko to jest tłumaczone połączeniem sieci spekań powstałych we wcześniejszym etapie nagrzewania oraz wzrostem liczby szczelin.

Badania przepuszczalności wykazały gwałtowny jej wzrost powyżej temperatury 500°C, spowodowany wyraźnym wzrostem porowatości. Ponadto Tian i inni [10] zauważyli różne trendy zachowań przepuszczalności w przypadku piaskowców poddanych temperaturom poniżej 200°C.

Badania zespołu Małkowskiego [6], na skałach karbońskich, wykazały, że warstwę nieprzepuszczalną dla migracji gazów mogą stanowić łupki ilasto-piaszczyste, pod warunkiem, że nie ulegną one znacznej destrukcji na skutek działania temperatury.

Jak wynika z dotychczasowego stanu wiedzy, badania właściwości fizycznych w zakresie porowatości i przepuszczalności skał sąsiadujących z potencjalnym georektorem, są niezbędne przy planowaniu przedsięwzięcia podziemnego zgazowania węgla.

W artykule przedstawiono wyniki badań zmian porowatości otwartej i przepuszczalności skał płonnych górotworu karbońskiego – ilowców i piaskowców o różnym uziarnieniu, ogrzewanych w temperaturze 600 i 1000°C. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań, wykazano, że działanie zadanej temperatury powoduje przyrost badanych parametrów w sposób znacznie zróżnicowany w zależności od typu skały i pochodzenia materiału skalnego.

## 2. Metodyka badań

Badania porowatości i przepuszczalności skał sąsiadujących z potencjalnym georektorem zostały przeprowadzone

na próbkach ilowców i piaskowców o różnym uziarnieniu. Skały pobrano z wszystkich obecnie eksploatowanych grup stratygraficznych karbonu produktywnego, w obszarach górniczych czynnych kopalń, zlokalizowanych w różnych rejonach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

Przed przeprowadzeniem badań z każdego rodzaju skał przygotowano serię próbek w kształcie walca o średnicy 30 mm i 60 mm. Przebadano 29 serii skał płonnych: 7 serii ilowców, 4 serie piaskowców gruboziarnistych, 9 serii piaskowców średnioziarnistych i 9 serii piaskowców drobnoziarnistych.

Przygotowane serie skał poddano obróbce termicznej w piecu oporowym, w temperaturze 600 i 1000°C, przez czas 8 godzin. Z każdej serii skał wydzielono próbki, na których badania przeprowadzono w stanie powietrzno-suchym bez wcześniejszego ogrzewania.

Badania porowatości otwartej oraz przepuszczalności przeprowadzono, wykorzystując nowoczesną aparaturę, będącą na wyposażeniu Pracowni Hydrogeologii Górniczej i Środowiskowej Zakładu Geologii i Geofizyki GIG.

Do oznaczenia porowatości otwartej zastosowano metodę próżniową, która polega na odpompowaniu powietrza z naczynia, w którym umieszczone są próbki badanych skał, a następnie powolnym zatopieniu ich w cieczy, przy stałe utrzymywanej próżni.

Wielkość porowatości otwartej wyrażonej wartością współczynnika  $n_o$  w przybliżeniu odpowiada największej wartości, dostępnych dla gazu i cieczy, pojemności wolnych przestrzeni w skale. Wartość tego parametru podaje się bezwymiarowo lub procentowo.

Badania przepuszczalności próbek skalnych w postaci rdzeni przeprowadzono na przepuszczalnościomierzu PDPK 400.

Pomiary przepuszczalności wyrażone współczynnikiem przepuszczalności  $K_p$  zostały wykonane metodą gazoprzepuszczalności. Przepuszczalnościomierz PDPK 400 mierzy przepuszczalność gazu (azotu) wnikającego i przechodzącego przez próbkę w punkcie pomiarowym. Pomiary wykonano na rdzeniach prostopadle do uławicenia. Ze względu na zbyt małe średnice rdzeni (30 mm) wykonanie badań równoległe do uławicenia było niemożliwe.

Uzyskane współczynniki przepuszczalności, wyrażone w miliardach, przeliczono na współczynniki filtracji dla wody i wyrażono w metrach na sekundę.

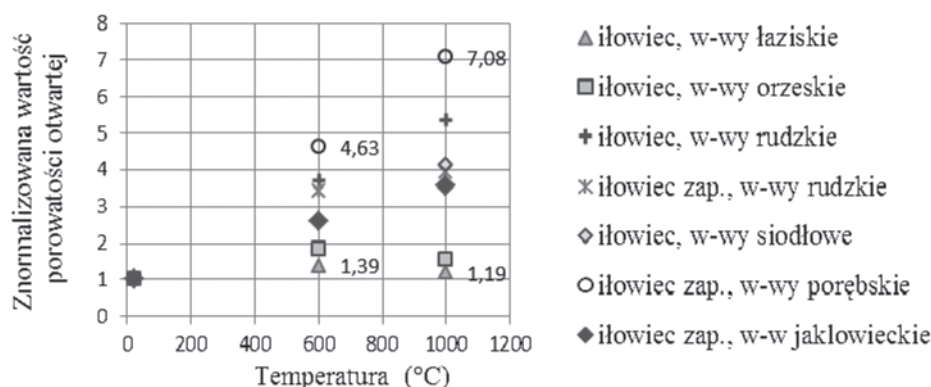
## 3. Wyniki badań porowatości skał płonnych poddanych działaniu różnych temperatur i ich analiza

W celu przeanalizowania zmian porowatości otwartej skał poddanych działaniu temperatury 600 i 1000°C, posłużono się wartością znormalizowaną, będącą stosunkiem wartości porowatości uzyskanej po działaniu wybranych temperatur do wartości uzyskanej dla próbki w stanie powietrzno-suchym.

Porowatość otwarta przebadana na próbkach z wytypowanych serii skał ilastych, w stanie powietrzno-suchym wahała się w zakresie od 1,8 (ilowiec – warstwy porębskie) do około 9,5% (ilowiec – warstwy łaziskie).

Zmianę znormalizowanej wartości porowatości otwartej skał ilastych po działaniu temperatury 600 i 1000°C przedstawiono na rysunku 1.

Na podstawie zmian można zauważyć, że po działaniu temperatury 600°C i 1000°C wartość porowatości stopniowo wzrosła dla wszystkich badanych próbek. Przedział wartości zmian po działaniu temperatury 600°C wyniósł od około 40% (ilowiec – warstwy łaziskie) do ponad 360% (ilowiec zapiaszczony – warstwy porębskie). Po działaniu temperatury 1000°C wartość porowatości zmieniała się w granicach 20%



Rys. 1. Zmiana znormalizowanej wartości porowatości otwartej iłowców po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

Fig. 1. Changing the normalized value of the open porosity claystones after the temperature of 600°C and 1000°C

(iłowiec – warstwy łaziskie) do ponad 600% (iłowiec zapiaszczony – warstwy porębskie). Na przykładzie badań iłowca z warstw łaziskich oraz iłowca zapiaszczonego z warstw porębskich można także stwierdzić, że wzrost porowatości był tym większy, im mniejsza była jej wartość w stanie powietrzno-suchym. Próbkę iłowców o stosunkowo dużej porowatości, odnotowanej w stanie powietrzno-suchym (9,5% – warstwy łaziskie i 5,3% – warstwy orzeskie) po działaniu temperatury 1000°C nie wykazały już większych zmian w stosunku do wartości uzyskanych po działaniu temperatury 600°C, a nawet zauważalny był ich nieznaczny spadek.

Znormalizowaną wartość porowatości otwartej piaskowców gruboziarnistych po działaniu temperatury 600 i 1000°C przedstawiono na rysunku 2.

Porowatość piaskowców gruboziarnistych w stanie powietrzno-suchym zmieniała się w zakresie od 3,18% do około 19%. Granice przedziału tych wartości stanowiły porowatość otwartą piaskowców z warstw libiąskich. Maksymalny wzrost porowatości po działaniu temperatury 600°C wynoszący około 109%, odnotowano dla jednego z piaskowców warstw libiąskich, natomiast najmniejszy, wynoszący 12% dla piaskowca warstw łaziskich. Wartości te wskazują na niewielkie zmiany porowatości w tym zakresie temperatury.

Ogrzewanie jednego z piaskowców warstw łaziskich w temperaturze 1000°C spowodowało ponad 6,5-krotny wzrost jego porowatości, podczas gdy porowatość pozostałych

piaskowców nie uległa większym zmianom, w porównaniu do wartości odnotowanej po działaniu temperatury 600°C. Warto podkreślić, że podobnie jak w przypadku skał ilastych, największy wzrost porowatości wystąpił dla próbki piaskowca o najmniejszej wartości w stanie powietrzno-suchym, z kolei najmniejsze zmiany wystąpiły w próbce o największej porowatości wyjściowej.

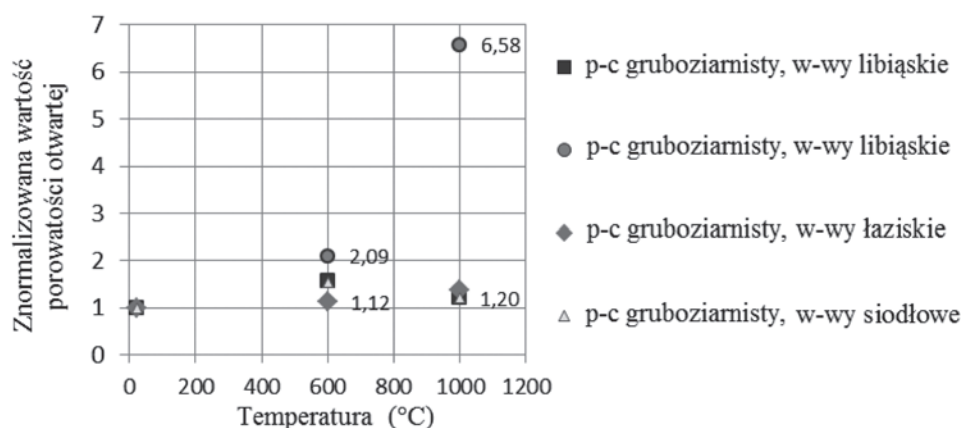
Zmianę znormalizowanej porowatości otwartej dla piaskowców średnioziarnistych po działaniu temperatury 600 i 1000°C przedstawiono na rysunku 3.

Wartość porowatości otwartej piaskowców średnioziarnistych w stanie powietrzno-suchym zmieniała się dla warstw:

- łaziskich od 4,8% do 15,7%;
- siodłowych od 5,3% do 8,5%;
- porębskich od 3,1% do 4,4%.

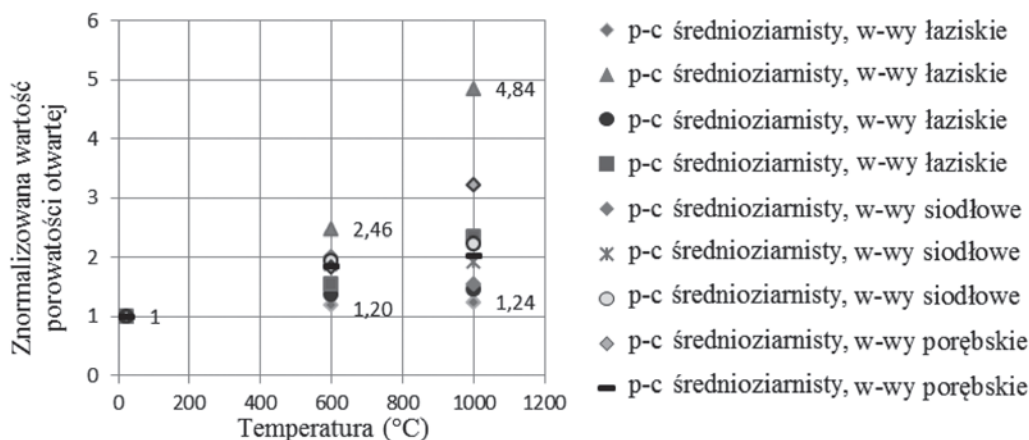
Na podstawie pomiarów wykonanych na próbkach w stanie powietrzno-suchym można stwierdzić, że największą porowatością otwartą, jak również największą jej zmiennością, charakteryzują się piaskowce młodszych ogniw litostatygraficznych.

Po działaniu temperatury 600°C, porowatość wszystkich badanych próbek piaskowców średnioziarnistych wzrosła, a przedział wartości tych zmian wahał się od 20% do 164%, w stosunku do wartości uzyskanej w stanie powietrzno-suchym. Skrajne wartości z przedziału zmian należały do piaskowców średnioziarnistych pochodzących z warstw



Rys. 2. Zmiana znormalizowanej wartości porowatości otwartej piaskowców gruboziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

Fig. 2. Changing the normalized value of the open porosity coarse-grained sandstones after the temperature of 600°C and 1000°C



Rys. 3. Zmiana znormalizowanej wartości porowatości otwartej piaskowców średnioziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

Fig. 3. Changing the normalized value of the open porosity medium-grained sandstones after the temperature of 600°C and 1000°C

łaziskich. Oddziaływanie temperatury 1000°C, generalnie, spowodowało wzrost porowatości próbek. Największą zmianę wykazały piaskowce o najmniejszej porowatości w stanie powietrzno-suchym z warstw łaziskich i porębskich. Piaskowce średnioziarniste, odznaczające się dużą porowatością w stanie powietrzno-suchym (warstwy łaziskie), po działaniu temperatury 1000°C, podobnie jak w przypadku ilowców i piaskowców gruboziarnistych, nie wykazały większych zmian.

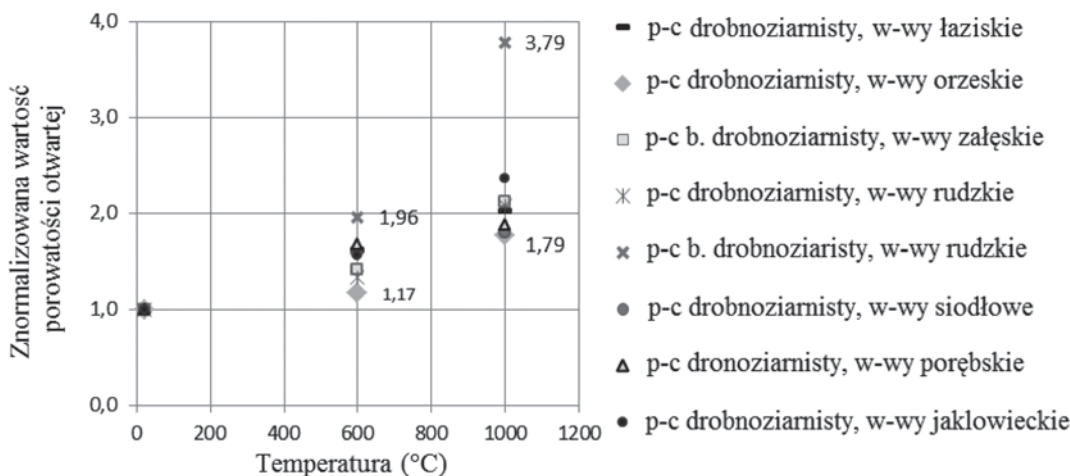
Porowatość otwarta piaskowców drobnoziarnistych w stanie powietrzno-suchym wyniosła od około 5,1% (warstwy porębskie) do blisko 9% (warstwy łaziskie). Obserwując zmianę wartości porowatości otwartej, badanej na próbkach skał w stanie powietrzno-suchym, podobnie jak w przypadku piaskowców gruboziarnistych i średnioziarnistych, można stwierdzić, że jej wartość jest tym większa, im młodsze są skały.

Porowatość piaskowców drobnoziarnistych po oddziaływaniu temperatury 600°C wzrosła w zakresie od 17% do 96%, w porównaniu z jej wartością uzyskaną na próbkach nieogrzewanych (rys. 4). Najmniejszy wzrost porowatości po działaniu tej temperatury odnotowano dla piaskowca z warstw orzeskich, którego wartość porowatości w stanie powietrzno-suchym wyniosła około 8% i była jedną z wyższych

odnotowywanych wśród grupy nieogrzewanych piaskowców drobnoziarnistych. Większość piaskowców drobnoziarnistych po oddziaływaniu temperatury 1000°C wykazała wzrost porowatości oscylujący na poziomie 2–2,5-krotności jej wartości w stanie powietrzno-suchym. Największy wzrost porowatości otwartej w tej temperaturze (blisko 4-krotny) wykazał jeden z piaskowców drobnoziarnistych warstw rudzkich, odznaczający się jedną z najmniejszych porowatości, wyznaczonych dla piaskowców drobnoziarnistych w stanie powietrzno-suchym (5,1%). Najmniejszy wzrost odnotowano dla piaskowca z warstw orzeskich, podobnie jak miało to miejsce po działaniu temperatury 600°C.

4. Wyniki badań współczynnika filtracji skał płonnych poddanych działaniu różnych temperatur i ich analiza

Analizę zmian przepuszczalności skał, spowodowanych wpływem temperatury, przeprowadzono na podstawie znormalizowanej wartości współczynnika filtracji, będącej ilorzem jego wartości zmierzonej po działaniu wybranej temperatury (600°C i 1000°C) i wartości zmierzonej na próbkach w stanie powietrzno-suchym.



Rys. 4. Zmiana znormalizowanej wartości porowatości otwartej piaskowców drobnoziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

Fig. 4. Changing the normalized value of the open porosity fine-grained sandstones after the temperature of 600°C and 1000°C

Brak płaskiej powierzchni w przypadku niektórych próbek po obróbce termicznej, uniemożliwił przeprowadzenie dla nich badania przepuszczalności. W szczególności pomiar był utrudniony dla próbek iłowców, gdzie spora ich część uległa dezintegracji po działaniu temperatury. Z tego względu dane przedstawione na wykresach dotyczą tylko tych próbek, dla których badanie było możliwe do przeprowadzenia.

Uzyskane wartości współczynnika filtracji zostały odniesione do podziału skał według ich właściwości filtracyjnych, na podstawie opracowania Pazdro i Kozerskiego [8], który przedstawiono w tabeli 1.

**Tablica 1. Podział skał według właściwości filtracyjnych według Pazdro i Kozerskiego [8]**

**Table 1. Distribution of rocks by filtration properties by Pazdro and Kozerski [8]**

Charakter przepuszczalności	Współczynnik filtracji k, m/s
Bardzo dobra	>10-3
Dobra	10-3–10-4
Średnia	10-4–10-5
Słaba	10-5–10-6
Skały półprzepuszczalne	10-6–10-8
Skały nieprzepuszczalne	>10-8

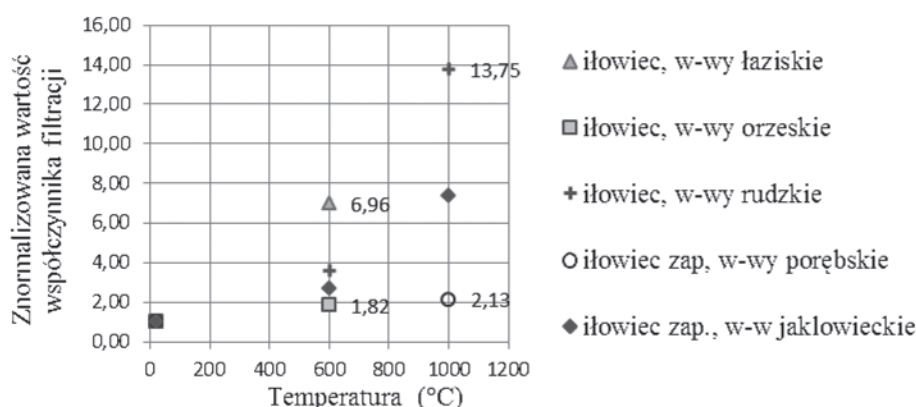
Na rysunku 5 przedstawiono zmianę znormalizowanej wartości współczynnika filtracji badanych próbek iłowców po działaniu temperatury 600°C i 1000°C.

Wartość współczynnika filtracji w stanie powietrzno-suchym dla wszystkich badanych próbek iłowców wskazała na ich nieprzepuszczalny charakter. Po działaniu temperatury 600°C, w przypadku wszystkich iłowców zaobserwowano wzrost wartości współczynnika filtracji w zakresie od 82% (warstwy orzeskie) do blisko 600% (warstwy łaziskie) (rys. 5). Wartość współczynnika filtracji po działaniu temperatury 1000°C można było określić tylko dla trzech próbek iłowców. Niemniej jednak po działaniu tej temperatury obserwowano również wzrost przepuszczalności tych skał w stosunku do przepuszczalności oznaczonej na próbkach w stanie powietrzno-suchym. Na podstawie iłowca z warstw rudzkich i jakłowieckich można stwierdzić, że przepuszczalność wzrosła, w porównaniu z wynikiem otrzymanym po działaniu temperatury 600°C. Pomimo obserwowanego wzrostu przepuszczalności próbek, wartości współczynnika filtracji wskazują, że próbki zachowały swój nieprzepuszczalny charakter.

Piaskowce gruboziarniste, po określeniu ich współczynnika filtracji w stanie powietrzno-suchym, według charak-

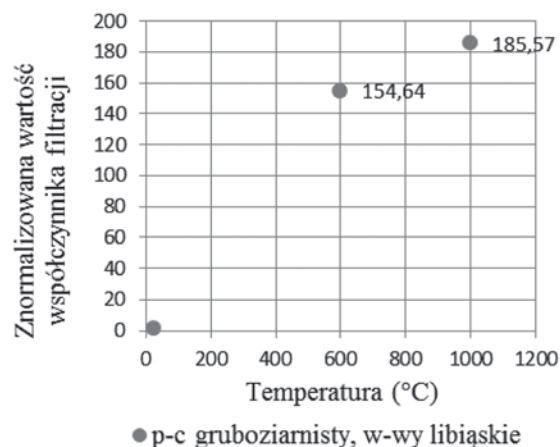
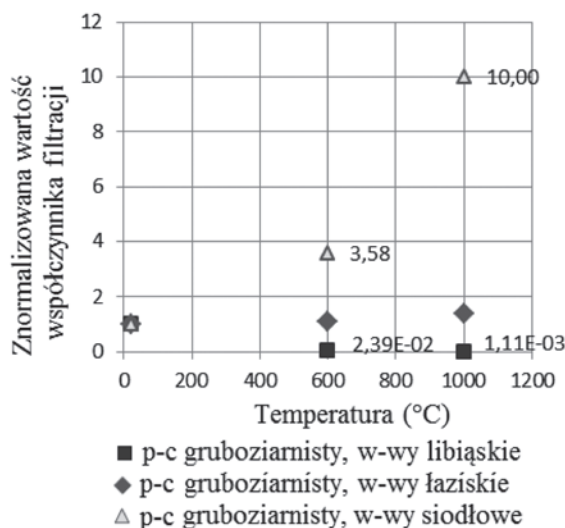
teru przepuszczalności sklasyfikowanego przez Pazdro i Kozerskiego (1990), wykazywały bardzo zróżnicowaną jej jakość od średnio przepuszczalnej (warstwy libiąskie), przez słabo przepuszczalną (warstwy łaziskie), półprzepuszczalną (warstwy siodłowe), po nieprzepuszczalną (warstwy libiąskie), co prawdopodobnie jest związane z głębokością ich zalegania [7,9]. Na rysunku 6 przedstawiono zmianę znormalizowanej wartości współczynnika filtracji piaskowców gruboziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C.

Piaskowiec gruboziarnisty o wartości współczynnika filtracji wskazującej średnią przepuszczalność (warstwy libiąskie), po działaniu temperatury 600°C i 1000°C jako jedyny zmniejszył swoją wartość w stosunku do wartości uzyskanej w temperaturze pokojowej, wykazując w tych temperaturach półprzepuszczalny charakter. Przepuszczalność jednego z piaskowców gruboziarnistych z warstw łaziskich, po działaniu wybranych temperatur praktycznie nie uległa zmianie. Piaskowce z warstw siodłowych i drugi piaskowiec z warstw łaziskich, które wykazywały na podstawie wartości współczynnika filtracji, charakter półprzepuszczalny i nieprzepuszczalny, po działaniu temperatury 600°C i 1000°C wykazały wzrost jego wartości. W przypadku piaskowca z warstw siodłowych wzrost ten był blisko 3,5-krotny po działaniu temperatury 600°C i 10-krotny po działaniu temperatury 1000°C. Dla piaskowca z warstw libiąskich wzrost był 160-krotny (600°C) i ponad 180-krotny (1000°C). W przypadku piaskowca z warstw siodłowych wzrost współczynnika filtracji nie spowodował zmian w charakterze jego przepuszczalności, natomiast w przypadku piaskowca z warstw libiąskich sprawił, że próbka o charakterze nieprzepuszczalnym stała się półprzepuszczalna. Znaczny wzrost przepuszczalności w przypadku próbki tego piaskowca może być spowodowany dużym wzrostem jej porowatości (7-krotny po działaniu temperatury 1000°C). Obserwując znormalizowane wartości współczynnika filtracji po działaniu temperatury 600°C i 1000°C, można stwierdzić, że jej wpływ na piaskowce gruboziarniste spowodował zmniejszenie się wartości współczynnika filtracji (warstwy libiąskie), brak większych zmian (warstwy łaziskie) lub zwiększenie jego wartości (warstwy siodłowe i łaziskie), w zależności od jego wartości w stanie powietrzno-suchym. Wszystkie piaskowce gruboziarniste, bez względu na rodzaj zachodzących zmian, po działaniu temperatury 1000°C wykazały wartość współczynnika filtracji wskazującą na półprzepuszczalny charakter przepuszczalności.



**Rys. 5. Zmiana znormalizowanej wartości współczynnika filtracji iłowców po działaniu temperatury 600°C i 1000°C**

**Fig. 5. Changing the normalized value of filtration coefficient of claystones after the temperature of 600°C and 1000°C**



Rys. 6. Zmiana znormalizowanej wartości współczynnika filtracji piaskowców gruboziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

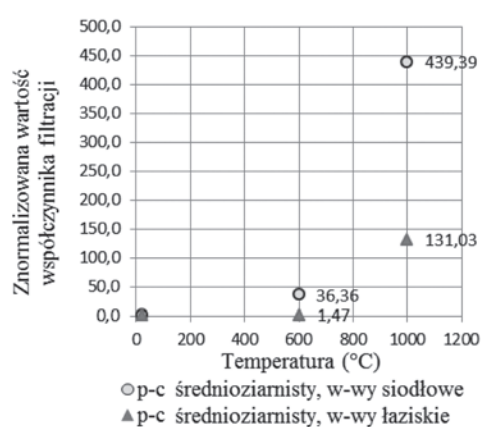
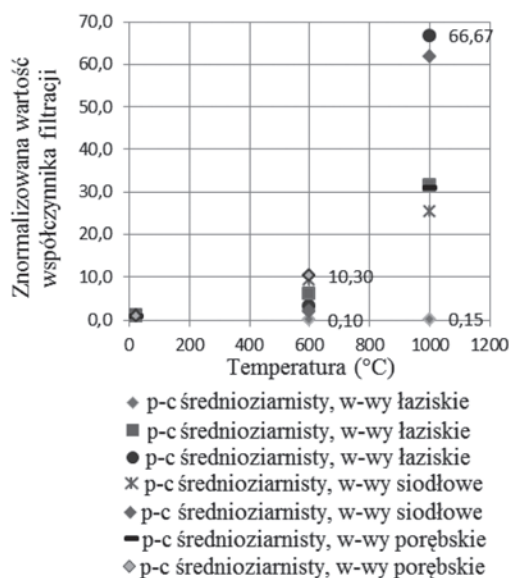
Fig. 6. Changing the normalized value of filtration coefficient of coarse-grained sandstones after the temperature of 600°C and 1000°C

Zmianę znormalizowanej wartości współczynnika filtracji piaskowców średnioziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C przedstawia rysunek 7.

Wartości współczynników filtracji, określone na próbkach piaskowców średnioziarnistych w stanie powietrzno-suchym, wskazywały na ich nieprzepuszczalny charakter. Tylko jeden z piaskowców średnioziarnistych wykazał wartość wyższą, wskazującą na jego średnią przepuszczalność. Obserwując zmiany znormalizowanej wartości współczynnika filtracji, zachodzące pod wpływem działania temperatury 600°C, można stwierdzić, że przepuszczalność piaskowców średnioziarnistych nieznacznie wzrasta lub nie ulega większym zmianom.

Największe zmiany po działaniu tej temperatury obserwuje się dla piaskowca średnioziarnistego z warstw siodłowych, dla którego wzrost był ponad 36-krotny. Oddziaływanie

temperatury 600°C na przepuszczalność piaskowców średnioziarnistych z warstw łaziskich nie spowodowało jej większych zmian. Po działaniu temperatury 1000°C, generalnie, obserwuje się wzrost przepuszczalności wśród wszystkich piaskowców średnioziarnistych. Tylko w przypadku jednego z piaskowców pochodzących z warstw łaziskich nie zaobserwowano większych zmian. Piaskowiec ten, przy wcześniejszych badaniach właściwości fizycznych i porowatości także odznaczał się dużą odpornością na działanie temperatury. Największy wzrost współczynnika filtracji (blisko 450-krotny) wystąpił dla próbki jednego z piaskowców średnioziarnistych warstw siodłowych, podobnie jak miało to miejsce po działaniu temperatury 600°C. Wartość współczynnika filtracji dla wszystkich próbek piaskowców średnioziarnistych po działaniu temperatury 1000°C wskazała na ich półprzepuszczalny charakter.



Rys. 7. Zmiana znormalizowanej wartości współczynnika filtracji piaskowców średnioziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

Fig. 7. Changing the normalized value of filtration coefficient of medium-grained sandstones after the temperature of 600°C and 1000°C

Na rysunku 8 przedstawiono zmianę znormalizowanej wartości współczynnika filtracji dla piaskowców drobnoziarnistych poddanych oddziaływaniu temperatury 600°C i 1000°C.

Wartość współczynnika filtracji w stanie powietrzno-suchym wszystkich piaskowców drobnoziarnistych wskazała, że są one nieprzepuszczalne. Oddziaływanie temperatury 600°C nie spowodowało większych zmian w charakterze ich przepuszczalności, a wzrost współczynnika filtracji był bardzo nieznaczny (średnio 7-krotny), w porównaniu z tym zaobserwowanym w temperaturze 1000°C. Najniższy wzrost współczynnika filtracji odnotowany w tej temperaturze był ponad 23-krotny dla piaskowca drobnoziarnistego z warstw rudzkich i aż 1900-krotny dla piaskowca z warstw jakłowieckich. Wszystkie piaskowce drobnoziarniste po działaniu temperatury 1000°C zmieniły swój charakter z nieprzepuszczalnego na półprzepuszczalny.

## 5. Wnioski

Badania porowatości i przepuszczalności skał w aspekcie ich zmian pod wpływem temperatury w tak szerokim zakresie mają znaczenie poznawcze i praktyczne. Aspekt ten jest ważny w przypadku planowania przedsięwzięcia podziemnego zgazowania węgla. Pomimo iż wiadomo, że parametry te wzrastają wraz z temperaturą jaka panuje w górotworze, zakresy tych zmian będą decydować o właściwościach filtracyjnych otoczenia zgazowanego pokładu i pomyślności procesu. W przypadku prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla i niekorzystnego rozkładu naprężeń, w którym znaczący udział mogą mieć naprężenia termiczne, zmiana właściwości skał otaczających georeaktor, w tym porowatości i przepuszczalności, może wpłynąć na stateczność komory powstałej po zgazowaniu węgla oraz na wielkość odkształceń górotworu.

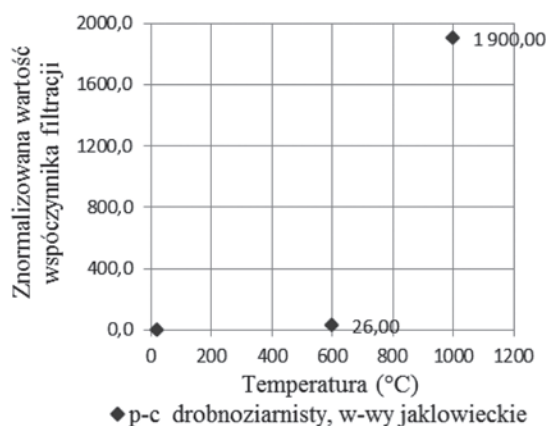
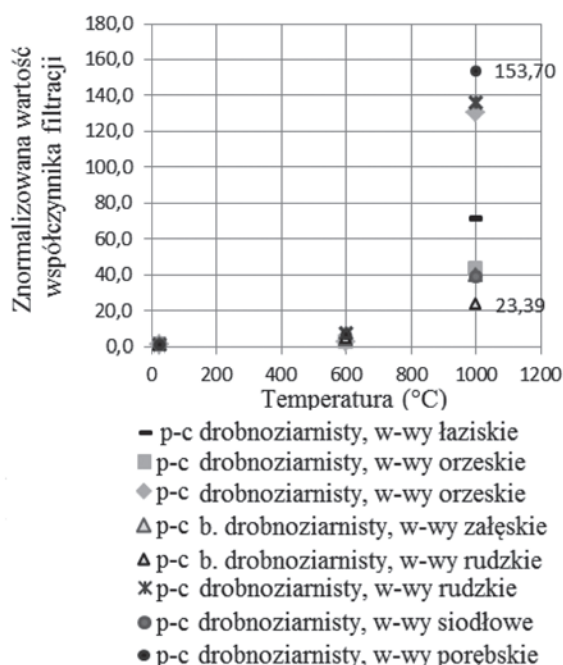
Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych – porowatości i współczynnika filtracji iłowców i piaskowców karbońskich,

które były wygrzewane w temperaturze 600°C i 1000°C wynika, że:

- Porowatość badanych skał osadowych pod wpływem temperatury 600 i 1000°C zwiększała się. Największy wzrost porowatości był charakterystyczny dla iłowców i piaskowców, dla których stwierdzono małe wartości porowatości otwartej w stanie powietrzno-suchym w porównaniu z całą populacją próbek o danym uziarnieniu. W przypadku, gdy próbki w stanie powietrzno-suchym wykazywały dużą porowatość, jej zmiana pod wpływem działania temperatury 600°C była nieznaczna. Po ogrzewaniu ich w temperaturze 1000°C porowatość nie ulegała większym zmianom.
- Największą zmienność porowatości wśród piaskowców gruboziarnistych i średnioziarnistych zarówno w stanie powietrzno-suchym, jak i po ich wygrzaniu wykazywały piaskowce z najmłodszych warstw litostratygraficznych – z warstw libiąskich i łaziskich.
- Oddziaływanie temperatury 600°C i 1000°C, powodowało wzrost współczynnika filtracji wszystkich rodzajów badanych skał. Warto podkreślić, że w temperaturze 600°C następował jego nieznaczny wzrost, który nie wpływał na zmianę charakteru przepuszczalności badanych próbek. Wzrost współczynnika filtracji po działaniu temperatury 1000°C na badane iłowce, nie spowodował zmian w charakterze ich przepuszczalności, w przeciwieństwie do badanych piaskowców.

## Literatura

1. *Bednarczyk J.*: Rozwój technologii podziemnego zgazowania węgla i perspektywy jej przemysłowego wdrożenia. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2007, R. 31, z. 3, 87–104.
2. *Brotóns V., Tomás R., Ivorra S., Alarcón J.C.*: Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology* 2013, Vol. 167, 117–127.



Rys. 8. Zmiana znormalizowanej wartości współczynnika filtracji piaskowców drobnoziarnistych po działaniu temperatury 600°C i 1000°C

Fig. 8. Changing the normalized value of filtration coefficient of fine-grained sandstones after the temperature of 600°C and 1000°C

3. *Chaki S., Takarli M., Agbodjan W.P.*: Influence of thermal damage on physical properties on a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. *Construction and Building Materials* 2008, Vol. 22, Issue 7, 1456–1461.
  4. *Kapusta K., Stańczyk K., Korczak K., Pankiewicz M., Wiatowski M.*: Wybrane aspekty oddziaływania procesu podziemnego zgazowania węgla na środowisko wodne. *Prace Naukowe GIG: „Górnictwo i Środowisko”* 2010, Nr 4, 17–27.
  5. *Ludwik-Pardala M.*: Przegląd przyczyn i mechanizmów migracji gazów powstałych w procesie podziemnego zgazowania węgla. „Przegląd Górniczy” 2013, Nr 3, 77–84.
  6. *Małkowski P., Skrzykowski K., Bożęcki P.*: Zmiany zachowania się skał pod wpływem wysokich temperatur w rejonie georeaktora. *Prace Naukowe GIG: „Górnictwo i Środowisko”* 2011, Nr 4/2, 259–272.
  7. *Paczyński B., Sadurski A. (red.)*: Hydrogeologia regionalna Polski. Tom II – Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa 2007.
  8. *Pazdro Z., Kozerski B.*: Hydrogeologia ogólna. Wyd. III, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1990.
  9. *Różkowski A.*: Środowisko hydrogeologiczne wód geotermalnych w utworach karbonu produktywnego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Technika Poszukiwań Geologicznych, „Geosynoptyka i Geotermia”* 2001, Nr 5, 51–62.
  10. *Tian H., Kempka T., Xu N.-X., Ziegler M.*: Physical Properties of Sandstone After High Temperature Treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2012, Vol. 45, 1113–1117.
  11. *Walter K.*: Fire in the Hole. Lawrence Livermore National Laboratory. ST&R April 2007.
  12. *Yavuz H., Demirdag S., Caran S.*: Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2010, Vol. 47, 94–103.
  13. *Younger P.L.*: Hydrogeological and geomechanical aspects of underground coal gasification and its direct coupling to carbon capture and storage. *Mine Water and the Environment* 2011, Vol 30, Issue 2, 127-140.
- 
-