

dr inż. Mateusz Kudasik

**Instytut Mechaniki Górotworu
Polskiej Akademii Nauk**

ul. Reymonta 27
30-059 Kraków

AUTOREFERAT

Kraków, marzec 2019

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Mateusz Kudasik**

Data urodzenia: **30.08.1981**

Miejsce urodzenia: **Zakopane**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- Stopień naukowy: **doktor nauk technicznych**

Dyscyplina: **górnictwo i geologia inżynierska**

Jednostka naukowa: **Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk**

Temat rozprawy doktorskiej: *„Porównanie wartości wybranych parametrów opisujących procesy sorpcji i transportu gazów w próbkach węgla kamiennego przy zastosowaniu różnych metod pomiarowych”*

Data uzyskania: **10.06.2015**

Promotor: **dr hab. Juliusz Topolnicki**

Recenzenci: dr hab. Katarzyna Zarębska, prof. AGH

dr hab. inż. Eugeniusz Krause, prof. GIG

- Stopień naukowy: **magister inżynier**

Specjalność: **Informatyka w zarządzaniu produkcją**

Kierunek: **Zarządzanie i Inżynieria Produkcji**

Wydział: **Mechaniczny**

Uczelnia: **Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki**

Data uzyskania: **26.09.2005**

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk

Pracownia Mikromerytyki:

- od 2006 do 2008: pracownik inżynierjno-techniczny
- od 2008 do 2015: asystent
- **od 2016 do nadal: adiunkt**

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl dziewięciu publikacji o wspólnej tematyce:

Zjawiska towarzyszące obecności gazu w przestrzeni porowej skał – badania, metody pomiarowe i modelowanie

4.2. Lista publikacji składających się na osiągnięcie naukowe

- 1) **Kudasik M.**, Skoczylas N.: *Analyzer for measuring gas contained in the pore space of rocks*. **Measurement Science and Technology**, Vol. 28(10), 2017, 105901, (IF: 1,685; 30 pkt MNiSW).
- 2) **Kudasik M.**, Pajdak A., Skoczylas N.: *The validation process of the method of balancing gas contained in the pore space of rocks via rock comminution*. **Archives of Mining Sciences**, Vol. 63(4), 2018, 989-1005, (IF: 0,629; 20 pkt MNiSW).
- 3) **Kudasik M.**, Skoczylas N.: *Balancing the amount and composition of gas contained in the pore space of cupriferous rocks*. **Environmental Earth Sciences**, Vol. 77, 2018, 135, (IF: 1,435; 25 pkt MNiSW).
- 4) Pajdak A., Godyń K., **Kudasik M.**, Murzyn T.: *The use of selected research methods to describe the pore space of dolomite from copper ore mine, Poland*. **Environmental Earth Sciences**, Vol. 76, 2017, 389, (IF: 1,435; 25 pkt MNiSW).
- 5) Pajdak A., **Kudasik M.**: *Structural and textural characteristic of selected copper-bearing rocks as one of the elements aiding in the assessment of gasogeodynamic hazard*. **Studia Geotechnica et Mechanica**, Vol. 39(2), 2017, 51-59, (12 pkt MNiSW).
- 6) **Kudasik M.**: *Investigating permeability of coal samples of various porosities under stress conditions*. **Energies**, Vol. 12(4), 2019, 762, (IF: 2,676; 25 pkt MNiSW).
- 7) Skoczylas N., Wierzbicki M., **Kudasik M.**: *A simple method for measuring basic parameters of the coal-methane system under mining conditions*. **Journal of Mining Science**, Vol. 54(3), 2018, 186-197, (IF: 0,435; 15 pkt MNiSW).
- 8) Skoczylas N., **Kudasik M.**, Topolnicki J., Oleszko K., Młynarczyk M.: *Model studies on saturation of a coal sorbent with gas taking into account the geometry of spatial grains*. **Przemysł Chemiczny**, Vol. 92(2), 2018, 272-276, (IF: 0,399; 15 pkt MNiSW).
- 9) Wierzbicki M., Skoczylas N., **Kudasik M.**: *The use of a unipore diffusion model to describe the kinetics of methane release from coal spoil in the longwall environment*. **Studia Geotechnica et Mechanica**, Vol. 39(2), 2017, 81-89, (12 pkt MNiSW).

4.3. Omówienie wyników prac stanowiących osiągnięcie naukowe

4.3.1. Wprowadzenie

Badania zjawisk związanych z obecnością gazu w przestrzeni porowej skał prowadzone są od wielu lat w Pracowni Mikromerytyki Instytutu Mechaniki Górotworu PAN. Badania te skupiają się głównie na obecności metanu w węglu kamiennym i dotyczą analizy zagadnień związanych z zagrożeniem zjawiskami gazogeodynamicznymi występującymi w kopalniach podziemnych.

Zjawiska gazogeodynamiczne kojarzone są głównie z kopalniami węgla kamiennego. W ostatnich latach zagrożenia gazogeodynamiczne występują również w polskim górnictwie rud miedzi. We wrześniu 2009 roku, w kopalni rud miedzi „Rudna”, w chodniku T-169a na poziomie 1200 m, miał miejsce pierwszy w skali światowej wyrzut gazów i dolomitu¹. W wyniku wyrzutu wyrobisko zostało zasypane materiałem skalnym na długości 70 m, a objętość powstałej kawerny powyrzutowej wyniosła 250 m³. Zdarzenie to zainicjowało cykl badań prowadzonych w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN, nad rozpoznaniem występowania zjawisk gazogeodynamicznych w kopalniach rud miedzi. Od zaistnienia wyrzutu gazów i dolomitu w O/ZG „Rudna”, w nowo eksploatowanych złożach rud miedzi w Polsce, coraz częściej stwierdza się obecność gazu zamkniętego w skałach miedzionośnych. Duża skala zagrożenia wynikającego z obecności gazu w złożach rud miedzi została potwierdzona kolejnym wyrzutem gazów i dolomitu, do jakiego doszło 1 marca 2018 roku w kopalni rud miedzi „Polkowice-Sieroszowice”, w przecince 90, upadowej D-0a/1, w wyniku którego powstała kawerna powyrzutowa o objętości około 219 m³.

Podjęta przeze mnie tematyka badawcza pod tytułem „**Zjawiska towarzyszące obecności gazu w przestrzeni porowej skał – badania, metody pomiarowe i modelowanie**”, stanowi mój wkład naukowy w rozwój dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska.

Na przedstawione osiągnięcie naukowe składa się dziewięć publikacji zawierających opis badań i „oryginalnych osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych oraz technologicznych²”. Prowadząc badania dla potrzeb zarówno górnictwa miedziożnego, jak i węglowego, część prac odnosi się do zjawisk zachodzących w skałach miedzionośnych (prace 1-5 z listy publikacji składających się na osiągnięcie), a druga część do zjawisk w węglu kamiennym (prace 6-9). Tematyka wszystkich prac skupia się głównie na zjawiskach towarzyszących obecności gazu w przestrzeni porowej skał, do których to zjawisk zalicza się:

- Sorpcja – rozumiana jako redukcja stopni swobody cząsteczki gazu znajdującego się w ruchu translacyjnym, zachodząca w wyniku oddziaływania sił powierzchniowych i obejmująca proces adsorpcji – zachodzącej na granicy faz sorbatu i sorbentu oraz proces absorpcji – polegającej na wnikaniu cząstki sorbatu do wnętrza fazy sorbentu³;

¹ Wierzbicki M., Młynarczuk M.: *Structural aspects of gas and dolomite outburst in Rudna copper mine*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 57, 2013, 113-118.

² Artykuł 16. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789).

³ Gawor M., Skoczylas N.: *Sorption Rate of Carbon Dioxide on Coal*. Transport in Porous Media, Vol. 101(2), 2014, 269-279.

- Filtracja – rozumiana jako ruch cząsteczki gazu w ośrodku porowatym, napędzany gradientem ciśnienia;
- Dyfuzja – rozumiana jako zjawisko przenoszenia cząsteczek jednej substancji względem cząsteczek drugiej substancji wewnątrz jednej fazy, wywołane gradientem stężenia⁴.

Część opracowanych rozwiązań do badań układu skała-gaz, których jestem współautorem, stanowiły nowatorskie metody pomiarowe, pozostałe stanowią udoskonalone metody i narzędzia, wykorzystywane w górnictwie od wielu lat. Prace rozwojowe nad dostarczaniem rozwiązań poprzedzone zostały badaniami podstawowymi, dotyczącymi opisu obserwowanych procesów fizycznych, w myśl idei, że jedynie dokładne poznanie natury badanego zjawiska może być podstawą do zaproponowania nowych rozwiązań.

4.3.2. Obecność gazu w przestrzeni porowej skał miedzionośnych

Większość skał, które wydobywane są w celach pozyskiwania surowców mineralnych, posiada rozwiniętą strukturę porową, w przestrzeni której może występować gazowa kopalina towarzysząca. Niezależnie od tego, czy gaz w porach skały jest pożądanym surowcem energetycznym, czy niebezpiecznym czynnikiem, generującym zagrożenie podczas eksploatacji, jego ilość powinna być znana. Wiedza o ilości gazu zawartego w jednostkowej masie skały – gazonośność – jest podstawowym indykatorem określającym zarówno ekonomiczną opłacalność jego pozyskiwania, jak również stanowiącym podstawę do oceny stanu zagrożenia gazogeodynamicznego w kopalniach podziemnych⁵.

Gaz obecny w skale może występować w postaci wolnej, wypełniając pory i szczeliny, oraz w postaci zasorbowanej (adsorpcja i absorpcja)⁶. Główną metodą określania gazonośności skały jest jej rozdrobnienie w warunkach hermetycznych, co umożliwia wolumetryczne bilansowanie ilości uwolnionego gazu. W przypadku skał, w których zachodzi zjawisko sorpcji (np. węgiel kamienny) i przepuszczalność jest stosunkowo wysoka, metrologia dostarcza szeregu metod pomiarowych opartych na analizie emisji gazu desorbującego (np. metanu) z próbek skały⁷. Znacznie bardziej problematyczne są pomiary zawartości gazu w skałach o wysokiej wytrzymałości, niesorbujących i o bardzo niskiej przepuszczalności.

Próbę dostarczenia rozwiązania technologicznego do bilansowania gazu zawartego w przestrzeni porowej skał miedzionośnych stanowi autorski, opatentowany⁸ analizator GPR (ang. Gas contained in the Pore space of Rocks), szczegółowo opisany w **pracy (1)**⁹ znajdującej

⁴ Fuliński A.: *Procesy nierównowagowe w fazach i kinetyka przejść fazowych*. W: *Chemia fizyczna*. PWN, Warszawa, 1980, 681-698.

⁵ Skoczylas N., Wierzbicki M.: *Evaluation and management of the gas and rock outburst hazard in the light of international legal regulations*. Archives of Mining Sciences, Vol. 59(4), 2014, 1119-1129.

⁶ Rice D.D.: *Composition and origins of coalbed gas*. In: Law B.E., Rice D.D.: *Hydrocarbons from Coal*. AAPG Studies in Geology, Vol. 38, 1993, 159-185.

⁷ Skoczylas N., Kudasik M., Wierzbicki M., Murzyn T.: *New instruments and methods for analysing the coal-methane system*. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 37(1), 2015, 85-92.

⁸ Numer prawa wyłącznego: 229684. Kudasik M., Skoczylas N., Murzyn T., Wierzbicki M.: *Urządzenie do oceny składu i ilości gazu zawartego w skałach*. Data przyznania: 31.08.2018.

⁹ Kudasik M., Skoczylas N.: *Analyzer for measuring gas contained in the pore space of rocks*. Measurement Science and Technology, Vol. 28(10), 2017, 105901.

się na liście publikacji składających się na osiągnięcie naukowe. Opracowana w niej koncepcja metrologiczna jest wynikiem badań nad zagadnieniami związanymi z występowaniem i transportem gazu w obrębie skał miedzionośnych i opiera się na rozpoznanych podstawach naukowych, uwzględniając strukturę porowatą dolomitów i anhydrytów. Metoda ta uwzględnia trudności związane z rozdrobnieniem skał o wysokiej wytrzymałości, do ziarnistości zapewniającej uwolnienie gazu zawartego w przestrzeni porowej analizowanej próbki.

Opracowany analizator GPR wykorzystuje wolumetryczne bilansowanie gazu, na podstawie zmian ciśnienia w komorze pomiarowej, w wyniku uwolnienia gazu po otwarciu przestrzeni porowej skały po jej rozdrobnieniu. Analizator GPR składa się z dwóch bloków funkcyjnych: młynka do rozdrabniania skał oraz analizatora zaopatrzonego w odpowiednie czujniki: gazów (CH_4 , H_2S , O_2), ciśnienia i temperatury. Próbka skały przeznaczona do badania umieszczana jest w hermetycznej komorze pomiarowej urządzenia. Próbka mielona jest udarowo na skutek zderzeń z wirującym ostrzem noża, napędzanym rotacyjnie wysokoobrotowym, bezszczotkowym silnikiem elektrycznym o mocy 2,2 kW. W pokrywie komory pomiarowej urządzenia umieszczone są czujniki gazów, ciśnienia i temperatury, które w trakcie pomiaru rejestrują zmiany wartości mierzonych parametrów. W pokrywie znajduje się również komora referencyjna, względem której odbywa się rejestracja zmian ciśnienia różnicowego w komorze pomiarowej. Koncepcja dwukomorowej budowy analizatora umożliwia pomiar różnicowym przetwornikiem ciśnienia o niewielkim zakresie pomiarowym i wysokiej precyzji. Dzięki temu, możliwe jest uzyskanie wysokiej czułości urządzenia oraz zapewnienie kompensacji zmian temperatury i ciśnienia atmosferycznego w trakcie pomiaru.

Parametry metrologiczne zbudowanego analizatora GPR zostały kompleksowo przebadane, głównie w aspekcie: efektywności rozdrabniania różnych skał¹⁰, energochłonności procesu rozdrabniania¹¹, a także optymalizacji czasu rozdrabniania¹². Wyniki przeprowadzonych testów metrologicznych urządzenia zostały szczegółowo omówione w **pracy (1)**⁹. Testy urządzenia wykazały, że zamysł metrologiczny i konstrukcja analizatora predysponują go do pomiarów zawartości i składu wybranych gazów pochodzących z przestrzeni porowej skał miedzionośnych. Zagadnienie to stanowi mój wkład naukowy w rozwój dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska, w zakresie opracowania oryginalnego rozwiązania technologicznego.

Głównym założeniem autorskiej metody bilansowania gazu w przestrzeni porowej skał miedzionośnych jest stwierdzenie, że warunkiem koniecznym do uwolnienia całkowitej zawartości gazu zawartego w przestrzeni porowej skały, jest jej rozdrobnienie do ziarn o średnicy porównywalnej do średnicy porów badanej skały. W celu zbadania słuszności tego założenia, przeprowadzono walidację opracowanej metody bilansowania gazu zawartego

¹⁰ Kudasik M., Skoczylas N., Murzyn T., Wierzbicki M.: *Efektywność rozdrabniania skał w kontekście oceny zawartego w nich gazu*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 16(3-4), 2014, 81-84.

¹¹ Kudasik M., Skoczylas N., Nurkowski J.: *Oszacowanie wydatku energetycznego rozdrabniania skał metodą mielenia udarowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 18(3), 2016, 75-82.

¹² Kudasik M., Skoczylas N.: *Stopień rozdrobnienia skał w zależności od czasu mielenia udarowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 18(3), 2016, 11-18.

w przestrzeni porowej skał, poprzez ich rozdrobnienie i analizę. Wyniki tych badań opisane zostały w **pracy (2)**¹³. Walidacja opierała się na zestawieniu badań porowatości próbek dolomitów i efektów ich rozdrobnienia, w aspekcie oceny możliwości otwarcia przestrzeni porowej. Zestawiono wyniki dystrybucji porów w próbkach skał przed rozdrobnieniem z wynikami badań rozkładu granulometrycznego po rozdrobnieniu. Badania wykonano na sześciu próbkach dolomitów pochodzących z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) w Polsce. Materiał skalny, przed rozdrobnieniem, poddano analizom porozymetrii rtęciowej (MIP) i skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM-EDS), a po rozdrobnieniu badaniu dyfrakcji laserowej.

Wyniki badań wykazały, że dolomity przed rozdrobnieniem posiadały porowatość w zakresie 0,3-14,8%, objętość porów otwartych 0,01-0,06 cm³/g oraz niejednorodny rozkład objętości porów. Rozdrobnienie próbek, przeprowadzone za pomocą analizatora GPR⁹ spowodowało, że próbki posiadały zbliżone rozkłady uziarnienia, średnią średnicę ziarn ($D_{3,2}$) w zakresie 4,0-4,5 μm oraz medianę na poziomie kilkunastu mikronów (15,4-18,6 μm). Po zestawieniu krzywych: skumulowanego rozkładu objętości porów z rozkładem wielkości rozdrobnionych ziarn, zaobserwowano, że w przebadanych próbkach krzywe tych rozkładów przecinały się, a punkty przecięcia uznano za wyznacznik ilości najmniejszych ziarn, które po rozdrobnieniu miały rozmiary mniejsze, niż największe pory w rdzeniach przed rozdrobnieniem. Przecięcie się krzywych rozkładu porozymetrycznego i granulometrycznego uznano za warunek wystarczający na otwarcie przestrzeni porowej skały w wyniku jej rozdrobnienia.

Na potwierdzenie słuszności tezy pracy, mówiącej, że rozdrobnienie skały do ziarn o średnicy porównywalnej do średnicy jej porów, powoduje uwolnienie gazu zawartego w przestrzeni porowej, dokonano analizy ilości gazu uwolnionego w wyniku rozdrobnienia. Wyniki bilansowania gazu wykazały, że w przestrzeni porowej przebadanych dolomitów obecny był gaz, którego ilość wynosiła od 3,19 cm³/kg do 45,86 cm³/kg. Uzyskane w badaniach wyniki rozdrobnienia materiału skalnego do ziarnistości porównywalnej z średnicami porów badanych skał oraz stwierdzenie obecności gazu w przestrzeni porowej przebadanych dolomitów uznano za dowód prawidłowości działania metody bilansowania gazu w skałach poprzez ich rozdrobnienie.

Szerokie spektrum badań gazonośności skał miedzionośnych, przeprowadzonych za pomocą autorskiego analizatora GPR⁹, na 41 próbkach dolomitów i anhydrytów pochodzących z różnych rejonów kopalń rud miedzi O/ZG „Rudna” i O/ZG „Polkowice-Sieroszowice”, przedstawione zostało w **pracy (3)**¹⁴. Maksymalna gazonośność przebadanych próbek dolomitów wyniosła 166,67 cm³/kg, a anhydrytów 84,66 cm³/kg. W niektórych próbkach stwierdzono śladowe ilości metanu, natomiast obecności gazów toksycznych (np. siarkowodoru) nie stwierdzono. Głównym gazem wypełniającym przestrzeń porową skał miedzionośnych był azot. Na podstawie analiz mikroskopowych wykonanych na szlifach

¹³ Kudasik M., Pajdak A., Skoczylas N.: *The validation process of the method of balancing gas contained in the pore space of rocks via rock comminution*. Archives of Mining Sciences, Vol. 63(4), 2018, 989-1005.

¹⁴ Kudasik M., Skoczylas N.: *Balancing the amount and composition of gas contained in the pore space of cupriferous rocks*. Environmental Earth Sciences, Vol. 77, 2018, 135.

i zglądach, wyznaczono porowatości otwartą, zamkniętą i całkowitą wszystkich próbek. Zmienność porowatości całkowitej próbek dolomitów mieściła się w przedziale 4,75-23,05%, a próbek anhydrytów w przedziale 3,87-16,60%. Na podstawie znajomości ilości uwolnionego gazu i wartości porowatości zamkniętej przebadanych próbek, oszacowano ciśnienie złożowe gazu zamkniętego w porach, które wyniosło maksymalnie 0,583 MPa.

Klasyczna teoria wyrzutu gazów i skał zakłada, że energia gazu zgromadzonego w porach skały musi być na tyle duża, aby mógł on wykonać pracę, zarówno w trakcie niszczenia skały, jaki i transportu rozdrobnionych mas wzdłuż wyrobiska¹⁵. Wysokie porowatości dolomitu (od 15,6% do 16,8%) oraz ciśnienie złożowe gazu na poziomie powyżej 5,3 MPa były jedną z głównych przyczyn wyrzutu dolomitu i skał, do jakiego doszło we wrześniu 2009 roku w kopalni rud miedzi "Rudna". W przypadku wszystkich przebadanych w ramach **pracy (3)**¹⁴ próbek, większość uzyskanych porowatości oraz wszystkie wartości ciśnienia złożowego gazu były znacznie niższe od tych, które określono w masach powyrzutowych pochodzących z kopalni „Rudna”. We wnioskach pracy stwierdzono, że porównując wyniki badań gazonośności przebadanych próbek, z wynikami uzyskanymi na próbkach mas powyrzutowych, rejony złoża rud miedzi, skąd pochodziły próbki do badań, są bezpieczne. Przedstawione wyniki badań gazonośności skał miedzionośnych, w zestawieniu z ich porowatościami, stanowią mój wkład naukowy w rozwój dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska, jako oryginalna metoda wspomagania oceny zagrożeń zjawiskami gazogeodynamicznymi w kopalniach rud miedzi.

Oznaczenie parametrów gazowych (gazonośność, ciśnienie i skład gazu w porach) skał jest warunkiem niezbędnym w ocenie stanu zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi w kopalniach podziemnych. Innymi parametrami, niezwykle istotnymi z punktu widzenia profilaktyki przeciwwyrzutowej, są właściwości strukturalno-teksturalne skał. Wiedza na temat charakterystyki skał miedzionośnych jest niezbędnym elementem w lokalizowaniu rejonów złoża o odmiennych właściwościach strukturalno-teksturalnych. Rejony te mogą być istotne w aspekcie oceny możliwości gromadzenia się gazów w tych skałach oraz w kontekście zagrożeń zjawiskami gazogeodynamicznymi. Właściwości strukturalno-teksturalne skał miedzionośnych uzależnione są od szeregu czynników, w tym między innymi od genezy osadów, ich składu elementarnego oraz szeroko pojętych cech petrograficznych. Z punktu widzenia możliwości lokalizowania obszarów wyrobiska o odmiennych właściwościach strukturalnych, potencjalnie zagrożonych zjawiskami gazogeodynamicznymi, identyfikacja struktury porowej dolomitu ma bardzo duże znaczenie. Zagadnienia związane z rozpoznaniem właściwości strukturalno-teksturalnych dolomitów pochodzących z LGOM, przy wykorzystaniu wielu metod pomiarowych, zostały szczegółowo omówione w **pracach (4)**¹⁶ i **(5)**¹⁷.

¹⁵ Skoczylas N.: *Laboratory study of the phenomenon of methane and coal outburst*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 55, 2012, 102-107.

¹⁶ Pajdak A., Godyń K., Kudasik M., Murzyn T.: *The use of selected research methods to describe the pore space of dolomite from copper ore mine, Poland*. Environmental Earth Sciences, Vol. 76, 2017, 389.

¹⁷ Pajdak A., Kudasik M.: *Structural and textural characteristic of selected copper-bearing rocks as one of the elements aiding in the assessment of gasogeodynamic hazard*. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 39(2), 2017, 51-59.

Badania przedstawione w **pracy (4)**¹⁶ przeprowadzone zostały na pięciu próbkach dolomitu, pochodzących z różnych rejonów O/ZG „Polkowice-Sieroszowice”. Wykorzystano kilka metod badawczych: mikroskopię optyczną w świetle przechodzącym i odbitym, mikrotomografię komputerową, porozymetrię gazową (LPNA) i rtęciową (MIP) oraz piknometrię helową i quazicieczową. Każda z metod badawczych uwzględniała inny zakres pomiarowy wielkości porów, co umożliwiło uzyskanie pełnego obrazu porowatej natury tych skał. Określono ich porowatość (otwartą, zamkniętą, całkowitą), powierzchnię właściwą, średni rozmiar i objętość porów oraz prześledzono charakter i rozkład porów w skali od kilku nm do kilku mm. Duża ilość zaprezentowanych w **pracy (4)**¹⁶ analiz uwarunkowana była szeroką zmiennością petrograficzną dolomitu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono:

- Analizy petrograficzne wykazały, że osady te poddane były zaawansowanym procesom diagenetycznym. Przemiany diagenetyczne osadów doprowadziły do przebudowy struktur skalnych, na skutek czego wykształciły się wtórne dolomity. Nastąpiła również znaczna przebudowa przestrzeni porowej tych osadów. Na skutek kompaktacji oraz krystalizacji wtórnych minerałów zmalała ich porowatość pierwotna. Procesy takie jak rozpuszczanie oraz rekrytalizacja (dolomityzacja) doprowadziły do powstania wtórnych porów o znacznych rozmiarach. Na skutek rekrytalizacji wytworzyła się porowatość międzyziarnowa, z porami otoczonymi przez ostrokrawędziste kryształy dolomitu.
- Kompleksowe badania porozymetryczne wykazały, że dolomity cechowały się zmiennością strukturalną. Posiadały one mezo- i makroporowatą budowę, o małym udziale mikroporów. Jak wynika z rozkładu objętości porów dolomitów, największy udział objętościowy miały pory o średnicy 0,1-10 μm .
- Analizy stereologiczne wykazały, że badane osady były porowate, a miejscami bardzo porowate. Ich porowatość całkowita była zróżnicowana i mieściła się w szerokim zakresie od 5% do 23%. We wszystkich próbkach dominowała porowatość typu otwartego. Zaobserwowano pory o wielkości w zakresie od 3 μm do 400 μm .
- Badania densymetryczne potwierdziły, że we wszystkich próbkach największy udział w porowatości całkowitej stanowiła porowatość otwarta, stanowiąca od 67% do 84%. Wartość porowatości otwartej przebadanych próbek wyniosła od 8,0% do 15,4%.

Na podstawie uzyskanych wyników badań, dwie z przebadanych próbek posiadały strukturę odmienną względem pozostałych, a rejonu złoża, z którego próbki te zostały pobrane, mogłyby zostać zaliczone do obszarów zagrożonych występowaniem zjawisk gazogeodynamicznych. Przedstawiony w pracy kompleksowy opis cech strukturalno-teksturalnych skał, w kontekście lokalizowania rejonów złoża o odmiennych właściwościach, stanowi oryginalną metodę rozpoznania zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi w kopalniach rud miedzi.

W **pracy (5)**¹⁷ przedstawione zostały badania dolomitów pochodzących z kopalń rud miedzi z LGOM, wykonane metodami porozymetrycznymi (MIP, LPNA), skaningową mikroskopią elektronową (SEM-EDS) i mikrotomografią komputerową (micro-CT). Badania

porozymetryczne umożliwiły poznanie struktury skał, z uwzględnieniem pełnego zakresu ich porowatości. Dzięki metodzie MIP scharakteryzowano porowatość skał w zakresie makroporów. Dzięki metodzie LPNA przeprowadzono analizę najdrobniejszych porów, a wykorzystany w obliczeniach model BJH umożliwił charakterystykę mezoporów, w których zachodzi zjawisko kondensacji kapilarnej. Analizy SEM-EDS pozwoliły na obserwację topografii powierzchni skał oraz określenie ich składu chemicznego, natomiast analizy micro-CT na ustalenie liczby i objętości występujących w niej porów otwartych i zamkniętych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dwie próbki dolomitów z kopalni „Rudna” miały bardziej rozbudowaną strukturę porowatą od pozostałych, pochodzących z kopalni „Polkowice-Sieroszowice”. Jak wykazały analizy MIP, próbki z O/ZG „Rudna” posiadały najwyższą porowatość i objętość całkowitą w zakresie makroporów. Szczególnie odmienione właściwości strukturalne posiadała jedna z próbek, której porowatość wyniosła ponad 15%, a objętość porów 0,06 cm³/g. Dolomit ten posiadał również pory o znacznie większych średnicach w porównaniu z pozostałymi skałami, natomiast cechował się słabo rozwiniętą porowatością w zakresie mikro- i mezoporów.

W pracy (5)¹⁷ dokonano również zestawienia uzyskanych wyników badań dolomitów, z wynikami analiz mas powyrzutowych, pochodzących z miejsca zdarzenia z 2009 roku, z kopalni rud miedzi „Rudna”. Dzięki temu zestawieniu możliwe było zaklasyfikowanie przebadanych próbek do grupy mniej lub bardziej zagrożonych zjawiskami gazogeodynamicznymi. Opierając się na przeprowadzonych analizach struktury porowej, rejonu, z których pochodziły trzy próbki pobrane z O/ZG „Polkowice-Sieroszowice”, zaklasyfikowano jako niezagrożone występowaniem zjawisk gazogeodynamicznych. Kolejne trzy dolomity pochodziły z obszarów zaklasyfikowanych jako średnio zagrożone, a jedna próbka dolomitu, pochodząca z O/ZG „Rudna”, posiadała wartości parametrów strukturalnych zbliżone do wartości występujących w próbkach odniesienia. Obszar, z którego próbka ta została pobrana uznano za potencjalnie zagrożony możliwością zaistnienia zjawisk gazogeodynamicznych. Zaproponowane w pracy, autorskie porównanie właściwości strukturalno-teksturalnych skał miedzionośnych z dolomitami pochodzącymi z rejonów zaistniałego w przeszłości wyrzutu, stanowić może pomocny element w zrozumieniu istoty zaistnienia zjawisk gazogeodynamicznych w dolomicie oraz może posłużyć do wspomagania oceny zagrożeń gazogeodynamicznych w kopalniach rud miedzi.

Podjęta w mojej pracy naukowej tematyka, związana z analizą zjawisk zachodzących w przestrzeni porowej skał miedzionośnych i wynikających z obecności w nich gazu, nadal stanowi zagadnienie, które kompleksowo nie zostało jeszcze rozpoznane. Aktualność i unikatowość tego zagadnienia wynika z faktu, że dotychczas w złożach rud miedzi gaz nie był obecny, a przestrzeń porowa dolomitów była słabo rozwinięta. Zbliżanie się z eksploatacją złóż rud miedzi w rejonie „Głogowa Głębokiego-Przemysłowego” do pobliskich złóż gazu ziemnego, eksploatowanych przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo (PGNiG), może istotnie wpłynąć na występowanie zjawisk gazogeodynamicznych w kopalniach rud miedzi. Konieczne jest zatem kontynuowanie badań nad istotą tego zjawiska, na czym zamierzam skupić część mojej aktywności naukowej w przyszłości.

Równolegle z analizami zjawisk zachodzących w przestrzeni porowej skał miedzionośnych, w swojej pracy naukowej, kontynuuję badania zachodzące w przestrzeni porowej węgla kamiennego. Prace te związane są między innymi z realizacją projektu badawczego w ramach programu OPUS¹⁸, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki, którego jestem wykonawcą.

4.3.3. Obecność gazu w przestrzeni porowej węgla kamiennego

Węgiel kamienny jest często badany pod kątem szeroko pojętych właściwości sorpcyjnych, głównie w aspekcie potencjalnych możliwości lokowania CO₂, przy jednoczesnym pozyskiwaniu CH₄¹⁹. Proces adsorpcji gazów w węglu jest złożony, ze względu na jego heterogeniczną budowę strukturalną. Węgiel zawiera w swojej strukturze cały zakres porowatości, od mikroporów o średnicach poniżej 2 nm, przez mezopory o średnicach 2-50 nm, po makropory o średnicach powyżej 50 nm²⁰. W zakresie mikroporów w węglu rozróżniane są również ultramikropory o średnicach poniżej 0,8 nm, a badania dowodzą, że ponad 90% jego porów ma średnicę poniżej 1 nm, stąd węgiel uznawany jest za materiał głównie ultramikroporowaty²¹.

Właściwości sorpcyjne i strukturalne węgla kamiennego, pomimo jego złożonej natury, są stosunkowo dobrze rozpoznane. Literatura szeroko opisuje zmienność parametrów sorpcyjnych węgla względem podstawowych sorbatów gazowych²². Rozpoznany jest wpływ temperatury, wilgoci oraz innych parametrów na zjawiska sorpcji i transportu gazów, zachodzące w przestrzeni porowej węgla. Od wielu lat rozwija się także obszar badań związanych z sorpcją konkurencyjną CO₂/CH₄, jako potencjalną możliwością podziemnego składowania CO₂, z jednoczesnym pozyskiwaniem CH₄, w pozabilansowych pokładach węgla.

Obszar niezmiernie istotny dla wielu badaczy, lecz znacznie mniej rozpoznany, dotyczy wpływu obciążenia okólnego węgla na zjawiska zachodzące w jego przestrzeni porowej. Znane są badania dotyczące redukcji wartości parametrów opisujących procesy sorpcji i transportu gazów w próbce obciążonej²³. Rozpoznane są także zagadnienia związane z pęcznieniem węgla w trakcie procesów sorpcyjnych, co z kolei wywołuje obniżenie przepuszczalności węgla względem gazów²⁴. Przepuszczalność jest kluczowym parametrem, stosownym do opisu węgla w procesach szczelinowania i pozyskiwania metanu z pokładów węgla (CBM). Pomiar laboratoryjne wykazały, że przepuszczalność węgla zmniejsza się wraz ze wzrostem

¹⁸ Projekt OPUS: *Sorpcja wymienna CO₂/CH₄ na materiale węglowym w stanie obciążenia okólnego*. Nr projektu: 2016/23/B/ST8/00744. Kierownik Projektu: dr hab. inż. Norbert Skoczyła, prof. IMG PAN, 2017-2020.

¹⁹ Dutka B., Kudasik M., Pokryszka Z., Skoczyła N., Topolnicki J., Wierzbicki M.: *Balance of CO₂/CH₄ exchange sorption in a coal briquette*. Fuel Processing Technology, Vol. 106, 2013, 95-101.

²⁰ IUPAC: *Physical chemistry division commission on colloid and surface chemistry subcommittee on characterization of porous solids. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)*. Pure and Applied Chemistry, Vol. 66(8), 1994, 1739-1758.

²¹ Ettinger J.L.: *Solubility of Methane Contained in Coal Deposits*. Archives of Mining Sciences, 1990, Vol. 33, 35-44.

²² Chattaraj S., Mohanty D., Kumar T., Halder G.: *Thermodynamics, kinetics and modeling of sorption behaviour of coalbed methane—A review*. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, Vol. 16, 2016, 14-33.

²³ Pone J.D.N., Halleck P.M., Mathews J.P.: *Sorption capacity and sorption kinetic measurements of CO₂ and CH₄ in confined and unconfined bituminous coal*. Energy Fuel, Vol. 23, 2009, 4688-4695.

²⁴ Larsen J.W.: *The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties*. International Journal of Coal Geology, Vol. 57, 2004, 63-70.

efektywnego naprężenia²⁵. Pod wpływem naprężenia efektywnego kanały przepływu w porach i szczelinach węgla stają się węższe, a nawet mogą zostać całkowicie zamknięte, co w konsekwencji znacznie obniża jego przepuszczalność²⁶.

Większość badań przepuszczalności węgla w warunkach obciążenia skupia się na redukcji wartości parametrów opisujących przepuszczalność, w wyniku wywierania naprężenia efektywnego na próbkę. Jednak niezwykle istotne jest rozdzielenie wpływu obciążenia na zmianę porowatości węgla, od wpływu obciążenia na zmianę jego przepuszczalności. Obciążenie próbki wywołuje zmianę jej porowatości. Jeżeli obniżenie przepuszczalności węgla, jako rezultat redukcji jego porowatości, jest równe obniżeniu przepuszczalności na skutek wywierania obciążenia na próbkę, oznacza to, że bezpośredni wpływ na zmianę przepuszczalności próbki ma zmiana jej porowatości. Obciążenie miałoby w tym przypadku jedynie pośredni wpływ na zmianę przepuszczalności węgla. Próbę odpowiedzi na pytanie, czy spadek przepuszczalności węgla jest bezpośrednim efektem obniżenia jego porowatości, a obciążenie wywołuje jedynie zmianę porowatości, podjąłem w **pracy (6)**²⁷.

Badania przepuszczalności brykietów węglowych, o różnych porowatościach w warunkach obciążenia, przeprowadzone zostały na autorskim stanowisku pomiarowym²⁸. Próbki węgla przeznaczone do badań stanowiły brykiety przygotowane z materiału węglowego, pochodzącego z kopalni węgla kamiennego „Zofiówka”. Do opisu przepuszczalności węgla posłużyłem się równaniem Darcy’ego, z uwzględnieniem poprawki tzw. efektu poślizgu Klinkenberga, charakterystycznej dla ośrodków porowatych o niskiej przepuszczalności.

Na podstawie uzyskanych rezultatów badań przepuszczalności brykietów węglowych względem azotu i metanu, stwierdziłem, że:

- Wartości współczynników przepuszczalności Klinkenberga maleją wraz ze wzrostem obciążenia i odpowiadającej jej redukcji porowatości.
- Przepuszczalność zbadanego węgla, względem azotu, była o około rząd wielkości większa, niż względem metanu.
- Wartości parametru b , opisującego efekt poślizgu Klinkenberga, były podobne względem azotu i metanu, w przebadanym zakresie porowatości brykietów węglowych.
- Wraz ze wzrostem porowatości brykietów, efekt poślizgu Klinkenberga zanikał w przypadku azotu oraz nieznacznie malał w przypadku metanu.

²⁵ Chen Z., Pan Z., Liu J., Connell L.D., Elsworth D.: *Effect of the effective stress coefficient and sorption-induced strain on the evolution of coal permeability: Experimental observations*. International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 5, 2011, 1284-1293.

²⁶ Huy P.Q., Sasaki K., Sugai Y., Ichikawa S.: *Carbon dioxide gas permeability of coal core samples and estimation of fracture aperture width*. International Journal of Coal Geology. Vol. 83(1), 2010, 1-10.

²⁷ Kudasik M.: *Investigating permeability of coal samples of various porosities under stress conditions*. Energies, Vol. 12(4), 2019, 762, 2019.

²⁸ Topolnicki J., Kudasik M.: *Aparatura pomiarowa do badań filtracji gazów przez brykiety węglowe w warunkach trójosiowego obciążenia*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 10(1-4), 2008, 55-61.

- Obciążenie wywierane na próbki węglowe wywoływało głównie zmianę ich porowatości, która była głównym czynnikiem mającym wpływ na charakter procesu przepuszczalności, opisanego równaniem Klinkenberga.

Wyniki przeprowadzonych badań dowiodły, że obciążenie wywołuje głównie zmianę porowatości węgla, co z kolei redukuje jego przepuszczalność, a przepuszczalność węgla względem gazów, zależy głównie od jego porowatości. Badania przedstawione w **pracy (6)**²⁷ stanowią zupełnie odmienny pogląd w teorii dotyczącej przepuszczalności węgla. Dotychczas, w większości prac autorzy twierdzili, że naprężenie efektywne wywierane na próbkę ma bezpośredni wpływ na redukcję jej przepuszczalności. Moje badania dowiodły, że naprężenie efektywne wywołuje redukcję porowatości węgla, co z kolei wpływa bezpośrednio na obniżenie jej przepuszczalności.

Problemy związane z występowaniem gazu w skale najczęściej kojarzone są z metanem zawartym w pokładach węgla kamiennego. Zagrożenia gazogeodynamiczne, w tym wyrzutowe, związane ze współwystępowaniem kopaliny stałej i gazowej dotyczą najczęściej układu węgiel-metan. W trakcie wyrzutu gaz zgromadzony w strukturze porowej skały wykonuje pracę rozdrabniając ją i transportując w głąb wyrobiska²⁹. Na potrzeby górnictwa węglowego opracowane zostały metody badawcze, pozwalające ocenić metanonośność pokładu³⁰. Metody te są czasochłonne, a wyniki końcowe otrzymuje się na podstawie badań laboratoryjnych.

W **pracy (7)**³¹ przedstawiona została autorska, prosta metoda pomiaru podstawowych parametrów układu węgiel-metan, umożliwiająca uzyskanie wyników bezpośrednio w warunkach kopalnianych. Metoda ta opiera się na pomiarze desorbowalnej zawartości metanu na autorskim urządzeniu AMER. Pomiar, podobnie jak w przypadku metody desorbometrycznej, wykonywany jest w warunkach dołowych i opiera się na rejestracji emisji metanu z ziarnistej próbki węgla. Wstępne wyniki można uzyskać już po kilkadziesiąt minutach, na podstawie aproksymacji uniporowego modelu emisji gazu z próbki³². Zastosowanie rozwiązania uniporowego równania dyfuzji pozwala, na podstawie wyników pomiaru, na szybkie wyznaczenie podstawowych parametrów układu węgiel-metan, takich jak: desorbowalna zawartość metanu, metanonośność oraz efektywny współczynnik dyfuzji. Kopalniane testy urządzenia AMER wykazały dużą zgodność uzyskanych rezultatów z wynikami pomiarów wykonanych w laboratorium metodą tradycyjną, zgodną z Polską Normą³³.

Opracowana metoda prostej i szybkiej oceny podstawowych parametrów opisujących układ węgiel-metan, została wdrożona do testów w kopalni węgla kamiennego „Pniówek”.

²⁹ Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N.: *Rock and gas outbursts-laboratory tests and in-shaft measurements*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49(1), 2004, 99-116.

³⁰ Szlązak N., Korzec M.: *Method for determining the coalbed methane content with determination the uncertainty of measurements*. Archives of Mining Sciences, Vol. 61(2), 2016, 443-456.

³¹ Skoczylas N., Wierzbicki M., Kudasik M.: *A simple method for measuring basic parameters of the coal-methane system under mining conditions*. Journal of Mining Science, Vol. 54(3), 2018, 186-197.

³² Crank J.: *Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, London, 1956.

³³ PN-G-44200:2013-10: *Górnictwo - Oznaczanie metanonośności w pokładach węgla kamiennego - Metoda zwiercinowa*. Polski Komitet Normalizacyjny, 2013.

Ponadto, jej unikatowość, została zastrzeżona wnioskiem patentowym³⁴ w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej. Urządzenie zostało nagrodzone złotym medalem na międzynarodowych targach wynalazczości i innowacyjności w Macao (Chiny) w 2015 roku³⁵.

Oprócz prac badawczo-rozwojowych związanych z rozpoznaniem układu węgiel-metan, w ostatnich latach skupiłem się również na modelowaniu zjawisk zachodzących w przestrzeni porowej węgla, czego efektem były **prace (8)**³⁶ i **(9)**³⁷.

Procesy akumulacji sorbatu w obrębie ziarn sorbentu stanowią następujące po sobie zjawiska: filtracji, dyfuzji oraz sorpcji właściwej. Procesy filtracji, w obrębie ziarnistej próbki węglowej, oraz sorpcji właściwej, zachodzą niemal natychmiastowo³. Najbardziej czasochłonnym procesem jest dyfuzja, zachodząca w przestrzeni mikro- i ultramikroporów węgla. Najczęściej stosowanym modelem do opisu procesu dyfuzji jest uniporowy model Cranka³², oparty na drugim prawie Ficka. Model ten zawiera wiele założeń, a jednym z nich jest uproszczenie kształtu ziarna do kuli, w której zachodzi proces dyfuzji. W **pracy (8)**³⁶ przedstawiono wyniki kalkulacji procesów dyfuzji zachodzących w ziarnach o różniących się kształtach: prostopadłościennym oraz kulistym. Wyniki kalkulacji zestawiono z wynikami pomiaru kinetyki sorpcji metanu w ziarnistej próbce węgla. Do zarejestrowanego pomiaru, dopasowano funkcję analityczną przebiegu kinetyki sorpcji w ziarnach o przybliżonym kształcie kul oraz rozwiązanie numeryczne kinetyki sorpcji zachodzącej w ziarnach o przybliżonym kształcie prostopadłościanów. Zestawienie to miało na celu ocenę precyzji wyznaczania współczynników dyfuzji za pomocą uniporowego modelu Cranka, przy założeniu kulistości ziarn sorbentu. Otrzymane współczynniki dyfuzji dla obu kształtów ziarn różniły się o około 30%. Ponadto przeprowadzono analizę stereologiczną przebadanych ziarn sorbentu węglowego. Wykazała ona, że rzeczywistą stereometrię ziarn lepiej odwzorowuje kształt prostopadłościenny. W podsumowaniu pracy stwierdzono jednak, że uzyskane rozbieżności wyznaczania efektywnych współczynników dyfuzji, na podstawie modelu opartego na ziarnie kulistym i prostopadłościennym węgla, są stosunkowo niewielkie, w zestawieniu z naturalną zmiennością wartości tego parametru dla węgla kamiennych, która sięga trzech rzędów wielkości.

Uniporowy model Cranka został również wykorzystany do stworzenia modelu opisującego emisję metanu z urobku, w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego w kopalni węgla kamiennego. Model ten został przedstawiony w **pracy (9)**³⁷. Zbudowany model numeryczny emisji metanu z urobku, w trakcie eksploatacji wyrobiska ścianowego, umożliwia zmianę wielu parametrów wejściowych, takich jak: kierunek ruchu kombajnu względem przenośnika, zabiór i prędkość kombajnu, prędkość przenośnika, miąższość pokładu, długość

³⁴ Numer zgłoszenia 409736: Skoczylas N., **Kudasik M.**, Wierzbicki M., Murzyn T.: *Sposób pomiaru przebiegu emisji gazu w wyniku desorpcji z próbki materiału węglowego oraz analogowy analizator zawartości gazu desorbowanego i kinetyki emisji gazu z węgla*. Data zgłoszenia: 09.10.2014.

³⁵ Golden Medal for the invention: *Analogue Methane Emission Recorder AMER*. Miejsce wyróżnienia: Macau International Innovation & Invention Expo 2015.

³⁶ Skoczylas N., Kudasik M., Topolnicki J., Oleszko K., Młynarczuk M.: *Model studies on saturation of a coal sorbent with gas taking into account the geometry of spatial grains*. *Przemysł Chemiczny*, Vol. 92(2), 2018, 272-276.

³⁷ Wierzbicki M., Skoczylas N., Kudasik M.: *The use of a unipore diffusion model to describe the kinetics of methane release from coal spoil in the longwall environment*. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 39(2), 2017, 81-89.

ściany, metanonośność, pojemność sorpcyjna, efektywny współczynnik dyfuzji oraz rozkład ziarnowy urobku. Na podstawie tych parametrów, model numeryczny, zaimplementowany w zaprojektowanym do tego celu oprogramowaniu, wyznacza objętość metanu uwalnianego z urobku w środowisku ściany, w funkcji czasu.

Na zbudowanym modelu przeprowadzone zostały przykładowe symulacje, mające na celu określenie czasoprzestrzennych dopływów metanu do ściany. Na podstawie krzywej składu ziarnowego urobku, przeanalizowany został udział emisji metanu z poszczególnych klas ziarnowych, z uwzględnieniem zarówno kinetyki emisji, jak i masowego udziału poszczególnych klas. Wyniki symulacji wykazały między innymi, że dominujący udział w objętości wydzielonego metanu przypadł na najniższe klasy ziarnowe, w szczególności poniżej 0,1 mm, mimo, że ich udział masowy w całości urobku nie przekraczał 5%.

Podjęta przeze mnie tematyka badań naukowych nad zjawiskami zachodzącymi w przestrzeni porowej skał, a także opracowywane metody pomiarowe i narzędzia badawcze, znajdują zastosowanie do rozpoznawania analizowanych zagadnień w dyscyplinie górnictwo i geologia inżynierska. W ostatnich latach prowadzone przeze mnie badania staram się wesprzeć modelowaniem numerycznym. W celu poszerzenia wiedzy na temat zastosowania numerycznych metod modelowania CFD do opisu zjawisk zachodzących w ośrodkach porowatych, odbyłem miesięczny staż naukowy w styczniu 2019 roku, w Instytucie Techniki i Systemów Bezpieczeństwa na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego im. Jana Długosza w Częstochowie. Wiedza zdobyta podczas odbytego stażu, w połączeniu z wieloletnim doświadczeniem w analizie zjawisk zachodzących w przestrzeni porowej skał, posłużą mi do dalszych badań nad kompleksowym rozpoznaniem i opisem układu skała-gaz.

4.3.4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Po ukończeniu studiów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej w 2005 roku, rozpocząłem pracę w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk. Po dwóch latach zdobywania doświadczeń na stanowisku inżynierjno-technicznym, rozpocząłem pracę naukową. Od początku mojej aktywności naukowej brałem czynny udział w budowie unikatowych urządzeń, a także w opracowywaniu nowych metod i narzędzi pomiarowych do badania zjawisk towarzyszących obecności gazu w przestrzeni porowej skał.

Jednymi z pierwszych, opracowanych przeze mnie wraz z zespołem, unikatowych urządzeń były: kapilarny przepływomierz masowy gazu³⁸ oraz manostat – precyzyjny regulator ciśnienia gazu³⁹. Urządzenia te zostały nagrodzone medalami na międzynarodowych targach innowacyjności oraz Dyplomami Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

³⁸ Topolnicki J., **Kudasik M.**, Skoczylas N., Sobczyk J.: *Low cost capillary flow meter*. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 152(2), 2009, 146-150.

³⁹ **Kudasik M.**, Skoczylas N., Sobczyk J., Topolnicki J.: *Manostat – an accurate gas pressure regulator*. Measurement Science and Technology, Vol. 21(8), 2010, 085402.

W latach 2009-2011 brałem czynny udział, w ramach współpracy międzynarodowej z Institut National de l'Environnement Industriel et des risques (INERIS) z Francji, w badaniach dotyczących sorpcji wymiennej CO₂/CH₄ na węglu kamiennym, w kontekście możliwości podziemnego składowania CO₂, przy jednoczesnym pozyskiwaniu CH₄, jako gazu energetycznego. Wraz z zespołem przeprowadziliśmy unikatowe badania, które pozwoliły na opisanie zjawiska sorpcji wymiennej zachodzącej w węglu, z uwzględnieniem czynników czasu i przestrzeni. Materiał węglowy został wstępnie nasycony CH₄ do stanu uzyskania równowagi sorpcyjnej, a następnie zatłaczano CO₂, w celu wyparcia CH₄. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów zaobserwowano między innymi zjawisko przemieszczającej się w węglu, wyraźnie rozgraniczonej strefy wymiany sorpcyjnej⁴⁰. Ponadto dokonano szczegółowego bilansowania wymiany sorpcyjnej CO₂/CH₄, która wykazała, że efektywność wymiany wyniosła od 82% do 98% i była wyższa przy niższych ciśnieniach zatłaczania CO₂⁴¹. Zwieńczeniem prac związanych z sorpcją wymienną CO₂/CH₄, było opracowanie modelu numerycznego opisującego procesy zachodzące w węglu w trakcie wymiany sorpcyjnej⁴².

W czerwcu 2015 roku obroniłem, z wyróżnieniem, pracę doktorską pt. „Porównanie wartości wybranych parametrów opisujących procesy sorpcji i transportu gazów w próbkach węgla kamiennego przy zastosowaniu różnych metod pomiarowych”. W pracy tej dokonałem szczegółowego porównania wyników badań sorpcyjnych wykonanych na 15 ziarnistych próbkach węgla, uzyskanych za pomocą dwóch autorskich, wolumetrycznych urządzeń sorpcyjnych: sorpcjomatu manometrycznego⁴³ i sorpcjomatu tłokowego⁴⁴. Wyniki uzyskane na tych urządzeniach zestawilem z rezultatami otrzymanymi na grawimetrycznym urządzeniu referencyjnym. Wyniki porównawczych pomiarów sorpcyjnych, uzyskanych na trzech urządzeniach badawczych, wykazały zgodność wartości pojemności sorpcyjnych i parametrów izoterm sorpcji Langmuira. Wymierną korzyścią z pracy było powstanie dwóch nowych urządzeń do laboratoryjnych badań sorpcyjnych, które są używane w Instytucie Mechaniki Górnotworu PAN.

Narastająca potrzeba na dostarczenie nowych technologii do zwalczania nierozpoznanych dotychczas zagrożeń zjawiskami gazogeodynamicznymi w kopalniach rud miedzi oraz chęć rozszerzenia moich zainteresowań badawczych o zagadnienia związane z górnictwem rud miedzi, skłoniły mnie do podjęcia nowych wyzwań naukowych. Bazując na wieloletnim doświadczeniu w opracowywaniu nowych rozwiązań i technologii dla potrzeb górnictwa węglowego, część mojej aktywności naukowej skupilem na rozpoznaniu zjawisk

⁴⁰ Dutka B., **Kudasik M.**, Topolnicki J.: *Pore pressure changes accompanying exchange sorption of CO₂/CH₄ in a coal briquette*. Fuel Processing Technology, Vol. 100, 2012, 30-34.

⁴¹ Dutka B., **Kudasik M.**, Pokryszka Z., Skoczylas N., Topolnicki J., Wierzbicki M.: *Balance of CO₂/CH₄ exchange sorption in a coal briquette*. Fuel Processing Technology, Vol. 106, 2013, 95-101.

⁴² Topolnicki J., **Kudasik M.**, Dutka B.: *Simplified model of the CO₂/CH₄ exchange sorption process*. Fuel Processing Technology, Vol. 113, 2013, 67-74.

⁴³ **Kudasik M.**: *The manometric sorptomat – an innovative volumetric instrument for sorption measurements performed under isobaric conditions*. Measurement Science and Technology, Vol. 27(3), 2016, 035903.

⁴⁴ **Kudasik M.**: *Results of comparative sorption studies of the coal-methane system carried out by means of an original volumetric device and a reference gravimetric instrument*. Adsorption - Journal of the International Adsorption Society, Vol. 23(4), 2017, 613-626.

związanych z obecnością gazu w przestrzeni porowej skał miedzionośnych oraz wdrażaniu nowych technologii w górnictwie rud miedzi. Owoce tych prac było uzyskanie przeze mnie projektu badawczego LIDER, pt. „Nowatorski system wspomaganie oceny zagrożeń gazowych w kopalniach rud miedzi”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, dedykowanego dla młodych pracowników naukowych. Końcowe rezultaty kierowanego przeze mnie projektu zostały wyróżnione Polską Nagrodą Inteligentnego Rozwoju 2018⁴⁵ pod patronatem Prezes Urzędu Patentowego RP.

W listopadzie 2018 roku otrzymałem prestiżową Nagrodę Naukową im. Witolda Budryka Wydziału IV Nauk Technicznych PAN⁴⁶, za cykl publikacji na temat badań zjawisk zachodzących w przestrzeni porowej skał, a także za opracowanie nowych metod i narzędzi pomiarowych służących badaniom tych zjawisk.

4.3.5. Podsumowanie

Prace naukowe, które podejmowałem w Instytucie Mechaniki Górniczej PAN, spotykały się z pozytywnym odbiorem zarówno w kraju, jak i za granicą. Trzykrotnie otrzymywałem I nagrodę Dyrektora Instytutu Mechaniki Górniczej PAN za prace statutowe. Wiele z opracowanych przeze mnie, wraz z zespołem, technologii, zostało opatentowanych (5 Patentów i 4 Wnioski) oraz nagrodzonych w kraju i za granicą, między innymi Dyplomami Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (2 dyplomy), Medalami (1 złoty i 3 srebrne) i Wyróżnieniem (1 wyróżnienie) na Międzynarodowych Targach Wynalazczości. Ponadto za część cyklu publikacji, które wchodzi w skład mojego osiągnięcia naukowego, otrzymałem indywidualną, prestiżową Nagrodę Naukową im. Witolda Budryka Wydziału IV Nauk Technicznych PAN⁴⁶.

Jestem autorem lub współautorem 50 prac naukowych, w tym 16 z listy Journal Citation Reports (JCR). Sumaryczny Impact Factor (IF) moich prac wynosi 28,250, sumaryczna liczba osiągniętych punktów MNiSW – 589, natomiast index Hirsha (h-index) – 6, według bazy Web of Science.

Pełne zestawienie moich osiągnięć naukowych znajduje się w załączniku nr 4.



⁴⁵ Polska Nagroda Inteligentnego Rozwoju 2018 pod patronatem Prezes Urzędu Patentowego RP za Projekt pt.: *Nowatorski system wspomaganie oceny zagrożeń gazowych w kopalniach rud miedzi*, w kategorii: Innowacyjne rozwiązania przyszłości w instytutach Polskiej Akademii Nauk.

⁴⁶ Nagroda Naukowa im. Witolda Budryka Wydziału IV Nauk Technicznych PAN za cykl prac pt.: *Gaz w przestrzeni porowej skał – nowe narzędzia i metody badawcze*.