

# Stopień rozdrabniania skał w zależności od czasu mielenia udarowego

MATEUSZ KUDASIK, NORBERT SKOCZYLAS

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Oznaczenie ilości gazu znajdującego się w przestrzeni porów skał może zostać zrealizowane poprzez rozdrobienie badanego materiału do jak najmniejszej klasy ziarnowej. W Pracowni Mikromerytyki IMG PAN zbudowano urządzenie do rozdrabniania skał. Rozdrabnianie skał za pomocą zbudowanego urządzenia realizowane jest poprzez mielenie udarowe. Do badań wpływu czasu mielenia skał na efektywność ich rozdrabniania użyto fragmentów rdzeni dolomitu i anhydrytu pochodzące z O/ZG „Rudna”. Próbkę skał o wielkości 10-30 mm i masie około 50 gram ulegały rozdrobieniu w różnych okresach czasów wynoszących odpowiednio 10, 20, 60 i 180 sekund. Ocena stopnia rozdrabniania skał wykonana została metodą sitową. Uzyskane rezultaty wykazały, że wydłużając czas mielenia stopień rozdrobnienia rośnie asymptotycznie. Określono optymalne czasy rozdrabniania skał dolomitu i anhydrytu za pomocą zbudowanego urządzenia. Po przekroczeniu tych czasów dalsze mielenie nie zwiększa stopnia rozdrobnienia.

**Słowa kluczowe:** rozdrabnianie skał, mielenie udarowe, granulometria, dolomit, anhydryt

## 1. Wstęp

Zjawiska gazo-dynamiczne do niedawna kojarzone były głównie z kopalniami węgla kamiennego. W ostatnich latach zagrożenia gazowe występują również w polskim górnictwie rud miedzi [Butra i Kijewski, 2013; Wyższy Urząd Górniczy, 2014]. W nowoeksploatowanych złożach rud miedzi obecny jest gaz zamknięty w porach skał miedzionośnych. We wrześniu 2009 r. w chodniku T-169a na poziomie 1200 m w kopalni miedzi „Rudna” miał miejsce pierwszy wyrzut gazów i skał w dolomicie [Mirek i in., 2010; Mirek i in., 2011]. Zdarzenie to zainicjowało cykl badań dotyczących rozpoznania przyczyn zjawiska, jego przebiegu oraz ewentualnych metod oceny stanu zagrożenia wyrzutami. W przypadku braku sorpcji, bezpośrednie przeniesienie metod badania układu skała-gaz z górnictwa węglowego jest niemożliwe. W skałach miedzionośnych gaz zakumulowany jest w strukturze porowej skały jako gaz wolny (nie związany sorpcyjnie). Zbilansowanie ilości i składu gazu w skale wymaga dotarcia do przestrzeni porowej, poprzez jej rozdrobnienie. Autorzy prezentują zbudowane w Pracowni Mikromerytyki IMG PAN urządzenie do bilansowania ilości i składu gazu w strukturze porowej dolomitu, którego głównym elementem jest wysokoobrotowy młyn udarowy.

W trakcie rozdrabniania skały istotnym parametrem jest dobór czasu mielenia, aby jednocześnie zapewnić zbliżone do maksymalnego rozdrobnienie oraz minimalizować energetykę procesu, co z kolei przekłada się na niższą temperaturę pracy urządzenia oraz jego dłuższą żywotność. W prezentowanej pracy podjęto próbę zbadania wpływu czasu mielenia zbudowanym urządzeniem na stopień rozdrobnienia skał dolomitu i anhydrytu, a także oszacowano optymalny czas rozdrabniania.

## 2. Urządzenie do rozdrabniania skał

W Pracowni Mikromerytyki IMG PAN zbudowano prototyp urządzenia do rozdrabniania skał w kontekście oceny ilości i składu zawartego w nich gazu (Rys. 1). Zbudowane urządzenie pracuje w oparciu o

proces mielenia udarowego. Próbkę skały, umieszczona w hermetycznym zbiorniku, ulega rozdrobieniu za pomocą noży tnących napędzanych wysokoobrotowym, bezszczotkowym silnikiem elektrycznym. Elementem rozdrabniającym materiał skalny są noże tnące, wykonane ze stali narzędziowej NC11LV. Zastosowany silnik bezszczotkowy Toro X8 KV2650 o mocy 2.2 kW napędza noże tnące do maksymalnej prędkości obrotowej dochodzącej do 21 000 obr/min. Objętość hermetycznego zbiornika w którym mielona jest próbka wynosi 200 cm<sup>3</sup>.



Rys. 1. Projekt 3D (widok półprzezroczysty) oraz zdjęcia urządzenia do rozdrabniania skał

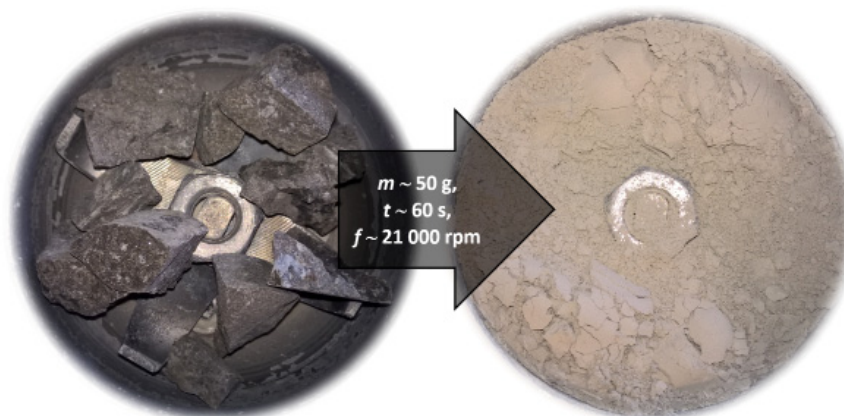
Wstępne testy zbudowanego urządzenia do rozdrabniania skał wykazały między innymi, że rozdrabnianie skał metodą mielenia udarowego wykazało wyższą efektywność w stosunku do rozdrabniania metodą skrawania i ścierania [Kudasik i in., 2014]. Ponadto przeprowadzone testy wykazały, iż zbudowana aparatura jest w stanie skutecznie rozdrobnić materiał skalny o bardzo wysokiej zwięzłości i wytrzymałości na rozciąganie. Rozdrabnianie próbek skał miedzionośnych (dolomit, anhydryt i piaskowiec), zaliczanych do skał „mocnych” o osiowej wytrzymałości na rozciąganie rzędu 50-350 MPa [Schön, 2011], pozwoliło uzyskać materiał o ziarnistości pojedynczych  $\mu\text{m}$ . Istotną zaletą urządzenia jest jego mobilność, która umożliwia hermetyczne zamknięcie próbki skały w zbiorniku rozdrabniającym w warunkach *in situ*, bezpośrednio po pobraniu próbki z górotworu. Dzięki temu bilansowaniu podlegać może zarówno gaz uwolniony z porów otwartych jak i z porów zamkniętych.

W przeprowadzonych badaniach zbudowane urządzenie wykorzystane zostało do rozdrabniania próbek skał dolomitów i anhydrytów.

### 3. Materiał badawczy i procedura pomiarowa

Do badań wpływu czasu mielenia udarowego skał na stopień ich rozdrabniania użyto fragmenty rdzeni dolomitu i anhydrytu pochodzące z O/ZG „Rudna”. Próbki te zostały wstępnie pokruszone do ziarnistości 10-30 mm, a następnie podzielone na cztery równe porcje anhydrytu i dolomitu o masach około 50 gram. Tak przygotowana porcja, stanowiąca pojedynczą próbkę, poddawana była procesowi mielenia w urządzeniu rozdrabniającym. Mielenie poszczególnych próbek odbywało się w różnych okresach czasów wynoszących odpowiednio 10, 20, 60 i 180 sekund. Ocena stopnia rozdrobnienia za pomocą autorskiego urządzenia, w zależności od czasu mielenia udarowego, dokonana została metodą analizy sitowej.

Przykładowe zdjęcie próbki dolomitu przed i po procesie rozdrabniania udarowego w urządzeniu badawczym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zdjęcia przykładowej próbki przed i po procesie rozdrabniania

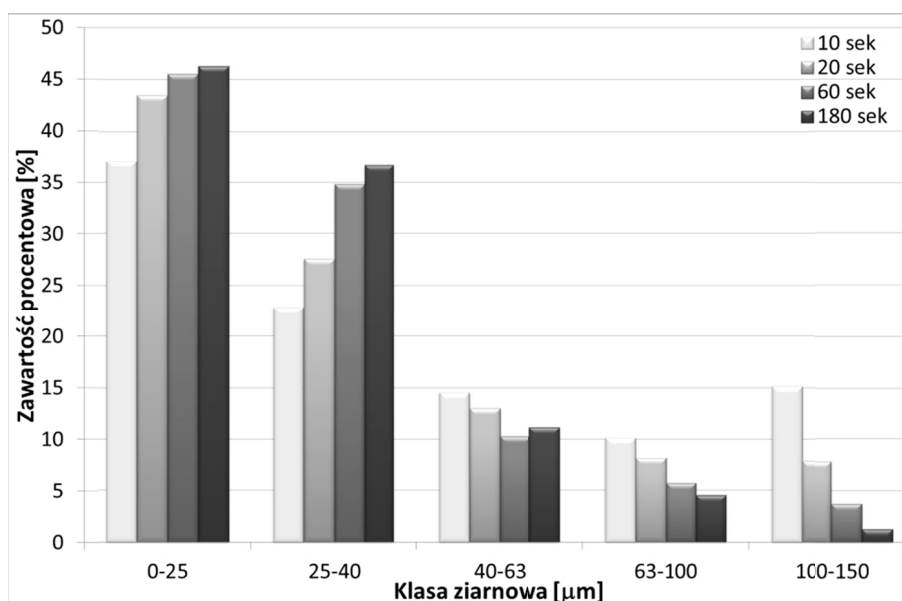
## 4. Wyniki

### 4.1. Stopień rozdrobnienia skał dolomitu w zależności od czasu mielenia

W tabeli 1 oraz na rysunku 3 przedstawiono wyniki rozkładu ziarnowego próbek dolomitu w zależności od czasu mielenia udarowego. Uzyskane wyniki analizy granulometrycznej dolomitu dowodzą, że stopniowe wydłużanie czasu mielenia udarowego zwiększa udziały niższych klas ziarnowych kosztem wyższych klas ziarnowych. Jak można zauważyć (Tab. 1) w wyniku rozdrabniania w czasie 60 i 180 sekund ponad 80% rozdrobnionych ziarn stanowił materiał o wielkości poniżej 40  $\mu\text{m}$ , a udział klasy ziarnowej powyżej 100  $\mu\text{m}$  niemal zanika.

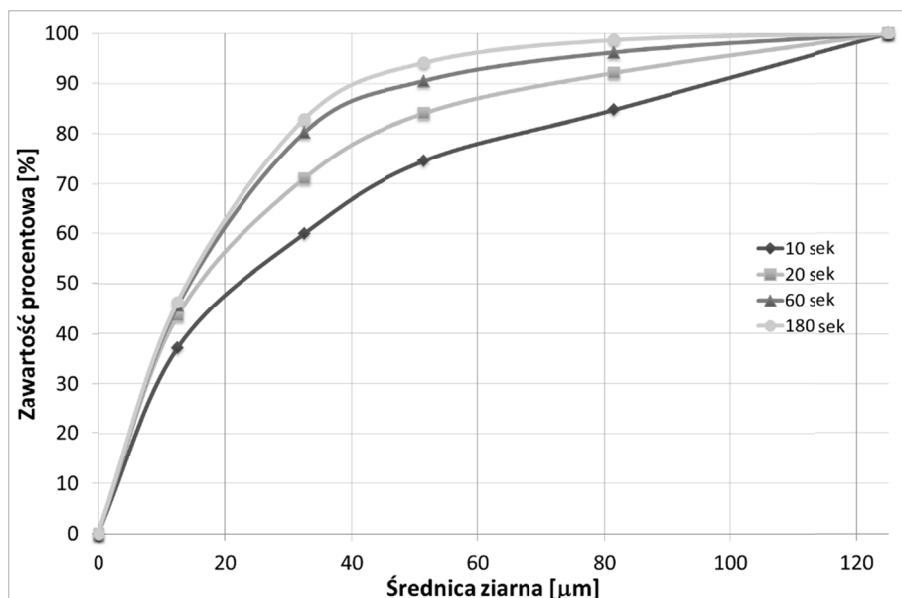
Tab. 1. Rozkład ziarnowy próbek dolomitu w zależności od czasu mielenia udarowego

Klasa ziarnowa [ $\mu\text{m}$ ]	Udział procentowy klasy ziarnowej [%]			
	Czas mielenia 10 sek.	Czas mielenia 20 sek.	Czas mielenia 60 sek.	Czas mielenia 180 sek.
0-25	37,1	43,5	45,5	46,3
25-40	22,9	27,6	34,8	36,7
40-63	14,6	13	10,3	11,2
63-100	10,2	8,1	5,7	4,5
100-150	15,2	7,8	3,7	1,3



Rys. 3. Udział poszczególnych klas ziarnowych rozdrobnionych próbek dolomitu w zależności od różnych czasów mielenia

Na podstawie wyników udziału poszczególnych klas ziarnowych wygenerowano sumaryczny rozkład granulometryczny próbek dolomitu w zależności od różnych czasów mielenia udarowego (Rys. 4). Krzywe rozkładu ziarnowego uzyskane przy mieleniu w okresie 60 i 180 sekund mają zbliżony charakter. Trzykrotne wydłużenie czasu rozdrabniania (z 60 do 180 sekund) już tylko nieznacznie zwiększyło stopień rozdrobnienia.



Rys. 4. Sumaryczny rozkład granulometryczny próbek dolomitu w zależności od różnych czasów mielenia udarowego

#### 4.2. Stopień rozdrobnienia skał anhydrytu

W tabeli 2 oraz na rysunku 5 przedstawiono wyniki rozkładu ziarnowego próbek anhydrytu w zależności od czasu mielenia udarowego. Podobnie jak w przypadku rozdrabniania próbek dolomitu, stopniowe wydłużanie czasu mielenia udarowego zwiększa stopień rozdrobnienia. W wyniku rozdrabniania w czasie 60 i 180 sekund ponad 70% rozdrobnionych ziarn stanowił materiał o wielkości poniżej 40 µm. Zatem rozdrabnianie skał anhydrytu za pomocą autorskiego urządzenia dało nieco gorsze, jednak porównywalne rezultaty jak w przypadku skał dolomitu.

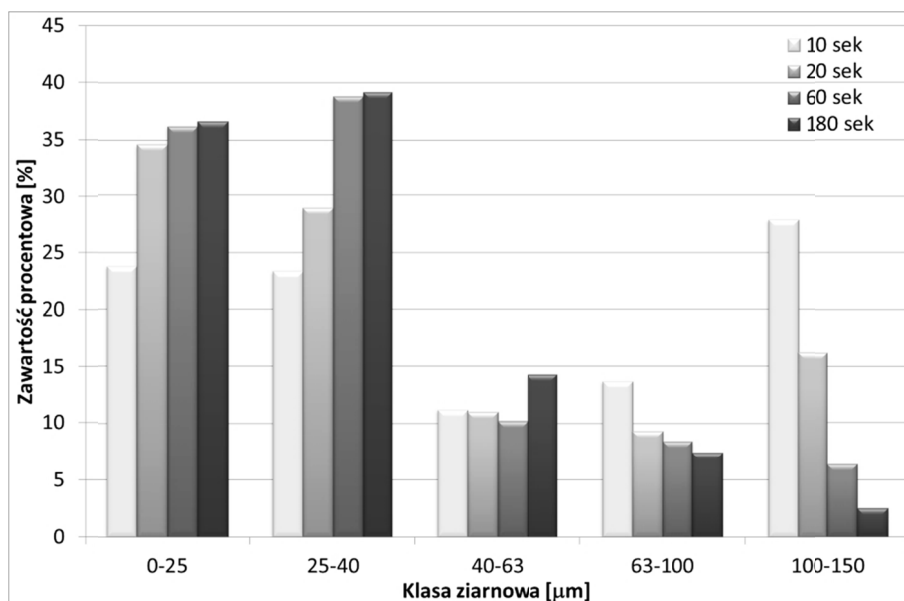
Tab. 2. Rozkład ziarnowy próbek anhydrytu w zależności od czasu mielenia udarowego

Klasa ziarnowa [µm]	Udział procentowy klasy ziarnowej [%]			
	Czas mielenia 10 sek.	Czas mielenia 20 sek.	Czas mielenia 60 sek.	Czas mielenia 180 sek.
0-25	23,8	34,6	36,2	36,6
25-40	23,4	28,9	38,8	39,2
40-63	11,2	11	10,2	14,3
63-100	13,7	9,3	8,4	7,4
100-150	27,9	16,2	6,4	2,5

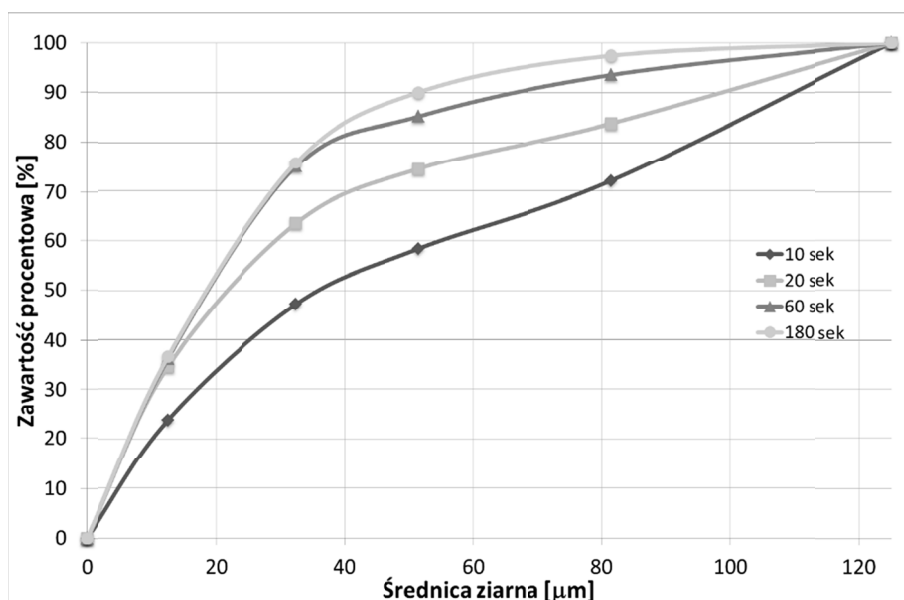
Na rysunku 6 przedstawiono kumulatywny rozkład granulometryczny próbek anhydrytu w zależności od różnych czasów mielenia udarowego. Podobnie jak w przypadku rozdrabniania próbek dolomitu, krzywe rozkładu ziarnowego anhydrytu uzyskane przy mieleniu w okresie 60 i 180 sekund mają zbliżony charakter.

#### 4.3. Określenie optymalnego czasu mielenia

Na podstawie sumarycznych rozkładów granulometrycznych uzyskanych z analizy sitowej rozdrobnionych próbek dolomitu i anhydrytu podjęto próbę określenia optymalnego czasu mielenia udarowego skał za pomocą zbudowanego urządzenia. W tym celu z wykresów przedstawionych na Rys. 4 i 6 odczytano górne



Rys. 5. Udział poszczególnych klas ziarnowych rozdrobnionych próbek anhydrytu w zależności od różnych czasów mielenia



Rys. 6. Sumaryczny rozkład granulometryczny próbek anhydrytu w zależności od różnych czasów mielenia udarowego

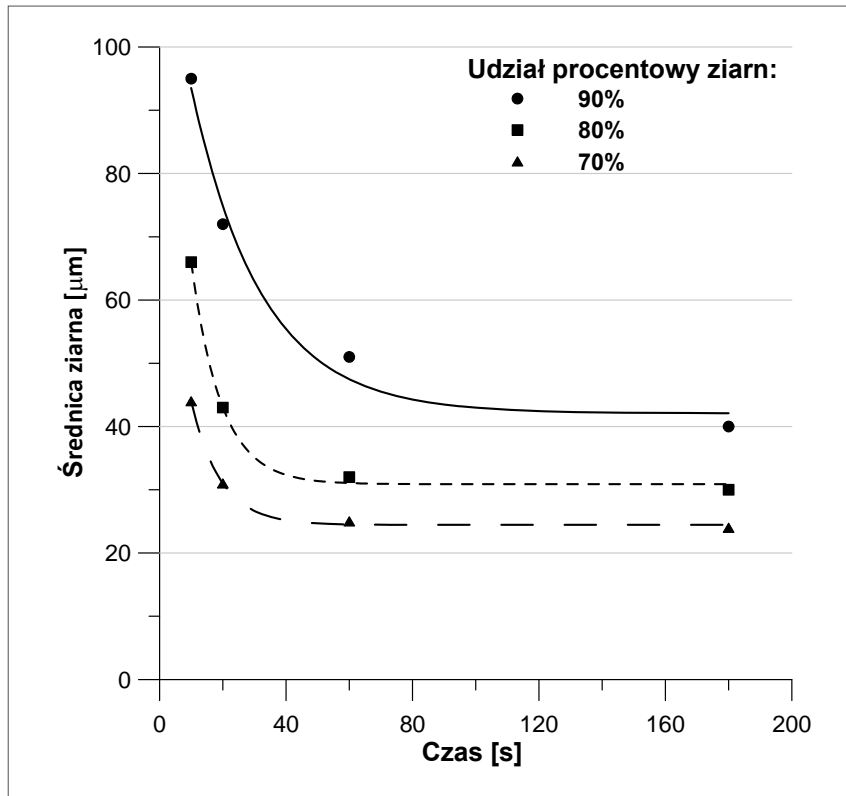
średnice ziarn, których udział procentowy wynosił 90%, dla poszczególnych czasów mielenia. Podobnie postępowano w przypadku udziałów procentowych równych 80% i 70%. Dzięki temu wykreślono zależność górnych średnic ziarn uzyskanych dla udziałów procentowych równych 90%, 80% i 70%, rozdrobnionego dolomitu i anhydrytu w funkcji czasu mielenia (Rys. 7 i 8).

Do uzyskanych zależności zmian średnic ziarn w funkcji czasu mielenia dopasowano równanie:

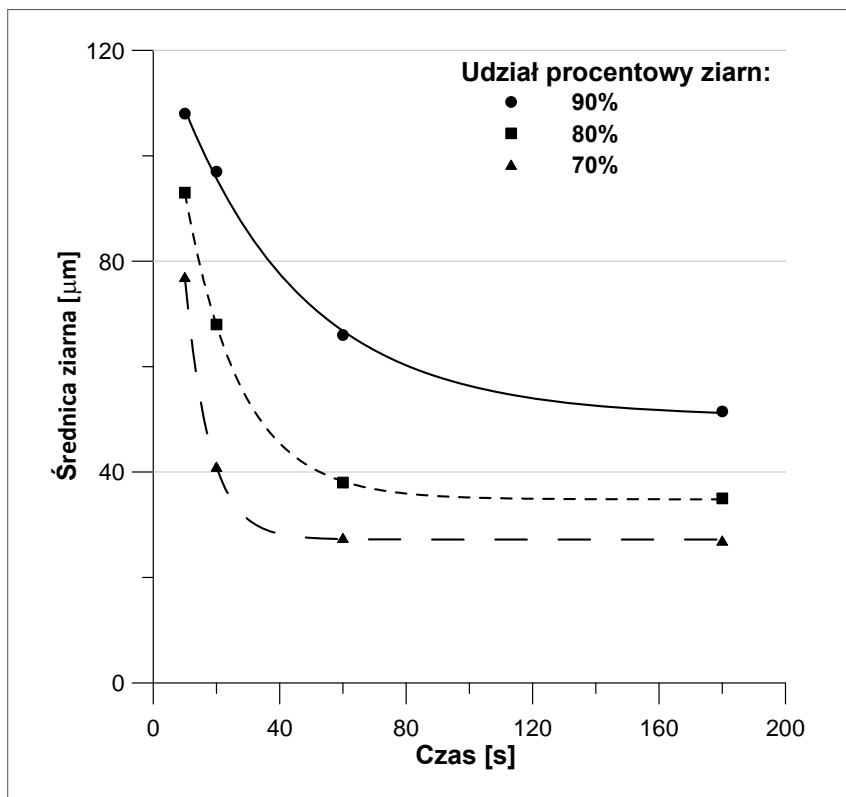
$$d(t) = A + B \cdot \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

gdzie:

- $d$  – średnica ziarn dla danego udziału procentowego, [μm],
- $A, B$  – stałe, [μm],
- $\tau$  – stała czasowa, [s],
- $t$  – czas, [s].



Rys. 7. Zależności uzyskanych średnic ziarn rozdrobnionego dolomitu od czasu mielenia



Rys. 8. Zależność uzyskanych średnic ziarn rozdrobnionego anhydrytu od czasu mielenia

Tab. 3. Parametry równania (1) uzyskane z wyników analizy sitowej po mieleniu dolomitu

Udział ziarn	$A$ [ $\mu\text{m}$ ]	$B$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\tau$ [s]
90%	42,1	80,7	22,2
80%	30,9	101,1	9,5
70%	24,4	58,0	9,2

Tab. 4. Parametry równania (1) uzyskane z wyników analizy sitowej po mieleniu anhydrytu

Udział ziarn	$A$ [ $\mu\text{m}$ ]	$B$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\tau$ [s]
90%	50,5	75,3	39,2
80%	34,8	102,6	17,7
70%	27,2	179,7	7,8

Wykresy 7 i 8 przedstawiają zależność uzyskanych maksymalnych średnic rozdrobnionych ziarn od czasu mielenia. Krzywa odpowiadająca 90% udziałowi informuje, jak w trakcie mielenia zmniejsza się maksymalna średnica 90% udziału masowego ziarn. Interpretacja stałej czasowej równania (1) wskazuje, iż dla czasu odpowiadającego trzykrotności jej wartości zbliżamy się do wartości asymptotycznej. Można więc stwierdzić, iż dla przebadanych dolomitów po czasie około 1 minuty, a dla anhydrytów po czasie około 2 minut, stopień rozdrobnienia tych skał nie będzie się już zmieniał.

## 5. Podsumowanie

Zagrożenia gazogeodynamiczne związane ze współwystępowaniem kopaliny stałej i gazowej najczęściej kojarzone są z metanem, bądź dwutlenkiem węgla obecnymi w pokładach węgla kamiennego. Gaz występujący w skale pod znacznym ciśnieniem jest źródłem energii, która umożliwi występowanie wyrzutów gazu i skał. Pełny wyrzut wymaga, by gaz zgromadzony w porach i szczelinach skały posiadał energię zdolną rozkruszyć materiał skalny oraz go przetransportować wzdłuż wyrobiska górniczego.

Ocena składu i zawartości gazu ulokowanego w strukturze porowej skał ma więc kluczowe znaczenie w aspekcie oceny stanu zagrożeń zjawiskami gazogeodynamicznymi. Podstawową metodą oceny ilości gazu jest zmielenie skały w celu otwarcia przestrzeni porowej. Według badań autorów, mielenie udarowe pozwala na najbardziej efektywne rozdrabnianie skał spośród przebadanych metod. Istotnym zagadnieniem jest określenie optymalnego czasu mielenia, by zagwarantować jak najlepszy stopień rozdrobnienia, a jednocześnie minimalizować efekty termiczne związane z pracą urządzenia oraz przedłużyć jego żywotność.

W pracy przebadane zostały procesy rozdrabniania dolomitu oraz anhydrytu, przy czasach mielenia trwających 10, 20, 60 i 180 sekund. Urządzeniem rozdrabniającym była autorska aparatura zbudowana w Pracowni Mikromerytyki IMG PAN. Ocena stopnia rozdrabniania skał wykonana została metodą sitową. Przeprowadzone badania wykazały, że znaczna poprawa stopnia rozdrobnienia obejmuje okres pierwszych 60 sekund. Dalsze mielenie skutkuje niewielkimi zmianami na krzywej składu granulometrycznego. Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność rozdrabniania skał miedzionośnych za pomocą zbudowanego urządzenia.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Nowatorski system wspomaganie oceny zagrożeń gazowych w kopalniach rud miedzi” (numer projektu: LIDER/003/408/L-4/12/NCBR/2013).

### Literatura

- Butra J., Kijewski P., 2013: *Zagrożenia gazowe w kopalniach rud miedzi - zagrożenie siarkowodorem*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 7, Wyższy Urząd Górniczy, s. 3-14.
- Kudasik M., Skoczylas N., Murzyn T., Wierzbicki M., 2014: *Efektywność rozdrabniania skał w kontekście oceny zawartego w nich gazu*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 16, nr 3-4, s. 81-84.
- Mirek A., Laskowski M., Hryciuk A., Półtorak M., 2011: *Zagrożenie wyrzutami gazów i skał w KGHM Polska Miedź S.A. – doświadczenia O/ZG „Rudna” w zakresie jego rozpoznawania i podejmowanych działań profilaktycznych przy prowadzeniu wyrobisk przygotowawczych*. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko; Nr 4/2, s. 305-313.

- Mirek A., Laskowski M., Respondek A., Hryciuk A., 2010: *Wyrzut gazów i skal z O/ZG „Rudna” – incydent czy tendencja?* Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko; Nr 4/3, s. 275-288.
- Schön J.H., 2011: Chapter 7 – *Geomechanical Properties*, Handbook of Petroleum Exploration and Production, Vol. 8, p. 245-271.
- Wierzbicki M., Młynarczuk M., 2013: *Structural aspects of gas and dolomite outburst in Rudna copper mine*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 57, p. 113-118.
- Wyższy Urząd Górniczy: *Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2013 roku*. Katowice, 2014.

## Degree of rock comminution depending on the time of impact milling

### Abstract

The amount of gas in the rock pores can be determined by grinding the investigated material to the finest grain fraction. In the Laboratory of Micrometrics of the Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences, an instrument for rock grinding, which employs the process of impact milling, was constructed. Fragments of dolomite and anhydrite core from 'Rudna' copper mine were used to determine the effect of grinding time on the degree of the comminution of the rocks. Samples of the size range from 10 mm to 30 mm and the mass of about 50 grams were ground in the time periods of 10, 20, 60 and 180 seconds. The evaluation of the degree of the comminution of the rocks was made using the sieve method. The achieved results indicated that as the time of milling grows, the comminution degree increases asymptotically. By the use of the constructed instrument, the optimal times of grinding dolomite and anhydrite rocks were specified. Exceeding the optimal grinding times does not increase the degree of the comminution.

**Keywords:** rock comminution, impact milling, granulometry, dolomite, anhydrite