

OCENA PRZYDATNOŚCI WAPIENI Z ROWU KLESZCZOWA (ZŁOŻE WĘGLA BRUNATNEGO BEŁCHATÓW – POLE SZCZERCÓW) JAKO POTENCJALNYCH SORBENTÓW SO₂ STOSOWANYCH W ENERGETYCE – PROBLEMY DOKUMENTOWANIA GEOLOGICZNEGO

THE ASSESSMENT OF USEFULNESS OF LIMESTONES FROM THE KLESZCZÓW GRABEN (BEŁCHATÓW LIGNITE DEPOSIT – SZCZERCÓW FIELD) AS POTENTIAL SO₂ SORBENTS IN THE POWER INDUSTRY – PROBLEMS OF GEOLOGICAL DOCUMENTING

ELŻBIETA HYCNA¹, JACEK MUCHA¹, TADEUSZ RATAJCZAK², MONIKA WASILEWSKA-BŁASZCZYK¹

Abstrakt. Występujące w zboczach rowu Kleszczowa wapienie wieku jurajskiego są jedną z najważniejszych kopalin towarzyszących w złożu węgla brunatnego Bełchatów. W ostatnich latach zaistniała potrzeba rozpoznania ich przydatności jako sorbentów SO₂. Podczas ich dokumentowania napotkano wiele trudności. Wapienie charakteryzują się znaczną zmiennością litologiczną, są to skały zarówno odznaczające się wysoką twardością i zwięzłością, jak i słabo zwięzłe czy nawet pylaste. W ich partiach stropowych występują procesy krasowe, a niżej położone są z kolei objęte wtórnymi procesami mineralizacyjnymi, spośród których najsilniej jest zaawansowany proces silifikacji. Widoczne są również efekty innych procesów przeobrażeniowych, takich jak: kompaktacja, cementacja, procesy rozpuszczania i rekrytalizacji kalcytu, które przyczyniły się do znacznego urozmaicenia składu mineralnego i chemicznego wapieni, zróżnicowania parametrów fizykochemicznych i fizykomechanicznych określających ich przydatność do gospodarczego wykorzystania jako sorbentów SO₂. Inne problemy związane z dokumentowaniem wapieni w złożu Bełchatów są związane z ich mniejszym znaczeniem w porównaniu z kopaliną główną, co powoduje, że ich rozpoznanie jest skromne, cechuje się większym interwałem poziomym otworów wiertniczych, zdecydowanie większymi i silnie zróżnicowanymi długościami próbek pobranych z rdzeni wiertniczych. Na obecnym etapie rozpoznania kopaliny towarzyszącej możliwe jest jedynie wstępne oszacowanie zasobów wapieni jako potencjalnych sorbentów SO₂. Doprecyzowanie oszacowań będzie możliwe po skonstruowaniu modelu 3D parametrów kryterialnych oraz opracowaniu scenariusza eksploatacji.

Słowa kluczowe: kopalina towarzysząca, wapienie jurajskie, sorbenty SO₂, odsiarczanie, statystyka, dokumentowanie geologiczne.

Abstract. Jurassic limestones of the Kleszczów Graben are among the most important accompanying raw materials in the Bełchatów lignite deposit. In recent years, there has been a need to recognize their suitability as SO₂ sorbents for use in the energy industry. The limestones are characterized by high lithological variability. They show both high hardness and compactness, and are weakly concise or even silty. At the top parts, they are subjected to karst processes. The lower parts are affected by secondary mineralization processes, among which the silicification process is most advanced. The effects of other transformation processes, such as compaction, cementation, dissolution and recrystallization of calcite are also visible. These processes contributed to a significant diversification of the mineral and chemical composition of limestone, and differentiation of physico-chemical and physical-mechanical parameters responsible for assessing the suitability for their commercial use as a raw material for the production of SO₂ sorbents. Other problems associated with documenting the limestones in the Bełchatów deposit are related to their lesser importance compared to the main mineral. Its degree of exploration is low, characterized by a lower density of exploratory boreholes and significantly longer average lengths of samples collected from drill cores. At the present stage of the accompanying mineral exploration, only a preliminary estimation of limestone resources as potential SO₂ sorbents is possible. The precise estimation will be possible after constructing a 3D model of criterion parameters and developing an extraction scenario.

Key words: accompanying mineral, Jurassic limestone, SO₂ sorbents, desulphurization, statistics, geological documentation.

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: hycnar@geol.agh.edu.pl, mucha@geol.agh.edu.pl, mwasilewska@geol.agh.edu.pl.

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; e-mail: tarat@min-pan.krakow.pl.

WSTĘP

Obszar badań znajduje się na terenie Kopalni Węgla Brunatnego (KWB) Bełchatów (fig. 1), gdzie złożo węgla brunatnego charakteryzuje się skomplikowaną budową geologiczną. Węgiel zalega w środkowej części wąskiego, równoleżnikowego rowu tektonicznego, tzw. rowu Kleszczowa, uformowanego w osadach mezozoicznych, głównie w jurajsko-kredowych wapieniach i marglach (fig. 2). Brzegi rowu tworzą naturalne ramy wyrobisk górniczych. Aktualnie eksploatacja węgla jest prowadzona w obrębie dwóch pól eksploatacyjnych – Bełchatów i Szczerców. Średnie roczne wydobycie węgla wynosi 42 mln ton rocznie i wymaga zdjęcia 120 mln m³ skał nadkładu. Wśród skał nadkładu znajduje się wiele wartościowych surowcowo kopalni, z których część spełnia kryteria kopalni towarzyszących. Jedną z najważniejszych są wapienie wieku jurajskiego zalegające w zboczach pól eksploatacyjnych. Na skutek postępującej eksploatacji węgla są one sukcesywnie odsłaniane. W celu zapewnienia zboczom stateczności, podczas wydobywania węgla konieczne jest ich formowanie do odpowiedniego nachylenia. Nieodzowna jest w tym przypadku eksploatacja wapieni, która musi zostać poprzedzona szczegółowym rozpoznaniem i udokumentowaniem geologicznych warunków zalegania, parametrów fizykomechanicznych oraz zaprojektowaniem technologii wybierania. Wapienie są skałą litą, nieurabialną podstawowymi maszynami pracującymi w odkrywcę, zatem ich obecność w znaczący sposób podnosi koszty funkcjonowania kopalni, dlatego racjonalne jest ich gospodarcze wykorzystanie. Pomimo że wskazano wiele możliwych kierunków zastosowania wapieni (m.in. w rolnictwie, hutnictwie, przemyśle chemicznym, cementowym, jako surowiec do produkcji wapna budowlanego lub betonów o wytrzymałości 20–50 MPa), praktycznie są używane jedynie jako kruszywo drogowe (klasy III) wykorzystywane

głównie na potrzeby własne kopalni do budowy dróg technologicznych. Do tej pory w KWB Bełchatów wydobyto i zagospodarowano ok. 2 mln ton wapieni. W celu eksploatacji zasobów bilansowych węgla brunatnego w kopalni Bełchatów, w zależności od wariantu ukształtowania konturu wyrobiska, trzeba będzie wydobyć od ponad 20 do prawie 70 mln ton wapieni (Ratajczak, Hycnar, 2017).

W takiej sytuacji konieczne jest wskazanie nowych kierunków gospodarczego wykorzystania wapieni bełchatowskich, co wiąże się z opracowaniem procedury rozpoznawania przydatności surowcowej wapieni znajdujących się w zboczach odkrywek (Ratajczak i in., 2015). Podjęto badania mające na celu określenie ich przydatności jako sorbentu SO₂ na potrzeby technologii odsiarczania spalin stosowanych w krajowej energetyce, biorąc pod uwagę zarówno mokrą metodę odsiarczania gazów odlotowych, jak i technologię spalania fluidalnego.

PODSTAWOWY MATERIAŁ BADAŃ

Podstawę rozpoznania i opisu geologicznego wapieni oraz opracowania statystycznego zgromadzonych zbiorów danych stanowiły wyniki opróbowania rdzeni pochodzących z 33 otworów wiertniczych wykonanych w południowym zboczu rowu Kleszczowa w obrębie pola eksploatacyjnego Szczerców i jednocześnie potencjalnej lokalizacji kamieniołomu wapieni (fig. 1).

Na planie otwory są rozmieszczone w miarę regularnie w pasie wydłużonym w kierunku zbliżonym do równoleżnikowego o rozmiarach 2600 × 400 m, o powierzchni ok. 1 km². Przeciętna odległość między otworami wynosi ok. 170 m. Długości wykonanych otworów są silnie zróżnicowane i mieszczą się w przedziale od 17,0 do 165,5 m, przy średniej arytmetycznej 104,2 m (fig. 3).



Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań w KWB Bełchatów – pole Szczerców (Archiwum Działu Geologicznego KWB Bełchatów)

Bełchatów lignite mine, Szczerców exploitation field (Archive of Geological Department of Bełchatów Mine)

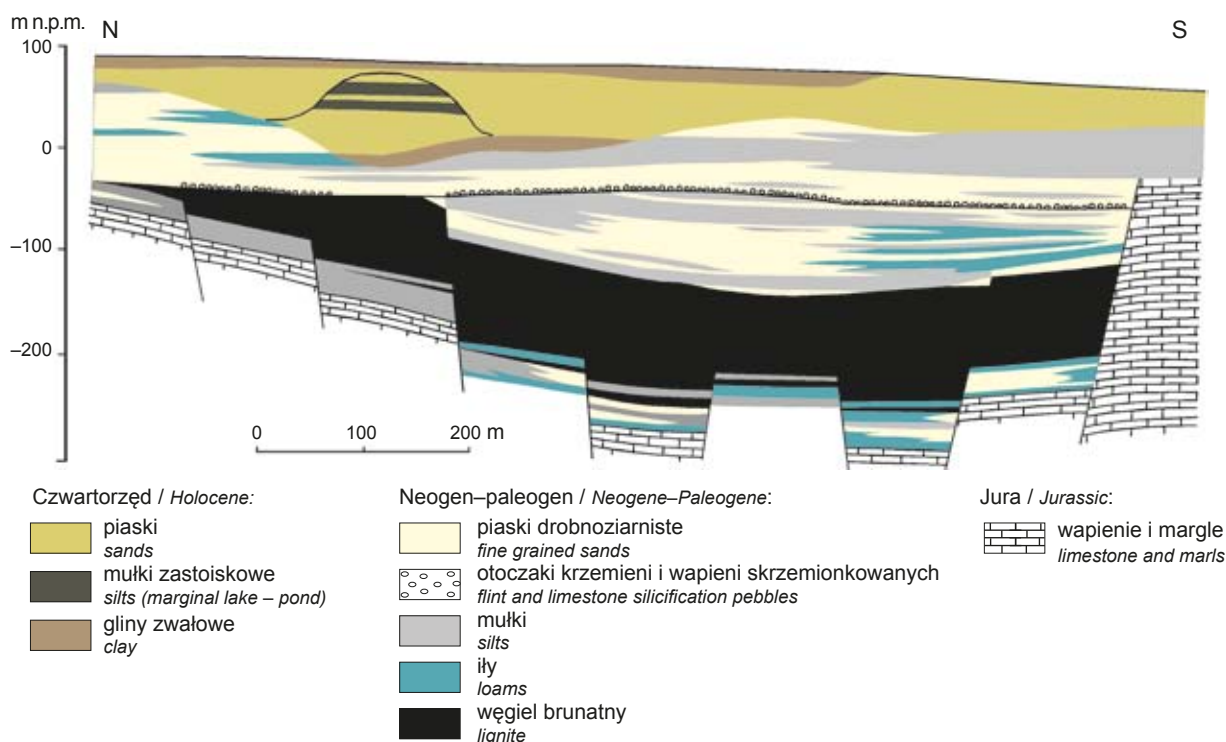


Fig. 2. Poprzeczny przekrój geologiczny przez złożo Belchatów (pole eksploatacyjne Szczerców) wg Ciuka (1968)

Geological cross-section through the Belchatów deposit (Szczerców field) after Ciuk (1968)

Z rdzeni otworów wiertniczych pobrano łącznie 189 próbek, na podstawie których oznaczono wartości parametrów fizykochemicznych i fizyko mechanicznych wapieni. Długości opróbowanych odcinków rdzeni, podobnie jak długości otworów, są także zróżnicowane, a ich skrajne wartości

wynoszą 0,6 i 45,1 m, przy średniej arytmetycznej 16,7 m (fig. 3). W profilu pionowym różnica wysokości skrajnych próbek sięga 220 m.

Ze zrozumiałych względów stopień rozpoznania wapieni, jako kopaliny towarzyszącej o drugorzędym znaczeniu

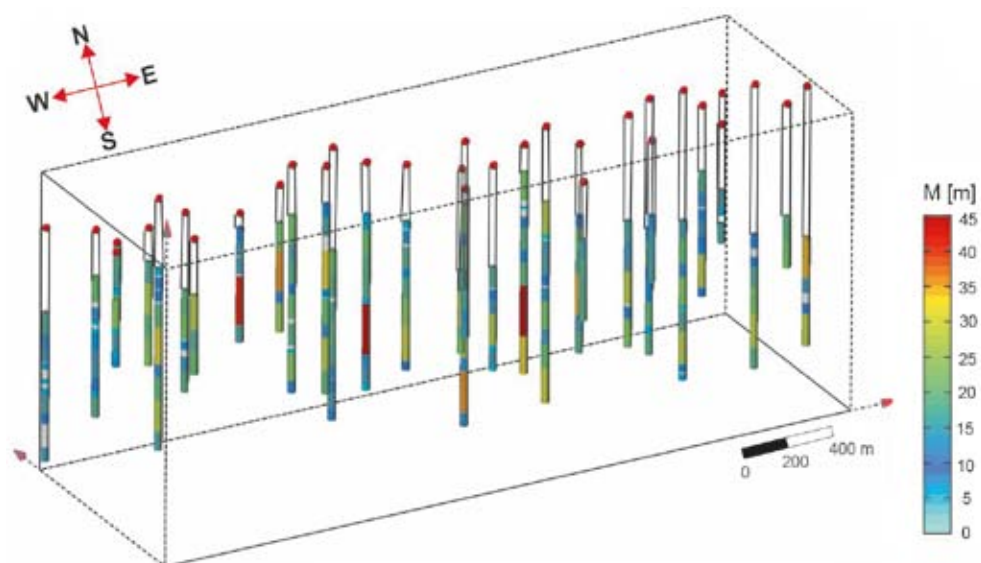


Fig. 3. Wizualizacja przestrzenna rozmieszczenia otworów i długości próbek odcinkowych (M) pobranych z rdzeni wiertniczych (Ratajczak i in., 2015)

3D visualization of the location of boreholes in the research area and the length (M) of segment samples collected from the boreholes (Ratajczak *et al.*, 2015)

ekonomicznym, jest znacznie skromniejszy niż kopaliny głównej. Duże zróżnicowanie długości opróbowanych odcinków rdzeni (próbek odcinkowych) oraz długości samych otworów uniemożliwia sporządzenie wiarygodnego modelu trójwymiarowego wartości parametrów wapieni, który byłby niezwykle przydatny do prognozy jakości urobku w elementarnych jednostkach eksploatacji (lub ich zespołach) i podejmowania decyzji o jego przeznaczeniu i zagospodarowaniu.

Badania wapieni realizowano przez kilka lat, a zastosowanie kompleksowej metodyki badań, obejmującej analizy mineralogiczne, chemiczne, fizykochemiczne i fizyko-mechaniczne, umożliwiło szczegółową charakterystykę parametrów jakości wapieni, istotnych z punktu widzenia zarówno technologii odsiarczania stosowanych w krajowej energetyce, jak i energochłonności procesu przemiału surowca na potrzeby uzyskania sorbentu.

CHARAKTERYSTYKA WAPIENI

Występujące w zboczach odkrywki wapienie charakteryzują się dużą zmiennością litologiczną. Dominują wśród nich wapienie biolitowe, głównie mikrobiałno-gąbkowe, rzadziej mikrobiałno-koralowe powstałe w warunkach skłonu budowli rafowych; gąbkowe, koralowe, skaliste będące elementem budowli rafowych oraz detrytyczne i oranodetrytyczne powstałe w warunkach niecek biohermalnych. Ponadto występują wapienie ooidowe i onkoidowe reprezentujące osady płytkiej platformy oraz pelityczne i kredowe basenu centralnego. Są to skały odznaczające się wysoką twardością i zwięzłością (jak np. wapienie skaliste), lecz występują też słabo zwięzłe czy nawet pylaste. Zawierają liczne przewarstwienia wapieni marglistych i margli. W partiach stropowych są objęte procesami krasowymi, których przejawem są liczne kawerny i leje krasowe wypełnione materiałem ilasto-piaszczystym, a nawet występowanie rumoszu wapiennego wymieszanego z materiałem ilastym – brekcja krasowa. Niektóre partie wapieni objęte są wtórnymi procesami mineralizacyjnymi, spośród których najsilniej jest zaawansowany proces silifikacji, przejawiający się zastępowaniem kalcytu krzemionką (opalem, chalcedonem) w bioklastach oraz występowaniem konkrecji krzemionkowych. Poza silifikacją są również rozwinięte procesy pirytyzacji i kalcytyzacji, w mniejszym stopniu sulfatyacji i fosfatyacji (Hycnar, 2016, 2018).

W wapieniach znajdujących się w skarpach odkrywek charakterystyczne jest występowanie różnego rodzaju nieciągłości (tektonicznych i kompakcyjnych), będących efektem znacznego zaangażowania tektonicznego przejawiającego się obecnością licznych uskoków (ramowych i drugiego rzędu). Stylolityzacja doprowadziła do powstania w wapieniach rozgałęzionej sieci spękań, o skomplikowanym przebiegu i zmiennej amplitudzie (od 0,1 mm do ok. 1 cm). Początkowo były one drogami migracji roztworów, odpowiedzialnych za procesy wtórnej mineralizacji.

W końcowym etapie epigeny skalnej zostały wypełnione kalcytem, związkami żelaza, krzemionką i uwęgloną materią organiczną (Hycnar, 2016, 2018).

OCENA JAKOŚCI WAPIENI JAKO SORBENTÓW SO₂ W PRZESTRZENI 3D

Do oceny jakości wapieni w przestrzeni 3D wykorzystano wyniki oznaczeń wartości wytypowanych parametrów w próbkach odcinkowych rozmieszczonych w obrębie bryły objętej rozpoznaniem wiertniczym i mającej formę prostopadłościanu o bokach 2600 × 400 × 220 m. Podstawowym parametrem określającym przydatność wapieni do wykorzystania w technologiach ograniczania emisji SO₂ do atmosfery jest zawartość CaCO₃. W przypadku mokrych metod odsiarczania brana jest również pod uwagę zawartość innych składników chemicznych mających wpływ na pogorszenie jakości produktu odsiarczania – gipsu, jak np. MgO, K₂O, Na₂O. Składniki te efektywnie wchodzi w reakcję z SO₂, tworząc łatwo rozpuszczalne siarczany. W przypadku suchych metod odsiarczania istotne są wartości wskaźników reaktywności (RI) i sorpcji bezwzględnej (CI). Wskaźnik reaktywności określa stosunek zawartości wapnia w sorbencie do ilości siarki po procesie sorpcji [mol Ca/mol S]. Wskaźnik sorpcji bezwzględnej (CI) definiuje ilość siarki zasorbowanej przez 1000 g sorbentu [g S/1000 g sorbentu] (Alstroom..., 1995).

W celu ściślejszego określenia przydatności wapieni przeznaczonych do wykorzystania w technologiach odsiarczania gazów stosowanych w energetyce, z uwagi na ich dużą zmienność litologiczną, zjawiska krasowe, występowanie wtórnych procesów mineralizacyjnych, które doprowadziły m.in. do urozmaicenia ich składu mineralnego i chemicznego, konieczne było rozszerzenie metodyki badań o dodatkowe parametry charakteryzujące właściwości fizykochemiczne (np. białość – Ry) i fizykochemiczne (m.in. indeks pracy Bondy – W_i) tego surowca. Oznaczone wartości porównano z parametrami jakości wymaganymi przez krajowe elektrownie i elektrociepłownie stosujące mokrą wapienną metodę odsiarczania oraz wykorzystujące technologię spalania fluidalnego z jednoczesnym odsiarczaniem (tab. 1).

Przedstawione w tabeli 1 wartości poszczególnych parametrów, określone dla próbek odcinkowych i charakteryzujące przydatność badanych wapieni do zastosowania w formie sorbentów, cechują się znacznym zróżnicowaniem. Wyliczone wartości średnie arytmetyczne wskazują, że badane wapienie ogólnie, w skali całej rozpatrywanej bryły, spełniają stawiane im wymagania zarówno w przypadku mokrej metody odsiarczania, jak i spalania fluidalnego. Z kolei wartości maksymalne dotyczące zawartości: SiO₂, Al₂O₃, MgCO₃, Na₂O, K₂O czy charakteryzujące energochłonność procesu mielenia (W_i), białość (Ry), reaktywność (RI), jak również minimalne określające zawartość CaCO₃ i pojemność sorpcyjną (CI) nie spełniają przyjętych kryteriów.

Tabela 1

Parametry fizykochemiczne i fizyko mechaniczne wapieni belchatowskich dla próbek odcinkowych określające ich przydatność w mokrej metodzie odsiarczania i paleniskach fluidalnych

Physico-chemical and physico-mechanical parameters of limestone from the Belchatów deposit, determining the usefulness in wet desulphurization technology and fluidized bed combustion

Parametr	Wymagania dla technologii odsiarczania		Wapień belchatowski (próbki odcinkowe z rdzeni)		
	mokra metoda odsiarczania*	paleniska fluidalne**	min.	maks.	średnia arytmetyczna
CaCO ₃ [% wag.]	≥95	≥94	91,11	99,15	97,14
SiO ₂ + NR [% wag.]	≤3,5	≤2,1	0,08	7,11	1,46
Fe ₂ O ₃ [% wag.]	≤0,35	≤0,7	0,05	1,09	0,08
Al ₂ O ₃ [% wag.]	≤1,5	≤0,7	0,07	1,01	0,10
MgCO ₃ [% wag.]	≤0,8	≤2,3	0,02	1,63	0,59
Na ₂ O [% wag.]	≤0,05	Na ₂ O + K ₂ O [%]	>0,001	0,11	0,016
K ₂ O [% wag.]	≤0,05		>0,001	0,12	0,009
Białość (Ry) [%]	≥65	–	39,62	84,80	71,48
Indeks reaktywności (RI) [mol Ca/mol S]	–	≤2,5	1,5	3,0	2,35
Indeks sorpcji bezwzględnej (CI) [g S/1000 g sorbentu]	–	≥120	101	195	126
Indeks pracy Bonda (W _i) [kWh/t]	≤10–11	≤10–11	8,18	11,62	9,76

* wymagania Elektrowni Belchatów, ** wymagania krajowych elektrowni i elektrociepłowni wykorzystujących technologię spalania fluidalnego

* requirements of the Belchatów Power Station, ** requirements of domestic thermoelectric power stations and those using fluidized bed combustion technology

Z uwagi na duże zróżnicowanie długości próbek odcinkowych uzyskane wyniki można traktować jedynie jako przybliżone. Niemniej jednak należy oczekiwać, że niektóre partie wapieni przewidziane do eksploatacji nie będą nadawały się do wykorzystania jako sorbenty SO₂ ani w mokrej technologii odsiarczania, ani w paleniskach fluidalnych.

W związku z tym, że dostępność wapieni do eksploatacji będzie warunkowana sukcesywnie postępującym wydobyciem węgla, rozpoznanie jakości surowcowej wapieni w lokalnej skali obserwacji, odpowiadającej objętościowo elementarnym jednostkom eksploatacji lub ich zespołom (urobek uzyskiwany w trakcie pojedynczego postępu eksploatacji przez odpalenie materiału wybuchowego w określonej grupie otworów strzałowych) jest niewystarczające (Hycnar i in., 2018).

OCENA JAKOŚCI WAPIENI JAKO SORBENTÓW SO₂ W PRZESTRZENI 2D

Oceny jakości wapieni w przestrzeni 2D dokonano na podstawie uśrednionych z 33 otworów wiertniczych wartości sześciu wytypowanych parametrów – zawartość: CaCO₃, MgCO₃ i SiO₂ oraz indeks pracy Bonda (W_i), wskaźnik reaktywności (RI) i białość (Ry). Uśrednienia wartości parametrów dokonano z wagowaniem na długość próbek odcinkowych. Wytypowane do analizy parametry cechują się pełnymi i równolicznymi zbiorami wartości, których

oznaczenia nie budziły wątpliwości. Podstawowe opracowanie statystyczne danych uśrednionych w otworach opisuje zmienność parametrów w płaszczyźnie poziomej (tab. 2).

Z uwagi na uśrednienie danych w otworach wyraźnie zmniejszył się zakres zmienności zawartości składników chemicznych. Wartości współczynnika zmienności wskazują, że dużą zmiennością względną charakteryzują się zawartości SiO₂ i MgCO₃ natomiast pozostałe parametry cechują się małą lub wręcz nikłą zmiennością.

Wykresy „ramka–wąsy” (fig. 4) pokazują, że w utworzonych zbiorach danych nie ujawniają się wartości anomalne, co pozwala założyć ich jednorodny charakter. Jedynie w przypadku białości (Ry) pojawia się jedna wartość odbiegająca, wyraźnie mniejsza od pozostałych, ale nie anomalna.

Obliczone dla wszystkich par badanych parametrów wartości współczynnika korelacji liniowej (Pearsona) wskazują na bardzo silną, ujemną korelację zawartości CaCO₃ i SiO₂ (fig. 5), co jest efektem kompensowania zmniejszającej się zawartości CaCO₃ głównie wzrostem zawartości pojawiającej się w próbkach krzemionki. Silną korelację stwierdzono w przypadku par parametrów: zawartość SiO₂–białość (korelacja ujemna) oraz zawartość CaCO₃–białość (korelacja dodatnia).

Weryfikację przydatności wapieni jako sorbentów SO₂ na całym obszarze ich rozpoznania przeprowadzono przez porównanie wymagań dotyczących minimalnych lub maksymalnych wartości parametrów, oddzielnie dla mokrej metody odsiarczania i dla palenisk fluidalnych, z dolnymi lub gór-

Tabela 2

Statystyka wartości wytypowanych parametrów wapieni dla oceny ich przydatności jako sorbentów SO₂ w suchej i mokrej metodzie odsiarczania (dla wartości uśrednionych w otworach)

Statistics of values of selected limestone parameters to assess their suitability as SO₂ sorbents in dry desulphurization methods and fluidized bed combustion (for averaged values in boreholes)

Parametr	CaCO ₃ [% wag]	MgCO ₃ [%]	SiO ₂ [%]	W _i [kWh/t]	RI [mol Ca/S]	Ry [%]
Liczba otworów	33	33	33	33	33	33
Średnia arytmetyczna	96,98	0,58	1,59	9,76	2,36	71,48
Odchylenie standardowe	1,29	0,25	1,28	0,91	0,24	8,45
Współczynnik zmienności	1,30%	42,70	80,2	9,30%	10,30%	11,80
Minimum	94,20	0,24	0,11	8,18	1,85	39,62
Maksimum	98,72	1,20	4,51	11,65	2,82	84,80

nymi granicami przedziałów ufności dla średnich wartości parametrów określonymi dla poziomu prawdopodobieństwa $P = 0,99$. Dolne granice przedziałów ufności wyznaczono dla tych parametrów, dla których w wymaganiach określono ich minimalne wartości (np. zawartość CaCO₃), natomiast górne granice dla tych, dla których określono maksymalne wartości (np. zawartość SiO₂, indeks pracy Bonda).

W przypadku, gdy dolne lub górne granice przedziałów ufności mieściły się w zakresie wskazanym w wymaganiach, przyjmowano, że wapienie, z uwagi na dany parametr, spełniają kryterium przydatności jako sorbent SO₂ dla danej technologii. Wobec przyjętego wysokiego prawdopodobieństwa (0,99) ryzyko błędnego wnioskowania jest niewielkie i nie przekracza 0,01.

Przy wyznaczaniu granic przedziałów ufności skorzystano z właściwości rozkładu t-Studenta, gdyż analizowane zbiory danych o liczności $n = 33$ można traktować jako dużą próbkę statystyczną i z tego względu przyjąć, że rozkład

średniej arytmetycznej wartości parametrów ma taką postać. Wartości graniczne przedziałów ufności wyznaczano w programie STATGRAPHICS ze wzorów:

- $x_d = \bar{x} - t_{0,99} \frac{s}{\sqrt{n}}$ – dla dolnej granicy przedziału ufności oraz
- $x_g = \bar{x} + t_{0,99} \frac{s}{\sqrt{n}}$ – dla górnej granicy przedziału ufności

gdzie:

s – odchylenie standardowe parametru

\bar{x} – średnia arytmetyczna (obie wielkości odczytano z tab. 2)

$n = 33$ – liczność zbiorów danych

$t_{0,99}$ – kwantyl rozkładu t-Studenta rzędu 0,99 ($t_{0,99} = 2,45$)

Wyniki obliczeń zawarte w tabelach 3 i 4, skonfrontowane z wymaganiami dla mokrej metody odsiarczania (tab. 3) i technologii spalania fluidalnego (tab. 4), z małym ryzykiem błędu dowodzą, że całościowo wapienie w badanej prze-

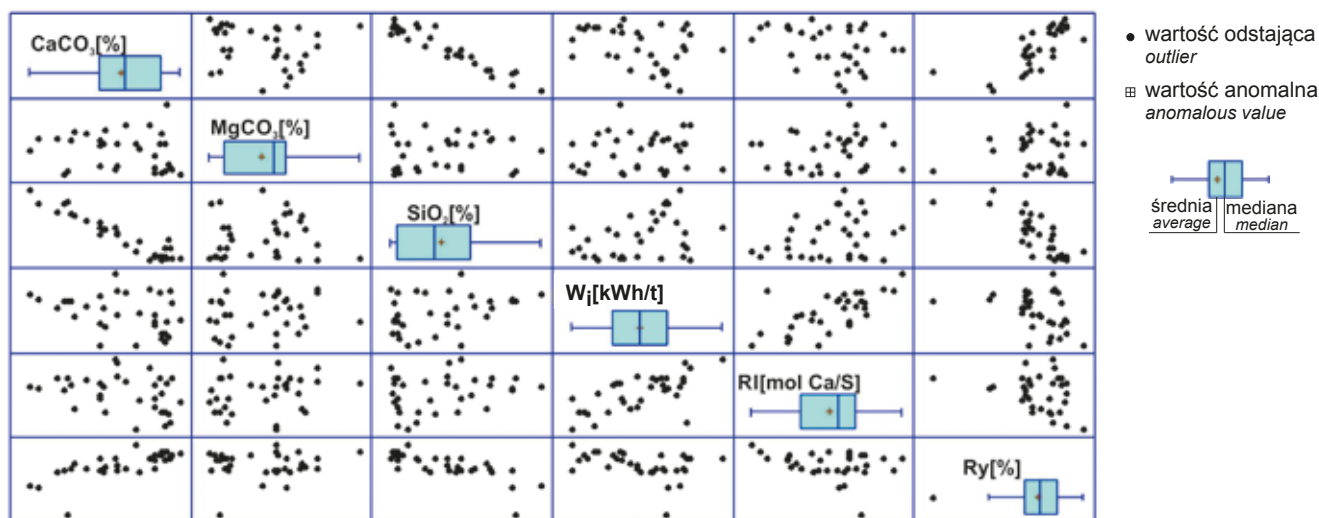


Fig. 4. Wykresy „ramka–wąsy” i wykresy punktowe zależności badanych parametrów wapieni

The “frame–whiskers” charts and point charts of the dependence of limestone parameters investigated

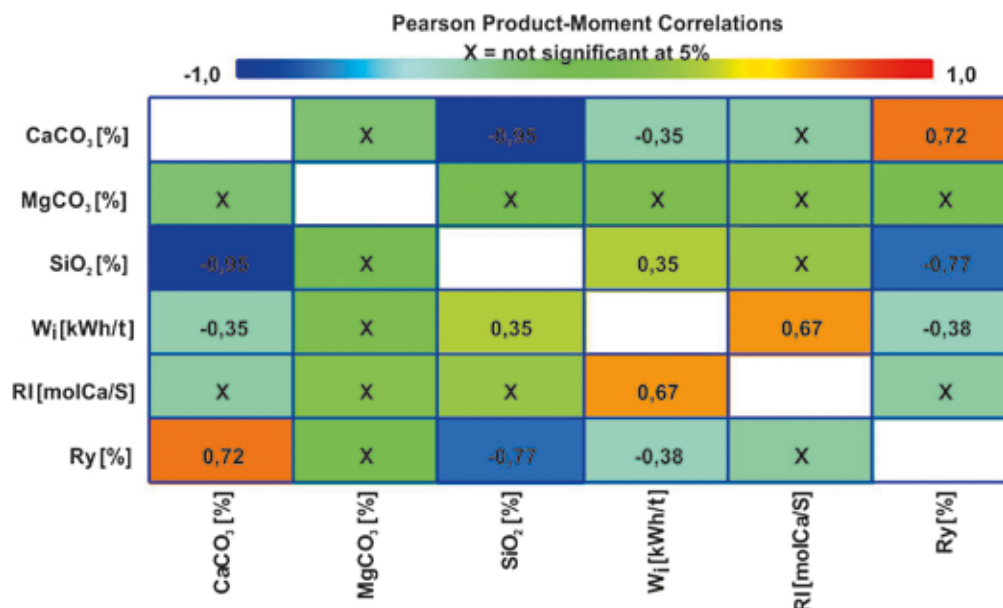


Fig. 5. Zestawienie współczynników korelacji liniowej dla wszystkich par parametrów wapieni

Znak „X” oznacza brak statystycznie istotnej korelacji na poziomie istotności 0,05

The comparison of linear correlation coefficients for all pairs of limestone parameters

The “X” sign means that there is no statistically significant correlation at the significance level of 0.05

strzeni górotworu spełniają kryteria przydatności dla obu metod jako sorbentów SO₂. Jest tylko jeden wyjątek – górna granica przedziału ufności dla zawartości SiO₂ (tab. 3) nieznacznie przekracza dopuszczalną zawartość tego składnika dla metody mokrej.

Na potrzeby wstępnej oceny przydatności wapieni jako sorbentów w lokalnej skali obserwacji określono procentowy udział otworów, w których kopalina spełnia wymagania dla suchej (tab. 3) i mokrej (tab. 4) metody odsiarczania.

W przypadku palenisk fluidalnych (tab. 3) najczęstsze przekroczenia wymagań (dla ok. 30% otworów) odnotowano dla zawartości SiO₂ oraz indeksu reaktywności (RI). Jednoczesne spełnienie wszystkich wymagań w odniesieniu do tej metody stwierdzono jedynie w 48,5% wszystkich otworów.

W przypadku metody mokrej (tab. 4) najczęstsze przekroczenia wymagań stwierdzono w odniesieniu do zawartości MgCO₃ (dla ok. 18% otworów) i SiO₂ (dla ok. 12% otworów). Jednoczesne spełnienie wszystkich wymagań

Tabela 3

Weryfikacja przydatności wapieni jako sorbentów SO₂ w paleniskach fluidalnych odniesiona do wartości średnich wytypowanych parametrów i wartości parametrów w pojedynczych otworach

Verification of limestone suitability as SO₂ sorbents in fluidized bed combustion in relation to the average values of selected parameters and values in individual boreholes

Parametr	Kryterium przydatności*	Granica przedziału ufności dla wartości średniej dla P = 0,99		f [%]
		dolna	górna	
CaCO ₃ [% wag.]	≥94	96,4	–	100
MgCO ₃ [% wag.]	≤2,3	–	0,68	100
SiO ₂ [% wag.]	≤2,1	–	2,14	69,7
Indeks reaktywności (RI) [mol Ca/mol S]	≤2,5	–	2,47	69,7
Indeks pracy Bondy (W _i) [kWh/t]	≤11	–	10,1	97,0
Spełnienie wszystkich kryteriów w otworach jednocześnie	–	–	–	48,5

* wymagania dla sorbentów SO₂ krajowych elektrowni i elektrociepłowni wykorzystujących technologię spalania fluidalnego, f – udział procentowy otworów, w których kopalina spełnia kryteria przydatności

* requirements for SO₂ sorbents of the domestic thermoelectric power stations and those using fluidized bed combustion technology, f – percentage of boreholes in which the mineral meets the requirements

Tabela 4

Weryfikacja przydatności wapieni jako sorbentów SO₂ przy zastosowaniu mokrej metody odsiarczania odniesiona do wartości średnich wytypowanych parametrów i wartości parametrów w pojedynczych otworach

Verification of limestone suitability as SO₂ sorbents in wet technology desulphurization in relation to the average values of selected parameters and values in individual boreholes

Parametr	Kryterium przydatności*	Granica przedziału ufności dla wartości średniej dla P = 0,99		f [%]
		dolna	górna	
CaCO ₃ [% wag.]	≥95	96,4	–	93,9
MgCO ₃ [% wag.]	≤0,8	–	0,68	81,8
SiO ₂ [% wag.]	≤3,5	–	2,14	87,9
Białość (Ry) [%]	≥65	67,9	–	90,9
Indeks pracy Bonda (W _i) [kWh/t]	≤11	–	10,1	97,0
Spełnienie wszystkich kryteriów w otworach jednocześnie	–	–	–	66,7

* wymagania Elektrowni Bełchatów dla kopaliny przeznaczonej do odsiarczania metodą mokrą, f – udział procentowy otworów, w których kopalina spełnia wymagania Elektrowni Bełchatów

* requirements of the Bełchatów Power Station for a mineral intended for desulphurization by the wet method, f – percentage of boreholes in which the mineral meets the requirements of the Bełchatów Power Station

w odniesieniu do tej metody stwierdzono w 66,7% otworów i jest to znacznie wyższy wynik niż uzyskany dla technologii spalania fluidalnego.

Potwierdza to przypuszczenie, że jedynie część przewidzianych do wydobycia wapieni będzie mogła być wykorzystana jako sorbenty SO₂, przy czym można założyć, że będzie to znacznie większa część w przypadku mokrej metody odsiarczania niż technologii spalania fluidalnego.

W celu bardziej precyzyjnego oszacowania części zasobów wapieni przydatnych do odsiarczania oraz dokładnego prognozowania jakości wapieni w kolejnych porcjach urobku niezbędne jest skonstruowanie wiarygodnych modeli 3D wszystkich parametrów kryterialnych oraz skonfrontowania ich z potencjalnymi scenariuszami ich wydobycia. Na obecnym etapie rozpoznania tej kopaliny, towarzyszącej złożu węgla brunatnego, nie jest to możliwe ze względu na wysoce niekorzystny system opróbowania rdzeni wiertniczych. Biorąc pod uwagę standardowe wielkości pojedynczych porcji urobku uzyskiwanego ze złóż wapieni, można oczekiwać, że udziały zasobów wapieni przydatnych do odsiarczania gazów ze spalania węgla brunatnego będą nieco większe niż wynika to z oszacowań dla pojedynczych otworów ze względu na większe uśrednienie wartości parametrów wapieni.

WNIOSKI

1. Wyniki przeprowadzonych badań wapieni jurajskich pochodzących ze stałych zboczy wyrobiska Szczerców w złożu węgla brunatnego w Bełchatowie wskazują, że w skali całego rozpatrywanego obszaru średnie wartości parametrów jakości wapieni spełniają wymagania odbiorców warunkujące ich przydatność w energetyce jako sorbentów SO₂ do odsiarczania gazów odlotowych,

zarówno z zastosowaniem metody mokrej, jak i technologii spalania fluidalnego.

- Należy się liczyć z tym, że w pewnej części urobku pochodzącego z elementarnych jednostek eksploatacji jakość kopaliny nie będzie spełniać kryteriów odbiorców wskutek dużej zmienności litologicznej wapieni, co wymaga znalezienia innych zastosowań surowcowych.
- Wstępna ocena lokalnej jakości wapieni dokonana na podstawie danych uśrednionych w otworach wiertniczych wykazała, że w przypadku mokrej metody odsiarczania ok. 67%, a w przypadku technologii spalania fluidalnego tylko ok. 49% zasobów wapieni będzie spełniać wymagania stawiane sorbentom SO₂.
- Dotychczasowy stan rozpoznania wapieni jako potencjalnych surowców do produkcji sorbentów można uznać za wystarczający do wstępnej oceny średnich wartości podstawowych parametrów opisujących ich jakość w całej wyznaczonej umownie przestrzeni badań, ale niewystarczający do precyzyjnego prognozowania jakości wapieni w lokalnej skali obserwacji, np. w elementarnych jednostkach wydobywczych lub ich zespołach.
- Precyzyjne oszacowanie zasobów wapieni przydatnych do odsiarczania oraz zadowalająca z punktu widzenia dokładności prognoza jakości wapieni w porcjach urobku uzyskiwanego w trakcie kolejnych postępów eksploatacji jest uwarunkowana skonstruowaniem wiarygodnych modeli 3D wszystkich parametrów kryterialnych oraz skonfrontowaniem ich z potencjalnymi scenariuszami wydobycia wapieni. Z uwagi na drastyczne zróżnicowanie długości próbek odcinkowych na obecnym etapie rozpoznania wapieni skonstruowanie w pełni wiarygodnych modeli 3D parametrów jest niemożliwe.

Pracę zrealizowano w ramach badań statutowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN oraz działalności statutowej AGH Katedry Mineralogii, Petrografii i Geochemii (nr 11.11.140.213) oraz Katedry Geologii Złożowej i Górniczej (nr 11.11.140.161) w 2018 r.

LITERATURA

- ALSTHROM Propywe-Reactivity index. Alsthrum Propywer 1995.
- CIUK E., 1968 – Types of brown coal deposits within coal bearing formation of continental Tertiary of Poland. *W: XXIII Inter. Geol. Congr. Prague.*
- HYCNAR E., 2016 – Structural-textural nature and sorption properties of limestones from the Mesozoic–Neogene contact zone in the Bełchatów deposit. *Miner. Res. Manag.*, **31**, 4: 75–94.
- HYCNAR E., 2018 – The structural and textural characteristics of limestones and the effectiveness of SO₂ sorption in fluidized bed conditions. *Miner. Res. Manag.*, **34**, 1: 5–24.
- HYCNAR E., MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M., RATAJCZAK T., 2018 – Documentation of accompanying minerals on the example of limestones from the Bełchatów lignite deposit (central Poland). *W: Proc. of 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. Albena, Bulgaria, 30 June–8 July 2018: 327–334. Exploration and Mining.*
- RATAJCZAK T., HYCNAR E., 2017 – Kopaliny towarzyszące w złożach węgla brunatnego. T. I. Geologiczno-surowcowe aspekty zagospodarowania kopalni towarzyszących. Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków.
- RATAJCZAK T., MUCHA J., HYCNAR E., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M., JOŃCZYK W., 2015 – Wapień jurajskie w złożu węgla brunatnego Bełchatów – aktualny stan ich rozpoznania jako sorbentów mineralnych. *Gór. Odkryw.*, **56**, 2: 26–33.
- STATGRAPHICS® Centurion XVII User Manual, Statpoint Technologies, Inc., 2014.

SUMMARY

The results of research on Jurassic limestones from the Szczerców excavation slopes in the Bełchatów lignite deposit indicate that their average quality parameters, which determine their usefulness in the energy sector as SO₂ sorbents for flue gas desulphurization, using both the wet method and fluidized bed combustion technology, meet the requirements of recipients. It should be recognized that in certain parts of the mine output, coming from the elementary units of exploitation, the mineral does not meet the customers' criteria due to high lithological variability of the limestone, which requires finding other raw materials uses. The preliminary evaluation of the limestone local quality, based on averaged data from boreholes, shows that approx. 67% of the limestone in the case of wet desulphurization, and only approx. 49% in the case of fluidized bed combustion technology, will

meet the requirements for SO₂ sorbents. The current state of limestone recognition as potential raw materials for the sorbents production can be considered sufficient to pre-estimate the average values of the basic parameters describing their quality in the entire presumed test space, but it is not sufficient to precisely predict the limestone quality on a local observation scale, e.g. in elementary extractor units or their sets. The precise estimation of limestone resources useful for desulphurization and the satisfactory forecast of limestone quality in spoils is conditioned by both the construction of reliable 3D models of all criterion parameters and confronting them with potential scenarios of limestone extraction. Due to the drastic variation in the length of section samples, it is impossible to construct fully reliable 3D models of the parameters at the present stage of limestone recognition.

