

KRUSZYWA MINERALNE

t. 9



Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2026

Kruszywa mineralne

t. 9



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2026

Redaktor naukowy

Wojciech GLAPA

Recenzenci

Magdalena DUCHNOWSKA

Wiesław KOZIOŁ

Redaktor techniczny

Stanisław GANCARZ

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2026

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-8134-020-5

https://doi.org/10.37190/Kruszywa_9

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

SPIS TREŚCI

Alicja BAKALARZ, Magdalena DUCHNOWSKA, Tomasz STEPIEŃ, Badanie wpływu zasolenia wody procesowej na efektywność odwadniania grawitacyjnego szlamów z obróbki bloków kamiennych	5
Magdalena DUCHNOWSKA, Alicja BAKALARZ, Piotr KARWOWSKI, Dobór dawki i rodzaju odczynników do procesu odwadniania grawitacyjnego szlamów z obróbki bloków	17
Andrzej GAŁAŚ, Katarzyna GUZIK, Slávka GAŁAŚ, Sozologiczne problemy gospodarki kruszywem naturalnym w Dolinie Górnej Odry	27
Tomasz GAWENDA, Agata STEMPKOWSKA, Hajime MATSUSHIMA, Yutaka JITSUYAMA, Izabela POLNIASZEK, Dariusz FOSZCZ, Badania kruszyw lekkich wytworzonych z glinek powstałych po płukaniu dolomitu	43
Tomasz GAWENDA, Daniel SARAMAK, Agata STEMPKOWSKA, Dariusz FOSZCZ, Aldona KRAWCZYKOWSKA, Agnieszka SUROWIAK, Oczyszczanie kruszyw z frakcji lekkiej w separatorze w Kopalni Dolomitu w Imielinie	59
Leszek JURDZIAK, Ryszard BŁAŻEJ, Aleksandra RZESZOWSKA, Ekonomia utrzymania taśm w górnictwie skalnym	73
Urszula KAŻMIERCZAK, Magdalena DUCHNOWSKA, Alicja BAKALARZ, Paweł STRZAŁKOWSKI, Michał WOLNY, Wpływ procesu rozdrabniania na skład granulometryczny melafiru	91
Wiesław KOZIOŁ, Ireneusz BAIC, Artur MIROS, Magdalena GRUSZKA-DROSIK, Marek ZAWALSKI, Magnezyt – surowiec strategiczny	103
Zbigniew KRYSA, Robert KRÓL, Radosław ZIMROZ, Od energochłonności kruszenia przez zaawansowaną diagnostykę po cyfrowe rozwiązania – nowoczesne zaplecze badawcze Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii	117
Natalia KUREK, Żaklina KONOPACKA, Dagmara SOLATYCKA, Badanie skuteczności szkoleń okresowych BHP jako elementu systemu zarządzania bezpieczeństwem pracy	129
Łukasz MACHNIAK, Konrad SŁOWIŃSKI, Recykling odpadów budowlanych jako element dywersyfikacji bazy surowcowej do produkcji kruszyw	141
Jerzy MALEWSKI, Efektywność separacji mieszanin wieloskładnikowych	151
Maksymilian OZDOBA, Anna NOWAK-SZPAK, Piotr BORTNOWSKI, Robert KRÓL, Złoże antropogeniczne pogórnice jako źródło kruszyw mineralnych w gospodarce cyrkularnej – potencjał geopolimerów i wodoru	169
Katarzyna PACTWA, Społeczna licencja na działanie elementem strategii sektora górniczego	187
Oskar SMAGA, Sebastian WOJTCZAK, Wykorzystanie kruszyw pomiedziowych do wytwarzania betonowych prefabrykatów formowanych	195
Autorzy	202

CONTENTS

Alicja BAKALARZ, Magdalena DUCHNOWSKA, Tomasz STĘPIEŃ, Study of the impact of process water salinity on the effectiveness of gravity dewatering of sludge from stone processing	5
Magdalena DUCHNOWSKA, Alicja BAKALARZ, Piotr KARWOWSKI, Selection of the dose and type of reagents for the gravity dewatering process of sludge from the processing of blocks	17
Andrzej GAŁAŚ, Katarzyna GUZIK, Slávka GAŁAŚ, Sozological problems of natural aggregate management in the Upper Odra Valley	27
Tomasz GAWENDA, Agata STEMPKOWSKA, Hajime MATSUSHIMA, Yutaka JITSUYAMA, Izabela POLNIASZEK, Dariusz FOSZCZ, Tests on lightweight aggregates produced from clays formed after washing dolomite	43
Tomasz GAWENDA, Daniel SARAMAK, Agata STEMPKOWSKA, Dariusz FOSZCZ, Aldona KRAWCZYKOWSKA, Agnieszka SUROWIAK, Cleansing of aggregates from the light fraction in the separator at the Dolomite Mine in Imielin	59
Leszek JURDZIAK, Ryszard BŁAŻEJ, Aleksandra RZESZOWSKA, Economics of conveyor belt maintenance in aggregate mining	73
Urszula KAŻMIERCZAK, Magdalena DUCHNOWSKA, Alicja BAKALARZ, Paweł STRZAŁKOWSKI, Michał WOLNY, Influence of the grinding process on the geometric composition of melaphyre	91
Wiesław KOZIOŁ, Ireneusz BAIC, Artur MIROS, Magdalena GRUSZKA-DROSIK, Marek ZAWALSKI, Magnesite – a strategic raw material	103
Zbigniew KRYSA, Robert KRÓL, Radosław ZIMROZ, From energy consumption of crushing through advanced diagnostic to digital solutions: modern research infrastructure of the Faculty of Geoengineering, Mining and Geology	117
Natalia KUREK, Żaklina KONOPACKA, Dagmara SOLATYCKA, Effectiveness study of periodic OHS training as an element of the occupational safety management system	129
Łukasz MACHNIAK, Konrad SŁOWIŃSKI, Recycling of construction waste as an element of diversification of the raw material base for aggregate production	141
Jerzy MALEWSKI, Efficiency of the multicomponent mixture separation	151
Maksymilian OZDOBA, Anna NOWAK-SZPAK, Piotr BORTNOWSKI, Robert KRÓL, Anthropogenic post-mining deposits as a source of mineral aggregates in the circular economy – the potential of geopolymers and hydrogen	169
Katarzyna PACTWA, Social license to operate as an element of the mining sector strategy	187
Oskar SMAGA, Sebastian WOJTCZAK, Copper slag aggregates as a component of concrete mixes for the production of prefabricated elements	195
Authors	202

Alicja BAKALARZ
Magdalena DUCHNOWSKA
Tomasz STĘPIEŃ

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

BADANIE WPŁYWU ZASOLENIA WODY PROCESOWEJ NA EFEKTYWNOŚĆ ODWADNIANIA GRAWITACYJNEGO SZLAMÓW Z OBRÓBKİ BŁOKÓW KAMIENNYCH

Prezentowane badania wpływu zasolenia wody technologicznej na efektywność procesu flokulacji w układzie odwadniania grawitacyjnego szlamów kamiennych w osadnikach stożkowych w zakładach obróbki kamienia. Proces flokulacji realizowano przy zmiennych poziomach zasolenia wody procesowej, uwzględniających stałą proporcję jonów chlorkowych i siarczanowych(VI) w wodzie, co odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacyjne wynikające z zamkniętych obiegów wodno-mułowych w zakładach obróbczych. Ocenie poddano wpływ składu jonowego na przebieg flokulacji ziarn mineralnych, klarowność wody nadosadowej oraz skuteczność sedimentacji. Przedstawione badania są istotne z punktu widzenia optymalizacji doboru flokulantów oraz poprawy efektywności odwadniania osadów w warunkach rosnącego zasolenia wód obiegowych. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do ograniczenia zużycia odczynników chemicznych stosowanych w procesach odwadniania odpadów, poprawy stabilności pracy osadników stożkowych oraz zmniejszenia oddziaływania zakładów obróbki kamienia na środowisko wodne.

1. WPROWADZENIE

Istotnym elementem funkcjonowania zakładów obróbki kamienia naturalnego jest efektywne gospodarowanie wodą procesową, która jest wykorzystywana przede wszystkim w operacjach cięcia, szlifowania i polerowania. Woda pełni funkcję chłodzącą, czyszczącą i smarującą oraz ogranicza emisję pyłów do środowiska [1]. Ze względu na znaczące dobowe zużycie wody w tego typu zakładach, wdrażanie systemów zamkniętego obiegu wodno-mułowego stanowi kluczowy element minimalizacji oddziaływania na środowisko i redukcji kosztów eksploatacyjnych [2].

Recyrkulacja obiegu wodno-mułowego w zakładach obróbki kamienia opiera się zazwyczaj na procesie sedimentacji grawitacyjnej i ciśnieniowej, odpowiednio w osadnikach stożkowych i prasach ciśnieniowych [3–4]. Oczyszczona w tych układach woda

jest zwracana i ponownie wykorzystywana w procesie technologicznym. Takie rozwiązania pozwalają na ograniczenie poboru świeżej wody i zmniejszenie ilości ścieków przemysłowych odprowadzanych do środowiska [1]. Średniej wielkości zakład obróbki kamienia naturalnego zużywa ok. 50–150 m³ wody, przy jej stracie na poziomie ok. 20% [5]. Recykling wody ma zasadnicze znaczenie zarówno dla ekonomii zakładu, jak i dla ochrony zasobów wodnych w zakresie ochrony środowiska [6]. Im wyższa efektywność oczyszczania wód w obiegach wodno-mułowych, tym mniejsze zużycie wody świeżej w tych zakładach, co zmniejsza obciążenie środowiska oraz poprawia efektywność ekonomiczną całego procesu technologicznego. Jednocześnie im wyższa skuteczność separacji fazy stałej od ciekłej, tym niższa końcowa zawartość wody w odwodnionym odpadzie, co przekłada się na zmniejszenie jego objętości, masy oraz kosztów transportu i składowania.

Woda, która podlega recyklingowi w zakładach obróbczych, powinna charakteryzować się niską zawartością części stałych, tak aby nie utrudniały one funkcjonowania procesów technologicznych [1, 7–8]. Wysoka zawartość części stałych w wodzie procesowej prowadzi do otrzymania kamienia o niższej jakości, ponieważ zawieszone w wodzie ziarna mogą powodować m.in. zarysowania na powierzchni ciętego, szlifowanego, polerowanego kamienia lub zwiększać zużycie materiałów tnących. W rezultacie czynniki te zmniejszają konkurencyjność producenta na rynku i wpływają na ekonomikę produkcji [1, 6].

Jedną z metod zwiększania efektywności separacji fazy stałej od ciekłej w zakładach obróbki kamienia w układach sedymentacji grawitacyjnej jest proces flokulacji, który polega na wprowadzeniu do zawiesiny odpowiednich odczynników chemicznych (flokulantów), powodujących łączenie się drobnych cząstek w większe agregaty (flokuly) [9]. Powstałe agregaty ziarn mineralnych mają większą masę i szybciej sedymentują, co umożliwia skuteczne oddzielenie fazy stałej od wody i jej ponowne wykorzystanie. Skuteczność procesu flokulacji zależy przede wszystkim od właściwości fizykochemicznych zawiesiny, jak skład mineralny, uziarnienie i zagęszczenie części stałych w zawieszynie. Istotne znaczenie mają również parametry chemiczne wody (pH, zasolenie, twardość), rodzaj i dawka zastosowanego flokulantu, intensywność mieszania [9–10].

Zasolenie wody procesowej jest jednym z kluczowych czynników determinujących efektywność procesu flokulacji ziarn mineralnych z zawieszin w zakładach obróbki i przeróbki surowców mineralnych. Z analizowanych danych literaturowych wynika, że wzrost zasolenia wody procesowej może skutecznie wpłynąć na poprawę efektywności procesu sedymentacji grawitacyjnej w układzie z flokulacją [11]. Na przykład na podstawie badań prowadzonych dla mączek kwarcowo-skaleniovych wykazano, że zastosowanie do procesu flokulacji wody morskiej może wyraźnie zwiększyć skuteczność oddziaływania flokulantu na agregację ziarn mineralnych i powstawanie flokuł [12]. Jednocześnie w niektórych przypadkach zwiększone zasolenie wody procesowej może wpłynąć na skrócenie łańcuchów niektórych flokulantów polimerowych i prowadzić do

pogorszenia jakości procesu sedymentacji ziarn mineralnych. Problem ten jest zwłaszcza istotny w przypadku osadników o dużej powierzchni z punktowym źródłem dozowania odczynnika do procesu [13–14]. Przedstawiona zmienność efektywności procesu flokulacji w zależności od zasolenia wody procesowej wskazuje na konieczność badań nad efektywnością tego procesu w warunkach krajowych zakładów obróbki kamienia, zwłaszcza w kontekście braku szczegółowych badań w tym zakresie w dostępnej literaturze. Wnioski z takich badań mogą wpłynąć na wydajność i kontrolę procesów technologicznych, a tym samym na ograniczenie kosztów produkcji w zakładach obróbki kamienia i wpływu tych zakładów na środowisko, zwłaszcza w kontekście ilości powstających i odwadnianych w zakładach obróbczych i przeróbczych w Polsce drobnoziarnistych odpadów, które stanowią 10% masy obrabianych bloków skalnych [15–16].

2. MATERIAŁY DO BADAŃ I METODYKA

Metodyka badań obejmowała uśrednienie i przygotowanie próbek do badań, analizę optyczną składu ziarnowego i analizę chemiczną badanych próbek odpadów, przygotowanie wody procesowej, a także przeprowadzenie procesu sedymentacji grawitacyjnej połączonego z procesem flokulacji w obecności anionowego flokulantu stosowanego w zakładach obróbki na terenie Dolnego Śląska.

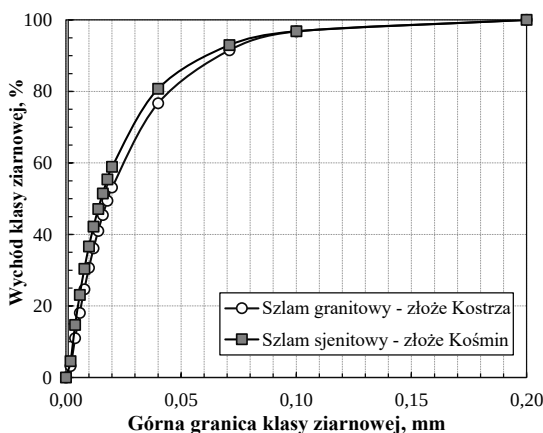
Materiał do badań stanowiły próbki drobnoziarnistych szlamów kamieniarskich powstających podczas wstępnej obróbki bloków. Badano dwa rodzaje materiałów: szlam granitowy, powstały w trakcie cięcia bloków granitowych eksploatowanych ze złoża Kostrza, a także szlam granodiorytowy, powstający podczas cięcia materiałów określanych jako sjenity ze złoża Kośmin. W opisie wyników w pracy zastosowano nomenklaturę historyczno-handlową dla materiału ze złoża Kośmin – szlam sjenitowy, pomimo faktu że skałą macierzystą ze złoża jest granodioryt i formalnie powinno pojawić się określenie szlam granodiorytowy.

Próbki szlamów kamieniarskich pobrano bezpośrednio z wylewów osadników stożkowych z instalacji obiegu wodno-mułowego w zakładach obróbczych. Stanowiły one jednorodną zawiesinę wodno-mineralną o zagęszczeniu części stałych wynoszącym 1950 g/dm^3 . Całkowita masa pobranej pojedynczej próbki wynosiła ok. 60 kg.

Do badań przygotowano wodę procesową o różnym stopniu zasolenia (0, 5, 10 i 20 g/dm^3). Wodę procesową stanowiła mieszanina wody wodociągowej z rozpuszczonymi w niej: chlorkiem sodu (NaCl) oraz bezwodnym siarczanem(VI) wapnia (CaSO_4). Jako chlorku sodu użyto soli kamiennej z Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. o czystości $>99\%$ wag. Jako odpowiednik bezwodnego siarczanu(VI) wapnia zastosowano naturalny odpowiednik tej soli – anhydryt, pozyskany z zasobów materiałów Laboratorium Przeróbki Kopalni Politechniki Wrocławskiej, pochodzący z kopalni Nowy Łąd. Ustalono, że stosunek jonów siarczanowych do jonów chlorkowych będzie wynosił jak 3 do 50, podobnie jak stosunek tych jonów w wodach głębinowych. Zastosowanie naturalnych

składników podczas przygotowania wody procesowej miało na celu w jak największym stopniu zbliżyć jej właściwości fizykochemiczne do właściwości wód krążących w obiegach w zakładach obróbki kamienia.

W pierwszym etapie badań określono skład ziarnowy oraz chemiczny analizowanych odpadów. Skład ziarnowy wyznaczono metodą dyfrakcji laserowej analizatorem Mastersizer 3000 produkcji firmy Malvern Panalytical. Na rysunku 1 przedstawiono skład ziarnowy badanych szlamów kamieniarskich. Próbkę charakteryzowały się bardzo drobnym uziarnieniem – zawartość frakcji $<0,04$ mm wynosiła ponad 80%.



Rys. 1. Skład ziarnowy próbek do badań

Fig. 1. Particle size distribution of waste samples

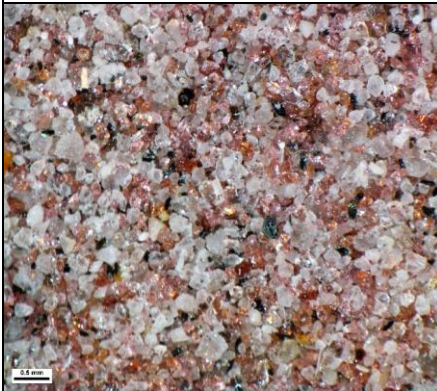
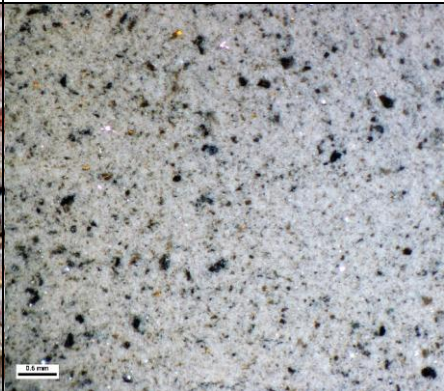
W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny analizowanych szlamów kamieniarskich oraz zdjęcia mikroskopowe pokazujące różnice w składzie mineralnym próbek. Skład chemiczny badanych odpadów oznaczono przy użyciu spektrometru fluorescencji rentgenowskiej EDXRF PANalytical Epsilon 3X produkcji Malvern Panalytical.

Skład chemiczny badanych szlamów kamieniarskich wykazuje wysoką zgodność ze składem petrograficznym i geochemicznym skał macierzystych: granit strzegomski dla szlamu granitowego (złożo Kostrza) i granodioryt z Kośmina dla szlamu sjenitowego. Analiza głównych składników chemicznych jest istotna pod względem rozpuszczalności tych składników w wodzie procesowej. Intensywność tego procesu zależy od rodzaju skały, jej składu mineralnego oraz właściwości wody. Granity będące skałami o dużej zawartości kwarcu i skaleni, a także granodioryty, charakteryzujące się wyższą zawartością plagioklazów, wykazują niską podatność na rozpuszczanie w typowych warunkach obróbki [17], jednak długotrwała cyrkulacja wody procesowej lub wzrost temperatury może prowadzić do zwiększenia stężenia jonów w obiegu wodno-mułowym. Jednocześnie w zakładach, w których stosuje się flokulanty, możliwe jest dalsze zwiększenie zasolenia wody procesowej. Flokulanty, stosowane w celu poprawy sedimentacji frakcji stałych, mogą wprowadzać do obiegu dodatkowe jony oraz modyfikować chemizm

wody, co w połączeniu z naturalnym rozpuszczaniem minerałów przyczynia się do wzrostu zawartości rozpuszczonych soli w obiegu [18]. Skład mineralny rozproszonych w zawieszynie składników mineralnych, zwłaszcza w momencie ich wietrzenia chemicznego, może również istotnie wpłynąć na parametry chemiczne wody procesowej. Przykładowo w przypadku analizowanych próbek, wyższa zawartość tlenków żelaza w nadawie do procesu odwadniania szlamów granitowych związana z wysoką zawartością tlenków żelaza – biotyту, spowodowała zakwaszenie tej zawiesiny. Wartość pH zawiesiny podczas flokulacji dla szlamów granitowych wynosiła 2,9 a dla szlamów sjenitowych pH było zbliżone do obojętnego i wynosiło 6,9.

Tabela 1. Obrazy mikroskopowe i skład chemiczny analizowanych szlamów kamieniarskich

Table 1. Microscopic images and chemical composition of the analyzed stone sludge

	Szlam sjenitowy – złożo Kośmin	Szlam granitowy – złożo Kostrza
		
Składnik	Zawartość, %	
SiO ₂	70,53	59,39
Al ₂ O ₃	13,32	14,08
CaO	1,56	7,30
K ₂ O	4,48	4,38
TiO ₂	0,43	0,68
Fe ₂ O ₃	4,48	6,47
Pozostałe	5,19	7,70

Elementem głównym przeprowadzonych badań był proces sedymentacji grawitacyjnej z flokulacją w wodzie o różnym zasoleniu. Z wydzielonych partii materiału przygotowano próbki przeznaczone do procesu sedymentacji grawitacyjnej wspomaganiej flokulacją w warunkach wody o różnym poziomie zasolenia. Celem tych badań była ocena wpływu zasolenia na skuteczność flokulacji. Proces flokulacji prowadzono w cylindrach miarowych o objętości 250 cm³ z wykorzystaniem anionowego flokulantu polimerowego o nazwie handlowej Superfloc A-100. Zagęszczenie części stałych w nadawie do procesu wynosiło 40 g/dm³. Proces realizowano przy zmiennych poziomach zaso-

lenia wody procesowej, uwzględniających stałą proporcję jonów chlorkowych i siarczanowych(VI) w wodzie, co odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacyjne wynikające z zamkniętych obiegów wodno-mułowych w zakładach obróbczych.

Badania prowadzono dla 4 poziomów zasolenia (0, 5, 10 i 20 g/dm³), natomiast dawkę flokulantu ustalono na podstawie wcześniejszych eksperymentów Autorów na poziomie 8 g/Mg. Podczas badań analizowano kinetykę zmiany położenia granicy mętności w funkcji czasu, monitorując dynamikę sedymentacji ziarn z zawiesiny. Pomiar poziomu granicy mętności prowadzono w regularnych odstępach czasowych. Otrzymane wyniki pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk procesu sedymentacji w warunkach zmiennej zawartości soli w wodzie procesowej, w zależności od składu mineralnego poddawanych sedymentacji osadów.

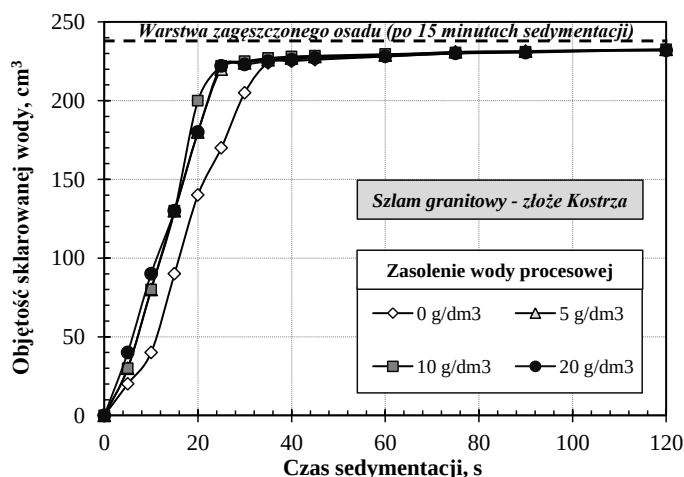
3. WYNIKI BADAŃ

Analizę wyników przeprowadzonych badań oparto na ocenie efektywności procesu sedymentacji na podstawie krzywych kinetyki sedymentacji (tab. 2). Na rysunku 2 przedstawiono kinetykę sedymentacji dla szlamów granitowych z Kostrzy jako funkcję obję-

Tabela 2. Kinetyki sedymentacji szlamów z obróbki kamienia
Table 2. Sedimentation kinetics of sludge from stone processing

Czas sedymentacji, s	Szlam sjenitowy – złożo Kośmin				Szlam granitowy – złożo Kostrza			
	Zasolenie wody procesowej, g/dm ³							
	0	5	10	20	0	5	10	20
	Wysokość słupa sklarowanej wody, cm ³							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20	20	10	20	20	30	30	40
10	30	30	25	25	40	80	80	90
15	50	40	60	50	90	130	130	130
20	80	70	80	85	140	180	200	180
25	110	90	110	140	170	220	222	222
30	145	110	130	170	205	224	225	223
35	170	125	160	210	224	226	227	225
40	195	140	190	218	225	227	228	226
45	216	170	216	219	226	228	229	227
60	220	218	221	220	228	229	230	228
75	222	222	223	223	230	231	231	230
90	223	224	224	224	231	232	231	231
120	226	226	226	226	232	233	233	232
300	230	230,5	232	231	234	235	234	234
900	233	234	234	233	235	238	238	237

tości sklarowanej wody od czasu sedymentacji w warunkach zróżnicowanego zasolenia wody procesowej. Na podstawie analizy krzywych można stwierdzić, że zasolenie wody procesowej istotnie wpływa na efektywność procesu flokulacji. Efekt ten dotyczy przede wszystkim szybkości klarowania cieczy, a w mniejszym stopniu wartości końcowej objętości fazy zsedymetowanej – zagęszczonego osadu.

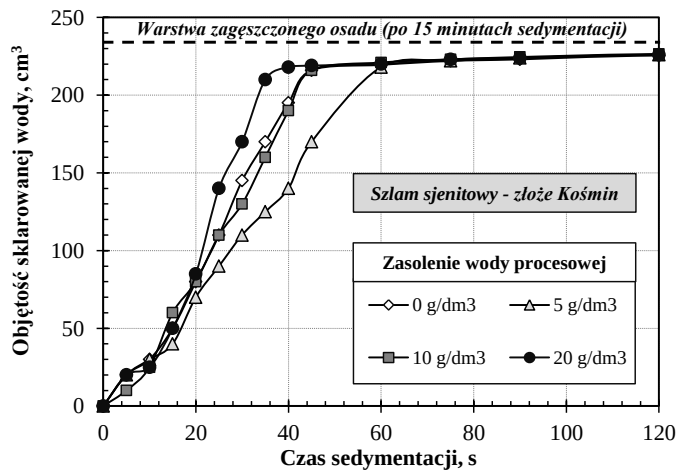


Rys. 2. Krzywe kinetyki sedymentacji dla szlamów granitowych

Fig. 2. Sedimentation kinetics curves for granite sludge

Zwiększenie zasolenia wody procesowej zwiększa efektywność procesu sedymentacji – flokulacji, prowadząc do skrócenia czasu klarowania ziarn z zawiesiny szlamów granitowych przy zachowaniu zbliżonej końcowej objętości fazy zsedymetowanej. Najwyższą efektywność separacji zaobserwowano dla zasolenia wynoszącego 10 g/dm^3 ; zwiększenie zasolenia do poziomu 20 g/dm^3 nie wpłynęło na szybkość klarowania ziarn z zawiesiny i nie miało istotnego wpływu na poprawę procesu sedymentacji. Jednocześnie obserwacje makroskopowe prowadzone podczas eksperymentów wskazują, że przy zwiększonym zasoleniu sklarowana ciecz wykazywała wyższy stopień przejrzystości niż w przypadku niższego zasolenia wody procesowej, co świadczy o skuteczniejszym oddzieleniu cząstek zawiesiny w warunkach podwyższonej siły jonowej roztworu. Analiza przedstawionych wyników dla szlamów granitowych wskazuje, że w praktyce przemysłowej w wyniku optymalizacji składu wody procesowej (jej zasolenia) w kierunku zwiększenia siły jonowej w zakresie umiarkowanym, możliwa jest poprawa efektywności zagęszczania grawitacyjnego, co jednocześnie może wpłynąć na skrócenie czasu retencji zawiesiny odpadów w osadniku stożkowym.

Na rysunku 3 przedstawiono kinetykę sedymentacji dla szlamów sjenitowych z Kośmina. Podobnie jak w przypadku szlamów granitowych, można zauważyć istotny wpływ zasolenia na kinetykę procesu sedymentacji.



Rys. 3. Krzywe kinetyki sedymentacji z flokulacją dla szlamów sjenitowych
 Fig. 3. Sedimentation kinetics curves for syenite sludge

W przypadku szlamów sjenitowych efektywność procesu sedymentacji z flokulacją wzrasta wraz ze wzrostem zasolenia. Im wyższa zawartość soli w wodzie procesowej, tym ziarna z zawiesiny szybciej sedymentują, a sklarowana woda charakteryzuje się lepszą przejrzystością.

Porównując proces sedymentacji grawitacyjnej w obecności flokulantu w warunkach zmiennego zasolenia wody procesowej można stwierdzić, że w przypadku obu badanych próbek wzrost zasolenia znacząco zmniejsza czas sedymentacji ziarn mineralnych ze szlamów kamieniarskich. Jednocześnie zauważono, że proces sedymentacji dla szlamu sjenitowego charakteryzuje się wolniejszą kinetyką w porównaniu do szlamu granitowego, co może wynikać z różnic w składzie granulometrycznym badanych próbek – szlam sjenitowy wykazywał drobniejsze uziarnienie. Niemniej jednak przedstawione wyniki wskazują, że wprowadzenie do wody procesowej pewnej ilości soli może polepszyć jakość procesu sedymentacji grawitacyjnej w układzie z flokulantem.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Optymalizacja właściwości wody procesowej, w szczególności jej zasolenia, znacząco wpływa na efektywność sedymentacji szlamów kamieniarskich. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że umiarkowane zwiększenie siły jonowej roztworu istotnie poprawia efektywność procesu flokulacji i sedymentacji ziarn mineralnych szlamów kamieniarskich. Wzrost zasolenia do poziomu 10–20 g/dm³ prowadzi do wyraźnego skrócenia czasu klarowania zawiesiny – sedymentacji ziarn mineralnych z zawiesi-

ny, a także wyraźnego zwiększenia przejrzystości sklarowanej wody, przy zachowaniu zbliżonej objętości końcowej zagęszczonego osadu. Jednocześnie zauważono, że proces sedymentacji szlamu sjenitowego przebiegał wolniej niż szlamu granitowego, co wynikało z drobniejszego uziarnienia i różnic w składzie mineralnym badanych próbek.

Przedstawione badania są istotne z punktu widzenia optymalizacji doboru flokulantów, jak i poprawy efektywności odwadniania osadów w warunkach rosnącego zasolenia wód obiegowych. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do poprawy stabilności pracy osadników stożkowych oraz zmniejszenia oddziaływania zakładów obróbki kamienia na środowisko wodne. Z punktu widzenia aspektów środowiskowych, optymalizacja zasolenia wody procesowej pozwala na skrócenie czasu sedymentacji grawitacyjnej, ograniczając wymywanie drobnych frakcji mineralnych do wód odpadowych oraz poprawiając jakość wód odprowadzanych z zakładu. W aspekcie ekonomicznym skrócenie czasu sedymentacji i zwiększenie skuteczności flokulacji pozwala na zmniejszenie wymiarów i pojemności osadników, co przekłada się na niższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne związane z utrzymaniem maszyn i zagospodarowaniem odpadów. Należy także zaznaczyć, że użycie w procesie sedymentacji wód o podwyższonym zasoleniu pozwoli ponadto na redukcję ilości dodawanego do procesu odwadniania odczynnika flokulującego, co także wpłynie korzystnie na ekonomikę całego procesu.

Podsumowując, na podstawie przedstawianych wyników można stwierdzić, że kontrola zasolenia wody procesowej może stanowić skuteczną strategię optymalizacji procesu sedymentacji grawitacyjnej w zakładach obróbki kamienia, pozwalając na jednoczesną poprawę wydajności technologicznej, ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko oraz zwiększenie efektywności ekonomicznej operacji odwadniania odpadów.

LITERATURA

- [1] REZAEI N., GHASEMI E., NASIRI SARVI M., *A laboratory investigation for assessing the effectiveness of wastewater treatment using flocculation process in building stone processing industry on stone surface quality and abrasive tool wear*, Discover Civil Engineering, 2024, 1 (1), 57. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00060-4>
- [2] NASSERDINE K., MIMI Z., BEVAN B., ELIAN B., *Environmental management of the stone cutting industry*, Journal of Environmental Management, 2009, 90(1), 466–470, DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.11.004.
- [3] ŁUSZCZKIEWICZ A., LASKOWSKI J., *Przeróbka kopalin: wzbogacanie surowców mineralnych*, Oficyna Wydawnicza PWR, 1989.
- [4] METSO:OUTOTEC, *Basics in Minerals Processing*, 2021, Edition 12, https://www.metso.com/globalassets/insights/ebooks/mo-basics-in-mineral-processing-handbook_lowres.pdf
- [5] ONEN V., BEYAZYUZ P., YEL E., *Removal of turbidity from travertine processing wastewaters by coagulants, flocculants and natural materials*, Mine Water and the Environment, 2018, 37, 482–492, <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0499-4>

- [6] SOLAK M., KILIÇ M., HÜSEYİN Y., ŞENCAN A., *Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: comparison of electrode materials and electrode connection systems*, Journal of Hazardous Materials, 2009, 172, 345–352, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.018>.
- [7] ERSOY B., TOSUN I., GÜNAY A., DIKMEN S., *Turbidity removal from wastewaters of natural stone processing by coagulation/flocculation methods*, CLEAN-Soil, Air, Water, 2009, 37 (3), 225–232, <https://doi.org/10.1002/clen.200800209>
- [8] TUĞBA T., KURAMA H., *Fine particle removal from natural stone processing effluent by flocculation*, Environmental Progress & Sustainable Energy, 2013, 32 (2), 317–324.
- [9] OZUN S., AGIRTMIS D.U., *An Investigation on the Turbidity Removal from Natural Stone Processing Plant Wastewater by Flocculation*, Inżynieria Mineralna, 2020, 2 (1), 157–162, <http://doi.org/10.29227/IM-2020-01-58>
- [10] DRZYMAŁA J., 2009, *Podstawy mineralurgii*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2009.
- [11] JI Y., LU Q., LIU Q., ZENG H., *Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculants*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 430, 29–38, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.04.006>
- [12] RAMOS J., PICEROS E., MEDINA T.D., ROBLES P., QUEZADA G.R., LEIVA W., JELDRES R.I., *Fractionated Anionic PAM Dosing Under High Salinity: Controlling Floc Growth and Stability*, 2025, Polymers, 18 (1), 50, <https://doi.org/10.3390/polym18010050>.
- [13] JELDRES R.I., PICEROS E.C., LEIVA W.H., TOLEDO P.G., HERRERA N., *Viscoelasticity and Yielding Properties of Flocculated Kaolinite Sediments in Saline Water*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 529, 1009–1015, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.07.006>
- [14] FAWELL P.D., NGUYEN T.V., SOLNORDAL C.B., STEPHENS D.W., *Enhancing Gravity Thickener Feedwell Design and Operation for Optimal Flocculation through the Application of Computational Fluid Dynamics*, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2021, 42 (7), 496–510, <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1678156>
- [15] STRZAŁKOWSKI P., *Characteristics of waste generated in dimension stone processing*, Energies, 2021, 14 (21), 7232, <https://doi.org/10.3390/en14217232>.
- [16] STRZAŁKOWSKI P., DUCHNOWSKA M., BAKALARZ A., GUZIK K., RATAJCZAK T., KAŻMIERCZAK U., GALOS K., *Properties of fine-grained rock waste from the production of granite elements in the Strzegom region, Poland – a case study*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2025, 61 (2), 204398, DOI: 10.37190/ppmp/204398.
- [17] GANOR J., ROUEFF E., EREL Y., BLUM J.D., *The dissolution kinetics of a granite and its minerals – implications for comparison between laboratory and field dissolution rates*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69 (3), 607–621.
- [18] MORENO-CHAVEZ J., *Effect of electrolyte concentration in process water on flocculation*, Journal of the Mexican Chemical Society, 2020, 64 (1), 14–29, <https://doi.org/10.29356/jmcs.v64i1.720>

STUDY OF THE IMPACT OF PROCESS WATER SALINITY ON THE EFFECTIVENESS OF GRAVITY DEWATERING OF SLUDGE FROM STONE PROCESSING

The article presents research on the influence of process water salinity on the efficiency of the flocculation process in the gravity dewatering system of stone sludge in conical settlement tanks used in natural stone processing plants. The flocculation process was carried out at variable levels of process water salinity, taking into account the constant proportion of chloride and sulfate(VI) ions in the water, which reflects the actual operating conditions resulting from closed water-sludge circuits in processing plants. The influence of the ionic composition of water on the course of flocculation of

mineral grains, clarity of supernatant water and sedimentation efficiency was assessed. The presented research is important for optimizing the selection of flocculants and improving the efficiency of sludge dewatering under conditions of increasing salinity in circulating waters. The obtained results may contribute to reducing the consumption of chemical reagents used in dewatering processes, improving the operational stability of conical settlement tanks, and reducing the impact of stone processing plants on the aquatic environment near the processing plants.

Magdalena DUCHNOWSKA
Alicja BAKALARZ
Piotr KARWOWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

DOBÓR DAWKI I RODZAJU ODCZYNNIKÓW DO PROCESU ODWADNIANIA GRAWITACYJNEGO SZLAMÓW Z OBRÓBKİ BŁOKÓW

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących doboru rodzaju i dawki flokulantu do procesu odwadniania grawitacyjnego szlamów kamieniarskich w osadnikach stożkowych w zakładach obróbki kamienia. Analizie poddano skuteczność wybranych odczynników różniących się charakterem chemicznym, w tym flokulantów anionowych i kationowych, na proces sedymentacji grawitacyjnej. Zróżnicowane właściwości fizykochemiczne flokulantów mogą w istotny sposób wpływać na przebieg procesu flokulacji, kinetykę sedymentacji oraz stopień klarowania wody nadosadowej. Badania doboru optymalnej dawki i rodzaju flokulantu są kluczowe dla zapewnienia stabilnej pracy układu odwadniania odpadów z obróbki skał, ograniczenia nadmiernego zużycia odczynników chemicznych oraz poprawy efektywności zagęszczania grawitacyjnego. Istotnym aspektem przedstawionych w pracy zagadnień są również uwarunkowania środowiskowe, uwzględniające takie aspekty środowiskowe, jak zmniejszenie ilości powstających odpadów, możliwość ponownego wykorzystania wody procesowej, minimalizację zużycia odczynników w zakładach obróbczych, a także minimalizację wpływu tych odczynników na środowisko zewnętrzne przy uwzględnieniu częściowo otwartych obiegów wodno-mułowych i zrzutów wody procesowej do cieków wodnych.

1. WPROWADZENIE

Proces technologicznej obróbki granitoidów realizowany w celu wytwarzania elementów kamiennych (m.in. płyt okładzinowych, krawężników, kostki brukowej czy detali architektonicznych) i kruszyw łamanych, wiąże się z generowaniem znacznych ilości odpadów mineralnych w postaci szlamów kamieniarskich [1–2]. Szacuje się, że w zależności od zastosowanej technologii (np. piły linowe diamentowe, traki wielotar-czowe), parametrów operacyjnych oraz jakości i spękania surowca, ubytek materiału może wynosić od ok. 5% do nawet 30% objętości pierwotnego bloku [3–4].

Szlamy kamieniarskie stanowią mieszaninę drobnouziarnionych ziarn mineralnych i wody procesowej, często zawierającej dodatki chemiczne stosowane w procesach ob-

róbczych. Ze względu na wysoką zawartość frakcji ilastych i pylastych, a także dużą wilgotność, szlamy charakteryzują się utrudnioną sedymentacją i odwadnianiem, co generuje problemy logistyczne, ekonomiczne oraz środowiskowe. Szlamy te stanowią najczęściej materiał odpadowy, który przed utylizacją musi być odwodniony, najczęściej w układzie odwadniania grawitacyjnego w osadnikach stożkowych i odwadniania ciśnieniowego w prasach filtracyjnych [2].

Jednym z procesów szeroko stosowanych w obróbce i przeróbce skał, który zwiększa efektywność procesu sedymentacji ziarn mineralnych w zawiesinach, a jednocześnie charakteryzuje się wysoką skutecznością, jest flokulacja [5]. Proces ten polega na łączeniu drobnych ziarn mineralnych w zawiesinie w agregaty (flokuly) poprzez adsorpcję na powierzchni tych ziarn polimerowych odczynników – flokulantów [6–7]. Zróżnicowane właściwości fizykochemiczne flokulantów mogą w istotny sposób wpływać na przebieg procesu flokulacji, kinetykę sedymentacji oraz stopień klarowania wody nadosadowej. Badania doboru optymalnej dawki i rodzaju flokulantu są kluczowe dla zapewnienia stabilnej pracy układu odwadniania, ograniczenia nadmiernego zużycia odczynników chemicznych oraz poprawy efektywności zagęszczania grawitacyjnego. W ostatnich latach przeprowadzono wiele badań mających na celu określenie optymalnych warunków procesu flokulacji w układach oczyszczania wód procesowych w zakładach obróbki bloków kamiennych. W badaniach tych (głównie laboratoryjnych) analizowano między innymi wpływ parametrów fizykochemicznych zawiesiny oraz parametrów procesowych na efektywność flokulacji, w tym rodzaj stosowanych do procesu flokulantów (anionowych, kationowych, niejonowych), a także wpływ dawki tych odczynników i ich masy cząsteczkowej na szybkość sedymentacji oraz przejrzystość sklarowanej wody [5, 8–11]. Większość tych badań skupiała się na badaniach prowadzonych dla skał osadowych, głównie marmurów, dolomitów lub materiałów rudnych [12]. Niewiele jest dostępnych informacji na temat sedymentacji osadów z cięcia skał granitoidowych [9], a zwłaszcza prac dotyczących krajowej bazy surowcowej. Większość prac dotyczących krajowych surowców opiera się na surowcach pierwotnych – mączkach kwarcowych i skaleniowych czy kaolinie [13–15]. W literaturze praktycznie nie porusza się tej tematyki w odniesieniu do materiałów odpadowych, zwłaszcza tak zróżnicowanych mineralnie jak w zakładach obróbczych kamieni. Dlatego przedstawione w pracy wyniki są istotne z naukowego punktu widzenia i mogą stanowić podstawę do opracowania bardziej efektywnych i ekonomicznie uzasadnionych rozwiązań technologicznych w gospodarce odpadami rodzimego przemysłu kamieniarskiego, przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu tych rozwiązań na środowisko naturalne.

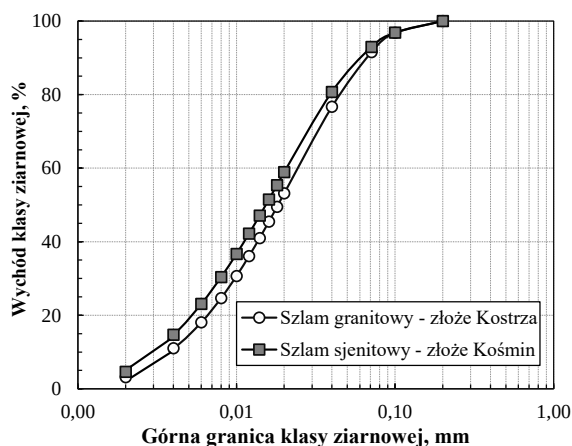
2. MATERIAŁY DO BADAŃ I METODYKA

Materiał do badań stanowiły próbki drobnoziarnistych odpadów skalnych (szlamów kamieniarskich) powstających podczas obróbki wstępnej bloków granitowych i sjeni-

towych piłami linowymi i tarczowymi. Szlam granitowy powstał podczas cięcia bloków granitowych eksploatowanych ze złoża Kostrza, natomiast szlam określany jako sjenitowy, pochodził z obróbki bloków ze złoża Kośmin.

Odpady pobrano z instalacji obiegu wodno-mułowego zakładów obróbczych, bezpośrednio z wylewów osadników stożkowych, w których następowała sedymentacja grawitacyjna frakcji stałej oddzielanej od wody procesowej. Materiały do badań miały postać jednorodnej zawiesiny wodno-mineralnej o zagęszczeniu na poziomie ok. $1,95 \text{ g/cm}^3$. Całkowita masa pobranej pojedynczej próbki wynosiła ok. 60 kg. Metodyka badań obejmowała uśrednienie i przygotowanie próbek do badań, klasyfikację mechaniczną i analizę chemiczną badanych próbek odpadów, a także przeprowadzenie procesu sedymentacji grawitacyjnej połączonego z procesem flokulacji w obecności kationowych i anionowych flokulantów wraz z analizą wpływu zmienności dawki flokulantu na efektywność procesu.

W pierwszym etapie badań określono skład ziarnowy i chemiczny badanych odpadów. Skład ziarnowy oznaczono metodą dyfrakcji laserowej analizatorem Mastersizer 3000 produkcji firmy Malvern Panalytical. Na rysunku 1 przedstawiono skład granulometryczny badanych odpadów. Badane szlamy kamieniarskie charakteryzowały się bardzo drobnym uziarnieniem z zawartością najdrobniejszych frakcji ziarnowych $<0,02 \text{ mm}$ na poziomie wynoszącym ponad 50%.

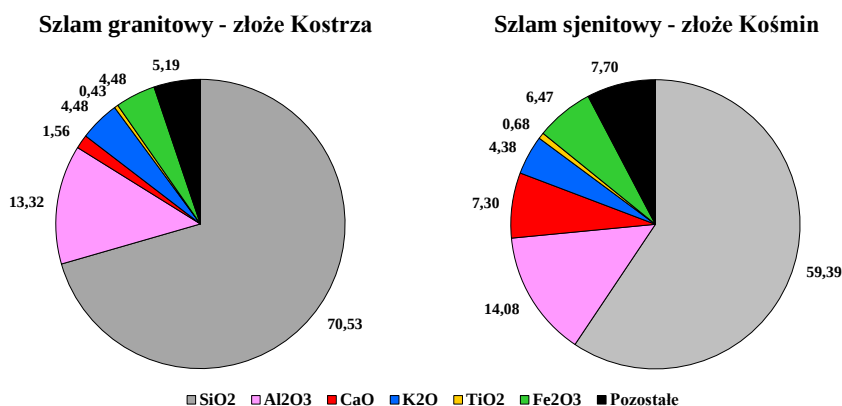


Rys. 1. Skład ziarnowy próbek do badań

Fig. 1. Particle size distribution of waste samples

W kolejnym etapie badań określono skład chemiczny badanych odpadów przy użyciu spektrometru fluorescencji rentgenowskiej EDXRF PANalytical Epsilon 3X produkcji Malvern Panalytical (rys. 2). Skład chemiczny szlamu granitowego pochodzącego z Kostrzy wykazuje wysoką zgodność ze składem petrograficznym i geochemicznym skały macierzystej – granitu strzegomskiego. Oznacza to, że proces cięcia bloków nie

spowodował istotnej zmiany proporcji podstawowych składników chemicznych, a powstały odpad stanowi drobnoziarnistą reprezentację litologii pierwotnej. Analogiczną zależność stwierdzono w przypadku szlamu określanego jako sjenitowy, pochodzącego z Koźmina. Jego skład chemiczny odpowiada składowi skały macierzystej eksploatowanej w tym złożu. Należy jednak podkreślić, że skały klasyfikowane handlowo i historycznie jako sjenity z Koźmina w ujęciu petrograficznym odpowiadają granodiorytom. Ma to istotne znaczenie przy interpretacji wyników analiz mineralnych i chemicznych, zwłaszcza w analizie rzeczywistych proporcji pomiędzy kwarcem a skałeniami.



Rys. 2. Główne składniki chemiczne badanych szlamów

Fig. 2. Main chemical components of the sludge samples

W kolejnym etapie badań z wydzielonych partii materiału przygotowano próbki przeznaczone do procesu sedymentacji grawitacyjnej wspomaganej flokulacją. Celem zastosowania odczynników flokulujących było zwiększenie efektywności rozdziału fazy stałej od ciekłej poprzez intensyfikację agregacji drobnych cząstek mineralnych i przyspieszenie ich opadania w polu sił grawitacyjnych.

Proces flokulacji prowadzono z wykorzystaniem flokulantów polimerowych o charakterze kationowym oraz anionowym, dobranych z uwagi na zróżnicowane właściwości powierzchniowe cząstek zawieszonych w badanych szlamach.

Proces sedymentacji grawitacyjnej prowadzono w cylindrach miarowych o objętości 250 cm³. Zawiesiny przygotowywano w taki sposób, aby zawartość fazy stałej wynosiła 10 g na objętość cylindra, co zapewniało powtarzalne warunki początkowe oraz porównywalność wyników pomiarów szybkości opadania i stopnia klarowania przygotowanych zawiesin. Charakterystykę zastosowanych flokulantów przedstawiono w tabeli 1. Odczynniki chemiczne dobrano na podstawie analizy preparatów stosowanych w zakładach obróbki kamienia zlokalizowanych w rejonie masywu strzegomskiego, co pozwoliło na uwzględnienie uwarunkowań technologicznych typowych dla lokalnych instalacji obróbczych. W przypadku szlamów pochodzących z obróbki skał

określanych jako sjenitowe badania objęły dwa flokulanty o charakterze kationowym oraz dwa o charakterze anionowym. Natomiast dla szlamów granitowych ze złoża Kostrza zakres badań rozszerzono do trzech flokulantów anionowych, z uwagi na niską efektywność wcześniej wytypowanych odczynników. Takie podejście umożliwiło identyfikację odczynników chemicznych zapewniających najwyższą efektywność destabilizacji zawiesiny i intensyfikację kinetyki sedymentacji ziarn mineralnych z tej zawiesiny. Badania prowadzono w wodzie wodociągowej.

Tabela 1. Zestawienie użytych w badaniach odczynników

Table 1. List of reagents used in the experiments

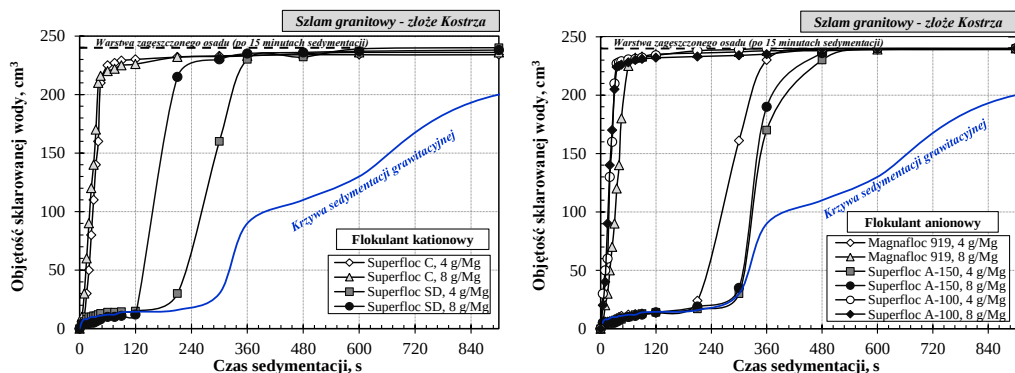
Nazwa flokulantu	Skład/dodatkové składniki	Postać odczynnika	Inne cechy
Odczynniki kationowe			
Superfloc C-496HMW	poliakrylamid kationowy/kwas adypinowy, kwas cytrynowy (max 9,9%)	ciało stałe, krystaliczny, proszek, białawy	wysoki ciężar cząsteczkowy
Superfloc SD-2081	poliakrylamid kationowy/alkany C ₁₁ –C ₁₄ max 25%, alkohole C ₁₀ –C ₁₆ max 2,99%, kwas cytrynowy max 3%	ciecz, emulsja, nieprzejrzysta	
Odczynniki anionowe			
Magnafloc 919	kopolimer poliakrylamidu anionowego, b.d.	ciało stałe, proszek, biały	bardzo wysoki ciężar cząsteczkowy
Superfloc A-100	poliakrylamid anionowy, b.d.	ciało stałe, proszek granulowany, biały	wysoki ciężar cząsteczkowy
Superfloc A-150		ciało stałe, proszek, biały	bardzo wysoki ciężar cząsteczkowy

3. WYNIKI BADAŃ

Ocenę wyników sedymentacji grawitacyjnej z flokulacją dla badanych próbek wykonano w oparciu o analizę porównawczą efektywności procesu sedymentacji na krzywych kinetyki sedymentacji. Na rysunku 3 przedstawiono krzywe kinetyki sedymentacji dla szlamów kamieniarskich otrzymanych podczas obróbki bloków granitowych w obecności flokulantów kationowych i anionowych, przy zróżnicowanych dawkach tych odczynników (4 i 8 g/Mg). Na wykresach zestawiono również wynik procesu sedymentacji grawitacyjnej bez dodatku flokulantu. Na podstawie analizy krzywych separacji można stwierdzić, że w przypadku szlamów granitowych dodatek do procesu polimerów istotnie intensyfikuje sedymentację ziarn mineralnych w porównaniu do standardowej sedymentacji grawitacyjnej tych zawiesin. W przypadku

flokulantów kationowych największy wpływ na szybkość sedymentacji ziarn mineralnych miał odczynnik Superfloc C-496HMW, przy niewielkim wpływie dawki tego odczynnika na szybkość opadania ziarn – bardzo podobny przebieg krzywych. Wyraźnie słabsze działanie flokujące wykazał drugi z badanych odczynników kationowych Superfloc SD-2081, przy czym im wyższa użyta dawka tego odczynnika, tym sedymentacja ziarn zachodziła szybciej.

W przypadku flokulacji szlamów granitowych w obecności flokulantów anionowych można zauważyć, że najefektywniej na proces sedymentacji ziarn wpłynął Superfloc A-100, niezależnie od użytej dawki do procesu. Nieznacznie gorsze wyniki otrzymano dla Magnafloc 919, którego dodano do zawiesiny w dawce 8 g/Mg. W przypadku pozostałych testów flokulacji z użyciem odczynników anionowych odnotowano wyraźnie niższą efektywność procesu klarowania i mniej dynamiczną sedymentację ziarn. Porównując wpływ flokulantów anionowych i kationowych na proces sedymentacji szlamu granitowego można stwierdzić, że najkrótszy czas sedymentacji i najbardziej strome nachylenie krzywych w początkowym etapie procesu zachodzi w obecności flokulantu Superfloc A-100 z grupy odczynników anionowych.

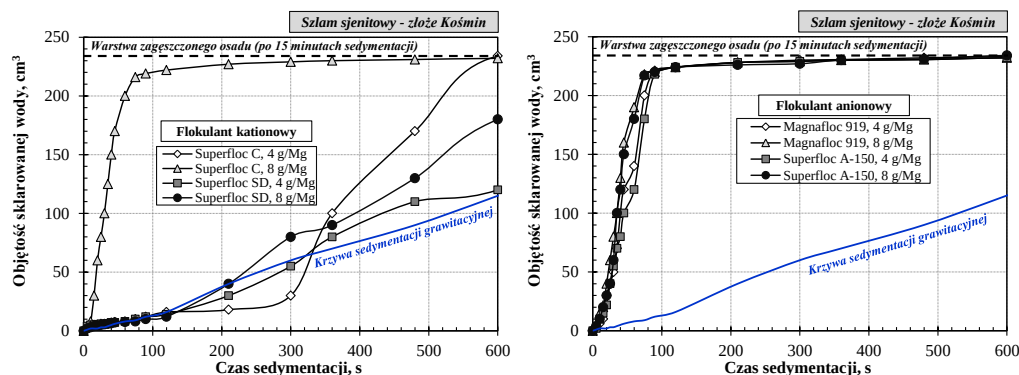


Rys. 3. Krzywe kinetyki sedymentacji szlamów granitowych

Fig. 3. Sedimentation kinetics curves for granite sludge

W przypadku analizy wyników sedymentacji z flokulacją dla szlamów sjenitowych (rys. 4) można zauważyć, że flokulanty kationowe wykazują wyraźnie niższą stabilność procesową niż odczynniki anionowe. Wśród badanych flokulantów kationowych jedynie Superfloc C-496HMW podany w wyższej dawce (8 g/Mg) istotnie poprawił proces sedymentacji ziarn w zawieszynie szlamów sjenitowych. W przypadku flokulantów anionowych zauważono, że efektywność procesu sedymentacji przy wysokiej klarowności wody nadosadowej utrzymuje się przy wyższych dawkach (8 g/Mg) obu badanych odczynników (Magnafloc 919 i Superfloc A-150). Należy równocześnie zaznaczyć, że dla wszystkich czterech testów sedymentacji z flokulacją w obecności flokulantów

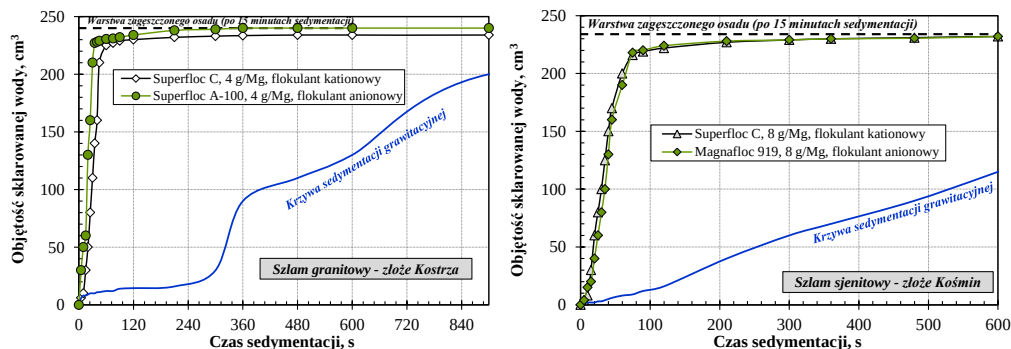
anionowych odnotowano wyraźne polepszenie kinetyki sedymentacji w porównaniu ze swobodnym opadaniem ziarn w warunkach bezodczynnikowych.



Rys. 4. Krzywe kinetyki sedymentacji szlamów sjenitowych

Fig. 4. Sedimentation kinetics curves for syenite sludge

Na podstawie porównania obu układów można stwierdzić, że w analizowanych warunkach większą efektywność działania wykazują flokulanty anionowe, które wyraźnie przyspieszają proces sedymentacji przy jednoczesnym otrzymywaniu wody sklarowanej o wyższej przejrzystości niż w przypadku flokulantów kationowych i procesu sedymentacji grawitacyjnej bez flokulacji. Może to sugerować, że powierzchnie ziarn mineralnych obecnych w szlamach kamieniarskich posiadają prawdopodobnie dodatni lub słabo ujemny ładunek, co w badanym zakresie pH (szlam sjenitowy pH 6,9, a szlam granitowy pH 2,9) może sprzyjać skutecznej adsorpcji flokulantów anionowych na powierzchni tych ziarn mineralnych i tworzeniu się stabilnych flokuł.



Rys. 5. Porównanie efektywności sedymentacji szlamów granitowych i sjenitowych

Fig. 5. Comparison of the sedimentation efficiency of granite and syenite sludge

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących doboru rodzaju i dawki flokulantu do procesu odwadniania grawitacyjnego szlamów kamieniarskich powstających podczas obróbki wstępnej bloków granitowych (ze złoża Kostrza) i sjenitowych (ze złoża Kośmin). Analizie poddano skuteczność działania wybranych odczynników flokulujących różniących się charakterem chemicznym (flokulanty kationowe i anionowe) na proces sedymentacji grawitacyjnej dwóch próbek odpadów skalnych.

Flokulanty anionowe wykazały wyższą efektywność klarowania, bardziej dynamiczny przebieg procesu, a także powstanie stabilnych flokuł. Ponadto analiza kinetyki sedymentacji wykazała, że zarówno w przypadku szlamów granitowych, jak i sjenitowych, wzrost dawki flokulantu do poziomu 8 g/Mg wyraźnie polepszył efektywność procesu sedymentacji grawitacyjnej i pozwolił na uzyskanie wody nadosadowej o wysokim stopniu przejrzystości. W przypadku flokulantów kationowych proces odwadniania charakteryzuje się niższą stabilnością i większą wrażliwością procesową działania na zmianę dawki odczynnika. Generalnie można stwierdzić, że zbadane flokulanty o dodatnim ładunku mają słabszy wpływ na proces flokulacji obu badanych próbek szlamów w porównaniu z flokulantami ujemnie naładowanymi.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wskazać, że zastosowanie flokulantów polimerowych w procesie sedymentacji grawitacyjnej granitoidowych szlamów kamieniarskich istotnie zwiększa efektywność separacji ziarn mineralnych od wody procesowej. Dodatek flokulantów do procesu przyspiesza opadanie ziarn mineralnych, skraca czas klarowania wody nadosadowej oraz poprawia jej przejrzystość. Dla zakładów obróbki kamienia oznacza to możliwość szybszego obiegu wody procesowej, zmniejszenia objętości powstających odpadów, a także poprawę stabilności pracy układów oczyszczania wody procesowej. W warunkach zmienności składu mineralnego szlamów kamieniarskich, na przykład przy naprzemiennym lub równoczesnym cięciu granitów i sjenitów w zakładzie obróbczym, optimum procesu odwadniania grawitacyjnego wynikające ze stabilności procesu flokulacji będzie zapewnione wyłącznie w obecności flokulantu anionowego.

Przedstawione w pracy wyniki mają bezpośrednie znaczenie praktyczne dla zakładów obróbki kamienia, ponieważ pozwalają na dobór optymalnego rodzaju i dawki flokulantu w sposób ograniczający ryzyko destabilizacji procesu przy zmianach parametrów obrabianych surowców mineralnych.

W warunkach przemysłowych, gdzie skład mineralny szlamów zmienia się wraz z rodzajem ciętego kamienia, wybór bardziej uniwersalnego i stabilnego flokulantu (anionowego, w dawce ok. 8 g/Mg) może ograniczyć konieczność częstych zmian dozowania odczynników, zminimalizować zawartość ziarn mineralnych w wodzie procesowej obiegu, co z kolei ma istotny wpływ na dalsze etapy procesu – np. na dokładność obróbki powierzchni.

Optymalny dobór odczynników do procesu sedymentacji grawitacyjnej przekłada się na stabilniejszą pracę układów recyrkulacji wody, niższe koszty eksploatacyjne, więk-

szą przewidywalność całego procesu technologicznego, a także obniża negatywne efekty oddziaływania tych zakładów na środowisko.

LITERATURA

- [1] DUCHNOWSKA M., BAKALARZ A., ŁUSZCZKIEWICZ A., *Properties of Fine-Grained Rock Waste from the Pilawa Gorna Amphibolite and Migmatite Aggregates Production Plant*, 2023, Minerals, 13 (3), <https://doi.org/10.3390/min13030345>
- [2] STRZAŁKOWSKI P., DUCHNOWSKA M., BAKALARZ A., GUZIK K., RATAJCZAK T., KĄZMIERCZAK U., GALOS K., *Properties of fine-grained rock waste from the production of granite elements in the Strzegom region, Poland—a case study*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2025, 61 (2), 204398, <https://doi.org/10.37190/ppmp/204398>
- [3] SABOYA J.F., XAVIER G.C., ALEXANDRE J., *The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic*, Construction and Building Materials, 2007, 21, 1950–1960, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029>
- [4] VIJAYALAKSHMI M., SEKAR A.S.S., PRABHU G.G., *Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste*, Construction and Building Materials, 2013, 46, 1–7, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>
- [5] REZAEI N., GHASEMI E., NASIRI SARVI, M., *A laboratory investigation for assessing the effectiveness of wastewater treatment using flocculation process in building stone processing industry on stone surface quality and abrasive tool wear*, Discover Civil Engineering, 2024, 1 (1), 57, <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00060-4>.
- [6] DRZYMAŁA J., *Podstawy mineralurgii*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2009.
- [7] ŁUSZCZKIEWICZ A., LASKOWSKI J., *Przeróbka kopalin: wzbogacanie surowców mineralnych*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 1989.
- [8] ARSLAN E.I., ASLAN S., IPEK U., ALTUN S., YAZICIOĞGU S., *Physico-chemical treatment of marble processing wastewater and the recycling of its sludge*, Waste Management and Research, 2005, 23 (6), 550–559, <https://doi.org/10.1177/0734242X05059668>
- [9] BASARAN H.K., TASDEMIR T., *Determination of flocculation characteristics of natural stone powder suspensions in the presence of different polymers*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2014, 50 (1), 169–184, <https://doi.org/10.5277/ppmp140115>
- [10] EHTESHAMI M., MAGHSOODI S., YAGHOOBIA E., *Optimum turbidity removal by coagulation/flocculation methods from wastewaters of natural stone processing*, Desalination and Water Treatment, 2016, 57 (44), 20749–20757, <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1110725>
- [11] ERSOY B., TOSUN I., GÜNAY A., DIKMEN S., *Turbidity removal from wastewaters of natural stone processing by coagulation/flocculation methods*, Clean-Soil, Air, Water, 2009, 37 (3), 225–232, <https://doi.org/10.1002/clen.200800209>
- [12] PARK J.H., OH C., HAN Y.S., JI S.W., *Optimizing the addition of flocculants for recycling mineral-processing wastewater*, Geosystem Engineering, 2016, 19 (2), 83–88, <https://doi.org/10.1080/12269328.2015.1099478>
- [13] LEWICKA E., *Innowacyjne technologie pozyskiwania ważniejszych surowców ceramicznych i szklarskich*, Górnictwo Odkrywkowe, 2013, 54 (5–6), 66–72.
- [14] KANIEWSKA A., *Optymalizacja dozowania flokulantów w procesie sedymentacji zawiesiny kaolinu*, Ekologia i Technika, 2015, 23(3), 111–115.
- [15] ŠULC R., DITL P., *The effect of flocculent dosage onto flocculation kinetics*, Czasopismo Techniczne. Mechanika, 2008, 105, 341–349.

SELECTION OF THE DOSE AND TYPE OF REAGENTS
FOR THE GRAVITY DEWATERING PROCESS OF SLUDGE
FROM THE PROCESSING OF BLOCKS

The article presents the results of research on the selection of the type and dose of flocculant for the gravity dewatering process of sludge from stone block processing in conical settlement tanks in stone processing plants. The effectiveness of selected reagents differing in chemical nature, including anionic and cationic flocculants, on the gravity sedimentation process was analyzed. The diverse physicochemical properties of flocculants can significantly affect the flocculation process, sedimentation kinetics, and the degree of supernatant clarification. Research into the selection of the optimal dose and type of flocculant is crucial to ensure stable operation of the dewatering system, reduce excessive consumption of chemical reagents, and improve the efficiency of gravity thickening. An important aspect of the issues presented in the paper are also environmental conditions, taking into account such environmental aspects as reducing the amount of waste generated, the possibility of reusing process water, minimizing the consumption of reagents in processing plants, and minimizing the impact of these reagents on the external environment, taking into account partially open water-sludge circuits and discharges of process water into watercourses.

Andrzej GAŁAŚ¹
Katarzyna GUZIK¹
Slávka GAŁAŚ²

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

² AGH w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

SOZOLOGICZNE PROBLEMY GOSPODARKI KRUSZYWEM NATURALNYM W DOLINIE GÓRNEJ ODRY

W Dolinie Górnej Odry znajdują się liczne złoża czwartorzędowych piasków i żwirów o różnym stopniu zagospodarowania. Jednocześnie, jak każda duża dolina rzeczna, jest to ważny szlak migracji zwierząt a szczególnie ptaków. W artykule scharakteryzowano możliwości zagospodarowania zasobów naturalnych Doliny Górnej Odry na odcinku od granicy Czech po Kędzierzyn-Koźle. Ukryte pod powierzchnią zasoby geologiczne, nie mogą być skutecznie wykorzystane ze względu na liczne formy ochrony przyrody oraz zagospodarowanie powierzchni. W dolinie istnieją liczne miejscowości i gospodarstwa rolne. Powódzie z lat 1997 i 2010 oprócz katastrofalnych strat gospodarczych spowodowały, odsunięcie się zabudowy od rzeki, wysiedlenie kilku osad oraz budowę suchego polderu Racibórz Dolny. To z kolei spowodowało wzrost wykorzystania kruszyw naturalnych. Wydobycie kruszyw z czaszy suchego polderu zwiększyło jego pojemność powodziową o 14%. Z przeprowadzonej analizy wynika, że dalszy rozwój wydobywania kruszyw z dna doliny Odry jest zgodny z zasadami sozologii, o przedłużeniu trwałości użytkowania zasobów przyrodniczych. Tym bardziej, że górnictwo powoduje zwiększenie bezpieczeństwa mieszkańców w dolinie Odry, co nie zawsze jest doceniane.

1. WPROWADZENIE

Dolina Górnej Odry ostatecznie ukształtowana na przełomie plejstocenu i holocenu została poddana długotrwałej presji człowieka. Przemodelowanie koryta, silna ingerencja w terasy rzeki nastąpiła poprzez wylesienie, gospodarkę rolną, budowę stawów hodowlanych, a w XX i XXI w. przez eksploatację kruszyw naturalnych. Dostęp do wody i żyznych gleb oraz szlak biegnący na południe wzdłuż Odry spowodował, że chętnie budowano tu wioski, które przekształcały się w miasta.

Aż do XX w. obszar często stanowił peryferie różnych państw, w tym także Polski, co spowodowało, że nie powstały tu żadne większe ośrodki miejskie i przemysłowe. Rozwój gospodarczy powstrzymywany był też przez okresowe, zapisane w kronikach

katastrofalne wezbrania rzeki. Najlepiej udokumentowana jest powódź na Odrze, która miała miejsce w lipcu 1997 r. Nastąpiło zalanie obszaru o powierzchni $\sim 750 \text{ km}^2$ na terenie województw śląskiego, opolskiego i dolnośląskiego. Uszkodzeniu uległo 37 000 budynków, 866 mostów i ponad 2000 km dróg, zginęło 60 osób [1]. Jedną z głównych przyczyn tych strat było niedostateczne zabezpieczenie przeciwpowodziowe. W 2001 r. rozpoczęto prace studialne nad rządowym projektem „Program dla Odry 2006”. W wyniku tych prac wskazano na konieczność budowy suchego polderu na Odrze powyżej Raciborza [2].

W niniejszej pracy analizie poddano fragment doliny Odry od granicy z Czechami do Kędzierzyna Koźła. Największym miastem w tej części doliny Odry jest Racibórz. „Program dla Odry 2006” oprócz zabezpieczenia przeciwpowodziowego, ustalił nowe reguły gospodarczego wykorzystania doliny. Przedstawiono możliwości i ograniczenia środowiskowe wykorzystania zasobów kruszyw naturalnych żwirowo-piaskowych. Jednocześnie autorzy wskazali stopień wyeksploatowania zasobów w dolinie Górnej Odry.

2. ZASOBY NATURALNE DOLINY GÓRNEJ ODRY

Obszar objęty analizą obejmuje fragmenty trzech powiatów znajdujących się w dwóch województwach. Województwo śląskie reprezentuje na południu powiat wodzisławski oraz raciborski. W powiecie wodzisławskim są to gminy Lubomia i Gorzyce, w raciborskim gminy Racibórz, Kuźnia Raciborska, Rudniki, Nędza, Kornowac i Krzyżanowice, a na północy w województwie opolskim, w powiecie kędzierzyńsko-kozielskim gminy Cisek, Bierawa i Reńska Wieś.

Z punktu widzenia podziału na jednostki geograficzne obszar należy do Kotliny Raciborskiej oraz niewielkie fragmenty do Kotliny Ostrawskiej. Omawiany obszar znajduje się w południowo-zachodniej części zapadliska przedkarpackiego wypełnionego utworami neogenu. Podłoże zapadliska stanowią osady dolnego karbonu reprezentowanego przez serię kulmową – piaskowce, łupki, szarogłazy. Są one związane z brzeżną strefą Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w tym miejscu głęboko przykrytą utworami zapadliska.

Trzeciorzędowe utwory (miocen) mają w okolicach Raciborza miąższość $\sim 600 \text{ m}$. W spągowej części wykształcone są jako warstwy kłodnickie – ility, margle i piaski z wkładkami węgla brunatnych. Na nich leżą osady badenu podzielone na serie: podgipsową, chemiczną i nadgipsową [3]. W stropie trzeciorzędu, bezpośrednio pod serią złożową występują ility i ility pylaste barwy szarej. Strop trzeciorzędu tworzy nieznacznie nierówną powierzchnię o deniwelacji ponad 2 m.

Obszar wypełniony osadami rzecznyymi rzeki Odry oraz wodnolodowcowymi plejstocenu ma powierzchnię $\sim 28 \text{ tys. ha}$ oraz długość niespełna 50 km. Na północ od Raciborza, w największym miejscu szerokość teras rzecznych ma 3 km. Na południe od

Kędzierzyna Koźła szerokość wraz z osadami wodnolodowcowymi przekracza 10 km. Jest to teren stosunkowo płaski, ze śladami starorzeczy, a tam gdzie się obniża pojawiają się niewielkie ciekły wodne i rowy melioracyjne.

2.1. PRZYRODA OŻYWIONA

Analizowany obszar doliny Górnej Odry cechuje się znacznym zróżnicowaniem siedlisk, które przekłada się na dużą różnorodność florystyczną obszaru, a także zróżnicowanie fauny. Część siedlisk występujących na analizowanym obszarze wchodzi w skład siedlisk wymienionych w załączniku I Dyrektyw Siedliskowej (tab. 1). Występują siedliska leśne, w tym jedno priorytetowe obejmujące łągi wierzbowe, topolowe, olszowe i jesionowe oraz grąd. Spośród zbiorowisk nieleśnych liczne są siedliska wód stojących: starorzeczy i zbiorników eutroficznych, półnaturalnych wilgotnych łąk ziołoroślowych oraz mezofilnych formacji trawiastych [4].

Występują siedliska oraz gatunki chronione na mocy prawa krajowego oraz Dyrektywy Siedliskowej i Ptasiej Unii Europejskiej. Liczne są obszary stanowiące miejsca żerowania niektórych ptaków chronionych, zwłaszcza drapieżnych, żerujących na otwartych przestrzeniach. Jest to także międzynarodowy korytarz ekologiczny.

Tabela 1. Podstawowe dane o formach ochrony przyrody, patrz rys. 1
Table 1. Basic data on forms of nature conservation, see Fig. 1

Nazwa	Rodzaj	Rok powołania	Stopień ochrony	Powierzchnia [ha]	Zagrożenie
Łęczczok	Rezerwat	1957	wysoki	409	antropopresja
Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich	Park Krajobrazowy	1993	średni	11618	
Wielikąt	Zespół Przyrodniczo-Krajobrazowy	1993		636,5	
Stara Odra	Użytek ekologiczny	2001	niski	20	
Gacek		2003		14	
Meandry rzeki Odry	Obszar Chronionego Krajobrazu	2004		162	
Stawy Wielikąt i Las Tworowski	Natura 2000 OSO	2008	średni	914	budowa polderu, wydobywanie piasku i żwiru
Stawy Łęczczok		2023		583	antropopresja
Las koło Tworowa		2012		115	brak zalewów
Graniczny Meander Odry		2022		156	antropopresja

Źródło: Geoserwis, [5, 6].

Są to Obszary Natura 2000 (tab. 1, rys. 1): Specjalnej Ochrony Ptaków (OSO) „Stawy Wielikąt i Las Tworkowski” LB0240003, Specjalnej Ochrony Siedlisk (SOO) „Las koło Tworkowa” PLH240040, Specjalnej Ochrony Siedlisk (SOO) „Graniczny Meander Odry” PLH240013.

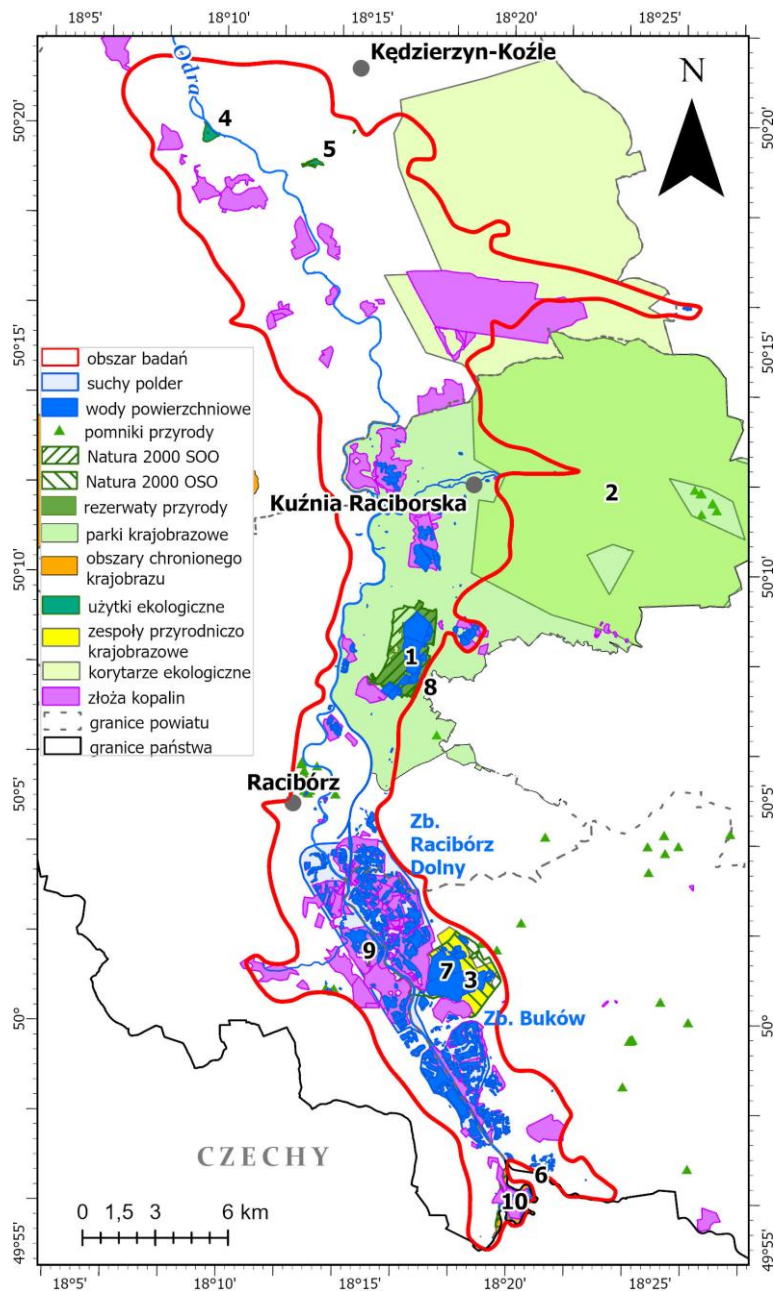
Uwzględniając stopień zachowania struktury i stopień zachowania funkcji, stan zachowania większości siedlisk na analizowanym obszarze doliny jest klasyfikowany jako dobry lub doskonały, zwłaszcza siedlisk w granicach obszarów chronionych w ramach sieci Natura 2000 [5, 6]. Płaty grądu i łęgu jesionowego – siedliska leśne z załącznika II Dyrektywy Siedliskowej chronione w granicach SOO „Las koło Tworkowa” – są rozległe, występują w typowych warunkach i są zachowane w bardzo dobrym stanie. Najlepiej zachowane, kilkudziesięciohektarowe płaty łęgu mają doskonałą reprezentatywność, w stopniu A, a pozostałych jest dobra, stopień B [5]. Na niewielkich powierzchniach biocenozy Lasu Tworkowskiego występują formy degradacji zbiorowisk leśnych: juwenalizacja, pietyzacja, monotypizacja, neofityzacja [4].

Dobrze zachowanymi składami gatunkowymi charakteryzuje się większość starorzeczy. Zmiennowilgotne łąki trzęślicowe w większości przypadków zachowane są w stanie dobrym lub doskonałym, rzadziej średnim. Część łąk trzęślicowych jest koszona rzadko lub zaniechano koszenia [6]. W efekcie następuje zanikanie zbiorowisk. Łąki te powstały niegdyś na skutek systematycznie prowadzonej, ekstensywnej gospodarki polegającej na jednorazowym jesiennym wykaszaniu (wrzesień–październik) i pozyskiwaniu siana z przeznaczeniem na ściółkę.

2.2. RODZAJE POWIĄZAŃ ELEMENTÓW PRZYRODY OŻYWIONEJ I NIEOŻYWIONEJ

Korytarz ekologiczny dolina Górnej Odry odgrywa ważną rolę w migracjach gatunkowych w tej części Europy. Pomimo dużych przekształceń koryta rzeki (rys. 2) i terenów zalewowych, dolina Górnej Odry stanowi jedną z nielicznych pozostałości dużych struktur ekologicznych w silnie zmienionym przez człowieka krajobrazie. Charakteryzuje się silną fragmentacją oraz małą lesistością. Na tym odcinku zachowały się jedynie niewielkie obszary leśne, podmokłe łąki i starorzecza.

Na tle tworzonym przez grunty orne wyróżnia się ostoje przyrodnicze o charakterze wyspowym i łączące je korytarze. Obszarami o charakterze wyspowym są Las Tworkowski, zbiorniki w wyrobiskach (rys. 2) k. wsi Nieboczowy, starorzecza Odry w okolicy miejscowości Nieboczowy (w sąsiedztwie akwenów poeksploatacyjnych) oraz stawy Wielikąt. Łączność pomiędzy nimi zachowana jest poprzez liniowe zadrzewienia i zakrzewienia, fragmenty użytków zielonych, rowy melioracyjne, ciek Płęsnica oraz przede wszystkim rzekę Odrę, stanowiącą największy i najważniejszy korytarz ekologiczny na rozpatrywanym obszarze.



Rys. 1. Zasoby naturalne środowiska w dolinie Górnej Odry (Geoportal 2, Midas).

Numery form ochrony przyrody jak w tab. 1

Fig. 1. Natural resources of the environment in the Upper Odra Valley (Geoportal 2, Midas).

Numbers of nature protection forms are as in Table 1



Rys. 2. Mewy odpoczywają na pogłębiarce; akwen eksploatacyjny żwirowni w czasie suchego polderu Racibórz Dolny, lipiec 2025

Fig. 2. Seagulls rest on a dredger. The gravel pit's operational basin in the Racibórz Dolny dry polder, July 2025

Cenny przyrodniczo jest las koło Tworkowa (tab. 1) pozostający w bezpośrednim kontakcie z rzeką oraz kompleks stawów Wielikąt – obszary europejskiej sieci ekologicznej Natura 2000. Las koło Tworkowa, kompleks leśny o wykształconym w pełni wnętrzu ekosystemu leśnego, to jeden z kluczowych obszarów dla zachowania ciągłości korytarza ekologicznego.

2.3. ZASOBY I WYDOBYCIE KRUSZYW NATURALNYCH

W dolinie Górnej Odry, w części obejmującej analizowany obszar od granicy z Czechami na południu po Kędzierzy-Koźle na północy, udokumentowane są 123 złoża kruszyw żwirowo-piaskowych (stan na 31.12.2024 r.). Większość z nich zlokalizowana jest w województwie śląskim (64 złoża w powiecie wodzisławskim i 37 w powiecie raciborskim). Zasoby bilansowe tych złóż na koniec 2024 r. wynosiły 371,3 mln t (w tym 259,1 w powiecie raciborskim i 112,3 w powiecie wodzisławskim; część złóż występuje równocześnie na terenie obydwu powiatów), stanowiąc aż ~38,9% łącznej wielkości zasobów tych kopalin w województwie śląskim (tab. 2). Zasoby przemysłowe analizowanych złóż to ~35,8 mln t, a ich udział w łącznych zasobach kruszyw żwirowo-piaskowych województwa śląskiego wynosi ~40%. Znaczące zasoby tych kruszyw związane są również z częścią doliny Górnej Odry znajdującą się w granicach województwa opolskiego, gdzie udokumentowanych jest 22 złóż (powiat kędzierzyńsko-kozielski, jedno złożo częściowo w powiecie raciborskim). Największe z nich

to złoża: Kotłarnia P. Północne (75,5 mln t), Poborszów (29,3), Kobylice IV (21,5) i Landzmiern (18,2) – tab. 3. Łączne zasoby bilansowe tych złóż to 189,6 mln t (12,6% zasobów województwa opolskiego), a zasoby przemysłowe 45,2 mln t (31,3% zasobów tego województwa).

Tabela 2. Zasoby i wydobywanie kruszyw żwirowo-piaskowych
w analizowanej części doliny Górnej Odry na tle województwa śląskiego i opolskiego
(stan na 31.12.2024; [7], obliczenia własne)

Table 2. Resources and mining output of sand and gravel aggregates
in the analysed part of the Upper Odra Valley on the background of Silesian and Opole voivodeship;
as of 31.12.2024; [7], author's calculations

Obszar	Liczba analizowanych złóż	Zasoby		Wydobywanie w 2024 r.
		bilansowe	przemysłowe	
		[tys. t]		
DOLINA GÓRNEJ ODRY, w tym:	123	562 377	81 015	4700
woj. śląskie	101	371 334	35 776	2919
powiat raciborski ¹	37	259 064	13 642	861
powiat wodzisławski ¹	64	112 270	22 134	2058
woj. opolskie	22	191 043	45 239	1781
powiat kędzierzyńsko-kozielski ²	22	189 624	45 239	1781
WOJ. ŚLĄSKIE OGÓŁEM ³	313	953 749	89 285	5413
Udział złóż w rejonie doliny Górnej Odry w wydobywaniu i zasobach woj. Śląskiego [%]	32,3	38,9	40,1	53,9
WOJ. OPOLSKIE ³	209	1 511 302	144 563	7540
Udział złóż w rejonie doliny Górnej Odry w wydobywaniu i zasobach woj. Opolskiego [%]	10,0	12,6	31,3	23,6

¹ 15 złóż znajduje się na granicy powiatu raciborskiego i wodzisławskiego; w przypadku złóż występujących w granicach dwóch powiatów zasobów nie rozdzielono; ² jedno złożo zlokalizowane jest w powiecie kędzierzyńsko-kozielskim i raciborskim; ³ wszystkie złoża udokumentowane w granicach województwa.

¹ 15 deposits are located on the border of the Racibórz and Wodzisław counties; in the case of deposits location within the borders of two counties the resources have not been calculated separately; ² one of analysed deposits is situated in Kędzierzyn-Koźle and Racibórz counties; ³ total number of deposits recognized in the voivodeship.

W ostatnim dziesięcioleciu (lata 2015–2024) ze złóż tego obszaru pozyskano łącznie 61,9 mln t piasków i żwirów, w tym 44,0 w województwie śląskim oraz 17,9 w województwie opolskim. W pierwszym z nich w 2024 r. eksploatowanych było 18 złóż zlokalizowanych w powiecie raciborskim oraz wodzisławskim. Wielkość wydobywania

w poszczególnych kopalniach nie przekraczała kilkaset tys. t/rok. Złóża o największym wydobyciu to: Turze 1, Bieńkowice-Wschód, Babice, Lubomia III, Racibórz II – Zbiornik 12, Lubomia VIII, Racibórz II – Zbiornik 5, Ligota 3, Racibórz II – Zbiornik 8/1 (rys. 3, 4) oraz Racibórz II – Zbiornik 6 (tab. 3). Z analizowanych złóż pozyskano 2,9 mln t piasków i żwirów, co stanowiło ponad połowę (53,9%) łącznej wielkości wydobywania tych kruszyw w woj. śląskim. W województwie opolskim eksploatowanych było w 2024 r. 8 złóż, z wydobywaniem 1,8 mln t kruszyw (23,6% łącznej wielkości

Tabela 3. Najważniejsze eksploatowane złoża kruszyw żwirowo-piaskowych w analizowanej części doliny Górnej Odry; stan na 31.12.2024; [7] i wydania wcześniejsze
Table 3. The most important sand and gravel aggregate deposits in the analysed part of the Upper Odra Valley; as of 31.12.2024; [7] and previous editions

Nazwa złóża	Województwo	Powiat	Zasoby		Wydobycie			
			bilansowe	przemysłowe	2015	2019	2023	2024
			[tys. t]					
Kobylice III	opolskie	kędzierzyńsko-kozielski	1875	1732	437	570	458	669
Kotłarnia P. Północne	opolskie, śląskie	kędzierzyńsko-kozielski, raciborski	75 515	9429	323	370	202	461
Lubomia III	śląskie	wodzisławski	16 968	8389	1348	351	589	448
Bierawa	opolskie	kędzierzyńsko-kozielski	1041	278	554	443	387	342
Racibórz II – Zbiornik 12	śląskie	raciborski, wodzisławski	4395	2073	–	–	142	315
Turze 1	śląskie	raciborski	7352	4972	285	247	311	293
Lubomia VIII		wodzislawski	172	131	–	–	209	289
Racibórz II – Zbiornik 5		raciborski, wodzislawski	475	354	250	292	334	259
Bieńkowice-Wschód			6552	1760	1657	931	184	223
Ligota 3		wodzislawski	129	–	–	–	–	209
Racibórz II – Zbiornik 8/1		wodzislawski	5523	3 849	–	332	166	190
Babice		raciborski	6840	774	229	76	115	187
Racibórz II – Zbiornik 6		raciborski, wodzislawski	1774	1014	–	–	247	175
Dziergowice	opolskie	kędzierzyńsko-kozielski	1514	1239	81	–	–	136
Ruda	śląskie	raciborski	45 550	1307	541	520	112	126

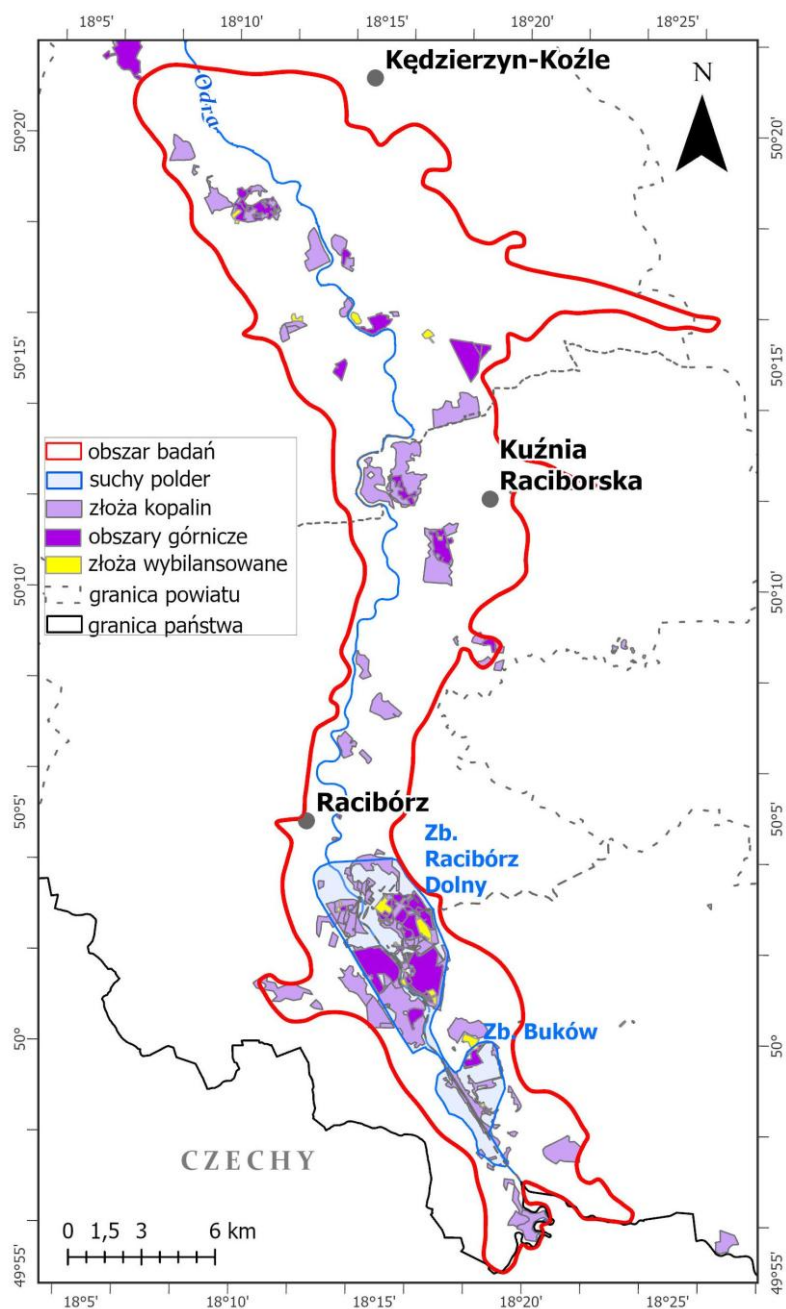
wydobycia w woj. opolskim). Największe wydobyć notowane było ze złóż Kobylce III, Kotłarnia P. Północne (zlokalizowanych częściowo w woj. śląskim, pow. raciborskim – tab. 3), Bierawa oraz Dziergowice. Warto podkreślić, że zasoby części złóż eksploatowanych obecnie w województwie opolskim i śląskim przy obecnym poziomie wydobywania wkrótce ulegną szczerpaniu. Dotyczy to m.in. złóż: Bierawa, Lubomia VIII, Racibórz II – Zbiornik 5 oraz Ligota 3.



Rys. 3. Odśłonięta seria złożowa w wyrobisku
w czaszy suchego polderu Racibórz Dolny, lipiec 2025

Fig. 3. Exposed deposit series in the excavation
in the bowl of the Racibórz Dolny dry polder, July 2025

Znaczna część złóż kruszyw żwirowo-piaskowych w dolinie Górnej Odry, udokumentowanych w analizowanych województwach śląskim i opolskim pozostaje nadal niezagospodarowana. W województwie śląskim są to 74 złoża położone w powiecie raciborskim i wodzisławskim, o łącznych zasobach 234 276 tys. t. Spośród nich największe zasoby rozpoznano w złożu Racibórz Zbiornik Górny (24,5 mln t), Turze (24,4), Brzezina nad Odrą (18,8), Ruda I (18,8), Bieńkowice-Zachód (18,7), Ruda 1 (16,8), Markowice (11,9) – rys. 4, tab. 4. Są to złoża kruszyw piaskowo-żwirowych i żwirowo-piaskowych o punkcie piaskowym średnio 37–66% (w trzech złożach wydzielono również zasoby piasku). W województwie opolskim zasoby 12 niezagospodarowanych złóż stanowią 75 706 tys. t. Największe spośród nich to złoża Kobylce IV (21,5 mln t) oraz Landzermierz (18,2) – rys. 4, tab. 4., punkt piaskowy odpowiednio 60 i 48%. Znaczący potencjał w zakresie możliwości zagospodarowania występujących na tym obszarze złóż dostrzeżony został w pracach [8, 9].



Rys. 4. Złoża kruszyw naturalnych w dolinie Górnej Odry (Geoportal 2, Midas)
 Fig. 4. Natural aggregate deposits in the Upper Odra Valley in the Upper Odra Valley
 (Geoportal 2, Midas)

Tabela 4. Największe niezagospodarowane złoża kruszyw żwirowo-piaskowych w analizowanej części doliny Górnej Odry (stan na 31.12.2024; [7, 10])
 Table 4. The largest undeveloped sand and gravel aggregate deposits in the analysed part of the Upper Odra Valley; as of 31.12.2024; [7, 10]

Złoża	Województwo	Powiat	Stan zagospodarowania złoża	Zasoby bilansowe [tys. t]	Punkt piaskowy [%]
Racibórz	śląskie	raciborski,	Z	24 490	37
Zbiornik Górny		wodzisławski			
Turze		raciborski	P	24 417	49
Kobylice IV	opolskie	kędzierzyńsko-kozielski	R	21 528	60
Brzezie nad Odrą	śląskie	raciborski,	Z	18 839	42
		wodzisławski			
Ruda I		raciborski	P	18 781	92 piasek, 47 piasek ze żwirem
Bieńkowice-Zachód			R	18 715	66
Landzermierz	opolskie	kędzierzyńsko-kozielski	P	18 197	48
Ruda 1	śląskie	raciborski	P	16 792	90 piasek, 54 piasek ze żwirem
Markowice			R	11 857	94 piasek, 50 piasek ze żwirem

3. ZAGOSPODAROWANIE DOLINY I ZAGROŻENIE POWODZIAMI

Znaczna część obszaru objętego analizami położona w obrębie doliny Odry stanowi naturalny teren zalewowy rzeki Odry, który regularnie, od czasów pojawienia się tutaj osadnictwa podlegał zalewom powodziowym. Największa w historii powódź w 1997 r. spowodowała zalanie niemal całego omawianego obszaru. Po oddaniu do użytku suchego polderu Racibórz Dolny obszary narażone na wezbrania ograniczone są do międzywala.

Ze względu na dobre warunki dla rolnictwa dolina Odry posiada obszary o wysokiej wartości rolniczej. W związku z tym obowiązują tu ograniczenia przeznaczania gruntów na cele niezwiązane z produkcją rolną, w tym ograniczenie lokalizacji zakładów przemysłowych szczególnie tych, które mogłyby spowodować ujemne skutki dla gospodarki rolnej oraz zanieczyszczenie cieków wodnych, powietrza atmosferycznego i powstawanie szkodliwych dla środowiska odpadów. Największą powierzchnie zajmuje uprawa zbóż z dominującą przewagą pszenicy ozimej, jak i uprawa jęczmienia

ozimego, jarego, buraków cukrowych i kukurydzy na ziarno. Rolnictwo charakteryzuje duża liczba jednostek zróżnicowanych pod względem wielkości gospodarstw, kierunku i poziomu produkcji.

Krajobraz na analizowanym obszarze zaliczyć można do krajobrazu dolin i równin akumulacyjnych, o gatunku zalewowym. W krajobrazie dominują grunty rolne. Tereny zielone związane są ze strefą korytową Odry i mniejszych cieków oraz ze starorzeczami. Pasy drzew i krzewów występują wzdłuż poboczy dróg gruntowych i na skarpach rowów.



Rys. 5. Częściowo zatopione koparki podczas wypełnienia polderu Racibórz Dolny wodą powodziową; wrzesień 2024, fot. Ł. Wdowczyk

Fig. 5. Excavators partially submerged during floodwater filling of the Racibórz Dolny polder; september 2024, photo by Ł. Wdowczyk

Trzeba zaznaczyć, że firmy górnicze prowadzące wydobywanie nie mogą być ubezpieczone z tytułu zagrożenia powodziowego. W latach 2007–2023 na terenie czaszy zbiornika działalność prowadziło 24 podmiotów. Mimo pewnych strat jakie firmy górnicze poniosły na obszarze zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny we wrześniu 2024 r. (rys. 5), należy podkreślić, że tego typu obiekty hydrotechniczne pozwalają na bardziej racjonalne zarządzanie zasobami środowiska. Umożliwienie długotrwałej eksploatacji kruszyw w dolinie rzeki jest wyraźnie atutem polderu.

W latach 2007–2024 z czaszy zbiornika Racibórz Dolny uzyskano 46 231 tys. t kruszywa. W wyniku eksploatacji wydobyto 27 509 tys. M^3 kopaliny, zwiększając tym samym pojemność przeciwpowodziową zbiornika o 14%. Obecnie zbiornik może pomieścić 185 mln m^3 wody, ale istnieje plan jego pogłębienia poprzez eksploatację udokumentowanych zasobów złóż kruszywa naturalnego. Pogłębienie, mające na celu zwiększenie pojemności do 300 mln m^3 może potrwać do 10 lat. Jednocześnie okresowe zatrzymanie wysokich przepływów na rzece nie powoduje krytycznej zmiany reżimu

rzeki. Tym samym także fauna rzeczna ma znaczną szansę zachować swoje siedliska. Wydłużony okres opuszczenia dna doliny przez różne formy zagospodarowania (rolnicze, leśne, mieszkaniowe) może przyczynić się do uniknięcia wysokich strat związanych z utratą dostępu do usług ekosystemowych, które zapewnia dolina rzeki.

4. KONFLIKTY ŚRODOWISKOWE

Eksploatacja kruszywa naturalnego z doliny Górnej Odry jest tak długa jak historia osadnictwa. Znaczne ilości piasków i żwirów były wydobywane w latach 80. XX w. Rozwój rolnictwa i presja osadnicza spowodowały, że wydobywanie natrafiło na rosnącą barierę. Jednak powódź w 1997 roku i kolejna w 2000 zmusiła wielu ludzi do opuszczenia najbardziej zagrożonych i wielokrotnie zalewanych wiosek, jak np. Nieboczowy. Decyzja o budowie polderu Racibórz Dolny była dla górnictwa kruszywowego punktem zwrotnym. Czasza zbiornika została dobrze rozpoznana w kierunku wydobywania kopalin klastycznych, co ma jednocześnie zwiększyć jego pojemność przecipowodziową [11]. W czaszy tego polderu w różnych okresach czasu funkcjonowało 24 przedsiębiorców z aktywnymi koncesjami wydobywczymi. Można uznać, że gdyby nie przeszkody formalne eksploatacja w czaszy polderu odbywa się bez przeszkód.

Natomiast zrozumiałe jest, że zajmowanie terenów rolniczych spotyka się lokalnie z przeszkodami. Jednak najpoważniejsze konflikty powstają na styku złóż kopalin i obszarowych form ochrony przyrody. Okazuje się, że ponad 40% omawianego obszaru o znacznym potencjale rozwoju eksploatacji złóż piasków i żwirów, objęte jest ochroną przyrody. Mimo tak niekorzystnej dla górnictwa sytuacji należy uznać, że nadal istnieją szanse na otwarcie nowych kopalń.

W efekcie pozyskiwania kruszywa i powstania pustek częściowo wypełnionych wodą można uznać, że eksploatacja zwiększa adaptację do postępujących zmian klimatu w następujący sposób:

- przejście pewnej ilości wody podczas przepływu fali powodziowej na Odrze,
- dostęp do wód podczas fali upałów np. dla zwierząt,
- dostęp do wód podczas suszy.

W związku z lokalizacją licznych złóż na terenie zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny, po zakończeniu eksploatacji teren ten zostanie zalany i stanie się w sposób naturalny częścią składową zbiornika retencyjnego (rys. 1). Wg projektu zagospodarowania zbiornika Racibórz Dolny eksploatacja kruszyw naturalnych jest konieczna aby uzyskać pełną pojemność przeciwpowodziową [11].

Obszarem zupełnie wyłączonym z eksploatacji jest z pewnością rezerwat Łęczczok. Znaczna część obszaru objęta jest ochroną krajobrazu w ramach PK Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich. Trzeba tu podkreślić, że oprócz założeń gospodarki rolnej, leśnej i hodowli ryb Cystersi kładli podwaliny pod górnictwo na tym terenie. Pozostałości wyrobisk, hałd i hut rud żelaza z XVIII w. znajdują się na wschód od

doliny Odry w miejscowościach: Smolnica, Stanica i Trachy (k. Sośnicowic). Charakter tego parku krajobrazowego łączy więc ochronę i wykorzystanie walorów środowiska. Dla potencjalnych inwestorów jest to informacja, że wydobywanie kruszyw jest możliwe pod warunkiem podjęcia działań w celu minimalizacji szkodliwego oddziaływania i ukształtowania terenu poeksploatacyjnego w kierunku przyrodniczym. Przykładem godnym do naśladowania, choć kopalnia znajduje się poza PK CKKRW, jest ścieżka edukacyjna przy kopalni Bierawa (firma Cemex).

Mimo, że obszary Natura 2000 powstały aby umożliwić zrównoważony rozwój gospodarczy w Europie [12], i tak są one postrzegane choćby na terenie Niemiec. W dolinie Odry walory przyrodnicze, dla których ochrony je powołano w praktyce uniemożliwiają prowadzenie wydobywania kruszywa na ich terenie. Złóża kruszywa w pasie przygranicznym „Zabełków” oraz „Racibórz IV-Zbiornik” udokumentowano odpowiednio w 1972 i 1980 r., tymczasem w XXI w. na ich powierzchni ustanowiono obszar Natura 2000. Możliwość eksploatowania tych złóż jest obecnie bardzo wątpliwa.

5. PODSUMOWANIE

Dolina Odry jest znana z dramatycznych powodzi. Oddany w 2022 r. zbiornik Racibórz Dolny obniżył falę powodziową na Odrze we wrześniu 2024 r. i mieszkańcy Raciborza, Opola i Wrocławia byli względnie bezpieczni. W przeciwieństwie do klasycznych zbiorników retencyjnych w Polsce budowa zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny nie spowodowała zalania i utraty zasobów kruszyw naturalnych. Tymczasem eksploatacja z czaszy zbiornika pozwala zaoszczędzić zasoby lądowych złóż, a tym samym przekształcenie środowiska w ich otoczeniu. Złóża na terasach Odry są łatwo dostępne do eksploatacji pod względem technicznym. Kruszywa naturalne z doliny Odry są dobrej jakości i umożliwiają produkcję różnych frakcji, w tym żwirowych.

W dolinie Górnej Odry, w części obejmującej analizowany obszar od granicy z Czechami na południu po Kędzierzyn-Koźle na północy, udokumentowane są 123 złóża kruszyw żwirowo-piaskowych o łącznych zasobach ~562,4 mln t. (stan na 31.12.2024 r.). Złóża te zlokalizowane są w województwie śląskim (powiat wodzisławski i raciborski) – 101 złóż o łącznych zasobach 371,3 mln t, a ponadto w województwie opolskim (powiat kędzierzyńsko-kozielski) – 22 złóża o zasobach 191,0 mln t. Łączne zasoby przemysłowe tych złóż to ~81,0 mln t. W ostatnim dziesięcioleciu ze złóż na analizowanym obszarze pozyskano 61,9 mln t piasków i żwirów. Tylko w 2024 r. wydobyte prowadzone było z 18 złóż w województwie śląskim, z których pozyskano 2,9 mln t kopaliny oraz z 8 złóż w województwie opolskim – 1,8 mln t.

Analizowany obszar posiada znaczny potencjał rozwoju wydobywania kruszyw żwirowo-piaskowych. Znaczna część złóż udokumentowanych w dolinie Górnej Odry, pozostaje niezagospodarowana, w tym 7 dużych złóż (o zasobach powyżej 10 mln t)

w województwie śląskim oraz 2 duże złoża w opolskim. Są to złoża kruszyw piaskowo-żwirowych i żwirowo-piaskowych o punkcie piaskowym średnio 37–66% (w trzech złożach wydzielono również zasoby piasku). Na obszarze dwóch analizowanych województw znajduje się 86 niezagospodarowanych złóż o zasobach ~310 mln t, w tym 74 złoża w województwie śląskim (powiaty raciborski i wodzisławski; zasoby ~234 mln t) oraz 12 złóż w województwie opolskim (powiat kędzierzyńsko-kozielski – 76 mln t).

W ostatnim dziesięcioleciu (lata 2015–2024) na analizowanym obszarze eksploatowanych było 26 złóż, z których pozyskano 61,9 mln t piasków i żwirów (44,0 mln t w województwie śląskim oraz 17,9 mln t w opolskim). Eksploatacja prowadzona jest spod lustra wody płynących koparkami ssącymi. Złoża są zawodnione, zwykle pod nadkładem 1–4 m. Są szybko zasiedlane przez roślinność szuwarową, liczne płazy, ryby i ptactwo. Powierzchnia wód otwartych znakomicie rekompensuje szkodliwy wpływ aktywnych kopalń, umożliwiając migrację zwierząt w Dolinie Odry. Dowodem na to są pozytywne oceny wyspowych form ochrony przyrody, w tym stanu środowiska, który jest monitorowany w obszarach Natura 2000.

Wydaje się, że dolina Górnej Odry nadal stanowi stosunkowo duży potencjał dla wysokiej jakości kruszyw naturalnych w tej części Polski. Zrozumienie praw związanych z ochroną przyrody oraz wyważoną gospodarką złożami kopalin jest kluczem do racjonalnego wykorzystania zasobów środowiska na tym terenie.

LITERATURA

- [1] DUBICKI A. (red.), *Dorzecze Odry. Monografia powodzi lipiec 1997*, IMiGW, Warszawa 1999.
- [2] SŁYSZ K. (kier), *Prognoza oddziaływania na środowisko projektu dokumentu Programu dla Odry, 2006 (aktualizacja)*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Instytut Rozwoju Miast, Instytut Ochrony Środowiska, Kraków 2010.
- [3] TRZEMPLA M., DROZD M., *Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 arkusz Racibórz (966) wraz z objaśnieniami*, PIG, Warszawa 1997.
- [4] *Waloryzacja przyrodnicza rejonu zbiornika i prognoza oddziaływania zbiornika na faunę i florę. Opracowanie na rzecz Studium wykonalności dla zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny na rzece Odrze*, Jacobs GIBB Polska, Hydroprojekt, Warszawa 2003.
- [5] SFD PLB0240003. *Formularz Danych Natura 2000. Obszar PLB0240003*.
- [6] SFD PLH240040. *Formularz Danych Natura 2000. Obszar PLH240040*.
- [7] *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce według stanu na 31.12.2024 r. (i wydania wcześniejsze)*, Wyd. PIG-PIB, Warszawa 2025.
- [8] GUZIK K., KAMYK J., KOT-NIEWIADOMSKA A., *Undeveloped deposits of sand and gravel aggregates with potential strategic importance in Poland*. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 2024, t. 40, z. 1, s. 105–124.
- [9] GUZIK K., KAMYK J., KOT-NIEWIADOMSKA A., 2024. *Potencjalnie strategiczne złoża piasków i żwirów do produkcji kruszyw oraz metodyka ich wyboru*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 7, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2024, 79–94.
- [10] Baza danych MIDAS PIG-PIB – Karty informacyjne złóż.
- [11] SROCZYŃSKI W. (red.), *Uwarunkowania geologiczne realizacji zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny na rzece Odrze*, Studia, Rozprawy, Monografie, PAN, IGSMiE, Kraków 2002.

- [12] SZALAST-PIWIŃSKA M., *Działalność gospodarcza a ochrona przyrody. Informator dla przedsiębiorców. Wybrane zagadnienia*, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2012.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych IGSMiE, PAN oraz Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH Akademii Górniczo-Hutniczej w ramach badań statutowych 16.16.140.315.

SOZOLOGICAL PROBLEMS OF NATURAL AGGREGATE MANAGEMENT IN THE UPPER Odra VALLEY

The Upper Odra Valley contains numerous deposits of Quaternary sands and gravels, at varying degrees of development. At the same time, like any large river valley, it serves as an important migration route for animals, especially birds. This article describes the potential for developing the natural resources of the Upper Odra Valley from the Czech border to Kędzierzyn-Koźle. These geological resources, hidden beneath the surface, cannot be effectively utilized due to numerous forms of nature conservation and land development. The valley is home to numerous villages and farms. Floods in 1997 and 2010, in addition to catastrophic economic losses, caused the displacement of buildings away from the river, the displacement of several settlements, and the construction of the Racibórz Dolny dry polder. This, in turn, led to an increase in the use of natural aggregates. Extraction of aggregates from the dry polder's basin increased its flood capacity by 14%. The analysis shows that further expansion of gravel and sand aggregate extraction from the Odra Valley floor is consistent with environmental principles aimed at extending the sustainability of natural resources. This is especially true given that mining increases the safety of residents in the Odra Valley, a factor that is not always appreciated.

Tomasz GAWENDA¹
Agata STEMPOWSKA¹
Hajime MATSUSHIMA²
Yutaka JITSUYAMA²
Izabela POLNIASZEK³
Dariusz FOSZCZ¹

¹ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

² Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Japan

³ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

BADANIA KRUSZYW LEKKICH WYTWORZONYCH Z GLINEK POWSTAŁYCH PO PŁUKANIU DOLOMITU

W artykule przedstawiono możliwości otrzymywania kruszyw z frakcji ilasto-pyłastych uzyskanych w wyniku płukania kruszyw łamanych dolomitowych. Formowanie kruszywa uzyskano wybranymi metodami przeróbki mechanicznej takimi, jak granulacja dynamiczna i metody sedimentacyjne oraz kruszenie i klasyfikacja. W celu oceny parametrów kruszywa zastosowano techniki instrumentalne: XRF fluorescencja rentgenowska w celu uzyskania szczegółowych informacji o składzie tlenkowym badanych surowców, HSM mikroskopia wysokotemperaturowa dla określenia specyficznej temperatury spiekania, pH-metr i konduktometr w celu badania roztworów filtracyjnych mających bezpośredni kontakt z kruszywem. Istotnym zagadnieniem było zbadanie mikrostruktury wytworzonych kruszyw po wypaleniu z wykorzystaniem techniki mikroskopowej SEM. Uzyskane wyniki pozwolą na dalsze badania nad opracowaniem koncepcji technologii produkcji kruszyw lekkich o charakterze alkalicznym. Wytworzono kruszywa o wysokiej nasiąkliwości ok. 50% oraz niskiej gęstości nasypowej 0,82 g/cm³. Badania w ogólnym zarysie przyczyniają się do rozpoznania zasobów, które mogą zostać przekształcone w kruszywa lekkie znajdujące zastosowanie w zazielenieniu miast, co wpisuje się w strategię gospodarki o obiegu zamkniętym i ochronę środowiska.

1. WSTĘP

Lekkie kruszywa (LWA – *lightweight aggregate*) to ogólna nazwa grupy kruszyw o gęstości względnej niższej niż kruszyw o normalnej gęstości (naturalny piasek, żwir i tłuczeń). Jest to kruszywo spełniające wymagania normy ASTM C 330 o gęstości nasypowej <1120 kg/m³ dla kruszywa drobnego i 880 kg/m³ dla kruszywa grubego. Kruszywa są przygotowane poprzez spęcznianie, granulowanie lub spiekanie produk-

tów: żużel wielkopiecowy, glina, popiół lotny, łupek ilasty lub łupek oraz przez przetwarzanie materiałów naturalnych, jak pumeks, żużel wulkaniczny lub tuf. W zależności od źródła i metody produkcji, kruszywa lekkie wykazują znaczne różnice w kształcie i strukturze cząstek. Kształty mogą być sześciennie, zaokrąglone, kanciaste lub nieregularne. Struktury mogą się zmieniać od drobnych porów, stosunkowo gładkich powierzchni do bardzo nieregularnych z dużymi odsłoniętymi porami. Kształt cząstek i tekstura powierzchni mogą mieć bezpośredni wpływ na gotowe produkty. Komercyjne kruszywa lekkie są szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Istnieją również zastosowania dla wielu rodzajów kruszyw pochodzących z recyklingu, jak: kruszone cegły, granulki gliny, granulki z recyklingu gazet i kruszywo z betonu porowatego [1–4]. Granulowane gliny mogą pochodzić z naturalnych złóż, takich jak LECA lub perlit, ale mogą również być pozostałościami po myciu innego rodzaju kruszywa. Dzięki odpowiedniemu przygotowaniu można z nich uzyskać kruszywo lekkie [5–7]. Kruszone cegły można mieszać z kruszywem z rozbiórek lub z miejskich spalarni odpadów. Jednak w tym przypadku problemem może być odciek, który wypłukuje się podczas ekspozycji na deszcz [8]. Ocieki z kruszyw bywają bardzo problematyczne i między innymi tym zagadnieniem zajęto się w artykule.

Dwie formy glinek pochodzących z płukania kruszyw, surowe i spiekane, mogą potencjalnie zostać ponownie wykorzystane w środowisku antropogenicznym. Glinki surowe to osady w swojej pierwotnej, niezmienionej postaci, natomiast materiał spiekany to osad formowany i przetworzony na „wypalany” produkt komercyjny. Zastosowanie surowych glinek jest najczęstsze i występuje w kilku kategoriach korzystnego wykorzystania, w tym: siedliska, zasilanie plaż, parki i rekreacja, rolnictwo, leśnictwo, ogrodnictwo i akwakultura; rekultywacja kopalń odkrywkowych, gospodarka odpadami stałymi oraz budownictwo hydrotechniczne [9–18]. Korzystne stosowanie surowego materiału wynika z rosnącego zapotrzebowania na materiały budowlane i malejących zasobów naturalnych. W wielu krajach powszechną praktyką jest stosowanie glinek jako surowca do produkcji cegieł (gлина z zawartością piasku poniżej 30%); ceramiki, takiej jak płytki (gлина), granulki do izolacji lub lekkiego zasypywania lub kruszywa (gлина); surowca do produkcji narzutu lub bloków do ochrony wałów i skarp przed erozją (skały, mieszanka) oraz surowca do produkcji bloków prasowanych do murów ochronnych w instalacjach wojskowych oraz dla zamkniętych osiedli i dzielnic mieszkaniowych [13–15].

Lekkie kruszywo (LWA) może być wytwarzane poprzez spiekanie, co pozwala uzyskać produkt korzystny dla środowiska, a także stanowiący ekonomiczną alternatywę w porównaniu z obecnie produkowanym LWA. Ponadto takie kruszywa mogą stanowić ważny element środowiskowy dla zrównoważonego rozwoju, gdy są stosowane do poprawy jakości wody, a także jako podłoże do uprawy roślin na zielonych dachach. Obecnie LWA są zazwyczaj wytwarzane z łupków, gliny, łupków łupkowych, a nawet osadów z oczyszczalni ścieków lub zakładów uzdatniania wody [19].

LWA jest często stosowane w ogrodnictwie i praktykach związanych z zieloną infrastrukturą [20]. Zielona infrastruktura (*Green Infrastructure*) – jak zielone dachy, rowy

biologiczne i ogrody deszczowe, kładąca nacisk na retencję hydrologiczną i ewapotranspirację poprzez interakcje gleby i roślin z wodą może stanowić elastyczne i niedrogie rozwiązanie w zakresie rekultywacji terenów przemysłowych, ograniczenia wysp ciepła w miastach oraz zarządzania wodami opadowymi i zanieczyszczeniami [9]. Zielone dachy wykorzystują lekkość i zdolności retencyjne kruszywa lekkiego do kontrolowania spływu wód opadowych [21]. Głębokość podłoża uprawowego dachu wynosi kilkadziesiąt centymetrów. Ze względu na tak niewielką głębokość, należy dążyć do optymalizacji rozwiązań w zakresie zarządzania wodami opadowymi jednocześnie zmniejszając potrzebę stosowania stałych systemów nawadniających. Systemy dachów zielonych, z kruszywem lekkim w warstwach wegetacyjnych, zapewniają odpowiednią strukturę i zdolność zatrzymywania wody, a jednocześnie są lżejsze niż inne produkty glebowe.

Materiał drugorzędowy pochodzący z płukania może stanowić surowiec mineralny do produkcji kruszywa, które ma wysoką zdolność retencji hydrologicznej przy budowie infrastruktury zielonej. W ramach badań skupiono się na dwóch celach:

- ocenie przydatności gliniek pochodzących z płukania dolomitowych kruszyw łamanych do wytwarzania kruszyw lekkich,
- przygotowaniu kruszywa o wysokiej porowatości powierzchni i wewnętrznej mikrostrukturze.

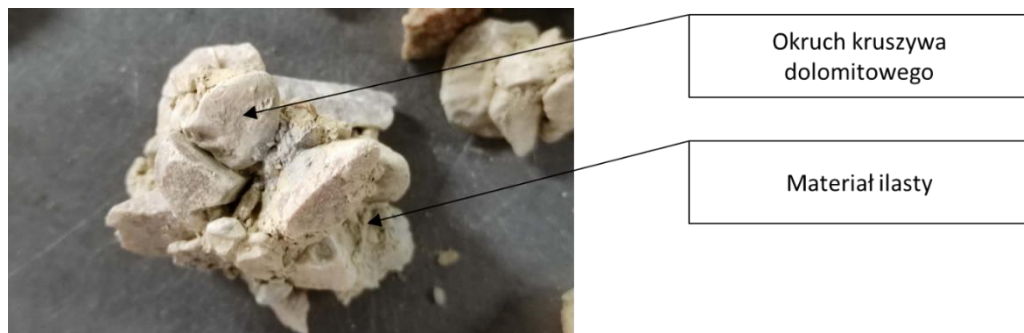
Kruszywa zostały wyprodukowane poprzez formowanie i spiekanie w oparciu o parametry określone na podstawie analizy termicznej, chemicznej i ziarnowej. Potencjał wykorzystania tego kruszywa lekkiego w budowie zielonych dachów został oceniony w laboratorium. Oczekuje się, że zastosowanie zielonej infrastruktury na terenach miejskich pozwoli rozwiązać problem nadmiernych wód opadowych oraz obniżenie lokalnego nagrzewania się miast.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. SUROWCE

Glinki poprocesowe z Kopalni Dolomitu Imielin powstają przy płukaniu kruszyw łamanych. Kruszywa te posiadają odpowiednią wytrzymałość, odporność na ścieranie i właściwości nośne dla zastosowań w produkcji betonu, stabilizacji podłoża oraz w budownictwie drogowym. Z pyłów powstałych podczas kruszenia produkuje się nawozy wapniowo-magnezowe. Pomimo swoich niewątpliwych zalet surowiec ten w swoim składzie zawiera liczne przewarstwienia ilaste, powodujących oblepianie fragmentów skały i jej aglomeracje (rys. 1). W takiej formie nie może być stosowane w budownictwie, dlatego w procesie technologicznym musi być płukane. W kopalni wykorzystuje się dwustadialne płuczki mieczowe połączone z procesem przesiewania na mokro oraz odwadniania w kołach odwadniających. Glinki odpłukane z kruszywa dolomitowego

gromadzone w osadnikach (rys. 2) jak do tej pory nie znalazły zastosowania przemysłowego. W badaniach wykorzystano materiał pobrany z dwóch różnych miejsc zbiornika osadowego.



Rys. 1. Konglomerat kruszywa dolomitowego z materiałem ilastym

Fig. 1. Conglomerate of dolomite aggregate with clay material



Rys. 2. Osadnik Kopalni Dolomitu Imielin

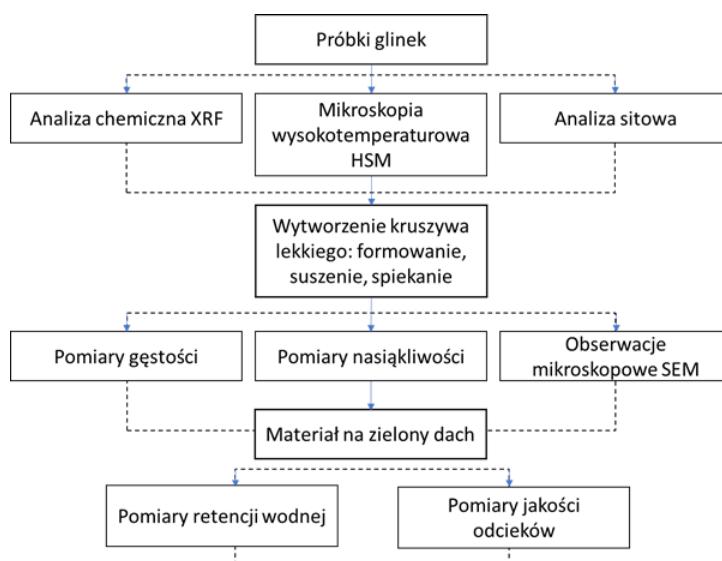
Fig. 2. Sedimentation pond of the Imielin Dolomite Mine

2.2. METODY

Analizę sitową na mokro wykonano wytrząsarką laboratoryjną Haver&Boecker z zestawem odpowiednio dobranych sit, a analizę chemiczną metodą XRF Epsilon 4 (Malvern Pananalytical) fluorescencji rentgenowskiej. Badaniom poddano wszystkie klasy ziarnowe w celu uchwycenia zmian zawartości tlenków w próbkach. Wyniki badań zostały uśrednione. Pomiar w mikroskopie wysokotemperaturowym Hesse-Instruments EM301 (Osterode am Harz) przeprowadzono na określonych zestawach próbek przy wzroście temperatury do 1250°C. Próbkę do badania mikroskopowego pobrano z su-

rowca i uformowano w cylindrze o wysokości 5 mm i średnicy 3 mm. Kruszywo zostało wytworzone w granulatorze dynamicznym MDL-03V firmy IdeaPro. Wypalanie kruszywa prowadzono w piecu muflowym komorowym o pojemności roboczej 8 dm³ firmy Czylok.

Analizę SEM wykonano mikroskopem elektronowym firmy Thermo Scientific, model Quattro S z możliwością analizy (bezwzorcowej) spektroskopii dyspersji energii (EDS) – analiza składu pierwiastkowego. Analizę EDS przeprowadzono z zastosowaniem detektora nowej generacji firmy EDAX w formie analiz punktowych. Pomiarów konduktometrycznych oraz pH wykonano wielofunkcyjnym urządzeniem pomiarowym Elmetron CPI 601 z odpowiednim kompletem elektrod. Schemat eksperymentu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat postępowania przy wytwarzaniu kruszywa lekkiego

Fig. 3. Diagram for the production of lightweight aggregate

3. WYNIKI

3.1. ROZKŁAD WIELKOŚCI UZIARNIENIA

W tabeli 1 podano wyniki badań rozkładu wielkości uziarnienia próbek. Materiał jest bardzo drobnoziarnisty co jednoznacznie wskazuje na wysokie zawartości minerałów ilastych. Poszczególne próbki są jednorodne i podobne do siebie. Następuje wyraźne odcięcie materiału drobnoziarnistego przy wielkości sita 0,02 mm, co oznacza że ponad 90% materiału jest o uziarnieniu mniejszym niż 0,02 mm.

Tabela 1. Wyniki analizy sitowej badanych materiałów
Table 1. Results of sieve analysis of the tested materials

Sito [mm]	Wychód [%]	Suma	Wychód [%]	Suma
	Próbka 1		Próbka 2	
0,02	94,10	94,10	91,01	91,01
0,04	0,00	94,10	0,00	91,01
0,063	0,76	94,86	0,89	91,90
0,071	1,00	95,86	0,73	92,63
0,1	1,56	97,42	2,27	94,90
0,2	1,78	99,20	2,91	97,98
0,315	0,80	100,00	2,19	100,00

3.2. ANALIZA CHEMICZNA METODĄ XRF

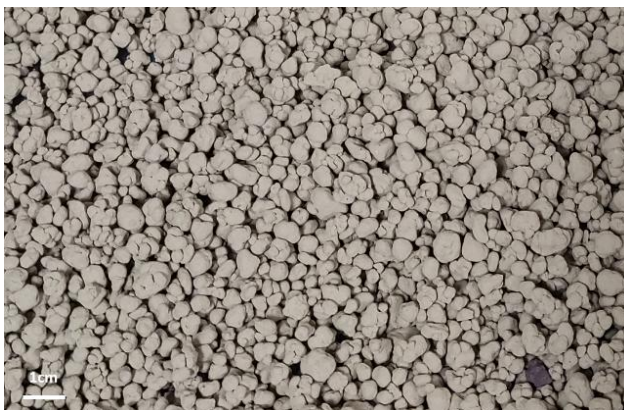
Analizę wykonano metodą XRF, fluorescencji rentgenowskiej. Badaniom poddano wszystkie klasy ziarnowe w celu uchwycenia zmian zawartości tlenków w poszczególnych frakcjach. Wyniki przedstawiono w tabeli 2. Skład chemiczny badanego materiału jest typowy dla tego typu surowców. Obserwuje się głównie tlenki glinu i krzemu. Tlenek krzemu może występować jako drobnoziarnisty kwarc ale także jako składnik licznych krzemianów budujących minerały ilaste. W składzie chemicznym obserwuje się również podwyższoną zawartość żelaza (~5% wag.) co będzie powodować zabarwienie próbek podczas wypalania w wysokich temperaturach. Zaobserwowano bardzo dużą ilość tlenku wapnia powyżej 30%, może on występować zarówno w postaci węglanów jak i jako składnik minerałów ilastych. Wysoka zawartość wapnia będzie wpływać na pH przesączy powstałych po kontakcie kruszywa z wodą. W badaniach zaobserwowano zaskakująco niską ilość tlenków magnezu jak na glinki pochodzące ze złóż dolomitowych. Nie znaleziono pierwiastków szkodliwych, jak Hg, Cr, Cd czy Pb.

Tabela 2. Średnie składy chemiczne materiału
Table 2. Average chemical composition of the material

Tlenek	Próbka 1	Próbka 2
	[% wag.]	
MgO	1,23	1,49
Al ₂ O ₃	6,50	5,79
SiO ₂	19,97	16,10
K ₂ O	2,93	2,47
CaO	31,60	30,89
Fe ₂ O ₃	5,38	4,37

3.3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK GRANULATÓW

Przygotowano zestawy mineralne do otrzymania granulatów, proporcje dobrano tak, aby w jak najszybszym czasie i z niewielkim udziałem wody otrzymać stabilny granulat, który po wysuszeniu utrzymuje swój kształt (rys. 4).



Rys. 4. Kruszywo lekkie wytworzone w granulatorze, przed wypaleniem, frakcja 4–6,3 mm

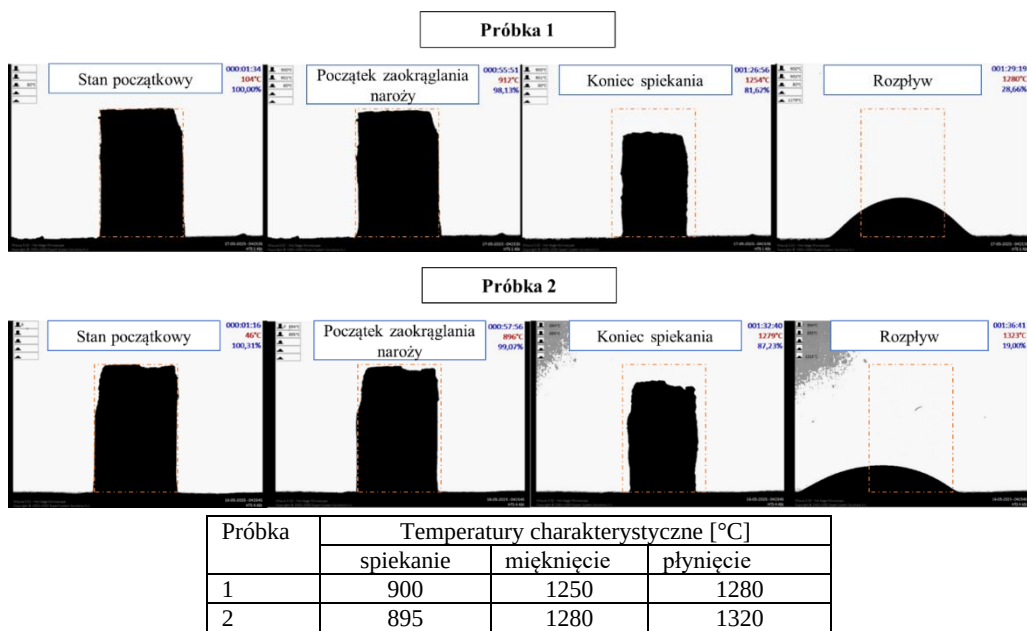
Fig. 4. Lightweight aggregate produced in a granulator, before firing, fraction 4–6.3 mm

Proces granulacji dynamicznej, odbywa się w granulatorze dynamicznym przeciwbieżnym ze zmienną prędkością obrotową bębna i mieszalnika o przeciwnych kierunkach obrotów. Maszyna umożliwia przetwarzanie różnego rodzaju konsystencji na wybrane formy granulatów. Mieszanie i granulacja odbywają się w jednym urządzeniu. Po zgranulowaniu kruszywo lekkie zostało odpowiednio przesiane na różne frakcje ziarnowe. Granulat charakteryzował się łatwością formowania, granule po wysuszeniu były wytrzymałe. Uzyskano charakterystyczne „bałwankowate” formy, które poprawiają porowatość.

3.4. BADANIE MIKROSKOPEM WYSOKOTEMPERATUROWYM

Mikroskopia wysokotemperaturowa jest techniką, która umożliwiającą zmiany wymiaru próbki pod wpływem temperatury. Z obrazowania próbek można uzyskać wystarczające informacje do ustalenia temperatur procesowych. Jako początek spiekania można uznać temperaturę, w której naroża próbki zaczynają się zaokrąglać. Aby uzyskać spiek lity należałoby wypalać próbki w temperaturze $\sim 1200^{\circ}\text{C}$. W przypadku spieku porowatego temperatura procesowa powinna zaczynać się od 900°C (rys. 5),

wzrost temperatury do 1000°C pozwoli na całkowite rozłożenie węglanów zawartych w badanym materiale.

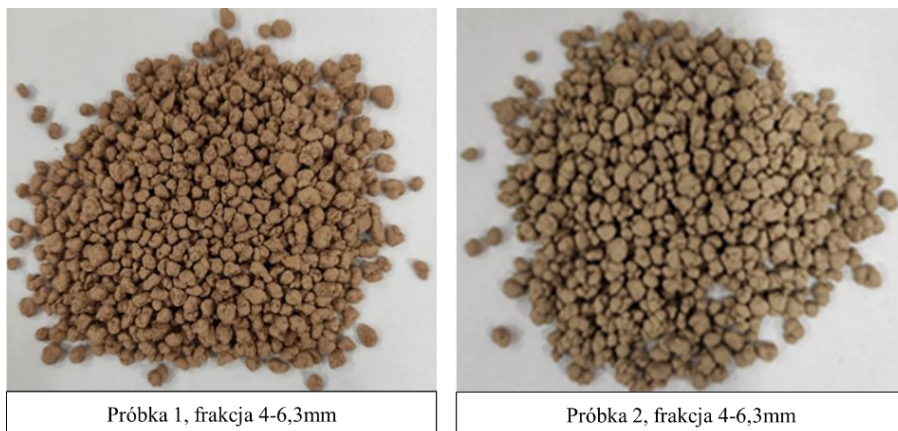


Rys. 5. Zmiany geometrii badanego materiału w miarę wzrostu temperatury oraz odczytane temperatury charakterystyczne

Fig. 5. Changes in the geometry of the tested material as the temperature increases and the characteristic temperatures read

3.5. PRÓBA WYPALANIA W TEMPERATURZE 1000°C

Podczas procesu wypalania otrzymano stabilny spiek. Obecność żelaza spowodowała lekko ciemniejsze zabarwienie granulatu. W surowym materiale żelazo występowało w formie zredukowanej. Tlenki żelaza powierzchniowo utleniają się już w temperaturze ~300°C, natomiast pełne utlenienie zachodzi w temperaturze ~1250°C. Przemiany fazowe oraz przyłączanie tlenu powoduje wzrost objętości spieku a zarazem wzrost porowatości. Z drugiej strony podczas wypalania dochodzi do termicznego rozkładu węglanów. Węglany rozkładają się w różnych temperaturach. Rozpad termiczny kalcytu i dolomitu jest podobny i rozpoczyna się zazwyczaj w temperaturze powyżej 800°C, kończąc przy ~1000°C. Podczas procesu wydzielą się CO₂, powodując znaczną utratę masy próbki i wtórną porowatość. Jeżeli proces spiekania nie zostanie przerwany w tym momencie, to tworząca się faza ciekła zamknie uzyskaną porowatość i powstanie lity spiek. Dlatego tak ważne jest umiejętne prowadzenie procesu spiekania dla kruszyw lekkich o porowatości otwartej.



Rys. 6. Obrazy granulatu po wypaleniu w 1000°C
 Fig. 6. Images of the granulate after firing at 1000°C

3.6. PARAMETRY FIZYKOCHEMICZNE WYTWORZONEGO KRUSZYWA

3.6.1. GĘSTOŚĆ

Gęstości pozorne otrzymanych kruszyw nie są wyższe niż stanowi norma EN 13055:2016 Lightweight aggregates, natomiast ze względu na zastosowany niepęczniejący surowiec nie osiągają wartości charakterystycznych dla typowych kruszyw lekkich, np. keramzytu $\sim 0,5 \text{ g/cm}^3$. Gęstość nasypowa kruszywa jest definiowana jako stosunek masy danej ilości materiału do całkowitej objętości zajmowanej przez ten materiał. Objętość ta obejmuje zarówno puste przestrzenie między cząstkami, jak i pory wewnątrz cząstek. Gęstość nasypowa jest funkcją kształtu cząstek, gęstości, wielkości, uziarnienia i zawartości wilgoci, a także sposobu upakowania materiału (luźno, wibracyjnie) i różni się nie tylko w zależności od różnych materiałów, ale także od różnych rozmiarów i uziarnienia danego materiału. Gęstość nasypowa wszystkich badanych kruszyw w frakcji 4–6,3 mm jest także podobna, spełnia wyżej wymienioną normę i wynosi $\sim 0,8 \text{ g/cm}^3$. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Gęstości pozorna i usypowa badanych kruszyw lekkich
 Table 3. Apparent and bulk density of the tested lightweight aggregates

Próbka	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość usypowa [g/cm ³]
1	1,23	0,85
2	1,28	0,86

3.6.2. BADANIE NASIĄKLIWOŚCI

Nasiąkliwość to zdolność materiału do wchłaniania i zatrzymywania przez strukturę wewnętrzną pewnej ilości wody. Nasiąkliwość jest parametrem niezwykle ważnym i jest zależna od porowatości. Wyraża się ją w procentach jako stosunek masy lub objętości cieczy do masy lub objętości materiału w stanie suchym. W większości przypadków dąży się aby nasiąkliwość materiałów budowlanych była jak najniższa, odwrotnie w przypadku kruszywa lekkiego projektowanego na zielony dach. Nasiąkliwości próbek są bardzo wysokie, rzędu 50% (tab. 4), co oznacza że proces spiekania bez zamykania porów został przeprowadzony poprawnie.

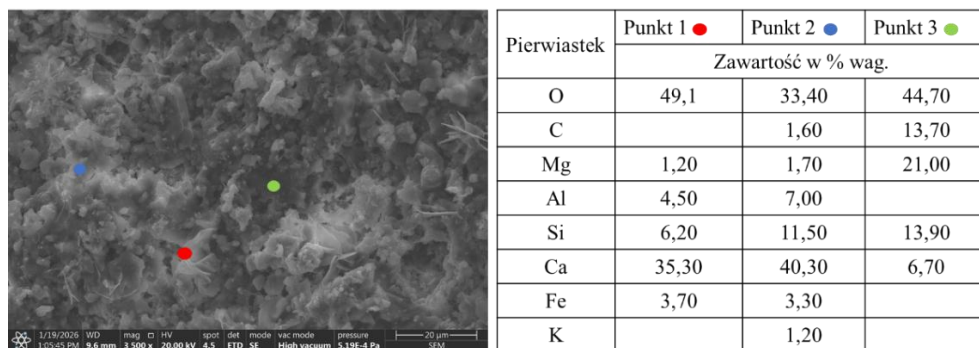
Tabela 4. Nasiąkliwość wodna i retencja kruszywa
Table 4. Water absorption and aggregate retention

Próbka	Masa suchej próbki [g]	Masa próbki po 24 h w wodzie [g]	Nasiąkliwość wodna [%]	Retencja krótkotrwała [%]
1	50,004	75,187	50,37	39,3
2	50,006	73,684	47,37	35,0

Nierównomierna wymiana wilgoci w cząstkach lekkiego kruszywa może być podzielona na dwa wyraźnie różne procesy. Pierwszy ma miejsce, gdy kruszywo jest zanurzone w wodzie i początkowo wchłania ją w sposób ciągły w dużym tempie. Drugi obejmuje proces pochłaniania wody w znacznie wolniejszym tempie, które z czasem spada do poziomu tak niskiego, że trwa to latami. Dla krótkotrwałej retencji wodnej najważniejsza jest dynamika pochłaniania wody w krótkim okresie czasu. Komercyjne lekkie kruszywo nie pochłania znaczących ilości wody. Woda przemieszcza się stosunkowo wolno do i z kruszywa przez pory kapilarne, ponieważ porowatość jest zamknięta. Zupełnie inaczej zachowują się kruszywa lekkie z porowatością otwartą i bez szklistej otoczki. Wytworzone kruszywo ma retencję krótkotrwałą powyżej 35% w związku z czym w bardzo krótkim czasie może pochłoniąć duże ilości wody z opadów nawałnych.

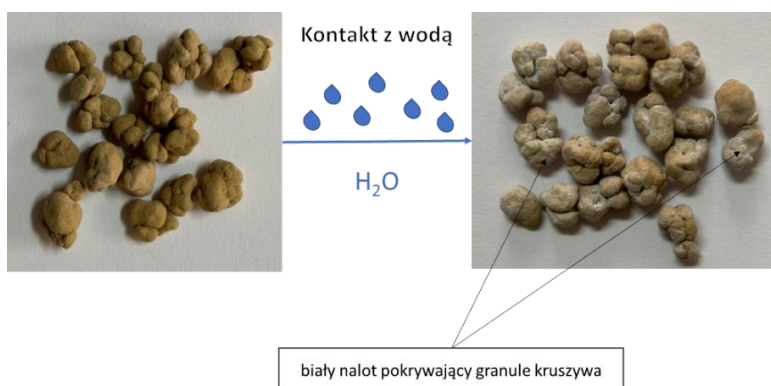
3.6.3. MIKROSTRUKTURA SEM ORAZ ANALIZA EDS

Pod względem strukturalno-teksturalnym ziarna kruszyw posiadają porowatość kształtowaną przez pory o kształcie głównie kulistym oraz pustki powstałe na skutek preparatyki, które są zazwyczaj znacznej wielkości. Wielkości pustek wynoszą miejscami do 0,500 mm, pustki mają kulisty kształt i występują w całej objętości materiału (rys. 7). Przeprowadzone analizy pierwiastkowe EDS w punktach są typowe dla materiałów pochodzenia mineralnego i zawierają fazy krzemianów, glinokrzemianów i tlenków wapnia, magnezu czy żelaza. Podwyższone zawartości wapnia są pozostałością po węglanach.



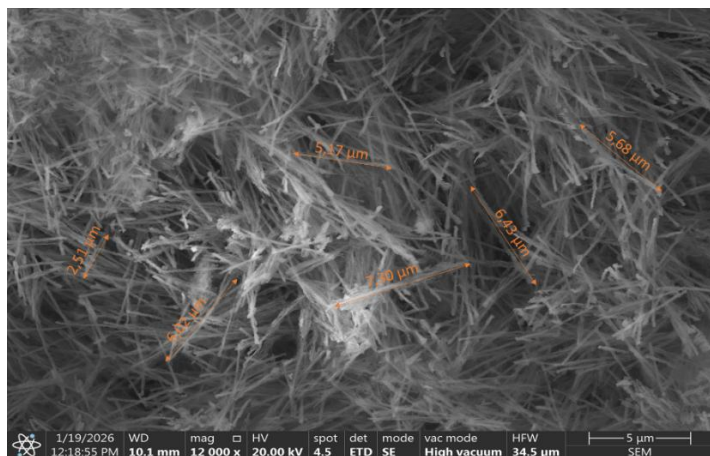
Rys. 7. Mikrografia z analizą EDS kruszywa po wypaleniu
Fig. 7. Micrograph with EDS analysis of the aggregate after firing

Podczas wykonywania pomiarów kruszywa zaobserwowano, że pokrywa się ono białym nalotem po kontakcie z wodą (rys. 8). Dlatego postanowiono przeprowadzić analizę mikrostruktury dla obu przypadków, bezpośrednio wypalonego kruszywa oraz takiego, które przeszło badania hydrometryczne.



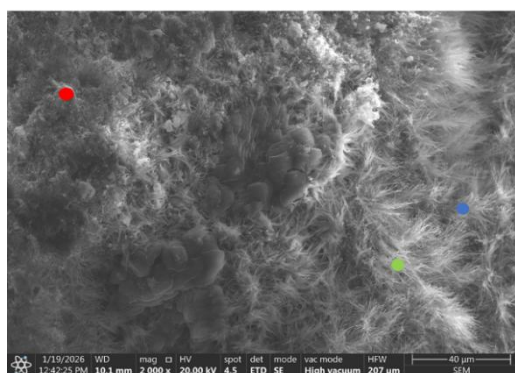
Rys. 8. Zdjęcia kruszywa przed i po deszczowaniu
Fig. 8. Photos of aggregate before and after irrigation

Zdjęcia mikroskopowe SEM wykazują wyraźne różnice pomiędzy dwoma próbkami. Na powierzchni ziaren kruszywa po kontakcie z wodą zaobserwowano dużą ilość igiełkowatych krystalitów. Długość igiełek jest rzędu kilku mikrometrów a szerokość kilku nanometrów (rys. 9). Wykonano również analizę pierwiastkową EDS w punkcie, aby ocenić skład chemiczny. Na rysunku 10 przedstawiono punkty z których zebrano dane oraz wyniki tych badań. Chemizm krystalitów wyraźnie różni się od materiału pierwotnego i można wnioskować na podstawie morfologii oraz danych chemicznych, że będą one zbudowane z węglanu lub wodorotlenku wapnia.



Rys. 9. Mikrofotografia kruszywa po wypaleniu i kontakcie z wodą z wymiarami wtórnych krystalitów

Fig. 9. Micrograph of the aggregate after sintering and contact with water with the dimensions of secondary crystallites



Pierwiastek	Punkt 1 ●	Punkt 2 ●	Punkt 3 ●
	Zawartość w % wag		
C	22,80	19,40	19,10
O	53,40	58,40	55,30
Na	1,00		
Mg	0,90		
Al	1,30		
Si	3,10	2,50	3,10
Ca	17,60	19,70	22,60

Rys. 10. Mikrofotografia z analizą EDS kruszywa po wypaleniu i kontakcie z wodą

Fig. 10. Micrograph with EDS analysis of the aggregate after firing and contact with water

3.6.4. OCENA ZAWARTOŚCI ZWIĄZKÓW ROZPUSTCZALNYCH NA PODSTAWIE PRZEWODNICTWA

Ocenę wymagalności związków rozpuszczalnych na podstawie przewodnictwa oraz pH wykonano na wypalonym granulacie. Parametry wody zdemineralizowanej użytej w badaniu: pH 5,21, przewodnictwo 0,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Wartości pH są bardzo wysokie, przekraczające wartość 10 i jest to związane z dużą zawartością związków wapnia (tab. 5). Podobnie jak w przypadku zawartości związków rozpuszczonych, którą można zbadać wykorzystując technikę konduktometrii elektrolitycznej. Przewodność dochodzi

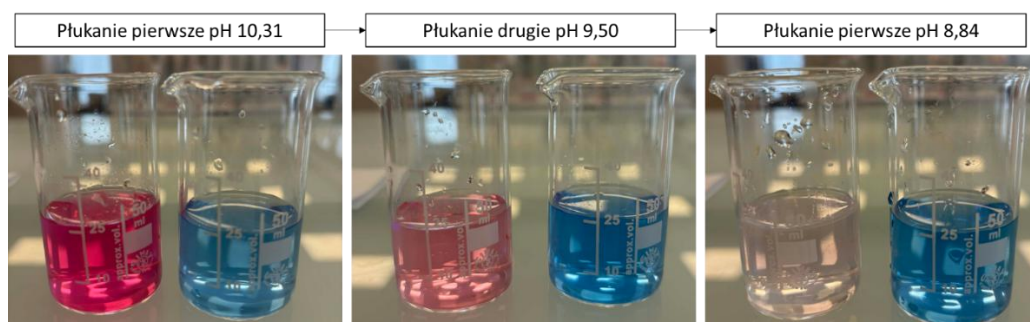
do 7 mS/cm. Granulat zachowuje swój kształt (nie rozpada się w wodzie) przez cały czas trwania eksperymentu.

Tabela 5. Wyniki badań przewodności i pH

Table 5. Conductivity and pH test results

Próbka	pH		
	1 dzień	3 dni	7 dni
1	10,76	11,20	11,52
2	11,20	11,85	11,09
Przewodność [μ S]			
1	399	2190	2020
2	1270	5990	7170

Takie wysokie pH jest niedopuszczalne jeśli chodzi o zastosowanie kruszywa na zielonym dachu, podobnie jak duża ilość wymywających się związków rozpuszczalnych. Podjęto więc próbę wypłukania kruszywa do zadawalającego pH, którą osiągnięto po 3 wymianach wody (rys. 11). Wartości pH kontrolowano miernikiem oraz za pomocą wskaźników alkacymetrycznych: fenoloftaleiny oraz błękitu bromotymolowego.



Rys. 11. Proces płukania kruszywa lekkiego
Fig. 11. Lightweight aggregate washing process

4. PODSUMOWANIE

Produkcja kruszyw mineralnych związana jest często z procesami płukania z frakcji ilasto-pylastych. Liczna część kopalń boryka się z zalegającymi produktami poprocesowymi na składowiskach lub stawach osadowych. Niekiedy producenci nie zdają sobie sprawy z potencjału możliwości wykorzystania tych surowców wtórnych do produkcji kruszyw lekkich.

Podejście ekologiczne i polityka proekologiczna coraz częściej wymusza zwiększenie powierzchni zazielenienia w terenach miejskich, także na dachach i ścianach w budynkach posadowionych na małych działkach. Kruszywa lekkie jako główny składnik substratów na zielone dachy odgrywają coraz większe znaczenie i stwarzają jednocześnie szansę na wykorzystanie surowców współtowarzyszących przy produkcji kruszyw łamanych.

Z gliniek powstałych po procesie płukania kruszyw dolomitowych na przykładzie kopalni z Imielina uzyskano perspektywiczne kruszywo lekkie. Badania wykazały, że najkorzystniejsza temperatura tworzenia trwałego spieku z rozwiniętą porowatością otwartą jest przedziale 900–1000°C. Kruszywa te zawierają dużą ilość węglanów, co skutkuje znaczącym ubytkiem masy, emisją CO₂ wpływającą na wzrost porowatości oraz podwyższonym pH podczas kontaktu z wodą. Należy rozważyć neutralizację pH poprzez przepłukiwanie kruszyw albo dodatek substancji zakwaszających.

Odpady z przeróbki kruszyw mają potencjał do termicznej konwersji na produkty o wartości dodanej ze względu na ich zdolność do spiekania. Poprzez ten proces można uzyskać materiały o wysokiej porowatości otwartej znajdującej zastosowanie w aranżacji zielonych dachów.

LITERATURA

- [1] MOLINEUX C.J., GANGE A.C., CONNOP S.P., NEWPORT D.J., *Using recycled aggregates in green roof substrates for plant diversity*, Ecol. Eng., 2015, 82, 596–604.
- [2] RAHMAN M.S., MACPHERSON S., LEFSRUD M., *Prospects of porous concrete as a plant-growing medium and structural component for green roofs: A review*, Renew. Agric. Food Syst., 2020, 37, 536–549.
- [3] EKSİ M., SEVGİ O., AKBURAK S., YURTSEVEN H., ESİN İ., *Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates*, Ecol. Eng., 2020, 156, 105966.
- [4] MICKOVSKI S.B., BUSS K., MCKENZIE B.M., SÖKMENER B., *Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs*, Ecol. Eng., 2013, 61, 706–714.
- [5] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., *Improved Artificial Aggregates for Use in Green Roof Design*, Sustainability, 2024, 16, 5512.
- [6] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., *Artificial lightweight aggregate made from alternative and waste raw materials, hardened using the hybrid method*, Sci. Rep., 2024, 14, 16880.
- [7] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., STASZEWSKA M., *Lekkie kruszywo alternatywne, specyfika, parametry, możliwości zastosowania*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 7, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2024, 175–188.
- [8] BATES A.J., SADLER J., GRESWELL R.B., MACKAY R., *Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment*, Landscape Urban Plan, 2015, 135, 22–31.
- [9] LIU R., COFFMAN, R., *Lightweight Aggregate Made from Dredged Material in Green Roof Construction for Stormwater Management*, Materials, 2016, 9, 611, <https://doi.org/10.3390/ma9080611>
- [10] OLIN-ESTES T.J., PALERMO M.R., *Recovery of dredged material for beneficial use: The future role of physical separation processes*, J. Hazard. Mater., 2001, 85, 39–51.
- [11] SIGUA G.C., *Current and future outlook of dredged and sewage sludge materials in agriculture and environment*, J. Soils Sediments, 2005, 5, 50–52.

- [12] KREITINGER J.P., PRICE R., BORROWMAN, T.D., KENNEDY A.J., BRANDON D.L., BOURNE M., *Evaluation of beneficial use suitability for Cleveland harbor dredged material, Interim capacity management and long-term planning*. [In:] ERDC/EL Project Report US Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA, 2011, http://www.lrb.usace.army.mil/Portals/45/docs/Cleveland/Army_ERDC_Cleveland_BU_Final_Report.pdf [accessed on 23 April 2015].
- [13] DANIELS W.L., WICK A., CARTER C., III, SAUNDERS C., *Screening criteria for beneficial utilization of dredge sediments in Virginia*, USA. In Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Tupelo, MS, USA, 8–15 June 2012, <http://www.asmr.us/Publications/Conference%20Proceedings/2012/0100-Daniels-VA.pdf> [accessed on 13 March 2015].
- [14] ESTE, T.J., MCGRATH C.J., *Economical treatment of dredged material to facilitate beneficial use*. [In:] ERDC/EL TR-14-11, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA, 2014, <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/trel14-11.pdf> [accessed on 29 January 2015].
- [15] ESTES T.J., MCGRATH C.J., *Economical treatment of dredged material to facilitate beneficial use*. [In:] ERDC/EL TR-14-11. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA, 2014. Available online: <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/trel14-11.pdf> [accessed on 29 January 2015].
- [16] STEMPKOWSKA A., WÓJCIK Ł., OSTROWSKI K.A., GAWENDA T., *Low-energy clay-cement slurries find application as waterproofing membranes for limiting the migration of contaminants – case studies in Poland*, ISSN 1996-1073, 2023, Vol. 16, Iss. 1, art. no. 230, s. 1–22.
- [17] LITWINEK-ROZBICKA E., IZAK P., WÓJCIK Ł., MASTALSKA-POPLAWSKA J., *Clay-cement suspensions based on Belchatow and Patoka polymineral clays – rheological characteristics*, Journal of Physics. Conference Series, ISSN 1742-6588, 2020, Vol. 1527, art. 012011, s. 1–7.
- [18] STEMPKOWSKA A., WÓJCIK Ł., IZAK P., STASZEWSKA M., MASTALSKA-POPLAWSKA J., *Investigation of post-industrial pollutions' immobilization in a hydraulic self-solidifying clay-cement binder*, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, ISSN 1757-8981, 2018, Vol. 427, art. no. 012014, Mineral Engineering Conference, Zawiercie 2018, s. 1–10.
- [19] LIU J., LIU R., HE Z., LI Y., *Preparation and microstructure of green ceramsite made from sewage sludge*, Journal Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed., 2012, 27, 149–153.
- [20] CHANG N.B., HOSSAIN F., WANIELISTA M., *Filter media for nutrient removal in natural systems and built environments. I – Previous trends and perspectives*, Environ. Eng. Sci., 2010, 27, 689–706.
- [21] STEMPKOWSKA A., *Lightweight Aggregates with Special Microstructure for Use in Rooftop Garden Design*, Sustainability, 2025, 17, 9489, <https://doi.org/10.3390/su17219489>

TESTS ON LIGHTWEIGHT AGGREGATES PRODUCED FROM CLAYS FORMED AFTER WASHING DOLOMITE

This article presents the possibilities of obtaining aggregates from clay-silt fractions obtained by washing crushed dolomite aggregates. Aggregate formation was achieved using selected mechanical processing methods, such as dynamic granulation, sedimentation, crushing, and classification. The following instrumental techniques were used to evaluate the aggregate parameters: XRF (X-ray fluorescence) to obtain detailed information on the oxide composition of the tested raw materials; HSM (high-temperature microscopy) to determine the specific sintering temperature; and pH and conductivity meters to examine filtration solutions in direct contact with the aggregate. A key issue was examining the microstructure of the produced aggregates after firing using SEM microscopy.

The obtained results will allow for further research on the development of a concept for the production of lightweight, alkaline aggregates. Aggregates with high water absorption of approximately 50% and a low bulk density of 0.82 g/cm³ were produced. The research generally contributes to the identification of resources that can be transformed into lightweight aggregates for use in urban greening, which is consistent with circular economy strategies and environmental protection.

Tomasz GAWENDA
Daniel SARAMAK
Agata STEMPKOWSKA
Dariusz FOSZCZ
Aldona KRAWCZYKOWSKA
Agnieszka SUROWIAK

AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

OCZYSZCZANIE KRUSZYW Z FRAKCJI LEKKIEJ W SEPARATORZE W KOPALNI DOLOMITU W IMIELINIE

Przedstawiono jedną z metod oczyszczania kruszyw z frakcji lekkich w separatorze wodnym SEL, który został zbudowany w innowacyjnym układzie technologicznym do produkcji kruszyw w Kopalni Dolomitu w Imielinie przez firmę Hydro-Tech-Sort Gliwice w ramach projektu Formator Plus. Celem autorów badań była ocena efektywności uszlachetniania pięciu typów litologicznych kruszyw mineralnych w klasach ziarnowych 2–8 i 8–16 mm zanieczyszczonych frakcją organiczną i muszlami w ilości ok. 2–3%. Założeniem badań było uzyskanie czystości kruszyw w warunkach przemysłowych na poziomie odseparowania zanieczyszczeń co najmniej 95%. Badania wykazały, że przy odpowiednich parametrach pracy separatora możliwe jest uzyskanie nawet 100% czystości.

1. WSTĘP

Uszlachetnianie kruszyw mineralnych ma na celu podniesienie ich cech jakościowych aby spełniały wymagania normowe dla konkretnego przeznaczenia. Proces ten ma szczególne znaczenie zwłaszcza dla kruszyw żwirowych, łamanych ze skał węglanowych lub innych kruszyw, a także z odpadów (np. budowlanych), które mogą być nieodpowiedniej jakości pod względem odporności na rozdrabnianie i ścieranie, nasiąkliwości, porowatości, zawartości zanieczyszczeń i kształtu ziarn. Dla osiągnięcia tego celu stosuje się różne metody, które dzielą się na grupy uszlachetniania w oparciu o wykorzystanie różnic [1–4]:

- w gęstościach pozornych ziarn wadliwych (zwiędziałych) i prawidłowych,
- właściwości wytrzymałościowych poszczególnych ziarn,
- we współczynnikach sprężystości i tarcia poszczególnych ziarn,

- w kształcie ziarn, według opatentowanej innowacyjnej metody (patent nr PL 233689 B1) polegającej na selektywnym odsiewaniu ziaren nieforemnych (płaskich, wydłużonych) w wąskich klasach ziarnowych w przesiewaczach ustawionych ze sobą posobnie i ponownym ich rozdrabnianiu układzie zamkniętym z kruszarką [5–7],
- w kształcie ziarn oraz ich gęstości i pływalności w ośrodku wodnym, według opatentowanej innowacyjnej metody „Układ urządzeń do produkcji kruszyw oraz sposób produkcji kruszyw” (patent nr 233318 B1) [8].

Najbardziej rozpowszechnione w przeróbce kruszyw są dwie pierwsze metody, powiązane zazwyczaj z procesami rozdrabniania, klasyfikacji, wzbogacania i płukania. Mówi się, że szeroko zakrojone procesy uszlachetniania występują jednocześnie np. w kruszarkach udarowych (oczyszczanie kruszyw na sucho z surowców ilastych i organicznych) [9], klasyfikatorach hydraulicznych i osadzarkach (usuwanie ziaren zwietrzałych o mniejszych gęstościach czy różnych prędkościach opadania) [10], a także w maszynach płuczających mechanicznych i wysoko ciśnieniowych [11]. Dotyczy to zwłaszcza kruszyw żwirowych, szczególnie pochodzenia polodowcowego posiadających w ziarnach otoczkę ilastą, która w procesie płukania i dokruszania zostaje usunięta.

Grawitacyjne wzbogacanie w osadzarkach jest prostą metodą separacji wykorzystywaną do rozdziału różnorodnych surowców mineralnych i odpadów. Metoda ta jest szczególnie wydajna i efektywna w przypadku separacji materiałów o stosunkowo dużej różnicy gęstości, jak w przypadku rozdziału węgla od skały płonnej. Jest także metodą o dosyć małym negatywnym wpływie na środowisko naturalne oraz wysokiej efektywności ekonomicznej [12].

Sam proces wzbogacania w osadzarkach przebiega w wyniku rozdziału nadawy na frakcje o różnych gęstościach. Odbywa się w powietrzu, wodzie lub innym ośrodku cieplem, lżejszym od składników wzbogacanego materiału. Materiały o różnych gęstościach charakteryzują się różnymi prędkościami opadania w danym ośrodku, w którym wytwarzany jest jego pionowy ruch pulsacyjny przepływu ośrodka [13, 14].

W skutek przeprowadzenia operacji rozdziału, po pewnym czasie utworzy się na sicie warstwa materiału rozdzielonego na frakcje według prędkości opadania ziaren. Jeżeli materiał jest jednorodny pod względem rozkładu cech geometrycznych, to warstwa najniższa (dolna) będzie zawierać ziarna o największej gęstości (większej prędkości opadania), a warstwa najwyższa (górną) – ziarna najlżejsze (najmniejsza prędkość opadania). Po zakończonym procesie separacji niejednorodnej nadawy w osadzarkach uzyskuje się frakcje produktu o większej jednorodności pod względem gęstości, a przez to i wyższej wartości handlowej. Jeżeli w nadawie zawarte są zanieczyszczenia lekkie (korzenie, liście, węgiel, bursztyn) to również one znajdują się w warstwie górnej osadzarki.

Na dokładność procesu rozdziału wpływa szereg czynników: skład granulometryczny i densymetryczny nadawy, wydajność, warunki hydrodynamiczne, ilość podawanej wody dolnej, rozwiązania konstrukcyjne (np. sposób odbierania produktu ciężkiego)

itp. Najistotniejszym parametrem determinującym efektywność rozdziału w osadzarce jest skład densymetryczny nadawy. W momencie, gdy zawartość frakcji o większej gęstości jest większa niż przepustowość urządzenia, część tego produktu trafia do produktu lekkiego, przez co pogarsza się efektywność rozdziału. Za minimalny wymiar ziarna, który można kierować do osadzarki należy uznać taką wartość, poniżej której efektywność wzbogacania innymi sposobami będzie większa [13, 14].

2. CEL BADAŃ

Celem autorów badań była ocena efektywności uszlachetniania kruszyw mineralnych (żwir, dolomit, wapień, piaskowiec, granit) w klasach ziarnowych 2–8 i 8–16 mm zanieczyszczonych frakcją organiczną i muszlami w ilości ok. 2–3% w separatorze frakcji lekkiej SEL w Kopalni Dolomitu w Imielinie. Założeniem było uzyskanie czystości kruszyw w warunkach przemysłowych na poziomie odseparowania zanieczyszczeń co najmniej 95%. Separator stanowił część innowacyjnego układu technologicznego przeznaczonego do produkcji kruszyw foremnych i oczyszczania kruszyw mineralnych z zanieczyszczeń lekkich organicznych.

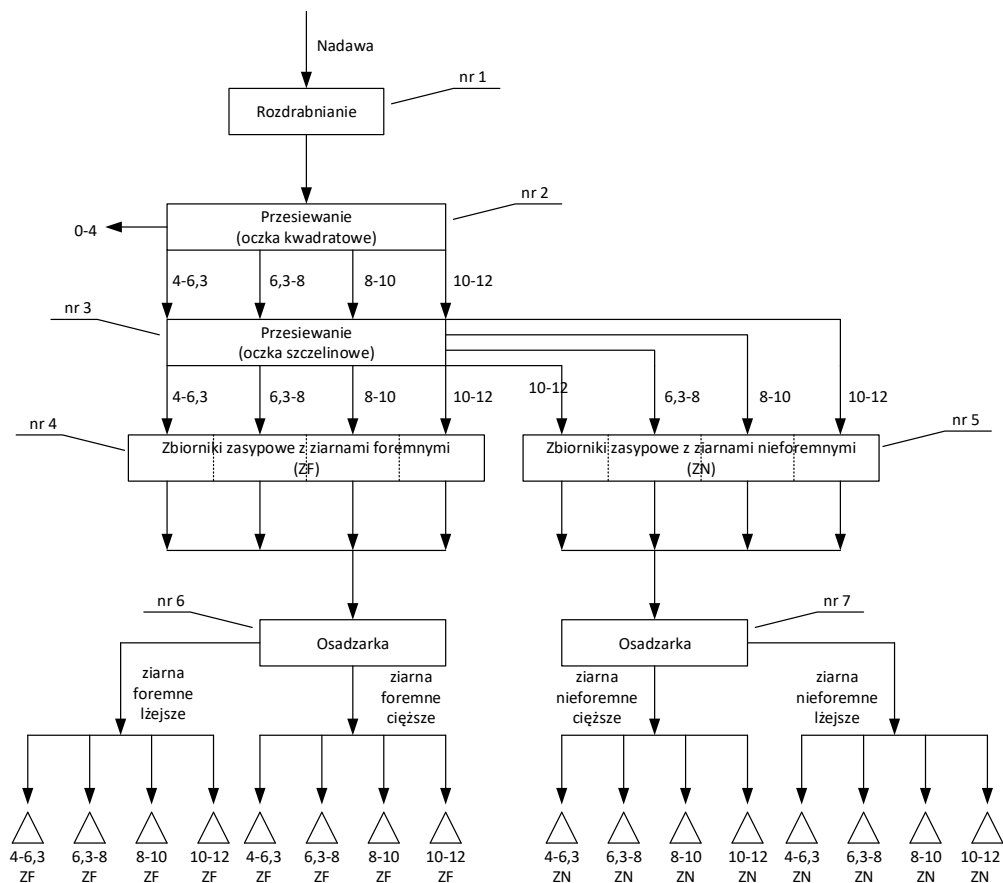
3. OPIS INNOWACYJNEJ INSTALACJI

Koncepcja rozwiązania układu technologicznego w Kopalni Dolomitu w Imielinie oparta jest na wynalazku pn. *Układ urządzeń do produkcji kruszyw oraz sposób produkcji kruszyw* (patent nr 233318 B1) [8]. Układ podany na rysunku 1 bazuje na rozwiązaniach technologicznych służących do produkcji (rozdrabniania i klasyfikacji) kruszyw foremnych i nieforemnych oraz na uszlachetnieniu kruszyw separatorami (osadzarkami). Za pomocą tych rozwiązań można oddzielnie wyprodukować cztery rodzaje kruszywa o dowolnym zakresie uziarnienia, tj. kruszywa foremne (kubiczne), nieforemne (płaskie, podłużne) o małej i wysokiej gęstości, albo kruszywa foremne i nieforemne wolne od zanieczyszczeń lekkich.

Sposób produkcji kruszyw (rys. 1) ma na celu rozdrobnienie w kruszarce (nr 1) i rozklasyfikowanie kruszyw na wąskie klasy ziarnowe w przesiewaczu (nr 2), następnie poddanie dalszemu procesowi separacji w przesiewaczu (nr 3) na sitach szczelinowych, tak aby uzyskać osobno ziarna foremne i nieforemne (kierując je do zbiorników nr 4 i 5), z których metodą grawitacyjną (np. w osadzarkach pulsacyjnych, osadzarkach powietrznych lub stołach koncentracyjnych) – nr 6 i 7 zostaną odseparowane ziarna lżejsze od cięższych.

Istotą wydzielania wąskich klas ziarnowych jest wyeliminowanie ziarn równo opadających przed procesem separacji, które będą miały negatywny wpływ na ostrość rozdziału ziarn w osadzarce pod względem gęstości. Taki układ do produkcji kru-

szyw wysokiej jakości pod względem kubeczności, czystości od zanieczyszczeń lekkich i wadliwych (zwietrzałych, porowatych) ziaren generuje dodatkowe kruszywa o odmiennych właściwościach nadających się dla branży ogrodniczej.



Rys. 1. Schemat układu technologicznego do produkcji kruszyw o zróżnicowanych właściwościach fizyczno-mechanicznych wg koncepcji patentu nr PL 233318 B1 [8]

Fig. 1. Diagram of the technological system for the production of aggregates with different physical and mechanical properties according to the concept of patent no. PL 233318 B1 [8]

Aby podnieść jakość kruszyw i zmniejszyć liczbę stadiów rozdrabniania zostały podjęte badania w ramach realizacji projektu aplikacyjnego NCBiR: Działania 4.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020. Spółka Hydro-Tech-Sort Gliwice przy współpracy z jednostkami naukowo-badawczymi (AGH w Krakowie, ICIMB Sieć Badawcza Łukasiewicz) zbudowała prototyp przesiewacza oraz separatory frakcji trudnej (SET) i lekkiej (SEL) kruszyw w skali laboratoryjnej oraz pełnowymiarowy prototyp innowacyjnego układu technologicznego wraz z przesiewaczami do uszlachet-

niania kruszyw mineralnych na potrzeby realizacji testów w warunkach rzeczywistych. Linia technologiczna została wybudowana w Kopalni Dolomitu Imielin (rys. 2). Jej obszerna charakterystyka oraz wyniki badań przedstawiono w publikacjach [15, 16].



Rys. 2. Linia technologiczna w Kopalni Dolomitu Imielin, obraz z drona
Fig. 2. Technological line in the Imielin Dolomite Mine, image from a drone

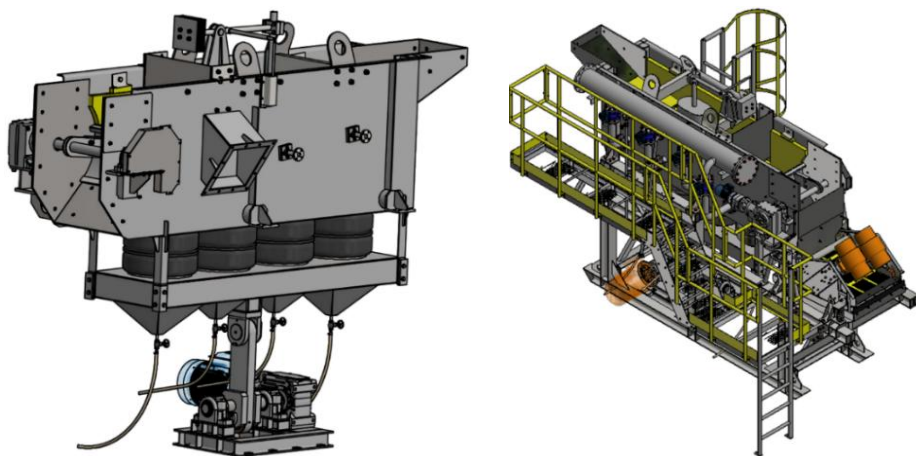
4. CHARAKTERYSTYKA STANOWISKA BADAWCZEGO SEPARATORA ZANIECZYSZCZEŃ LEKKICH (SEL)

Separator pulsacyjny przeznaczony jest do oddzielania zanieczyszczeń organicznych lekkich (drewno, liście, korzenie roślin, węgiel, bursztyn) i zanieczyszczeń węglanowych (kreda, muszle) od kruszywa o granulacji 2–32 mm. Jest to urządzenie, w którym odbywa się w sposób ciągły rozdzielanie mieszaniny, np. żwirowo-piaskowej w pulsującym ośrodku wodnym, w wyniku czego następuje jej rozdział na trzy produkty: żwir, piasek i odpady. Urządzenie to zbudowane jest z wanny samonośnej posadowionej na specjalnej ramie nośnej z płozami. Na ramie pod skrzynią piaskową umieszczono układ napędowy. Pod skrzynią piaskową zamontowano gumowe miechy, które pod wpływem nacisku ze strony napędu przenoszonego przez korbówód ulegają ściśnięciu, co powoduje wzrost ciśnienia wewnątrz i wyrzut wody ku górze (rys. 3). Ma-

teriał transportowany jest w sposób pulsacyjny po sicie poliuretanowym zamontowanym wewnątrz wanny.

Urządzenie pracuje w ten sposób, że strumień materiału (łóże) pod wpływem pulsacyjnego działania wody zostaje rozwarstwiony według gęstości pozornej poszczególnych ziaren. Ziarna o dużej gęstości przechodzą do dolnej części strumienia, a ziarna porowate o małej gęstości pozornej wydostają się na wierzch. Przesuwający się strumień materiału natrafia na swej drodze na urządzenie rozdzielające go na dwie części, które oddzielnie są odbierane. Zanieczyszczenia lekkie są wymywane i pływają na powierzchni wody, a następnie są odprowadzane wraz z wodą wylotem bocznym z maszyny. Oczyszczony materiał wydostaje się wraz z wodą od czoła maszyny. Zanieczyszczenia piaskowe przedostają się przez sito transportujące łóże, opadają i są odprowadzane w sposób ciągły rurkami od dołu maszyny. Stopień oczyszczenia kruszywa jest zmienny i zależy od ilości użytej wody oraz od stopnia zanieczyszczenia kruszywa.

W sekcji napędowej ruch posuwisto-zwrotny tłoków realizuje się za pomocą mimośrodowo umieszczonego na wale napędowym. Wał wprawia się w ruch silnikiem przez przekładnię z opcjonalnym przemiennikiem częstotliwości służącym do regulacji liczby obrotów napędów. Długość drogi tłoka reguluje się mimośrodowo. Przy uszlachetnianiu materiału o większym uziarnieniu grubość warstwy na sicie powinna być ok. 7 razy większa od najmniejszego wymiaru ziarna. Przy drobnym materiale o uziarnieniu ok. 2 mm grubość warstwy powinna wynosić co najmniej 40 mm. Na ogół w jednej osadzarce uszlachetnia się jedną frakcję kruszywa. W procesie technologicznym separator zanieczyszczeń lekkich współpracuje z innymi urządzeniami linii technologicznej zakładu, np. przenośnikiem taśmowym, przesiewaczem. Widok zainstalowanego separatora SEL na kopalni pokazuje fotografia (rys. 4). W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę parametrów SEL.



Rys. 3. Schemat budowy separatora SEL [17]

Fig. 3. Schematic diagram of the SEL separator [17]



Rys. 4. Widok separatora SEL
Fig. 4. View of the SEL separator

Tabela 1. Charakterystyka separatora zanieczyszczeń lekkich SEL [17]
Table 1. Characteristics of the SEL light pollution separator [17]

Nazwa	Jednostka	Wartość
Skok regulowany	[mm]	100–250
Czas skoku regulowany	[skok/s]	0,6–1,2
Wysokość progu produktu ciężkiego	[mm]	0–300
Moc napędu	[kW]	22
Napięcie zasilania, częstotliwość	[V], [Hz]	400, 50
Obroty silnika elektrycznego	[obr/min]	~1400
Wydajność w kruszywie	[t/h]	max 40
Zapotrzebowanie na wodę	[m ³ /h]	max 80
Uziarnienie nadawy	[mm]	2–32
Gęstość nasypowa	[g/cm ³]	< 2
Wymiar sita	[mm]	400x720
Liczba sit	[szt.]	4

Stanowisko badawcze separatora, wytworzone w HTS Gliwice, jest usytuowane za przesiewaczem WSL, z którego jest kierowane kruszywo foremne 2–8 mm (rys. 4). Należy podkreślić, że na potrzeby badawcze wielokrotnych testów, zarówno dla frakcji 8–16, jak i 2–8 mm stanowisko separatora było wyposażone w dodatkowy przenośnik zasilany łyżką koparki (rys. 5). Taki węzeł pozwolił na przetestowanie układu różnymi surowcami o różnym stopniu zanieczyszczenia.



Rys. 5. Widok separatora z bocznym dodatkowym zasilaniem nadawy
Rys. 5. View of the separator with additional side feed supply

5. ANALIZA BADAŃ PRZEPROWADZONYCH W SEPARATORZE

Do testów zostały specjalnie przygotowane kruszywa (żwir, dolomit, wapień, piaskowiec, granit) z zanieczyszczeniami organicznymi i muszlami w ilości ok. 2–3%, a próbki nadawy zostały pobrane do analiz. Udziały zanieczyszczeń dla różnych kruszyw zestawiono w tabelach 2 i 3. Poziom odseparowania zanieczyszczeń został zdefiniowany jako iloraz różnicy udziału zanieczyszczeń w nadawie i produkcie, a udziałem zanieczyszczeń w nadawie.



Rys. 6. Praca separatora, wymywanie zanieczyszczeń
Fig. 6. Separator operation, washing out impurities



Rys. 7. Widok zgromadzonych zanieczyszczeń lekkich
i muszli na powierzchni łoża

Fig. 7. View of accumulated light debris and shells on the bed surface

Nadawa zanieczyszczona podawana była do maszyny napelnianej wodą w obiegu zamkniętym, w której wytwarzany był ruch pulsacyjno-falowy wody. W wyniku falowania zanieczyszczenia były wymywane z dołu do góry i najlżejsze pływały na powierzchni wody oraz przemieszczały się po górnej warstwie materiału (rys. 6 i 7).

Następnie zanieczyszczenia były odprowadzane przez pierwszy próg przelewowy wraz z wodą wylotem bocznym z maszyny. Cięższy oczyszczony materiał wydostawał się od czoła maszyny przez drugi próg przelewowy (produkt ciężki) – rys. 8, a następnie trafiał do przesiewacza odwadniającego.



Rys. 8. Praca separatora, wyjście żwiru przez próg

Fig. 8. Separator operation, gravel exit through the threshold

W przeprowadzonych testach oczyszczania kruszyw zostały poddane różne kruszywa (pięć typów) o uziarnieniu 2–8 i 8–16 mm. Zastosowano różne częstotliwości pulsacji (50, 60 Hz) co daje 62 i 72 cykle/min wału korbowego, dwa rodzaje skoku miechów 100 i 130 mm oraz dwie wysokości progu odbioru kruszywa, tj. 130 i 160 mm (tab. 2 i 3).

Tabela 2. Zestawienie parametrów pracy separatora oraz udziału zanieczyszczeń w kruszywach w klasie 2–8 mm

Table 2. Summary of the separator's operating parameters and the share of impurities in aggregates in the 2–8 mm fraction

Kruszywo	Próg [mm]	Skok [mm]	Pulsacje [1/min]	Udział zanieczyszczeń [%]		Poziom odseparowania [%]
				nadawa	produkt	
Dolomit	130	100	62	2,59	0,27	89,5
Piaskowiec	130	100	62	2,83	0,18	93,7
Żwir	130	130	62	2,78	0,21	92,6
Dolomit	160	130	62	2,75	0,20	92,8
Granit	160	130	62	2,40	0,19	92,2
Żwir	160	100	62	2,63	0,12	95,3
Dolomit	160	100	72	3,03	0,14	95,2
Piaskowiec	160	100	72	3,17	0,05	98,3
Żwir	160	100	72	2,99	0,09	96,9
Granit	160	100	72	3,35	0,00	100,0
Wapień	160	100	72	2,47	0,12	95,0

Tabela 3. Zestawienie parametrów pracy separatora oraz udziału zanieczyszczeń w kruszywach w klasie 8–16 mm

Table 3. Summary of the separator's operating parameters and the share of impurities in aggregates in the 8–16 mm fraction

Kruszywo	Próg [mm]	Skok [mm]	Pulsacje [1/min]	Udział zanieczyszczeń [%]		Poziom odseparowania [%]
				nadawa	produkt	
Dolomit	130	130	72	3,63	0,23	93,7
Piaskowiec	130	130	62	2,96	0,10	96,7
Żwir	130	130	72	2,06	0,18	91,4
Granit	160	130	62	2,23	0,10	95,7
Granit	160	130	72	2,61	0,13	95,2
Dolomit	160	130	62	2,80	0,10	96,5
Piaskowiec	160	100	62	3,02	0,19	93,7
Żwir	160	100	62	2,27	0,07	97,0
Granit	160	130	62	2,45	0,01	99,4
Wapień	160	100	62	2,96	0,11	96,3

Parametry pracy separatora SEL zostały dobrane zgodnie z wytycznymi uzyskanymi na podstawie badań laboratoryjnych [18], a więc zawężone do pewnego optimum natężenia przepływu wody, wielkości skoku, progu i pulsacji. Wobec tego natężenie przepływu wody było niskie i stałe, ponieważ nie ma ono tak istotnego znaczenia, jak wysokość położenia progu odbioru kruszywa ciężkiego, a wydatek wody (jeśli miałby być rozumiany jako zużycie) nie jest istotny, ponieważ układ wodny pracuje w obiegu zamkniętym. Wydatek wody wynosił ok. $50 \text{ m}^3/\text{h}$ przy jednostkowym obciążeniu separatora kruszywem ok. $12 \text{ t}/(\text{m}^2 \times \text{h})$ powierzchni sita, co daje ok. $3,6 \text{ m}^3$ wody na tonę oczyszczanego kruszywa.

W testowaniu we wszystkich analizowanych przypadkach ustawienia parametrów separatora osiągnięto niskie zawartości zanieczyszczeń w produktach po separacji o wartości $<0,3\%$ i sięgające nawet 0% . Jest bardzo istotne z punktu widzenia jakości produktów, aby zawartość zanieczyszczeń lekkich była $<0,5\%$ ($m_{\text{LPC}} 0,5$ wg PN-EN 13043) [19]. Wyniki analiz podano w tabelach 2 i 3. Jak widać uzyskane wyniki testów wskazały na bardzo wysoką efektywność oczyszczania kruszyw, a poziom odseparowania zanieczyszczeń lekkich przekroczył 95% w większości przypadków. Z analiz wynika, że wszystkie przebadane rodzaje surowców można oczyścić do tego poziomu 95% (wytluszczone wartości w tabelach), oczywiście przy odpowiednim ustabilizowaniu procesu separacji ustawiając optymalne parametry pracy separatora.

6. PODSUMOWANIE

Testowany separator w Kopalni Dolomitu w Imielinie stanowił część innowacyjnego układu technologicznego przeznaczonego do produkcji kruszyw foremnych i oczyszczania kruszyw z zanieczyszczeń lekkich. Dokonano w urządzeniu SET oceny efektywności uszlachetniania kruszyw mineralnych (żwir, dolomit, wapień, piaskowiec, granit) w klasach ziarnowych 2–8 i 8–16 mm zanieczyszczonych frakcją organiczną i muszlami w ilości ok. 2–3%. Założenie uzyskania czystości kruszyw na poziomie odseparowania zanieczyszczeń co najmniej 95% zostało spełnione przy odpowiednim nastawieniu parametrów maszyny. Oznacza to, że osiągnięto niskie zawartości zanieczyszczeń w produktach poniżej $0,3\%$ i sięgające nawet 0% .

Z przeprowadzonych badań można zaobserwować, że bardziej korzystne jest ustawienie wyższego progu przelewu kruszywa ciężkiego (160 mm) zarówno dla obu zakresów uziarnienia 2–8 i 8–16 mm dla wszystkich oczyszczanych surowców, chociaż dla przypadku piaskowca 8–16 mm przy niższym progu 130 mm a wyższym skoku 130 mm także uzyskano stopień odseparowania powyżej 95% . Ustawienie wyższego progu determinowane jest zwiększonym skokiem, jaki był ustawiony (100 i 130 mm), co powoduje większe rozluźowanie łoża i szybsze przemieszczanie się zanieczyszczeń ku górze.

Testy wykazały, że frakcje drobniejsze 2–8 mm lepiej oczyszczają się przy niższym skoku (100 mm) i wyższej pulsacji (72 cykle/min). Natomiast frakcje grubsze 8–16 mm oczyszczają się przy obu zakresach skoku 100 i 130, ale przy niższych pulsacjach (62 cykle/min).

Artykuł jest wynikiem realizacji projektu w ramach konkursu NCBiR: konkursu nr 1 w ramach Poddziałania 4.1.4 „Projekty aplikacyjne” POIR w 2017 r., pt.: *Opracowanie i budowa zestawu prototypowych urządzeń technologicznych do budowy innowacyjnego układu technologicznego do uszlachetniania kruszyw mineralnych wraz z przeprowadzeniem ich testów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych*. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Działania 4.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020.



Rzeczpospolita
Polska



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Unia Europejska



LITERATURA

- [1] GRZELAK E., *Technologia kruszyw mineralnych*, Wyd. Arkady, Warszawa 1973.
- [2] GRZELAK E., *Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975.
- [3] GRZELAK E., *Kruszywa mineralne. Poradnik*, Wyd. Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 1995.
- [4] GAWENDA T., LUBACZEWSKA K., *Innowacyjne uszlachetnianie*, BMP Surowce i Maszyny Budowlane, 2019, nr 3, s. 64–69.
- [5] GAWENDA T., *Układ urządzeń do produkcji kruszyw foremnych*, Patent nr PL233689 B1, AGH w Krakowie, Kraków 2019.
- [6] GAWENDA T., *Ways of increasing regular particles contents in aggregates*, Mineral Engineering Conference, Szczawnica, 14–17 September 2015, Dysk Flash, s. 61–76.
- [7] GAWENDA T., *Zasady doboru kruszarek oraz układów technologicznych w produkcji kruszyw lamanych*, Rozprawy Monografie, nr 304, Wyd. AGH, Kraków 2015.
- [8] GAWENDA T., SARAMAK D., NAZIEMIEC Z., *Układ urządzeń do produkcji kruszyw oraz sposób produkcji kruszyw*, Patent nr 233318 B1, AGH w Krakowie, Kraków 2019.
- [9] MAZELA A., *Procesy kruszenia w kruszarkach udarowych*, IMBiGS, Warszawa 1988.
- [10] OSOBA M., *Osadzarki wodne pulsacyjne Komag do przeróbki żwiru i piasku*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWR, 2007, nr 119/48, s. 127–136.
- [11] SARAMAK D., ŁAGOWSKI J., GAWENDA T., SARAMAK A., STEMPKOWSKA A., LUBIENIECKI T., LEŚNIAK K., *Modeling of Washing Effectiveness in a High-Pressure Washing Device Obtained for Crushed-Stone and Gravel Aggregates*, Resources, 2020, 9 (10), 119.
- [12] MARX G., MOSKALA R., SCHNEIDER-KÜHN U., *Gravity Separation with Wet Jigs*, Aufbereitungs Technik, 1999, 40, 215–224.
- [13] SUROWIAK A., GAWENDA T., STEMPKOWSKA A., NIEDOBA T., NAD A., *The influence of selected properties of particles in the jigging process of aggregates on example of chalcedonite*, Minerals, 2020, 10, 600.
- [14] STĘPIŃSKI W., *Wzbogacanie grawitacyjne*, PWN, Warszawa 1964.

- [15] GAWENDA T., *Production Methods for Regular Aggregates and Innovative Developments in Poland*, Minerals, 2021, 11, 1429.
- [16] GAWENDA T., STEMPKOWSKA A., SARAMAK D., FOSZCZ D., *Analiza produkcji kruszyw foremnych w innowacyjnym układzie technologicznym kopalni dolomitu Imielin*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 5, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2022, 27–38.
- [17] Instrukcja obsługi SEL, NR 505-172/2021, HTS, Gliwice 2021.
- [18] GAWENDA T., SUROWIAK S., STEMPKOWSKA A., KRAWCZYKOWSKA A., *Oczyszczanie kruszyw z frakcji lekkiej w separatorze*, BMP Surowce i Maszyny Budowlane, 2020, nr 4, s. 44–52.
- [19] PN-EN 13043:2004. *Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu*.

CLEANSING OF AGGREGATES FROM THE LIGHT FRACTION IN THE SEPARATOR AT THE DOLOMITE MINE IN IMIELIN

This article discusses one of the methods of purifying aggregates from light fraction in a SEL water separator. The separator was built in an innovative technological system for the production of regular aggregates at the Dolomite Mine in Imielin by HTS Gliwice. These efforts were part of the Formator Plus project. The aim of the study was to evaluate the efficiency of refining five lithological types of mineral aggregates in grain sizes 2–8 and 8–16 mm. Material was contaminated with organic fractions and shells in an amount of approximately 2–3%. The assumption of the research was to achieve aggregate purity, under industrial conditions, with a contaminant separation level of at least 95%. The study demonstrated that with appropriate separator operating parameters, up to 100% purity of mineral aggregates is possible.

Leszek JURDZIAK
Ryszard BŁAŻEJ
Aleksandra RZESZOWSKA

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

EKONOMIA UTRZYMANIA TAŚM W GÓRNICTWIE SKALNYM

Przenośniki taśmowe są podstawowym środkiem ekonomicznego i niskoemisyjnego transportu kruszyw, a sama taśma stanowi istotny składnik kosztów CAPEX/OPEX. Ponieważ pętla taśmy składa się z odcinków i złączy o różnym wieku oraz stopniu zużycia, jej stan powinien być oceniany zarówno globalnie, jak i lokalnie. Okresowe badania nieniszczące (NDT) rdzenia, okładek i złączy, połączone z regresyjnym wyznaczaniem tempa degradacji, umożliwiają prognozowanie pozostałego czasu użytkowania (RUL). Zaproponowano model degradacji oparty na rosnącej gęstości uszkodzeń oraz średnią i lokalną ocenę RUL. Wyniki wskazują, że zastosowanie wstawki w miejsce nadmiernie zużytego fragmentu może poprawić ogólny stan odcinka taśmy. Analiza ekonomiczna obejmuje koszt postoju oraz oczekiwany koszt ryzyka. W praktyce opłacalność diagnostyki i wstawek należy oceniać przez całkowity koszt cyklu życia, a nie tylko wymiany przewencyjnej. Celem artykułu jest przedstawienie spójnego podejścia do ekonomiki utrzymania taśm w górnictwie skalnym na podstawie danych eksploatacyjnych z kopalń kruszyw.

1. WPROWADZENIE

Transport taśmowy stanowi podstawowy środek przepływu urobku i produktów w zakładach przeróbki kopalin skalnych. W kopalniach kruszyw elastyczność pracy transportu z przodku do zakładu przeróbczego jest często realizowany samochodami [1, 3, 37], natomiast od kruszarki, przesiewaczy i zbiorników pośrednich odbywa się głównie przenośnikami [23]. Transport taśmowy ma tu inną specyfikę niż w wielkich systemach węgla brunatnego, czy kopalń rud. W kopalniach kruszyw dominują przenośniki obsługujące operacje kruszenia, przesiewania, magazynowania i ekspedycji. Właśnie dlatego taśma nie jest tu jedynie elementem jednego długiego ciągu transportowego, lecz podstawowym składnikiem układu technologicznego, a jej niezawodność wpływa bezpośrednio na wydajność całego zakładu.

Autorzy analizując pięć wybranych dolnośląskich kopalń kruszyw łamanych, pokazali, że pracowało w nich łącznie 286 przenośników z ponad 26 km taśm, z domi-

nującym taśmami tekstylnymi o małych i średnich szerokościach oraz małych prędkościach. Podkreślili jednocześnie duże zróżnicowanie trwałości taśm zależne od miejsca pracy w układzie oraz brak systemów wspomagających zarządzanie eksploatacją taśm, utrudniających racjonalną gospodarkę ich użytkowaniem [22, 23]. Dane te pokazują, że nawet przy stosunkowo krótkich przenośnikach jednostkowych gospodarka taśmami ma istotne znaczenie ekonomiczne [23, 24]. Długość tras wzrasta, gdy kruszarki wprowadza się do wyrobiska [16, 33, 40, 50] lub gdy bezpośredni odbiorca, punkt redystrybucji lub rampa kolejowa są odległe od miejsca eksploatacji [8, 21].

Skala zagadnienia wynika również z rozmiarów samej branży. Aggregates Europe podaje, że sektor kruszyw w obejmuje ~26 tys. lokalizacji eksploatacyjnych, ~15 tys. przedsiębiorstw; zatrudnia ~187 tys. osób i dostarcza 3 mld t kruszyw rocznie, co czyni go największym nieenergetycznym sektorem wydobywczym w Europie [2]. W Polsce, w 2024 r. mamy zagospodarowanych 288 złóż kamieni łamanych i blocznych oraz 3586 złóż piasków i żwirów [41]. Oznacza to, że problem ekonomiki utrzymania taśm dotyczy bardzo szerokiej grupy zakładów [2, 41].

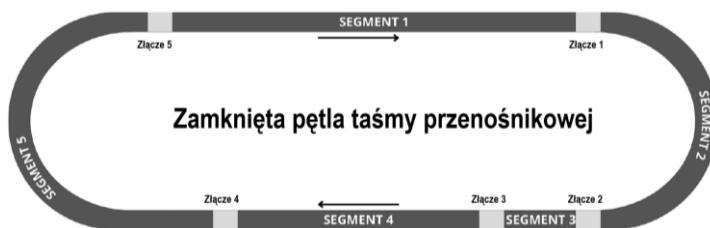
Rozwój diagnostyki NDT i monitorowanie stanu zmienia sposób podejmowania decyzji o utrzymaniu. Współczesne systemy pozwalają nie tylko wykrywać uszkodzenia rdzenia, zużycie okładek i zmiany geometrii złączy, ale także wspierać prognozowanie RUL, decyzje o wymianie, regeneracji i lokalnych interwencjach [7, 9, 12–14, 34–36, 42]. W pracach zespołu Diagnostyki taśm przenośnikowych DiagBelt (<https://diagbelt.pwr.edu.pl>) z Politechniki Wrocławskiej pokazano, że współczesna diagnostyka taśm nie ogranicza się do działań reaktywnych – napraw uszkodzeń po fakcie [20], lecz może być proaktywna, adaptacyjna [18] i służyć do mapowania uszkodzeń rdzenia na przenośnikach [7, 14], monitorowania zużycia okładek [35, 36], tworzenia profilów uszkodzeń i wytarc [10, 11, 31], wymiarowania połączeń [13] i śledzenia zmian ich geometrii [13, 29], budowy prognoz momentów wymiany w oparciu o RUL [9, 34, 43], strategii prewencyjnych wymian [25, 28, 30], a w konsekwencji do poprawy efektywności ekonomicznej polityki wymian [27, 30] oraz stwarza możliwość prowadzenia racjonalnej regeneracji taśm w oparciu o ich stan [12, 26, 27].

2. MODEL PĘTLI TAŚMY ZŁOŻONEJ Z N ODCINKÓW

Rozważmy pętlę taśmy o długości całkowitej L , złożoną z N odcinków o długościach l_i (rys. 1), spełniających warunek:

$$\sum_{i=1}^N l_i = L. \quad (1)$$

Każdy odcinek charakteryzuje się odrębnym stanem technicznym i własnym tempem degradacji (rys. 1).



Rys. 1. Pętla taśmy złożona z odcinków i połączeń. Każdy obiekt może różnić się producentem, wiekiem, stopniem zużycia i innymi cechami oraz posiadać lokalne koncentracje uszkodzeń (hotspots)

Fig. 1. A belt loop composed of sections and joints. Each object may differ in manufacturer, age, degree of wear (and other characteristics) and may have damage concentrations (hotspots)

3. MECHANIZMY DEGRADACJI TAŚMY

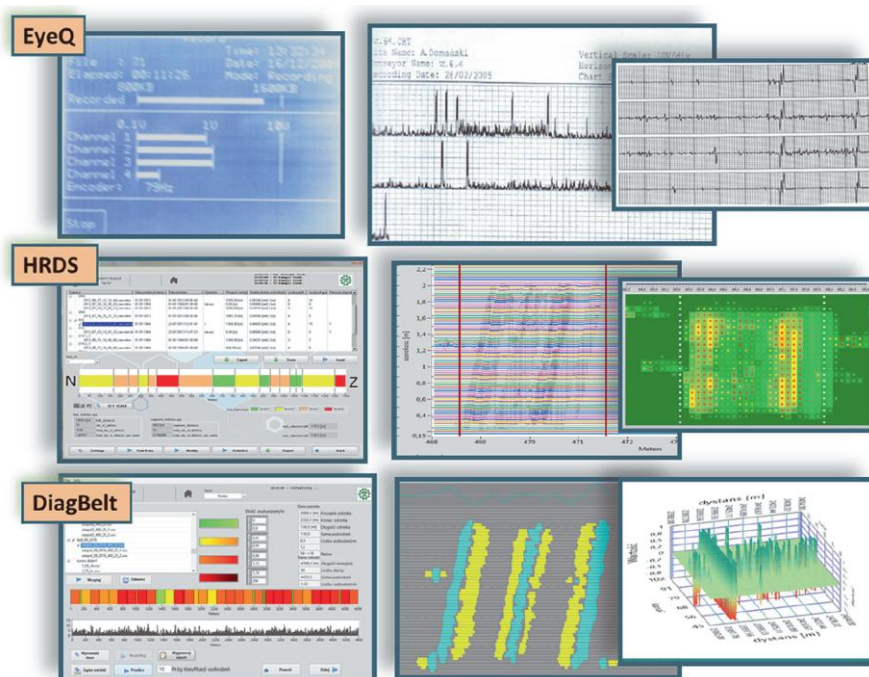
Warunki pracy taśm w kopalniach kruszyw łamanych są szczególnie trudne. Materiał transportowany ma często postać brył ostrokrawędzistych, abrazyjnych i o dużych wymiarach. W publikacji [22] autorzy podkreślili, że przy maksymalnym ziarnie do 300 mm oraz dużym udziale krótkich przenośników dochodzi do częstych uderzeń materiału w taśmę, szczególnie w rejonach nadawy i po kruszeniu wstępnym. Z tego względu mechanizmy degradacji można podzielić na trzy grupy: degradację ciągłą i kumulacyjną, uszkodzenia lokalne o charakterze skokowym oraz degradację mieszaną, w której wcześniejsze zużycie obniża odporność taśmy na późniejsze uszkodzenia nagłe. Ma to istotne znaczenie ekonomiczne; lokalny defekt w starej taśmie może prowadzić do znacznie poważniejszych skutków niż analogiczny defekt w taśmie nowej.

Zmiany parametrów użytkowych taśmy w czasie eksploatacji nie są jednorodne, co uzasadnia odejście od prostego modelu „jedna taśma – jeden wiek”. W praktyce pętla taśmy jest układem złożonym z fragmentów o różnej historii pracy, napraw i zużycia, a współczesne metody NDT umożliwiają szybkie zobrazowanie tych różnic oraz ich wykorzystanie w zarządzaniu eksploatacją

W krajowym górnictwie węgla brunatnego diagnostyka i regeneracja taśm zostały wdrożone stosunkowo wcześnie, co stworzyło praktyczne podstawy do racjonalnych decyzji o wymianie, regeneracji i ponownym wykorzystaniu rdzenia [15, 24, 27, 44, 46, 51]. Działania te wyprzedziły znacznie modne obecnie hasła związane z wydłużeniem życia obiektów – ocena wg Life Cycle Assessment [3, 19, 38, 39], ekonomii obiegu zamkniętego [4, 12] i oszczędności surowców i energii [5].

Taki obraz eksploatacji dobrze uzasadnia rozwój diagnostyki NDT. Przegląd najnowszych urządzeń NDT dla taśm przenośnikowych opisano w [6], a późniejsze prace zespołu z PWr pokazały, że mapy uszkodzeń rdzenia identyfikowane w kolejnych skanach można wykorzystać do analizy trendów i budowy prognoz RUL [34]. Z kolei w opracowaniu o opłacalności regeneracji i diagnostyki wykazano, że stan techniczny

taśmy może być podstawą lepszej ekonomicznie decyzji o naprawie, regeneracji lub wymianie [12]. Najnowsze prace o diagnostyce z wykorzystaniem sensorów i przegląd NDT dla taśm jeszcze bardziej wzmacniają tę logikę, pokazując, że monitoring stanu może służyć nie tylko do wykrywania uszkodzeń, lecz do wspomagania całej polityki utrzymania [9, 42].



Rys. 2. Obraz pętli taśmy z kodowanym kolorami odcinkami (wg stanu degradacji – gęstości uszkodzeń) oraz histogramem uszkodzeń wzdłuż osi taśmy – ewolucja obrazowania aż do systemu DiagBelt [7]
Fig. 2. Image of a belt loop with color-coded sections (according to degradation state – damage density) and a histogram of failures along the belt axis – evolution of imaging up to the DiagBelt system [7]

4. TEORETYCZNE PODSTAWY WYZNACZANIA ET, RUL I EFEKTU „ODMŁODZENIA” TAŚMY PO WSTAWCE

4.1. MODEL STANU OPARTY NA GĘSTOŚCI USZKODZEŃ

Przyjmijmy, że miara skumulowanego zużycia i -tego odcinka opisana jest zależnością:

$$d_i(t) = a_i t^2, \quad (2)$$

gdzie:

$d_i(t)$ – miara stanu zużycia/degradacji i -tego odcinka (np. gęstość uszkodzeń/m),

a_i – współczynnik tempa zmian stanu i -tego odcinka,

t – czas eksploatacji od chwili montażu lub ostatniej wymiany w miesiącach.

Przyjęcie kwadratowej funkcji czasu dla zmiany stanu odcinka (po dobraniu krzywej regresji gęstości $d_i(t)$) oznacza, że tempo degradacji rośnie wraz z upływem czasu, co odpowiada sytuacji, gdy zużycie okładek (wytarcia) i lokalne osłabienia zwiększają podatność taśmy na kolejne uszkodzenia.

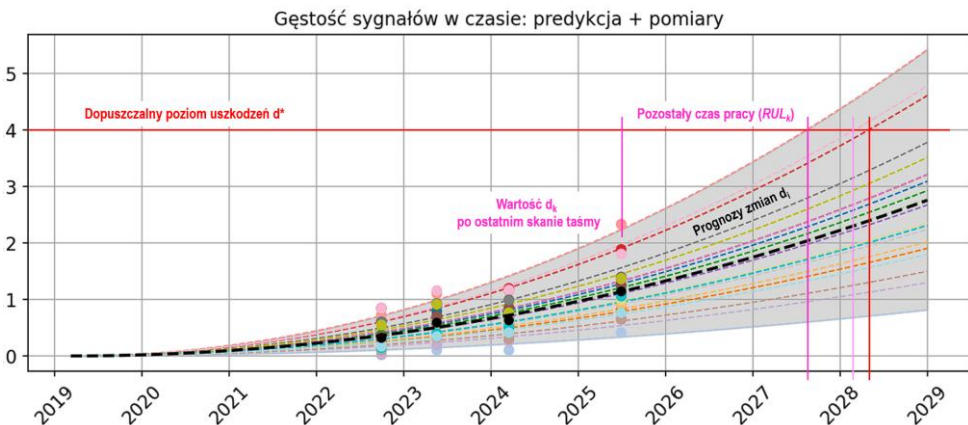
Niech stan graniczny dla gęstości uszkodzeń wynosi: $d^* = 4$ uszkodzenia na metr (rys. 3), wtedy oczekiwany czas życia nowej taśmy (odcinka i) do osiągnięcia stanu granicznego jest równy:

$$ET_i = \sqrt{\frac{d^*}{a_i}}. \quad (3)$$

Dla tempa przyrostu $a_i = 0,001$ i wartości granicznej $d^* = 4$ (uszk./m) otrzymujemy:

$$ET_i = \sqrt{\frac{4}{0,001}} = 63,25 \text{ mies.} \quad (4)$$

Ta wartość mieści się w zakresie obserwowanych trwałości taśm w kopalniach kruszyw [23] i może być potraktowana jako ilustracyjna wartość ET dla przypadku referencyjnego.



Rys. 3. Prognoza zmian stanu odcinków taśm (gęstości uszkodzeń d_i) w pętli linią stanu granicznego d^* i zaznaczeniem pozostałego czasu pracy (RUL_k) dla wybranego odcinka k

Fig. 3. Forecast of changes in the condition of belt sections (damage density d_i) in a loop with the threshold line d^* and marking the remaining useful life (RUL_k) for the selected section k

4.2. WIEK RÓWNOWAŻNY WEDŁUG OCENY STANU TAŚMY

Jeżeli po wykonaniu skanu poznajemy aktualny stan degradacji (np. gęstość uszkodzeń) danego fragmentu taśmy, to można przypisać mu wiek równoważny t_{i_eq} :

$$t_{i_eq} = \sqrt{\frac{d_i}{a_i}}. \quad (5)$$

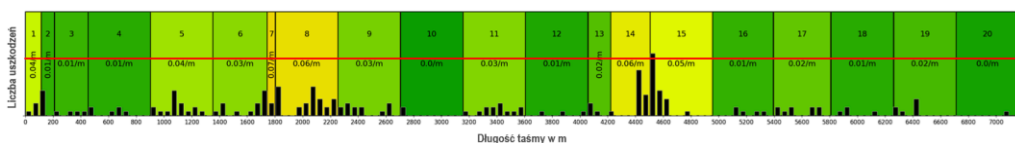
Taki wiek nie jest wiekiem kalendarzowym, lecz wyznaczonym według jego stanu. Odpowiada więc stopniu degradacji taśmy, a nie czasu jaki upłynął od montażu taśmy na przenośniku. Dzięki temu możliwe jest porównanie: wieku kalendarzowego całej taśmy, różnych jej fragmentów (lokalnego) oraz wieku równoważnego pozostałej części po usunięciu najbardziej zniszczonego odcinka.

4.3. POZOSTAŁY CZAS PRACY (RUL)

Dla dowolnego fragmentu taśmy pozostały czas pracy (RUL – *Remaining Useful Life*) można wyrazić jako:

$$RUL_i = ET_i - t_{i_eq}. \quad (6)$$

W przypadku odcinka jednorodnego model jest prosty. W praktyce jednak odcinek o długości L , np. 300 m może zawierać krótki, nadmiernie zużyty fragment (hotspot) oraz dłuższą część w stanie znacznie lepszym. Wtedy decyzja oparta wyłącznie na średniej dla całego odcinka może być myląca. Miejsca koncentracji uszkodzeń identyfikuje histogram gęstości uszkodzeń (rys. 4).



Rys. 4. Pętla taśm z odcinkami kodowanymi kolorami wg gęstości uszkodzeń. Histogram liczby uszkodzeń wzdłuż osi pozwala wskazać lokalne zagrożenia (hotspoty)

Fig. 4. A belt loop with sections colored according to damage density. A histogram of the number of damages along the axis allows for the identification of local threats (hotspots)

4.4. ODCINEK Z HOTSPOTEM

Niech:

L – całkowita długość analizowanego odcinka,

l_h – długość hotspotu,

- d_h – gęstość uszkodzeń hotspotu,
 d_r – gęstość uszkodzeń pozostałej części,
 $\bar{d}$ – średnia gęstość uszkodzeń całego odcinka,

wtedy:

$$\bar{d} = \frac{l_h d_h + (L - l_h) d_r}{L}, \quad (7)$$

a zatem:

$$d_r = \frac{L\bar{d} - l_h d_h}{L - l_h}. \quad (8)$$

To równanie jest bardzo ważne, pozwala odtworzyć stan „pozostałej” części taśmy, jeśli na skanie znamy średnią dla całego odcinka i lokalny stan hotspotu.

4.5. EFEKT WSTAWKI

Jeśli fragment nadmiernie zużyty (hotspot) zostaje wycięty i zastąpiony nową taśmą („wstawką”) o stanie początkowym $d = 0$, to nowa średnia gęstość uszkodzeń odcinka wynosi:

$$\bar{d}_{after} = \frac{(L - l_h) d_r}{L}. \quad (9)$$

Stąd można obliczyć: nowy wiek równoważny odcinka po „wstawce”, nowy RUL, łączny oczekiwany czas życia od początku eksploatacji po wykonaniu „wstawki”. To właśnie formalizuje intuicję, że wycięcie najbardziej zużytego fragmentu odmładza taśmę w sensie stanowym.

5. KOSZT ZASTĄPIENIA ZUŻYTEGO FRAGMENTU ODCINKA NOWĄ TAŚMĄ

5.1. KOSZT NOWEJ TAŚMY I WYKONANIA POŁĄCZEŃ

W praktyce eksploatacyjnej koszt odcinka taśmy można zapisać jako:

$$C_{b_i} = L_i c_b, \quad (10)$$

gdzie c_b oznacza koszt 1 m taśmy o zadanej szerokości i konstrukcji.

Dla analizowanego przypadku referencyjnego można przyjąć, że chodzi o taśmę tekstylną 800 mm – taki wariant dominował w badanych zakładach. Koszt złącza należy traktować oddzielnie:

$$C_j = n_j c_j, \quad (11)$$

gdzie n_j oznacza liczbę złączy, a c_j koszt jednego złącza.

Publicznie dostępne, porównywalne ceny rynkowe taśm i usług wulkanizacji dla kopalń kruszyw są ograniczone, w analizie ekonomicznej przyjmuje się wariantowe wartości kosztów wejściowych odpowiadające poziomom obserwowanym w praktyce eksploatacyjnej i ofertowej. Taka metoda jest poprawna, o ile w artykule wprost zaznaczy się scenariuszowy charakter kosztów wejściowych.

5.2. KOSZT POSTOJU AWARYJNEGO

Koszt postoju awaryjnego nie powinien być utożsamiany jedynie z czasem pracy ekipy montażowej. Z ekonomicznego punktu widzenia podstawowym składnikiem kosztu postoju jest wartość materiału, który nie został wyprodukowany lub nie został przetransportowany. Dlatego:

$$C_{stop} = t_{stop} \cdot Q \cdot m_u, \quad (12)$$

gdzie:

t_{stop} – czas Postoju [h],

Q – wydajność przenośnika [t/h],

m_u – jednostkowa wartość utraconej produkcji lub koszt utraconej zdolności transportowej [PLN/t].

W przypadku taśmy 800 mm wydajność można powiązać z szerokością, prędkością, kątem niecki, kątem usypu i gęstością materiału. W ogólnej postaci:

$$Q = A \cdot v \cdot 3600 \cdot \rho \cdot K, \quad (13)$$

gdzie:

A – pole przekroju strugi materiału,

v – prędkość taśmy,

ρ – gęstość objętościowa materiału,

K – współczynnik korekcyjny dla pochylenia.

Przy szerokości 800 mm oraz typowych parametrach pracy w kopalniach kruszyw orientacyjne wydajności dla analiz scenariuszowych mogą mieścić się w przedziale ~300 do ponad 600 t/h, zależnie od prędkości. To oznacza, że przy wartościach rzędu 20–30 PLN/t nawet jedna godzina postoju może oznaczać stratę liczoną w tysiącach lub dziesiątkach tysięcy PLN.

5.3. KOSZT AWARII

Koszt ten należy zapisać szerzej niż koszt postoju planowego:

$$C_f = t_f \cdot Q \cdot m_u + C_{aw} + C_{spill} + C_{sec}, \quad (14)$$

gdzie:

- t_f – czas nieplanowanego postoju awaryjnego,
- C_{aw} – dodatkowy koszt naprawy awaryjnej,
- C_{spill} – koszt zebrania rozsypanego nosiwa i uporządkowania ciągu,
- C_{sec} – koszt skutków wtórnych.

Wtedy oczekiwany koszt ryzyka można zapisać jako:

$$E(C_{fail}) = p_f \cdot C_f, \quad (15)$$

gdzie p_f oznacza prawdopodobieństwo awarii przed planowaną wymianą.

6. WSKAŹNIK OPŁACALNOŚCI WSTAWKI

6.1. WSKAŹNIK BAZOWY – JEDNOSTKOWY KOSZT UŻYTKOWANIA

Dla nowej taśmy od początku życia:

$$KPI_0 = \frac{C_0}{T_0}, \quad (16)$$

C_0 obejmuje koszt zakupu całego odcinka i koszt początkowych złączy.

6.2. WSKAŹNIK PO WSTAWCE

Jeżeli po czasie t_s wykonujemy wstawkę, to:

$$KPI_w = \frac{C_0 + C_w}{t_s + RUL_{after}}, \quad (17)$$

C_w obejmuje koszty: nowego fragmentu, nowych złączy, planowego postoju na wykonanie złącza, ewentualny koszt mobilizacji ekipy i czynności pomocniczych.

$$KPI_{DN}^{risk} = \frac{C_0 + E(C_{fail})}{t_s + RUL_{DN}}, \quad (18)$$

$E(C_{fail})$ przedstawia wartość oczekiwaną ewentualnej awarii zagrożonego odcinka, czyli koszt ryzyka pozostawienia go bez wykonania wstawki – nicnierobienia.

Wstawka jest korzystna ekonomicznie, gdy:

$$KPI_w < KPI_{DN}^{risk}. \quad (19)$$

W odróżnieniu od prostych porównań kosztu wstawki z kosztem wymiany, taki zapis uwzględnia nie tylko koszt materiału i połączenia, ale także koszty czasu i ryzyka.

7. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

7.1. TAŚMA PO 9 MIESIĄCACH, HOTSPOT 20 m O GĘSTOŚCI 1 uszk./m

Przyjmijmy: $a = 0,001$, $d^* = 4$ uszk./m, $L = 300$ m, $h_h = 20$ m, $t_s = 9$ mies., to oczekiwany czas życia nowej taśmy wg (3) i (4):

$$ET_i = \sqrt{\frac{4}{0,001}} = 63,25 \text{ mies.} \quad (20)$$

Średnia gęstość uszkodzeń całego odcinka po 9 miesiącach (2):

$$\bar{d}(9) = 0,001 \cdot 9^2 = 0,081. \quad (21)$$

Założmy, że na 20 m występuje zagrożony fragment (hotspot) o lokalnej o gęstości $d_h = 1$, wtedy pozostałe 280 m taśmy ma gęstość:

$$d_r = \frac{300 \cdot 0,081 - 20 \cdot 1}{280} = 0,015357. \quad (22)$$

Wiek równoważny pozostałych 280 m (5):

$$t_{eq,r} = \sqrt{\frac{0,015357}{0,001}} = 3,92 \text{ mies.} \quad (23)$$

Pozostały czas życia dla tej części: $RUL_{280} = 63,25 - 3,92 = 59,33$ mies.

Po wycięciu 20 m i zastąpieniu hotspotu nową wstawką średnia gęstość uszkodzeń całego odcinka wynosi:

$$d_{after} = \frac{280 \cdot 0,015357}{300} = 0,014(3). \quad (24)$$

Wiek równoważny odcinka po wstawce (5):

$$t_{eq, after} = \sqrt{\frac{0,014333}{0,001}} = 3,79 \text{ mies.} \quad (25)$$

Stąd $RUL_{after} = 63,25 - 3,79 = 59,46$ mies. i łączny oczekiwany czas życia od początku eksploatacji po wykonaniu wstawki $ET_{after} = 9 + 59,46 = 68,46$ mies.

Ten wynik pokazuje, że mimo wieku kalendarzowego 9 miesięcy odcinek po usunięciu hotspotu staje się wg stanu zużycia zbliżony do taśmy o wieku $\sim 3,8$ miesiąca. Jest to formalny zapis efektu „odmłodzenia”. W praktyce oznacza to, że jeśli koszt wstawki i koszt planowego postępu są umiarkowane, a pozostawienie hotspotu zwiększa ryzyko awarii, to lokalna interwencja może być wyraźnie uzasadniona [53].

7.2. TAŚMA PO 24 MIESIĄCACH, HOTSPOT 20 m O GĘSTOŚCI 3 uszk./m

Przykład ten ma większą wartość ilustracyjną, pokazuje bowiem sytuację taśmy starszej, w której średnia gęstość uszkodzeń całego odcinka może jeszcze nie sugerować natychmiastowej interwencji, ale stan lokalny już wyraźnie sygnalizuje wysokie ryzyko.

Przyjmijmy: $a = 0,001$, $d^* = 4$, uszk./m, $L = 300$ m, $l_h = 20$ m, $t_s = 24$ mies., średnia gęstość uszkodzeń całego odcinka po 24 miesiącach wyniesie (2):

$$\bar{d}(24) = 0,001 \cdot 24^2 = 0,576. \quad (26)$$

Niech hotspot 20 m ma $d_h = 3$, wtedy stan pozostałych 280 m jest równy:

$$d_r = \frac{300 \cdot 0,576 - 20 \cdot 3}{280} = 0,403. \quad (27)$$

Wiek równoważny pozostałych 280 m:

$$t_{eq,r} = \sqrt{\frac{0,402857}{0,001}} = 20,07 \text{ mies.}, \quad (28)$$

co daje: $RUL_{280} = 63,25 - 20,7 \approx 54,77$ mies. Dla samego hotspotu:

$$t_{eq,h} = \sqrt{\frac{3}{0,001}} = \sqrt{3000} \approx 54,77 \text{ mies.}, \quad (29)$$

a zatem $RUL_h = 63,25 - 54,77 \text{ mies.} \approx 8,47 \text{ mies.}$

Otrzymany wynik pokazuje, że średnia dla całego odcinka może maskować rzeczywiste ryzyko lokalne. Po wycięciu hotspotu poprawia się nie tylko średni stan odcinka, lecz także bezpieczeństwo dalszej eksploatacji.

8. EKONOMICZNA WARTOŚĆ DIAGNOSTYKI

Diagnostyka nie jest wyłącznie kosztem dodatkowym, lecz źródłem informacji pozwalającej decydze utrzymywaniowe. Literatura z obszaru *condition monitoring* pokazuje,

że jej wartość ekonomiczna zależy od tego, czy uzyskana informacja zmienia decyzję i ogranicza oczekiwany koszt życia obiektu [45, 47]. Monitoring może zmieniać optymalną politykę wymiany w modelu degradacyjnym [52], a jego opłacalność zależy od relacji między kosztem systemu a wartością unikniętych awarii, lepszego planowania i redukcji *lost production* [48]. Ocena ekonomiczna technologii monitorowania stanu *condition monitoring* musi obejmować zarówno koszt techniczny systemu, jak i wpływ na politykę obsługi (maintenance), redukcję niepewności oraz ograniczenie kosztów ryzyka [17].

W odniesieniu do kopalń kruszywowych oznacza to, że opłacalność NDT nie musi przyjmować formy zakupu kosztownego systemu on-line na stałe. W wielu przypadkach bardziej racjonalne jest okresowe skanowanie usługowe, wykonywane co pół roku lub raz do roku, połączone z bieżącymi przeglądami wizualnymi użytkownika. Taki model jest szczególnie atrakcyjny dla krótkich, lecz krytycznych przenośników, w których lokalny hotspot może zdecydować o awarii, mimo że średni stan taśmy nadal wydaje się akceptowalny.

9. UJĘCIE DETERMINISTYCZNO-STOCHASTYCZNE DEGRADACJI TAŚMY

Przedstawiony wcześniej model oparty na gęstości uszkodzeń i funkcji $d(t) = at^2$ dobrze opisuje jeden z podstawowych mechanizmów starzenia taśmy, ale nie obejmuje pełnej złożoności zjawisk obserwowanych w praktyce. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych taśma przenośnikowa nie podlega jednemu procesowi degradacji, lecz co najmniej dwóm równoległym procesom o różnym charakterze, a dodatkowo osobnej dynamice podlegają złącza.

9.1. PROCES KUMULACYJNY, ZDARZENIA NAGLE I ROLA POŁĄCZEŃ

Pierwszym procesem jest ciągła degradacja kumulacyjna, obejmująca zużycie okładek, zmęczenie rdzenia, narastanie drobnych uszkodzeń i stopniowe pogarszanie stanu taśmy wraz z czasem pracy. Jej intensywność zależy od obciążenia przenośnika, czasu pracy, rodzaju materiału i zmienności warunków eksploatacji. Oznacza to, że współczynnik degradacji nie jest ściśle stały w sensie fizycznym, lecz w prostym modelu może być traktowany jako uśredniona wartość efektywna dla danego okresu pracy i danego układu technologicznego. W praktyce cykliczne skany diagnostyczne służą właśnie do tego, aby tę wartość korygować na podstawie rzeczywistych obserwacji i aktualizować prognozę *ET* oraz *RUL*. W tym sensie model: $d(t) = at^2$ należy interpretować nie jako ściśle prawo fizyczne, lecz jako model efektywnego narastania stanu degradacji kumulacyjnej, aktualizowany kolejnymi kampaniami skanowania.

9.2. ZDARZENIA NAGŁE I KATASTROFICZNE W CZĘŚCI ROBOCZEJ TAŚMY

Drugim procesem są zdarzenia nagłe i katastroficzne, jak przebicia, rozcięcia czy uszkodzenia wywołane przez obce elementy. Mają one charakter losowy i mogą wystąpić także wtedy, gdy średni stan taśmy pozostaje jeszcze zadowalający. W odróżnieniu od procesu kumulacyjnego, taki mechanizm nie powinien być modelowany wyłącznie przez *ET* i *RUL*. Wymaga on raczej opisu przez: prawdopodobieństwo zdarzenia, intensywność zagrożenia, koszt skutków zdarzenia.

Z praktycznego punktu widzenia oznacza to, że monitoring tego typu zagrożeń powinien być możliwie ciągły, ale forma tego monitoringu nie musi być zawsze kosztowna. Dla krótkich przenośników w kopalniach kruszyw rozbudowane systemy ciągłego monitoringu mogą być ekonomicznie nieuzasadnione. W takich przypadkach wystarczające bywa: ciągłe obserwowanie taśmy przez obsługę, prosty monitoring wizyjny, kamera przemysłowa, nawet monitoring prowadzony z użyciem prostych środków rejestracji obrazu. Oznacza to, że dla procesu nagłego katastroficznego kluczowe jest nie tyle dokładne prognozowanie *RUL*, ile szybka detekcja zagrożenia i szybka reakcja operacyjna.

9.3. ZŁĄCZA JAKO OSOBNY OBIEKT DEGRADACJI I RYZYKA

Dotychczasowe modele skupiają się głównie na samej taśmie, natomiast w praktyce bardzo często najsłabszym ogniwem układu są złącza. Dotyczy to zarówno złączy mechanicznych, klejonych, palcowych, wulkanizowanych, połączeń wykonanych w warunkach gorszej jakości technologicznej. Złącze może mieć własny, odrębny mechanizm degradacji. Z jednej strony może podlegać stopniowemu pogarszaniu stanu, np. przez: zmęczenie strefy łączenia, rozwarstwiania, lokalne odkształcenia, zmiany geometrii, postępujące rozchodzenie się połączenia. Z drugiej strony złącze może ulec nagłemu zerwaniu, np. pod wpływem: rozruchu, chwilowego wzrostu napięcia, przeciążenia, błędów wykonania, niejednorodności materiałowej lub technologicznej [23].

Oznacza to, że złącze powinno być traktowane jako osobny obiekt stanu i ryzyka, a nie tylko jako element pomocniczy. W praktyce oznacza to konieczność wprowadzenia do modelu dodatkowej zmiennej stanu, np.: $z(t)$, gdzie $z(t)$ opisuje stan złącza, niezależnie od stanu części roboczej taśmy.

Wtedy pełny stan odcinka można zapisać jako:

$$X_t = (d_t, z_t, e_t),$$

gdzie:

d_t – stan degradacji kumulacyjnej taśmy,

z_t – stan złącza lub złączy,

e_t – ekspozycja na zdarzenia nagłe i katastroficzne.

Taki zapis jest bardziej zgodny z praktyką eksploatacyjną niż model oparty wyłącznie na jednej zmiennej opisującej średnią gęstość uszkodzeń.

9.4. ROLA CYKLICZNYCH SKANÓW I MONITORINGU CIĄGŁEGO

Z punktu widzenia utrzymania ruchu oba typy procesów wymagają różnych narzędzi obserwacji. Proces kumulacyjny powinien być wspierany przez cykliczne skany serwisowe i okresową ocenę stanu, natomiast proces nagły przez prosty monitoring bieżący i szybką reakcję operacyjną. W tym sensie skany okresowe i monitoring ciągły są komplementarne, a nie konkurencyjne.

9.5. KONSEKWENCJE DLA MODELU DECYZYJNEGO

Przy takim rozróżnieniu decyzje utrzymaniowe można podzielić na strategiczne, oparte na procesie kumulacyjnym oraz operacyjne, związane ze zdarzeniami nagłymi. Oznacza to, że pełny model ekonomiczny nie powinien opierać się wyłącznie na średnim *RUL*, lecz powinien uwzględniać koszty: degradacji kumulacyjnej, zdarzeń nagłych oraz ryzyka związanego ze złączami.

Można to zapisać jako:

$$C_{tot} = C_{cum} + C_{shock} + C_{splice}, \quad (30)$$

gdzie:

- C_{cum} – koszt degradacji kumulacyjnej i planowych interwencji,
- C_{shock} – oczekiwany koszt zdarzeń nagłych w części roboczej taśmy,
- C_{splice} – koszt ryzyka i utrzymania złączy.

9.6. WNIOSEK METODOLOGICZNY

Z metodologicznego punktu widzenia oznacza to, że model deterministyczny przedstawiony w niniejszej pracy należy traktować jako podstawowy dla procesu kumulacyjnego, użyteczny do wyznaczania *ET*, wieku równoważnego, *RUL* i opłacalności wstawki. Pełniejszy model eksploatacyjny powinien w przyszłości łączyć proces kumulacyjny, zdarzenia nagłe oraz degradację złączy, stanowiąc pomost do bardziej zaawansowanego ujęcia stochastycznego [45, 47–49, 52].

10. EKONOMICZNA WARTOŚĆ DIAGNOSTYKI

Przedstawione przykłady pokazują, że średnia gęstość uszkodzeń dla całego odcinka nie stanowi wystarczającej podstawy decyzji, gdyż lokalny hotspot może zasadniczo zmieniać ocenę ryzyka i opłacalności interwencji. Z praktycznego punktu widzenia

koszt postoju powinien być liczony jako funkcja czasu postoju, wydajności przenośnika i wartości utraconej produkcji. W kopalniach kruszyw, gdzie taśmy są relatywnie krótkie i tańsze niż w dużych systemach odkrywkowych, szczególnie racjonalny może być model okresowego serwisu diagnostycznego, wspieranego prostym monitoringiem bieżącym.

11. WNIOSKI

1. W kopalniach surowców skalnych transport taśmowy pełni krytyczną rolę w zakładzie przeróbczym, a analiza literatury pokazuje, że dominują liczne krótkie przenośniki oraz taśmy tekstylne o zróżnicowanej trwałości zależnej od miejsca pracy w ciągu technologicznym [23].
2. Model oparty na gęstości uszkodzeń umożliwia wyznaczenie wieku równoważnego stanu, ET i RUL zarówno dla całych odcinków, jak i dla lokalnych hotspotów.
3. Wycięcie lokalnego, nadmiernie zużytego fragmentu może odmłodzić taśmę w sensie stanowym, poprawić wskaźniki kosztowe dalszej eksploatacji i być ekonomicznie uzasadnione zwłaszcza wtedy, gdy pozostawienie hotspotu zwiększa ryzyko awarii.
4. Oceniając zasadność wstawki, należy uwzględniać nie tylko koszt nowego fragmentu i złączy, ale również koszt postoju planowego oraz oczekiwany koszt ryzyka pozostawienia uszkodzenia bez interwencji.
5. Diagnostyka NDT ma wartość ekonomiczną, ponieważ poprawia jakość decyzji utrzymaniowych i pozwala przejść od wieku kalendarzowego do oceny rzeczywistego stanu taśmy; w górnictwie kruszywowym szczególnie racjonalny może być model okresowego serwisu diagnostycznego zamiast kosztownego systemu ciągłego.
6. Naturalnym rozwinięciem przedstawionego modelu jest ujęcie procesu degradacji jako procesu Markowa lub semi-Markowa, w którym kolejne skany aktualizują stan procesu i wspierają korektę polityki decyzyjnej [53].

LITERATURA

- [1] ABBASPOUR H., *Environmental comparison of different transportation systems-truck-shovel and IPCCs in open-pit mines by system dynamic modelling*, Proceedings of the 27-th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018, Springer International Publishing, Cham 2019, 287–305.
- [2] AGGREGATES EUROPE – UEPG, *About us*, UEPG, Brussels 2026.
- [3] AWUAH-OFFEI K., CHECKEL D., *Evaluation of belt conveyor and truck haulage systems in an open pit mine using life cycle assessment*, CIM Magazine, 2009, 4 (5).
- [4] BAJDA M., HARDYGÓRA M., *Energy efficiency of conveyor belts in raw materials industry*, Energies, 2022, 15 (9), 3080.

- [5] BAJDA M., JURDZIAK L., PACTWA K., *Energy-saving of conveyor belts in the strategy and reporting of corporate social responsibility initiatives of producers*, Global Congress on Manufacturing and Management, Springer International Publishing, Cham 2021, pp. 402–414.
- [6] BŁĄŻEJ R., *Review of the newest NDT equipment for conveyor belt diagnostics*, Diagnostyka, 2012, 4 (64), 21–24.
- [7] BŁĄŻEJ R., *Tworzenie mapy uszkodzeń taśm przenośnikowych w systemie DiagBelt*, Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego, Polska, 2018.
- [8] BŁĄŻEJ R., CHĘCIŃSKI S., JURDZIAK L., *Diagnostyka taśm na przenośnikach dalekiego zasięgu dla górnictwa skalnego*, Mining Science, 2014, 21.
- [9] BŁĄŻEJ R., JURDZIAK L., *Sensor-based diagnostics for conveyor belt condition monitoring and predictive refurbishment*, Sensors, 2025, 25 (11), 3459.
- [10] BŁĄŻEJ R., JURDZIAK L., BAJDA M., KIRJANÓW-BŁĄŻEJ A., RZESZOWSKA A., *Rozkład uszkodzeń na profilu poprzecznym taśmy przenośnikowej. Wdrożenie systemu DiagBelt+ w KWB Belchatów*, Kruszywa: produkcja–transport–zastosowanie, t. 4, 2024, 40–47.
- [11] BŁĄŻEJ R., JURDZIAK L., KIRJANÓW A., *A device for measuring conveyor belt thickness and for evaluating the changes in belt transverse and longitudinal profile*, Diagnostyka, 2017, 18.
- [12] BŁĄŻEJ R., JURDZIAK L., KIRJANÓW-BŁĄŻEJ A., BAJDA M., OLCHÓWKA D., *Profitability of conveyor belt refurbishment and diagnostics in the light of the circular economy and the full and effective use of resources*, Energies, 2022, 15 (20), 7632.
- [13] BŁĄŻEJ R., JURDZIAK L., KIRJANÓW-BŁĄŻEJ A., KOSTRZEWA P., *Dimensioning of Splices Using the Magnetic System*, Ig. Min. Res., 2024, 2, 469–472.
- [14] BŁĄŻEJ R., JURDZIAK L., KIRJANÓW-BŁĄŻEJ A., RZESZOWSKA A., *Improving the effectiveness of the DiagBelt+ diagnostic system-analysis of the impact of measurement parameters on the quality of signals*, Eksploatacja i Niezawodność, 2024, 26 (3).
- [15] BRZEZINSKI W., JURDZIAK L., KAWALEC W., *The Sufler system in the Turow brown coal mine*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr nr 50, Wrocław 1988.
- [16] CHRISTOPH B., *Optimising processes of discontinuous loading and continuous transportation through mobile crushing plants (Prozessoptimierung bei diskontinuierlicher Beladung und kontinuierlichem Transport durch mobile Brecheranlagen)*, World of Mining-Surface and Underground, 2006, Vol. 58.
- [17] DADFARNIA M., SHARP M.E., *Comprehensive evaluations of condition monitoring-based technologies in industrial maintenance: A systematic review*, Journal of Manufacturing Systems, 2025, 82, 449–477.
- [18] DAYO-OLUPONA O., GENC B., CELIK T., *Adoptable approaches to predictive maintenance in mining industry: An overview*, Resources Policy, 2023, 86, 104291.
- [19] ĐORĐEVIĆ M., ZRNIĆ N., *Simplified life cycle assessment of a return belt conveyor idler*. [In:] Proceedings of the 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2013, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, 2013, pp. 243–248.
- [20] GHOLIPOUR Y., ZARE M., VAZIRI M., GHOLIPOUR Y., *Comprehensive Review of Maintenance Strategies: From Reactive to Proactive Approaches*, Available at: SSRN 5349871, 2025, Centralasia and the Caucasus, Vol. 26, Iss. 1, 2025, file:///C:/Users/User/Downloads/ssrn-5349871%20(2).pdf
- [21] GŁADYSIEWICZ L., *Innowacyjny przenośnik dalekiego zasięgu do transportu kruszywa*, Górnictwo Odkrywkowe, 2013, 54 (5–6), 88–94.
- [22] HARDYGÓRA M., WOŹNIAK D., *Transport taśmowy w górnictwie surowców skalnych – eksploatacja taśm przenośnikowych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr, vol. 132, nr 39, Wrocław 2011.
- [23] HARDYGÓRA M., WOŹNIAK D., *Gospodarka taśmami przenośnikowymi w krajowych zakładach górniczych kruszywa naturalnych łamanych*, Górnictwo Odkrywkowe, 2012, 53 (5–6), 41–47.

- [24] JURDZIAK L., *Gospodarka taśmami przenośnikowymi w kopalniach-stan obecny i perspektywy*, Górnictwo Odkrywkowe, 1998, 40 (5–6), 63–81.
- [25] JURDZIAK L., *Prewencyjne strategie wymian taśm przenośnikowych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr, vol. 26, nr 89, Wrocław 2000, 123–143.
- [26] JURDZIAK L., *Szacowanie kosztów utrzymania taśm w kopalni stosującej różne strategie wymian taśm i metody wykrywania ich uszkodzeń*, Cuprum, Wrocław 2010, 5–18.
- [27] JURDZIAK L., *Polityka wymian taśm przenośnikowych z uwzględnieniem ich regeneracji – korzyści z wykorzystania diagnostyki stanu taśm*, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2016, 2, 6–13.
- [28] JURDZIAK L., *Economic analysis of steel cord conveyor belts replacement strategy in order to undertake profitable refurbishment of worn out belts*, International Multidisciplinary Scientific Geo Conference: SGEM, 2017, 1 7(1.3), 283–290.
- [29] JURDZIAK L., BŁAŻEJ R., *Non-Destructive Diagnostics in the Assessment of Splice Geometry in Steel Cord Conveyor Belts*, Applied Sciences, 2025, 15 (9), 5034.
- [30] JURDZIAK L., BŁAŻEJ R., BURDUK A., BAJDA M., KIRJANÓW-BŁAŻEJ A., KOZŁOWSKI T., *Optymalizacja kosztów eksploatacji taśm przenośnikowych w kopalni w różnych strategiach ich wymiany i diagnostyki*, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2020, 4, 50.
- [31] JURDZIAK L., BŁAŻEJ R., KIRJANÓW-BŁAŻEJ A., *Transverse Profiles of Belt Core Damage in the Analysis of the Correct Loading and Operation of Conveyors*, Minerals, 2023, 13 (12), 1520.
- [32] JURDZIAK L., STOLARCZYK R., *Nowe narzędzia do komputerowego wspomagania zarządzania eksploatacją taśm*, Transport Przemysłowy, 2002, 10–14.
- [33] KAMRANI A., *Optimization of Long-term Open Pit Mine Planning Incorporating Semi-Mobile In-Pit Crushing and Conveying Systems*, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta, 2025.
- [34] KIRJANÓW-BŁAŻEJ A., JURDZIAK L., *Forecast of the remaining lifetime of steel cord conveyor belts based on regression methods in damage analysis identified by subsequent DiagBelt scans*, Engineering Failure Analysis, 2019, 101, 471–481.
- [35] KIRJANÓW-BŁAŻEJ A., JURDZIAK L., BŁAŻEJ R., *BeltSonic innowacyjne urządzenie diagnostyczne do pomiaru grubości taśm przenośnikowych w ruchu, projekt LIDER*, Transport, 2020, 4, 50.
- [36] KIRJANÓW-BŁAŻEJ A., JURDZIAK L., BŁAŻEJ R., *Calibration procedure for ultrasonic sensors for precise thickness measurement*, Measurement, 2023, 214, 112744.
- [37] LIU S.Q., LIN Z., LI D., LI X., KOZAN E., *Recent research agendas in mining equipment management: A review*, Mining, 2022, 2 (4).
- [38] MARASOVA D., TEPLICKA K., BOKŠA P., REHAK R., *Sustainable quality of conveyor belts using an integrated knowledge system to support decision-making*, Acta Montanistica Slovaca, 2021, 26 (1).
- [39] MCLAUCHLIN A., STAMFORD L., ESQUIVEL J., SPENCER-SMITH C., WAITE D., SHAVER M., *Toward the sustainable use of conveyor belts: life cycle assessment of end-of-life options*, Procedia CIRP, 2025, 135, 727–731.
- [40] OSANLOO M., *In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: a literature review and research agenda*, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2020, 34 (6), 430–457.
- [41] *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2024 r.*, Wyd. PIG-PIB, Warszawa 2025.
- [42] RZESZOWSKA A., BŁAŻEJ R., *Non-Destructive Testing for Conveyor Belt Monitoring and Diagnostics: A Review*, Applied Sciences, 2025, 15 (24), 13272.
- [43] RZESZOWSKA A., JURDZIAK L., BŁAŻEJ R., *Analysis of Uncertainty in Conveyor Belt Condition Assessment Using Time-Based Indicators*, Applied Sciences, 2025, 15 (14), 7939.
- [44] SAPKOWSKA J., *Belt regeneration at the Turow brown coal mine*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr, 48, Wrocław 1986.
- [45] SRINIVASAN R., *Value of condition monitoring in infrastructure maintenance*, Computers and Industrial Engineering, 2013, 66 (2), 233–241.

- [46] STOLARCZYK R., *Analiza eksploatacyjna taśm przenośnikowych w KWB „Belchatów”*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWR, vol. 112, nr 44, Wrocław 2005, 639–646.
- [47] TOMASEVICZ C.L., *Optimum maintenance policy using semi-Markov decision processes*, Electric Power Systems Research, 2009, 79 (9), 1285–1291.
- [48] TURNBULL A., *Cost Benefit of Implementing Advanced Monitoring and Predictive Maintenance Strategies for Offshore Wind Farms*, Energies, 2021, 14 (16), 4922.
- [49] WANG J., *Optimal preventive maintenance policy of the balanced system under the semi-Markov model*, Reliability Engineering and System Safety, 2021, 213, 107690.
- [50] WITT A., *Możliwości zastosowania innowacyjnych układów wyposażonych w mobilne maszyny krusząco-sortujące i transportowe w polskim górnictwie skalnym*, Górnictwo Odkrywkowe, 2011, 52 (6), 129–134.
- [51] WRÓBEL J., *Zwiększenie wydajności procesu regeneracji taśm przenośnikowych dla górnictwa odkrywkowego*, Archiwum Wiedzy Inżynierskiej, 2016, 1.
- [52] WU X., *Value of condition monitoring for optimal replacement in the proportional hazards model with continuous degradation*, IIE Transactions, 2010, 42 (8), 553–563.
- [53] XIANG Y., CASSADY C.R., *Optimal maintenance policies for systems subject to a Markovian operating environment*, Computers and Industrial Engineering, 2012, 62 (1), 190–197.

ECONOMICS OF CONVEYOR BELT MAINTENANCE IN AGGREGATE MINING

Belt conveyors are the primary means of economical and low-emission transport of aggregates, while the belt itself constitutes a significant component of CAPEX/OPEX costs. Because the belt loop consists of sections and splices of different ages and wear levels, its condition should be assessed both globally and locally. Periodic non-destructive testing (NDT) of the core, covers, and splices, combined with regression-based estimation of the degradation rate, enables forecasting of the remaining useful life (RUL). A degradation model based on increasing damage density was proposed, together with average and local RUL assessment. The results indicate that inserting a replacement segment in place of an excessively worn fragment may improve the overall condition of the belt section. The economic analysis includes downtime cost and expected risk cost. In practice, the profitability of diagnostics and insertions should be evaluated based on total life-cycle cost rather than only the cost of preventive replacement

Urszula KAŻMIERCZAK
Magdalena DUCHNOWSKA
Alicja BAKALARZ
Paweł STRZAŁKOWSKI
Michał WOLNY

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

WPLYW PROCESU ROZDRABNIANIA NA SKŁAD GEOMETRYCZNY MELAFIRU

Proces technologiczny przeróbki kruszyw ma istotny wpływ na właściwości geometryczne otrzymywanych z kruszenia produktów. Celem niniejszych badań była ocena wpływu procesu rozdrabniania kruszywa melafirowego w różnych rodzajach kruszarek, przy założeniu określonych parametrów geometrycznych nadawy, na kształt i płaskość ziarn w produktach po kruszeniu. Rozdrabnianie przeprowadzono w dwóch typach kruszarek: stożkowej oraz szczękowej. Do badań wykorzystano kruszywo melafirowe z rejonu Sudetów Środkowych. Ocenę wyników badań przeprowadzono w oparciu o analizy składu granulometrycznego nadaw i produktów po kruszeniu, a także analizę wskaźników kształtu i płaskości w produktach. Wyniki badań porównano z danymi dla kruszyw bazaltowych. Wykazano, że proces kruszenia melafiru w kruszarce stożkowej skutkował drobniejszym uziarnieniem i wyższym udziałem ziarn nieforemnych, podczas gdy rozdrabnianie w kruszarce szczękowej prowadziło do uzyskania wyższej foremności ziarn, przede wszystkim w grubszych klasach ziarnowych. Grubouziarnione kruszywo melafirowe charakteryzuje się wysoką zawartością ziarn płaskich w stosunku do kruszywa melafirowego drobnouziarnionego. Porównując procesy rozdrabniania kruszywa melafirowego z bazaltowym stwierdzono, że badane skały wykazują podobną charakterystykę rozdrabniania, przy czym produkty grubouziarnione po rozdrabnianiu melafiru wykazują wyższy udział ziarn płaskich i nieforemnych. Z kolei drobne ziarna melafiru cechują się wyższą foremnością niż analogiczne frakcje bazaltu. Ponadto, w przypadku kruszyw melafirowych ziarna płaskie rozdrabniają się do produktów o niższej zawartości ziarn nieforemnych w przeciwieństwie do charakterystyki rozdrabniania płaskich ziarn kruszywa bazaltowego.

1. WPROWADZENIE

Jednym z kluczowych parametrów determinujących jakość kruszyw łamanych są ich parametry geometryczne – kształt i płaskość. Cechy te w istotny sposób wpływają na właściwości technologiczne kruszyw, a zwłaszcza na ich zdolność do zagęszczania i parametry wytrzymałościowe. W konsekwencji właściwości geometryczne kruszyw mają bezpośredni wpływ na trwałość i jakość konstrukcji inżynierskich, w których materiały

te są stosowane. Z analizy danych literaturowych [1–10] wynika, że właściwości geometryczne kruszyw są uwarunkowane zarówno procesami skałotwórczymi, jak i warunkami technologicznymi ich rozdrabniania.

Gawenda [3–4, 11] wskazuje, że istotnym czynnikiem wpływającym na jakość kruszyw jest wielostadialny proces kruszenia, który zmniejsza udział ziarn nieforemnych. Podobnie Rajan i Singh [7] wykazali większą nieregularność ziarn w kruszywie uzyskanym w dwuetapowym kruszeniu w porównaniu z układem czteroetapowym. Strzałkowski i in. [10] stwierdzili, że ziarna płaskie i nieforemne koncentrują się głównie w najdrobniejszych frakcjach.

Na kształt ziarn kruszyw łamanych znaczący wpływ mają parametry pracy urządzeń rozdrabniających. Eloranta [12] wykazał, że rozkład wielkości ziarn nadawy i szerokość szczeliny wylotowej kruszarki istotnie oddziałują na wskaźnik płaskości rozdrobnionego kruszywa. Podobne wnioski przedstawili Bengtsson i Evertsson [13], wskazując dodatkowo na istotę szybkości kruszenia. W przypadku kruszarek szczękowych i stożkowych szybkość dozowania nadawy wpływa zarówno na zużycie energii, jak i na wskaźniki płaskości dla produktów po kruszeniu [8, 13]. W przypadku kruszarek udarowych z pionowym wałem zauważono, że generują one zwiększoną ilość drobnego kruszywa o uziarnieniu $<0,25$ mm w stosunku do kruszarek, w których dominującym sposobem rozdrabniania jest zgniatanie [14].

Istotne znaczenie w generowaniu parametrów geometrycznych kruszyw ma również konfiguracja układu technologicznego kruszenia. Rajan i Singh [5–6] wykazali, że wskaźnik kształtu wyznaczony dla rozdrobnionego kruszywa zależy od kolejności zastosowanych w układzie rozdrabniającym kruszarek. Badania Umashankara i in. [15] wskazują, że kruszywa produkowane w układzie kruszarek szczękowo-stożkowych charakteryzują się korzystniejszym kształtem ziarn niż produkty uzyskiwane w układach wykorzystujących wyłącznie kruszarki szczękowe. Diógenes i in. [16] natomiast podają, że kruszarka szczękowa w pierwszym etapie rozdrabniania wytwarza gruboziarniste kruszywo o niskich zawartościach ziarn płaskich i nieforemnych, podczas gdy drobne kruszywo powstające w końcowych etapach kruszenia w kruszarkach stożkowych zawiera zwiększoną ilość ziarn płaskich i nieforemnych. Jednocześnie zauważono, że skład ziarnowy, jak i struktura spękań w poszczególnych ziarnach, a także ich parametry geometryczne istotnie zależą od właściwości litologicznych przerabianej nadawy [8–9, 17–18].

W literaturze podkreśla się również znaczenie właściwego przygotowania nadawy do procesu rozdrabniania. Przeprowadzone analizy parametrów geometrycznych produktów kruszenia w odniesieniu do parametrów geologicznych nadawy wykazały, że w przypadku kruszyw bazaltowych wstępny rozdział ziarn nadawy na ziarna płaskie i niepłaskie może przyczynić się do poprawy parametrów geometrycznych końcowego produktu handlowego [19]. Niniejsza publikacja jest kontynuacją badań związanych z wyborem technologii i metody kruszenia skał [10, 19] a jej celem jest określenie wpływu procesu rozdrabniania i parametrów geometrycznych nadawy na skład geometryczny kruszywa melafirowego.

2. MATERIAŁY DO BADAŃ I METODYKA

Materiałem do badań laboratoryjnych było melafirowe kruszywo łamane pobrane w zakładzie przeróbczym w rejonie Wałbrzycha. Masa pobranej do badań próbki wynosiła 120 kg. Próbki do badań zostały pobrane z ciągu technologicznego zakładu przeróbki kruszyw. Po wstępnym rozdrobnieniu skał za pomocą materiałów wybuchowych zostały one przetransportowane do zakładu przeróbczego samochodami technologicznymi. Następnie kruszywo zostało poddane klasyfikacji wstępnej, poprzedzonej rozbijaniem bloków nadgabarytowych w kruszarce żyratorowej – wstępny etap kruszenia. Po procesie wstępnego rozdrabniania urobek został skierowany do I stopnia kruszenia w kruszarce stożkowej, a następnie produkt rozdrabniania był klasyfikowany mechanicznie na przesiewaczach vibracyjnych. Do badań została pobrana próbka jednego z produktów tej klasyfikacji o uziarnieniu 0–31,5 mm.

Petrograficznie pobrana próbka to melafir, skała wylewna o strukturze porfirowej i teksturze migdałowcowej w składzie, w której dominują drobne listewki silnie zazębiających się plagioklazów, pirokseny, oliwiny oraz wtórnie wykrystalizowana krzemionka.

Rejon	Wałbrzyski
Skład mineralny	plagioklasy, pirokseny, oliwiny
Struktura	afanitowa, czasem porfirowa
Tekstura	masywna, bezładna i/lub migdałowcowa
Barwa	czerwonobrunatna

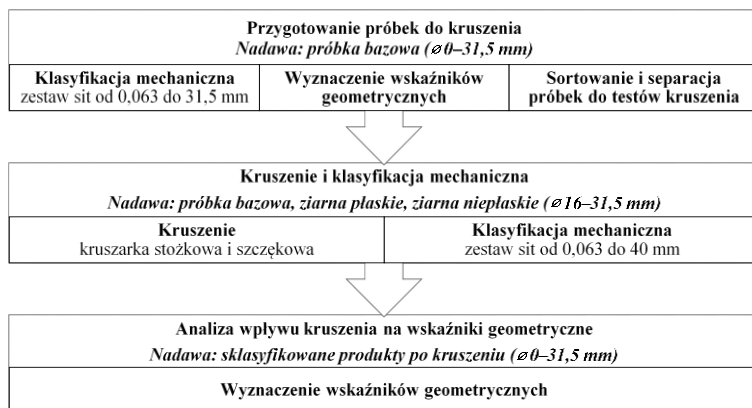


Rys. 1. Kruszywo melafirowe

Fig. 1. Melaphyre aggregate

W pierwszym etapie badań przeprowadzono szczegółową analizę składu ziarnowego próbki zgodnie z normą EN 933-1 [20]. Następnie dla każdej z uzyskanych klas ziarnowych o średnicy powyżej 4 mm wyznaczono wskaźniki kształtu oraz płaskości przy użyciu suwmiarki Schultza oraz sit prętowych, zgodnie z normami EN 933-3 i EN 933-4 [21–22].

W kolejnym etapie badań wydzielono materiał przeznaczony do testów kruszenia. Z próbki pierwotnej wydzielono próbkę bazową oraz porównawcze próbki ziarn płaskich i niepłaskich o uziarnieniu 16–31,5 mm. Badania nad efektywnością procesu kruszenia kruszywa melafirowego prowadzono w kruszarce szczękowej oraz stożkowej o szerokości szczeliny wylotowej ustawionej na 18 ± 1 mm. Produkty otrzymane po procesie kruszenia poddano analizie granulometrycznej, a dla każdej z klas ziarnowych wyznaczono wskaźnik kształtu oraz płaskości. Schemat metodyki badań przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat metodyki badań
Fig. 2. Scheme of research methodology

Przedstawione w pracy badania obejmują cykl standardowych operacji badawczych stosowanych w analizie parametrów technicznych kruszyw łamanych, realizowanych zgodnie z obowiązującymi normami i procedurami badawczymi. Ich integracja w spójny, uporządkowany schemat badawczy, ze szczególnym uwzględnieniem rozdzielnego procesu kruszenia ziarn płaskich oraz niepłaskich, umożliwiła opracowanie rozszerzonej metodyki badań kruszyw.

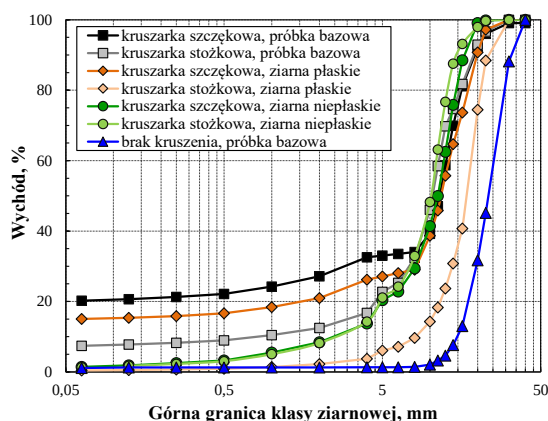
Zaproponowana przez Autorów [19] metodyka badań może mieć istotne znaczenie aplikacyjne w technologii produkcji kruszyw. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do optymalizacji parametrów pracy układów kruszących, w tym doboru typ kruszarek, a także konfiguracji stopni kruszenia, co może pozwolić na bardziej świadome kształtowanie składu ziarnowego i właściwości geometrycznych kruszywa końcowego, w szczególności w zakresie ograniczania udziału ziarn płaskich i nieforemnych, które niekorzystnie wpływają na właściwości technologiczne kruszyw dla budownictwa i drogownictwa.

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy składu ziarnowego dla próbek bazowych przed kruszeniem oraz dla próbek bazowych z podziałem na ziarna płaskie i niepłaskie po kruszeniu. Wartości na osi poziomej przedstawiono w skali logarytmicznej zgodnie z wymogami normy EN 933-1 [20].

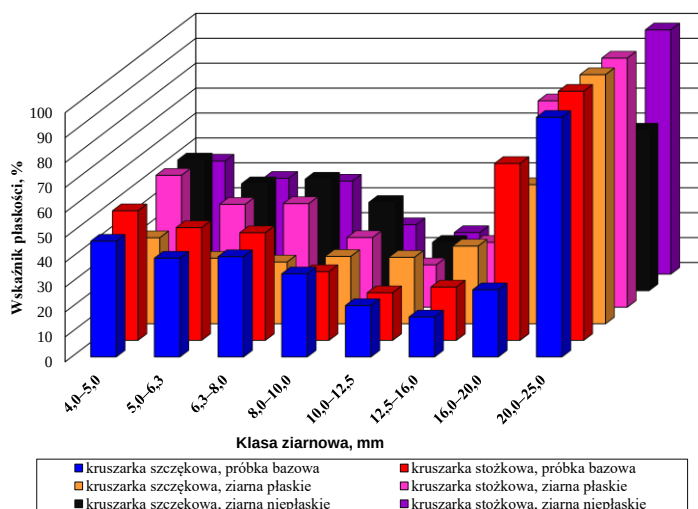
Kruszywo melafirowe przed procesem rozdrabniania charakteryzowało się niską zawartością najdrobniejszych klas ziarnowych. Na podstawie analizy krzywych składu ziarnowego próbek po kruszeniu można stwierdzić, że w wyniku rozdrabniania w kruszarce stożkowej ziarn płaskich i nadawy w pierwotnym składzie geometrycznym

otrzymuje się wyraźnie drobniejsze uziarnienie produktu niż w przypadku kruszarki szczękowej. Ziarna foremne rozdrabniają się w obu rodzajach kruszarek do podobnego uziarnienia. Im wyższa zawartość ziarn płaskich w nadawie, tym większe różnice pomiędzy wielkością ziarna otrzymywanego z kruszarki szczękowej i stożkowej, na niekorzyść produktu po kruszeniu w kruszarce stożkowej.



Rys. 3. Skład ziarnowy próbek przed i po kruszeniu
Fig. 3. Grain composition of samples before and after crushing

Na rysunku 4 przedstawiono zestawienie wskaźników płaskości dla procesu rozdrabniania ziarn kruszywa melafirowego o określonych parametrach geometrycz-

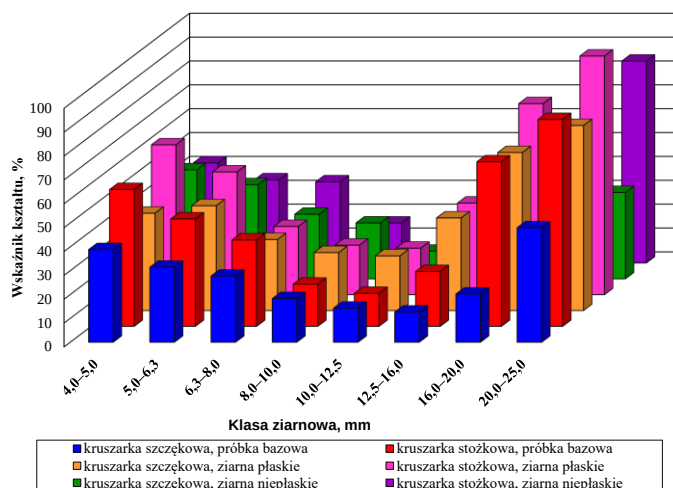


Rys. 4. Wskaźniki płaskości dla rozdrabniania kruszywa melafirowego
Fig. 4. Flakiness indexes for crushing melaphyre aggregate

nych w dwóch rodzajach kruszarek. Na podstawie analizy wykresu można stwierdzić, że w przypadku kruszywa melafirowego koncentracja ziarn płaskich następuje w najgrubszych klasach ziarnowych. W przypadku grubych klas ziarnowych niższe wartości wskaźnika płaskości można otrzymać w przypadku rozdrabniania wyłącznie ziarn niepłaskich w kruszarce szczękowej.

Jednocześnie zauważono odwrotną tendencję w przypadku drobnych klas ziarnowych. W wyniku zmiany stopnia rozdrobnienia ziarn płaskich następuje zmniejszenie zawartości ziarn płaskich w drobnych klasach ziarnowych, niezależnie od właściwości geometrycznych nadawy, jak i rodzaju maszyny. Wskazuje to, że o ile w przypadku grubych klas ziarnowych rodzaj kruszarki istotnie determinuje płaskość ziarn, to w przypadku drobnych klas ziarnowych rodzaj zastosowanej kruszarki nie ma tak dużego znaczenia, a dodatkowo otrzymywane wskaźniki płaskości są bardziej optymalne.

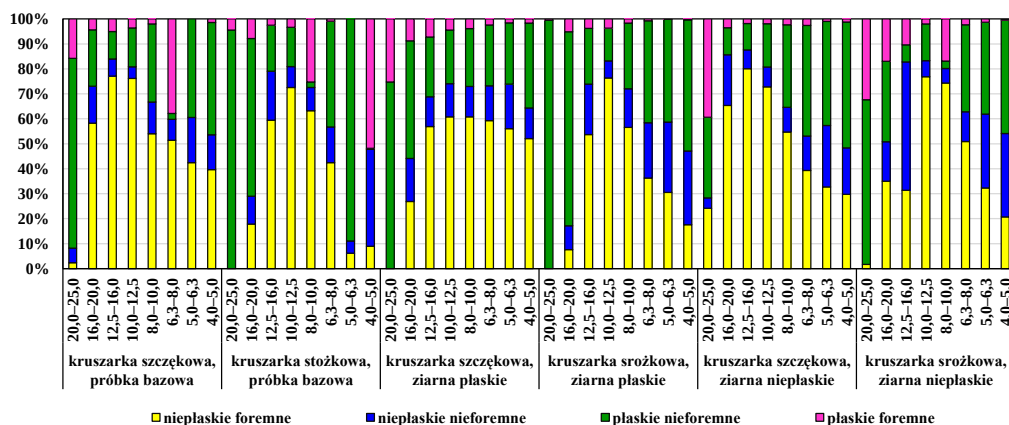
Inaczej niż dla wskaźnika płaskości przedstawia się analiza wartości wskaźników kształtu (rys. 5). Zauważono, że rodzaj kruszarki ma istotny wpływ na wartość tego parametru. W wyniku rozdrabniania w kruszarce stożkowej kruszywa melafirowego, niezależnie od zawartości ziarn płaskich w rozdrabnianej nadawie, wskaźniki kształtu dla produktów po kruszeniu są wyższe niż w przypadku produktów otrzymanych z kruszarki szczękowej. Tendencja ta jest stała dla pełnego zakresu uziarnienia. Rozdrabniane w kruszarce stożkowej ziarna niepłaskie rozdrabniają się do produktu o wyraźnie podwyższonej, w stosunku do pierwotnej próbki, zawartości ziarn nieforemnych. Przedstawione wyniki wskazują, że w przypadku konkretnie kruszywa melafirowego zastosowanie w ciągu technologicznym kruszarek szczękowych może znacznie pogorszyć parametry jakościowe kruszyw otrzymywanych z procesu rozdrabniania.



Rys. 5. Wskaźniki kształtu dla rozdrabniania kruszywa melafirowego

Fig. 5. Shape indexes for crushing melaphyre aggregate

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę sklasyfikowanych według zaproponowanej w literaturze [19] metodyki podziału ziarn na: płaskie foremne, płaskie nieforemne, niepłaskie foremne i niepłaskie nieforemne. Klasy ziarnowe zsumowano operacyjnie do 100%, niezależnie od ich wychodu masowego.



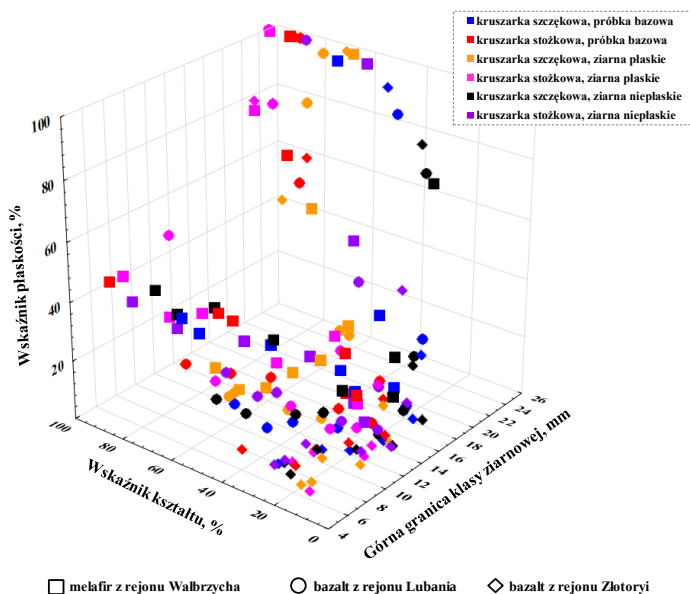
Rys. 6. Charakterystyka rozkładu ziarn o określonych kształtach w klasach ziarnowych
Fig. 6. Characteristics of the distribution of grains with specific geometrical parameters in grain classes

Na podstawie analizy danych z rys. 6 można stwierdzić, że kruszywo melafirowe charakteryzuje się wysoką zawartością ziarn płaskich w grubszych klasach ziarnowych. Zauważono, że w wyniku rozdrabniania nadawy w kruszarce szczękowej, niezależnie od zawartości ziarn płaskich w nadawie, ziarna w produktach po kruszeniu wykazują większą foremność niezależnie od analizowanej klasy ziarnowej w porównaniu do rozdrabniania w kruszarce stożkowej. Produkty otrzymywane z kruszarki stożkowej wykazują wyższą zawartość ziarn nieforemnych.

Na rysunku 7 przedstawiono porównawczą charakterystykę geometryczną kruszyw bazaltowych i melafirowych po kruszeniu w kruszarce stożkowej i szczękowej w układzie trójparametrowym, określając rozkład wskaźników kształtu i płaskości dla każdej z klas ziarnowych. Kolorami na wykresie oznaczono rodzaj nadawy i rodzaj kruszarki stosowanej do rozdrabniania, natomiast kształtem znacznika wskazano rodzaj kruszonej skały.

Dane dla kruszyw bazaltowych pozyskano z literatury [19]. Na podstawie analizy rozkładu trójwymiarowego właściwości geometrycznych analizowanych kruszyw melafirowych i bazaltowych można stwierdzić, że wykazują one podobną charakterystykę rozdrabniania. Kruszywo melafirowe rozdrabniane w zbliżonych warunkach technologicznych i w podobnym uziarnieniu jak kruszywo bazaltowe rozdrabniało się do produktów o wyższej zawartości ziarn płaskich i nieforemnych. Rozdrabnianie kruszywa melafirowego w kruszarce szczękowej do drobniejszych klas ziarnowych skutkuje wy-

rażnie niższą zawartością ziarn nieforemnych w produkcie po kruszeniu niż w przypadku kruszywa bazaltowego.



Rys. 7. Charakterystyka 3W rozkładu parametrów geometrycznych w klasach ziarnowych
Fig. 7. 3D distribution characteristics of geometric parameters in grain classes

Analiza porównawcza właściwości geometrycznych produktów po kruszenia wykazała również, że w przypadku kruszyw ze skał wylewnych, drobne klasy ziarnowe produktu po kruszeniu bazaltu charakteryzują się wyższą zawartością ziarn płaskich i nieforemnych niż w przypadku rozdrabniania melafiru. Ziarna płaskie z melafiru rozdrabniają się do ziarn niepłaskich i foremnych, w przeciwieństwie do bazaltu – ziarna płaskie i foremne rozdrabniają się do ziarn płaskich i nieforemnych.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza procesu rozdrabniania kruszywa melafirowego wykazała, że rodzaj zastosowanej kruszarki istotnie wpływa na uziarnienie oraz parametry geometryczne produktów. Kruszenie w kruszarce stożkowej skutkuje drobniejszym uziarnieniem i większym udziałem ziarn nieforemnych, natomiast kruszenie w kruszarce szczękowej prowadzi do uzyskania wyższej foremności ziarn, zwłaszcza w grubszych klasach ziarnowych. Kruszywo melafirowe charakteryzuje się znaczną zawartością ziarn płaskich w grubszych frakcjach, podczas gdy w drobnych klasach ziarnowych wpływ rodzaju kruszarki na udział ziarn płaskich jest ograniczony.

Porównując procesy rozdrabniania kruszywa melafirowego i bazaltowego, wykazano, że badane skały wylewne wykazują podobną charakterystykę rozdrabniania, przy czym produkty grubouziarnione po rozdrabnianiu melafiru wykazują wyższy udział ziarn płaskich i nieforemnych, natomiast drobne ziarna melafiru cechują się wyższą foremnością niż analogiczne frakcje bazaltu. Zauważono również, że w przypadku kruszyw melafirowych ziarna płaskie rozdrabniają się do produktów o niższej zawartości ziarn nieforemnych niż w przypadku bazaltów.

Zastosowanie rozdzielnej analizy procesu rozdrabniania dla ziarn płaskich i niepłaskich umożliwia bardziej precyzyjną ocenę wpływu morfologii ziarn na przebieg procesu kruszenia i właściwości geometryczne produktów, co pozwala na optymalizację parametrów technologicznych, w tym doboru typu kruszarki, konfiguracji stopni kruszenia, a także kontrolę parametrów geometrycznych i granulometrycznych produktów.

Przyjęta metodyka wykazuje potencjał do szerokiego zastosowania w analizie użyteczności kruszyw łamanych, umożliwiając wypracowanie wniosków zbliżonych do optimum technologicznego dla różnych rodzajów skał. W konsekwencji może się to przyczynić do poprawy jakości produktów oraz zwiększenia efektywności procesów przeróbczych.

LITERATURA

- [1] RÄISÄNEN M., MERTAMO M., *An evaluation of the procedure and results of laboratory crushing in quality assessment of rock aggregate raw materials*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2004, 63, 33–39, <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0218-1>
- [2] HOFER V., BACH H., LATAL C., NEUBAUER A.-C., *Impact of Geometric and Petrographic Characteristics on the Variability of LA Test Values for Railway Ballast*, Mathematical Geosciences, 2013, 45, 727–752, <https://doi.org/10.1007/s11004-013-9472-3>
- [3] GAWENDA T., *Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2013, 29 (1), 53–65, <https://doi.org/10.2478/gospo-2013-0002>
- [4] GAWENDA T., *Innowacyjne technologie produkcji kruszyw o ziarnach foremnych*, Mining Science – Mineral Aggregates, 2015, 22 (1), 45–59.
- [5] RAJAN B., SINGH D., *An image-based approach to capture influence of production mechanism on aggregate dimension distribution and breakage potential*, Advances in Civil Engineering Materials 2020, 9 (1), 152–168, <https://doi.org/10.1520/ACEM20190197>
- [6] RAJAN B., SINGH D., *Investigation on effects of different crushing stages on morphology of coarse and fine aggregates*, International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21 (2), 177–195, <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1449951>
- [7] RAJAN B., SINGH D., *Quantify effects of stage crushing on dimensional distribution of basaltic aggregates using image technique*, International Journal of Pavement Research and Technology, 2019, 12, 497–507, <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0060-x>
- [8] KÖKEN E., LAWAL A.I., *Investigating the effects of feeding properties on rock breakage by jaw crusher using response surface method and gene expression programming*, Advanced Powder Technology, 2021, 32 (5), 1521–1531, <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.007>
- [9] KÖKEN E., ÖZARSLAN A., *New testing methodology for the quantification of rock crushability: Compressive crushing value (CCV)*, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2018, 25, 1227–1236, <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1675-7>

- [10] STRZAŁKOWSKI P., DUCHNOWSKA M., KAŻMIERCZAK U., BAKALARZ A., WOLNY M., KARWOWSKI P., STĘPIEŃ T., *Evaluation of the Structure and Geometric Properties of Crushed Igneous Rock Aggregates*, Materials, 2021, 14, 7202, <https://doi.org/10.3390/ma14237202>
- [11] GAWENDA T., STEMPKOWSKA A., SARAMAK D., FOSZCZ D., KRAWCZYKOWSKA A., SUROWIAK A., *Assessment of Operational Effectiveness of Innovative Circuit for Production of Crushed Regular Aggregates in Particle Size Fraction 8–16 mm*, Minerals, 2022, 12, 634, <https://doi.org/10.3390/min12050634>
- [12] ELORANTA J., *Influence of crushing process variables on the product quality of crushed rock*, Dissertation, Tampere University of Technology, 1995.
- [13] BENGTTSSON M., EVERTSSON C. M., *An empirical model for predicting flakiness in cone crushing*, International Journal of Mineral Processing, 2006, 79 (1), 49–60.
- [14] CEPURITIS R., GARBOCZI E. J., JACOBSEN S., *Three dimensional shape analysis of concrete aggregate fines produced by VSI crushing*, Powder Technology, 2017, 308, 410–421.
- [15] UMASHANKAR O., GOWREESH Y.S., MAMATHA K.H., DINESH S.V., *Effect of crushing mechanism on the shape properties of coarse aggregates*, Materials Today: Proceedings, 2022, 60, 534–540.
- [16] DIÓGENES L.M., BESSA I.S., CASTELO BRANCO V.T.F., MAHMOUD E., *The influence of stone crushing processes on aggregate shape properties*, Road Materials and Pavement Design, 2019, 20, 877–894, <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422792>
- [17] KAMANI M., RASOUL A., *The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape*, Construction and Building Materials, 2019, 230, 117016, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117016>
- [18] BOUQUETY M.N., DESCANTES Y., BARCELO, L., DE LARRARD F., CLAVAUD B., *Experimental study of crushed aggregate shape*, Construction and Building Materials, 2007, 21, 865–872, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.013>
- [19] DUCHNOWSKA M., STRZAŁKOWSKI P., BAKALARZ A., KAŻMIERCZAK U., KARWOWSKI P., WOLNY M., STĘPIEŃ T., *Analiza wpływu rozdrabniania na parametry geometryczne kruszywa bazaltowego*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 8, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2025, 41–52.
- [20] EN 933-1:2012. *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method.*
- [21] EN 933-3:2012. *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 3: Determination of particle shape – Flakiness index.*
- [22] EN 933-4:2012. *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape – Shape index.*

INFLUENCE OF THE GRINDING PROCESS ON THE GEOMETRIC COMPOSITION OF MELAPHYRE

The technological process of aggregate processing has a significant impact on the geometric properties of the products obtained from crushing. This publication is a continuation of research related to the selection of aggregate crushing technology and methods, and the development of an appropriate crushing procedure. The aim of this research was to assess the impact of the crushing process of melaphyre aggregate in different types of crushers, assuming specific geometric parameters of the feed, on the shape and flakiness of particles in the crushed products. Crushing was carried out in two types of crushers: cone and jaw. Melaphyre aggregate from the Central Sudetes region was used for the research. The evaluation of the research results was based on analyses of the granulometric composition of the feeds and crushed products, as well as an analysis of the shape and flakiness indexes of particles in the crushed products. The research results were compared with data for basalt aggregates.

It has been shown that crushing melaphyre in a cone crusher resulted in finer grains size and a higher proportion of non-cubical particles, while crushing in a jaw crusher led to higher particle cubicity, especially in the coarser grain sizes. Coarse-grained melaphyre aggregate is characterized by a high content of flaky particles compared to fine-grained melaphyre aggregate. When comparing the crushing processes of melaphyre and basalt aggregates, it was found that the rocks tested exhibit similar crushing characteristics, with coarse-grained products after melaphyre crushing showing a higher proportion of flaky and non-cubical particles. On the other hand, fine melaphyre grains are more cubical in shape than the corresponding basalt fractions. Furthermore, in the case of melaphyre aggregates, flaky particles are crushed into products with a lower content of non-cubical particles, in contrast to the crushing characteristics of flaky basalt aggregate particles.

Wiesław KOZIOŁ
Ireneusz BAIC
Artur MIROS
Magdalena GRUSZKA-DROSIK
Marek ZAWALSKI

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii
w Budownictwie, Warszawa

MAGNEZYT – SUROWIEC STRATEGICZNY

Magnezyt (MgCO_3) jest podstawowym surowcem do produkcji tlenku magnezu. Wykorzystywany jest jako półfabrykat lub składnik do produkcji materiałów ogniotrwałych, kluczowych dla hutnictwa, produkcji cementu, szkła oraz wielu innych procesów wysokotemperaturowych. Znajduje też zastosowanie do produkcji niektórych nawozów sztucznych, środków uzdatniania wody i ścieków, dodatek do pasz mineralnych, w medycynie itp. Obecnie jego znaczenie gospodarcze i strategiczne podlega dynamicznym zmianom w związku z zastosowaniem do produkcji nowoczesnych ognioodpornych materiałów budowlanych (płyt, spoiw itp.) oraz materiałów niezbędnych w procesach transformacji energetycznej i zielonej gospodarki. W artykule przedstawiono nowoczesne kierunki zastosowań magnezytów i magnezji, ocenę światowych i krajowych zasobów magnezytu oraz ich strategicznego znaczenia dla UE i kraju. Eksploatacja magnezytu w Polsce (kopalnia Grochów) związana jest z wydobywaniem skał serpentynitowych, zalegających w nadkładzie i w otoczeniu żył magnezytowych, które są wykorzystywane do produkcji kruszyw.

1. WPROWADZENIE

Magnezyt jest jednym z ważniejszych minerałów magnezu i związków magnezu (MgO), dotychczas wykorzystywanych jako półfabrykat lub składnik do produkcji materiałów ogniotrwałych, kluczowych dla hutnictwa żelaza i stali, cementowni, hutnictwa metali nieżelaznych, odlewni, przemysłu szklarskiego, przemysłu wapienniczego i innych procesów wysokotemperaturowych. Magnezyt i związki magnezu stosowane są też do produkcji niektórych nawozów rolniczych i ogrodniczych, uzdatniania wody i ścieków, dodatek do pasz mineralnych, w medycynie itd. Obecnie znaczenie gospodarcze i strategiczne magnezytu podlega dużym zmianom w związku z zastosowaniem do produkcji nowoczesnych o wysokiej impedancji ogniowej materiałów budowlanych (płyt, prefabrykatów, spoiw, zapraw itp.), magazynowania energii oraz

w aplikacjach środowiskowych. Perspektywy tych zastosowań wskazują, że choć magnezyt nie znajduje się obecnie na liście najbardziej deficytowych (krytycznych) surowców mineralnych (na liście CRMA jest natomiast magnez-metal pozyskiwany głównie z magnezytu [6, 24], to jego znaczenie strategiczne w UE rośnie wraz ze wzrostem zapotrzebowania, dominujący import z Chin i ograniczoną dostępność lokalnych źródeł. Aktualnie trwają starania przemysłu by magnezyt/magnezje zostały uwzględnione na planowanej aktualizacji w UE w 2027 r. liście surowców krytycznych i kluczowych.

Z punktu widzenia zastosowań magnezytu naturalnego jego podstawowe wymagania dotyczą: wysokiej zawartości MgO (zwykle 40–47%), bardzo niskiej rozszerzalności cieplnej po przekształceniu w MgO, odporności chemicznej w środowiskach zasadowych oraz możliwości uzyskania produktów MgO o szerokim zakresie rozkładu termicznego (tzw. krzywej prażeń). Parametry te determinują późniejsze zastosowania do produkcji dobrej jakości materiałów ogniotrwałych, w budownictwie, w chemii przemysłowej i innych. W praktyce użytkowej (przemysłowej) magnezyt naturalny (górnicy) traktuje się jako surowiec do produkcji tlenku magnezu (MgO) w trzech głównych klasach jakościowych [10, 12, 33, 35]:

- magnezyt kalcynowany (700–1000°C), produkt reaktywny, stosowany m.in. w budownictwie, chemii, rolnictwie, ochronie środowiska,
- magnezyt prażony (1600–1800°C), nisko reaktywny, stosowany do wyrobów wysoko ogniotrwałych,
- magnezyt topiony (>2800°C), produkt o najwyższej czystości i niskiej gęstości, stosowany do najbardziej wymagających produktów ogniotrwałych.

2. ZNACZENIE MAGNEZYTU DLA PRZEMYSŁU EUROPEJSKIEGO

Magnezyt i jego pochodne (magnezyt kalcynowany, prażony i topiony) jest surowcem o kluczowym znaczeniu dla wielu sektorów przemysłu XXI w., jego rola jest szczególnie ważna dla [10, 12, 16]:

- 1) przemysłu ogniotrwałego i ciężkiego w tym głównie dla hutnictwa stali, produkcji cementów i hut szkła; Przemysł ten odpowiada za znaczny udział w emisjach CO₂, a jego modernizacja związana jest między innymi z zapotrzebowaniem na wysokojakościowe produkty magnezytowe (magnezyty, magnezje);
- 2) technologii transformacji energetycznych; w nowych, innowacyjnych sektorach gospodarki magnezyt i jego pochodne mają rosnące znaczenie dla:
 - niskoemisyjnej produkcji stali w elektrycznych piecach łukowych tzw. zielonej stali,
 - magazynowaniu ciepła i energii (zastosowanie magnezji jako materiału konstrukcyjnego i izolacyjnego zbiorników magazynowych energii),

- magazynowania wodoru w postaci MgH_2 ,
 - oczyszczania spalin i sorpcji CO_2 (magnezyt kalcynowany stosowany jest jako sorbent w procesach neutralizacji gazów, a badania nad pochłanianie CO_2 wskazują na rosnący potencjał tego surowca,
 - produkcji baterii i krytycznych metali Li, Ni (produkcja ta wymaga pieców, których wyłożenia muszą być odporne na ekstremalne warunki temperaturowe co zwiększa zapotrzebowanie na magnezyty, magnezje prażone i topione);
- 3) budownictwa, rolnictwa, przemysłu chemicznego i zastosowań środowiskowych, choć w porównaniu do hutnictwa i cementowni wielkości zapotrzebowania na magnezyt i jego produkty dla tych sektorów są aktualnie mniejsze, to jednak:
- magnezyt kalcynowany (MgO) jest podstawowym składnikiem do produkcji nowego typu cementu siarczanowego ($MgO/MgSO_4$) o dużo korzystniejszych właściwościach w porównaniu do tradycyjnego cementu Sorela ($MgCl_2$),
 - budownictwo coraz częściej wykorzystuje magnezyty kalcynowane i cementy siarczanowe do produkcji ognioodpornych (klasa niepalności A1), przeciwpożarowych płyt MgO stosowanych w infrastrukturze transportowej (tunele drogowe i kolejowe, osłony mostów), w budownictwie obronnym (schrony, magazyny itp.), w budynkach użyteczności publicznej (hotele, szpitale, centra kongresowe itd.), w niektórych zabudowaniach mieszkalnych narażonych na ryzyko pożarów (garaże); magnezyty kalcynowane stosowane są także do wykonania posadzek, produkcji innowacyjnych spoiw mineralnych i zapraw, a także do stabilizacji gruntów,
 - rolnictwo stosuje MgO jako źródło magnezu w nawozach i paszach oraz środek odkwaszający gleby,
 - chemia przemysłowa wykorzystuje MgO jako katalizator i adsorbent,
 - w zastosowaniach środowiskowych rośnie zastosowanie MgO jako środka neutralizującego ścieki i w procesach pochłaniania CO_2 .

Podsumowując należy stwierdzić, że magnezyt jest surowcem o kluczowym (strategicznym) znaczeniu. Jego właściwości fizykochemiczne predestynują go do zastosowań w ważnych sektorach przemysłu XXI w. Jako podstawowy surowiec do produkcji tlenku magnezu (magnezji), spełnia kluczową rolę m.in. w hutnictwie, produkcji cementu, technologiach środowiskowych i nowoczesnych, niepalnych materiałów budowlanych. Globalne zapotrzebowanie na surowce o wysokiej impedancji ogniowej, niskiej emisyjności i zdolności do pochłaniania CO_2 sprawia, że magnezyt nabiera szczególnego znaczenia w nawiązaniu do realizowanej w UE transformacji energetycznej i strategii bezpieczeństwa surowcowego [12, 19, 28, 30, 34].

3. GOSPODARKA SUROWCAMI MAGNEZYTOWYMI I ICH ZASOBY

3.1. MAGNEZYT

Zasoby magnezytu naturalnego (surowego), głównego surowca do produkcji wyrobów magnezytowych, oceniane są w świecie na 8 do 9 mld t [2, 9], chociaż dokładna ich ilość jest trudna do ustalenia. Brak dostępu do zweryfikowanych danych z krajów, jak Chiny, Rosja i Korea Północna powoduje rozbieżność ocen wielkości światowych zasobów. Niektóre źródła podają nawet zasoby 13–15 mld t [17, 20]. Niezależnie od ocen, wystarczalność światowych zasobów magnezytu wydaje się być duża, tym bardziej, że coraz większego znaczenia nabiera pozyskiwanie surowców magnezytowych z wody morskiej i solanek. Większość światowych złóż tworzą magnezyty krystaliczne, powstałe w wyniku procesów hydrotermalno-metasomatycznych w formacjach dolomitowych i wapiennych, a także procesów sedymentacji w lagunach i płytkich morzach. Mniejsze znaczenie mają złoża magnezytów skrytokrystalicznych, powstałe w serpentynitach w wyniku przemian hydrotermalnych oraz wietrzenia i infiltracji masywów serpentynitowych. Główne zasoby złóż magnezytu skupione są w Rosji (~30%), Słowacji, Chinach oraz w Australii i Grecji, a także w Brazylii [20]. Najważniejszymi producentami magnezytu górniczego są Chiny (~60% produkcji światowej) oraz Turcja, Brazylia, Rosja, Australia, Austria, Hiszpania, Słowacja i Grecja. Światowe wydobycie magnezytu w ostatnich latach wynosi 25–26 mln t/rok [20, 33] i w dużym stopniu uzależnione jest od koniunktury w hutnictwie żelaza i stali.

Eksploracja górnicza magnezytów odbywa się głównie w kopalniach odkrywkowych. W UE duże zasoby magnezytu naturalnego występują na Słowacji w masywie Dubrava w rejonie Koszyc [2, 13, 30, 32]. Niektóre źródła podają ich zasoby na ~3,4 mld t [5, 12], chociaż inne dane określają zasoby na 1,2 mld t [20]. Eksploracją magnezytu i produkcją wyrobów magnezytowych zajmują się Zakłady Magnezytowe w Jelšavie [12]. Są one jednym z czołowych w Europie producentów magnezytowych wyrobów ogniotrwałych i magnezytu naturalnego. Produkty te dostarczane są do wielu krajów, a najwięksi odbiorcy to: Ukraina, Niemcy, Czechy, Polska i Austria. Magnezyt eksploatowany jest w kopalni podziemnej z zastosowaniem systemów filarowo-komorowych [13]. Jednym z ważniejszych krajów w Europie pod względem wydobycia i produkcji wysokiej jakości magnezytów jest Grecja, z zasobami ~280 mln t, i produkcją 380 do 500 tys. t [20].

Magnezyt (MgO) można także otrzymywać z dolomitów i serpentynitów jako alternatywnych źródeł tlenu magnezu, zwłaszcza w zastosowaniach mniej wymagających pod względem czystości, lub też tam, gdzie nie ma zasobów złóż magnezytu albo są one niewystarczające. Mimo znacznie większej dostępności złóż dolomitu i serpentynitu obecnie technologia ta ma mniejsze zastosowanie ze względu na duże zużycie energii, wysoki koszt i ograniczenia środowiskowe.

Podstawowym przedmiotem handlu międzynarodowego są magnezyty (magnezje) prażone, a głównymi ich dostawcami są Chiny (60–70%), Turcja i Brazylia oraz w mniejszym stopniu Austria, Australia, Hiszpania, Słowacja i Grecja. Przedmiotem obrotu międzynarodowego są także produkowane magnezyty topione, szczególnie przez Chiny, Australię i Kanadę. Handel magnezytami kalcynowanymi ma znaczenie głównie w wymianie regionalnej, zaś magnezyty surowe podlegają wymianie na bardzo małą skalę, w tym importowane są przez Polskę.

Magnezyt naturalny jest też podstawowym surowcem do produkcji magnezu metalicznego wykorzystywanego m.in. w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, elektronicznym, w metalurgii, systemach magazynowania energii (produkcja baterii), w przemyśle chemicznym itd. Obecnie globalnym liderem w produkcji metalicznego magnezu są Chiny z ponad 85% światowej podaży.

3.2. SOLE POTASOWO-MAGNEZOWE

Dla magnezytów kalcynowanych, prażonych i topionych, produkowanych z magnezytów naturalnych, konkurencją są odpowiednie gatunki magnezji syntetycznej (MgO), lepsze jakościowo, a pozyskiwane głównie z solanek i wody morskiej [10]. Sole potasowe oraz sole potasowo-magnezowe i siarczanu magnezu (rzadsze, ale wyżej cenione) są głównym źródłem potasu i jego związków, w mniejszym stopniu magnezu (chlorek magnezu $MgCl_2$). Pozyskiwane są w ~88% ze złóż naturalnych soli chlorkowych i siarczanowych, a w 12% ze złóż saletry potasowej KNO_3 oraz solanek jezior słonych i wód zmineralizowanych [35, 36]. Sole te stosowane są głównie w postaci nawozów mieszanych, niemal wyłącznie w rolnictwie (95%).

Globalne zasoby soli potasowo-magnezowych szacuje się na ~3,7 mld t K_2O , a ich wydobycie w 2015 r. wyniosło 38,8 mln t K_2O [8]. Największe zasoby udokumentowane są w Kanadzie, Białorusi i Rosji. Sole chlorku potasu i magnezu (sylwin, karnalit) stanowią zdecydowaną większość światowych zasobów i są głównym towarem eksportowym po cenach około dwukrotnie niższych od soli siarczanu potasu i magnezu (polihalit, kizeryt), gdyż występowanie i eksploatacja soli potasowo-magnezowych typu siarczanowego (SOP) jest rzadkością, wydobywane są m.in. w USA i Wielkiej Brytanii [8, 35]. W produkcji światowej surowców magnezytowych dominujące znaczenie mają surowce magnezytowe prażone, a udział surowców magnezytowych kalcynowanych wynosi nieco ponad 10%, zaś surowców kalcynowanych ~5% [10]. W odróżnieniu od informacji dotyczących produkcji magnezytów kalcynowanych, prażonych i topionych, wielkość produkcji magnezji z soli i solanek nie jest publikowana w statystykach poszczególnych krajów producentów. Dostępne są jedynie dane dotyczące zdolności produkcyjnych i głównych kierunkach przetwórstwa [36].

4. ZASOBY, PRODUKCJA I ZASTOSOWANIE SUROWCÓW MAGNEZYTOWYCH W POLSCE

4.1. MAGNEZYTY

Złoża magnezytów w kraju związane są z prekambryjskimi masywami serpentynitowymi Sobótki, Szklar, Grochowej-Braszowic oraz Gogołów-Jordanów [1, 22]. Do tychczas udokumentowano sześć złóż magnezytów w województwie dolnośląskim. Są to złoża magnezytu typu żyłowego, o grubości żył do 3 m, o skomplikowanej budowie geologicznej i zmiennej jakości. Według stanu na koniec 2024 r. [1] krajowe zasoby geologiczne magnezytu w udokumentowanych złożach wynoszą 16,44 mln t, z czego 14,25 mln t stanowią zasoby bilansowe zlokalizowane w sześciu złożach i 2,18 mln t zasoby pozabilansowe. Znaczna część zasobów bilansowych (4,1 mln t) zalega w zaniechanym do eksploatacji złożu Wiry k. Sobótki, a niemal połowa (5,92 mln t) we wstępnie rozpoznanych złożach Grochów, Wiry-Gogołów, Wiry-Tapadła i Szklary. Zasoby w eksploatowanym złożu Braszowice wynoszą 4,2 mln t, w tym ~3,2 mln t zasoby przemysłowe [1]. Zasoby perspektywiczne skupione w trzech masywach serpentynitowych Gogołów-Jordanów, Szklary i Grochowa-Braszowice oszacowano na 3,25 mln t [3, 26]. Polska nie jest jednak krajem zasobnym w dobre jakościowo złoża. Najlepsze pod względem jakości i stosunkowo grube żyły magnezytów w poszczególnych masywach złożowych, w tym w złożu Wiry zostały już w kopalniach podziemnych wyeksploatowane [25]. Od 1997 r. jedynym eksploatowanym złożem magnezytu w Polsce jest złożo Braszowice w Grochowie. Jest to eksploatacja wtórna po prowadzonej w latach 1904–1959 eksploatacji podziemnej [1, 22, 27, 29]. Metodą odkrywkową wydobywana jest kopalina magnezytowo-serpentynitowa. Po przeróbce mechanicznej (kruszenie, przesiewanie) urobek poddawany jest optycznemu sortowaniu oraz wzbogacaniu z wykorzystaniem źródła izotopowego. W latach 2011–2019 kopalnia selektywnie wydobywała od 75 do 102 tys. t/rok magnezytu surowego, w następnych 3 latach wydobyte uległo zmniejszeniu do ~66,0 tys. t/rok, ostatnio w 2023 r. wydobyto 28,6 tys. t, a w 2024 produkcja nieco wzrosła do 44,7 tys. t [1, 9, 10]. Produkcja krajowa magnezytu surowego była większa i w 2024 r. wyniosła 67,6 tys. t, a jego import, głównie ze Słowacji i Serbii stanowił 16 tys. t [11]. Z wydobytego w kopalni Grochów magnezytu po odpowiedniej przeróbce uzyskuje się koncentrat o zawartości 43–45% MgO w postaci mielonego lub kruszonego magnezytu surowego. Kopalnia wykorzystuje także eksploatowane skały magnezytowo-serpentynitowe, które służą do produkcji niższej jakości surowych produktów magnezytowych mielonych i kruszonych. Łączna produkcja gatunków o zawartości MgO od 30 do 45% kształtuje się ostatnio na ~100 tys. t/rok. Produkty kruszone (10–40, 10–80 mm) i mielone (0–1, 0–2 mm) znajdują zastosowanie głównie do nawozów sztucznych i naturalnych wieloskładnikowych, do produkcji różnych związków chemicznych magnezu w tym siarczanów magnezu $MgSO_4$, azotanów $MgNO_3$ oraz chlorków magnezu $MgCl_2$, a także do produkcji płytek ceramicz-

nych, chemii budowlanej itp. [11]. Zmienna, żyłowa budowa złoża, przy rosnących wymaganiach przemysłu i konkurencyjności surowców importowanych od 1997 r. spowodowały zaniechanie produkcji komponentów magnezytowych dla wyrobów ogniotrwałych (przemysłu hutniczego, cementowego itd.). Sporadycznie, na małą skalę, na indywidualne zamówienia, podejmowana jest produkcja magnezytu kalcynowanego. Skład jakościowy magnezytu kalcynowanego z Grochowa: MgO 74–85%, CaO 3,2–3,6%, FeO do 1,0%, SiO₂ 5,0–6,0%. Proces kalcynacji zachodzi w temperaturze 350°C do 750°C, a więc jest to stosunkowo niska temperatura przereagowania MgCO₃ w MgO. Taka jakość magnezytu kalcynowanego odpowiada wymaganiom przemysłu materiałów budowlanych do produkcji ognioodpornych płyt MgO, spoiw i zapraw, dodatków do cementu Sorela (MOC) i cementu MgO/MgSO₄ (MOS) oraz do stabilizacji gruntów.

W nadkładzie złoża Braszowice-Grochów stwierdzono także mineralizację niklową. Zawartość niklu jest zmienna od 0,1 do 1%, a miąższość utworów nikłonośnych wynosi kilka do kilkunastu metrów [22]. Przy wzrastających cenach niklu (surowiec strategiczny) na rynkach światowych, być może odzysk tego metalu okaże się ekonomicznie uzasadniony. Występujące w otoczeniu złóż magnezytu serpentynity zwłaszcza zsylikowane, są dobrym materiałem do produkcji kruszyw budowlanych. Do tego celu częściowo wykorzystywane są też serpentynitowe odpady z byłych kopalń magnezytu.

Import magnezytów i magnezji kalcynowanych, prażonych i topionych do Polski w ostatnich latach wynosi od ~90 do ponad 120 tys. ton/rok [11]. W 2024 r. wyniósł 89,6 tys. t i realizowany był głównie z Chin (~44%), Słowacji (~14%), Brazylii (~12%), Węgier (~10%) i Grecji (~7%). Krajowy magnezyt kalcynowany charakteryzuje się stosunkowo małą zawartością MgO (74–85%) oraz dużą zawartością SiO₂ (5–6%) i CaO (3,2–3,6%). Dlatego też obecnie całość krajowych potrzeb w zakresie magnezytów prażonych i topionych (~100 tys. t/rok) oraz kalcynowanych (~10 tys. t/rok) pokrywana jest z importu. Szacunkowa struktura zużycia magnezytu i związków magnezu w Polsce [11]:

- magnezyt surowy: produkcja związków chemicznych magnezu – ponad 50%, produkcja nawozów wieloskładnikowych N-P-K-Mg, ponad 40%, produkcja płytek ceramicznych, chemii budowlanej itp., poniżej 10%,
- magnezyty i magnezje kalcynowane, prażone i topione: produkcja zasadowych materiałów ogniotrwałych ponad 90% (odmiany prażone i topione), produkcja związków chemicznych magnezu – do 10% (odmiany kalcynowane).

Ważnym producentem wyrobów magnezytowych w Polsce są Zakłady Magnezytowe Ropczyce [21, 25], produkujące z importowanych surowców, na rynek krajowy i w znacznym stopniu na eksport, wysokiej jakości materiały ogniotrwałe; zasadowe i glinokrzemianowe, stanowiące niezbędny element wyłożeń pieców i urządzeń cieplnych pracujących w wysokich temperaturach. Produkty te mają zastosowanie głównie do przemysłu stalowego, metali nieżelaznych, cementowo-wapienniczego, hutnictwa

szkła, odlewnictwa, koksownictwa oraz do innych branż stosujących procesy wysokotemperaturowe.

4.2. ZASOBY SOLI POTASOWO-MAGNEZOWYCH I SIARCZANU-MAGNEZU W POLSCE

Na obszarze Polski sole potasowo-magnezowe występują jedynie w obrębie cechsztyńskiej formacji solonośnej. Budują one wraz z solą kamienną dwa osobne wydzielienia litostratygraficzne – starszą i młodszą sól potasową, występujące na obszarze Niżu Polskiego (odnotowane w strukturach wysadowych w centralnej Polsce oraz jako pokłady w południowo-zachodniej części monokliny przedsudeckiej). Zasoby przewidywane (perspektywiczne i prognostyczne) permskich soli potasowo-magnezowych, oszacowane do głębokości 2 km w wystąpieniach pokładowych, wynoszą blisko 3,64 mld t [1, 3]. Zasoby bilansowe (bez filarów ochronnych) udokumentowanych 5 złóż wynoszą ponad 686 mln t, a pozabilansowe – blisko 19 mln t, z czego większość (4) stanowią złoża soli typu siarczanowego (polihalit) z rejonu Zatoki Puckiej [1]. Polihalit występuje tam jako minerał wczesno diagenetyczny w obrębie anhydrytów. Głębokość występowania nieregularnych gniazd i przerostów polihalitowych wynosi 740–900 m, przy zawartości K_2O od 7,7% do 13,7%. Złoża te, rozmieszczone na obrzeżu złoża soli kamiennej rejonu Zatoki Puckiej, zostały w latach 1964–1971 wstępnie udokumentowane w kat. C₂ (zasoby bilansowe ~597 mln t) przy założeniu równomiernej (pokładowej) rozmieszczenia mineralizacji polihalitowej. Późniejsze badania wykazały, że proces mineralizacji polihalitowej był bardziej złożony niż wcześniej sądzono, co winno skutkować koniecznością ponownego oszacowania zasobów i efektywności budowy kopalni i wydobywania [1]. Ostatnio obserwuje się wzrost zainteresowania krajowych i zagranicznych przedsiębiorstw możliwością zagospodarowania krajowych wystąpień i złóż soli potasowo-magnezowych, a szczególnie złóż polihalitów nad Zatoką Pucką. Od 2015 r. KGHM Polska Miedź S.A. prowadzi rozpoznanie geologiczne w okolicach tego złoża. Z dotychczas udostępnionych badań wynika, że największe nagromadzenie polihalitu występuje w obrębie platform siarczanowych, czyli należy oczekiwać przewagi zawartości soli siarczanowo-magnezowych [23].

Niewielkie ilości soli potasowo-magnezowych (powyżej 89 mln t) zostały rozpoznane w wysadzie solnym Kłodawa wzdłuż jego wschodniej granicy (w obrębie udokumentowanego w części centralnej wysadu złoża Kłodawa 1), gdzie w zapadającym pod kątem 70° sfałdowanym i miejscami sprasowanym pokładzie młodszej soli potasowej występują sole typu chlorkowego (karnalit z nieznaczną domieszką sylwinu) oraz magnezowe (kizeryt), którym towarzyszy znaczna ilość zanieczyszczeń (substancja ilasta, sól kamienna) [1, 26]. Średnia zawartość K_2O wynosi 8,5% oraz 8,1% MgO . Zmienna miąższość pokładu (od kilku do 50 m) oraz trudności ze wzbogacaniem kopaliny są powodem niskiego zainteresowania gospodarczego. Niewielkie wydobywanie (kopalina towarzysząca) prowadzono okresowo w części centralnej wysadu w 2000 r.

– 1,4 tys. t, później zaprzestano pozyskiwania soli potasowych z tej partii złoża. Pozyskaną sól wykorzystywano jako nawóz rolniczy i sól leczniczą do zabiegów balneologicznych. Warunki górnicze zalegania kopaliny oraz niska jakość ograniczają możliwości jej opłacalnego wykorzystania na większą skalę. Obecnie w Polsce nie jest prowadzona eksploatacja soli potasowo-magnezowych.

W latach 80 XX w. podjęto próby odsalania wód kopalnianych z byłej KWK Dębieńsko z możliwością odzysku soli oraz związków jodu, bromu i karnalitu (chlorki potasu i magnezu), niestety z technologii tej zrezygnowano na rzecz technologii membranowo-termicznej szwedzko-amerykańskiej [4, 7]. W odpadowym anhydrycie z odsalania wód kopalnianych w b. kopalni Dębieńsko w składzie tlenkowym zawartość MgO wynosi $\sim 2,5\%$, a SO_3 ponad 30% [14].

4.3. PERSPEKTYWY ROZWOJU W POLSCE PRODUKCJI NOWOCZESNYCH OGNIOODPORNYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

Krajowe złoża magnezytu naturalnego charakteryzujące się stosunkowo niską jakością (mała zawartość MgO , wysoka zawartość SiO_2), i nie nadają się do produkcji magnezytów prażonych i topionych stosowanych do produkcji materiałów Krajowe złoża magnezytu naturalnego charakteryzujące się stosunkowo niską jakością (mała zawartość MgO , wysoka zawartość SiO_2), i nie nadają się do produkcji ogniotrwałych wysokich jakości [22]. Magnezyty te odpowiadają jednak zastosowaniom do produkcji cementów siarczanowych MOS stosowanych do nowoczesnych o wysokiej impedancji ogniowej materiałów budowlanych (płyty, lekkie prefabrykaty, spoiwa, zaprawy itp.). Płyty magnezjowe z zastosowaniem cementu MOS ($MgO/MgSO_4$) w odróżnieniu od płyt magnezjowych produkowanych z cementu Sorela typu MOC ($MgO/MgCl_2$) charakteryzują się dużo mniejszym ryzykiem korozji oraz odpornością na wilgoć i wodę, i dlatego też w wielu krajach następuje szybki rozwój ich zastosowań i produkcji. Dominującym rynkiem zastosowań (ponad 50% światowej produkcji) są Chiny oraz Indie i kraje Azji Południowo-Wschodniej. Ze względu na wzrost wymagań przeciwpożarowych i standardów ekologicznych wykorzystanie płyt $MgO/MgSO_4$ szybko rośnie także w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, a w Europie, w Niemczech, Wielkiej Brytanii, Francji, Szwecji i Włoszech.

Cement MOS jest siarczanowym odpowiednikiem cementu Sorela (MOC) i znajduje obecnie coraz większe zastosowanie konstrukcyjne oraz przemysłowe [12]:

- w budownictwie do produkcji magnezjowych (MOS) płyt ściennych, podłogowych, meblowych, dekoracyjnych (płyty kolorowe, sztukateria itd.), prefabrykatów, posadzek odpornych na ścieranie, kompozytów drewno–cement itp.,
- w wiertnictwie i geotechnice; materiałów uszczelnienia skał i wypełnienia szczelin,
- do produkcji materiałów ognioodpornych; izolacje przeciwpożarowe, powłoki żaroodporne itp.

Spoiwa magnezjowe typu MOS osiągają wysokie wytrzymałości na ściskanie powyżej 90–100 MP po 28 dniach oraz wyższą odporność na wodę dlatego też cementy

typu MOS (*magnesium oxysulfate cement*) stosowane są jako niskoemisyjna alternatywa dla części zastosowań cementu portlandzkiego oraz jako rdzeń przy produkcji ognioodpornych płyt magnezjowych [12]. Podstawowymi składnikami do produkcji cementów typu MOS i ognioodpornych materiałów budowlanych są tlenek magnezu MgO i uwodniony roztwór siarczanu magnezu $MgSO_4$. Badania optymalizacyjne wskazują, że cement MOS uzyskuje najlepsze właściwości przy proporcjach (udział masowy): MgO – 45%, $MgSO_4$ – 30%, H_2O – 25%, odpowiada to molowemu udziałowi $MgO/MgSO_4$ zbliżonemu do 4–6 : 1 w zależności od stopnia hydratacji [12].

Innowacyjna w kraju produkcja płyt MOS jest obecnie w końcowej fazie wdrożenia [31]. Mając na uwadze szybko wzrastające zastosowania wyrobów budowlanych o wysokiej impedancji ogniowej, zagospodarowanie krajowych złóż soli potasowo-magnezowych i siarczanu magnezu wydaje się w pełni uzasadnione. Polska dysponująca udokumentowanymi i prognostycznymi zasobami magnezytów oraz soli potasowo-magnezowych i siarczanu magnezu powinna włączyć się w strategiczne wykorzystanie tych surowców. Wydobycie i produkcja soli siarczanu magnezu z rejonu Zatoki Puckiej może zasilić krajowy łańcuch produkcji innowacyjnych materiałów budowlanych magnezjowych typu MOS: płyt, lekkich prefabrykatów, włókno cementów, zapraw itp., wspierając proces dekarbonizacji budownictwa.

Magnezyt z kopalni w Grochowie i innych krajowych złóż spełnia wymagania przemysłu materiałów budowlanych w zakresie produkcji magnezytu kalcynowanego do cementów siarczanowych ($MgO/MgSO_4$), dla płyt, spoiw itp., a podwyższona zawartość krzemionki SiO_2 w tym przypadku jest składnikiem pozytywnym.

Podsumowując Polska dysponuje ograniczonymi zasobami magnezytu i potencjalnie dużymi zasobami soli potasowo-magnezytowych oraz siarczanu magnezu, które przy właściwej polityce i strategii mogą stać się podstawą rozwoju nowych technologii energetycznych i budowlanych w ramach europejskiej transformacji energetycznej.

5. MAGNEZYT W NAWIĄZANIU DO POLITYKI SUROWCOWEJ UNII EUROPEJSKIEJ

Przemysł europejski jest silnie uzależniony od importu magnezytów i magnezji, co naraża go na wahania cen, politykę celną, regulacje środowiskowe dostawców oraz bariery logistyczne. W odpowiedzi na rosnące ryzyko w globalnych łańcuchach dostaw surowców niezbędnych dla przemysłu niskoemisyjnego, cyfrowego i obronnego, UE przyjęła w 2024 r. Europejski Akt w sprawie Surowców Krytycznych (Critical Raw Materials Act-CRMA). Do 2030 r. ustanawia się trzy cele ilościowe [6, 24]:

- ponad 10% zapotrzebowanie na surowce strategiczne ma pochodzić z wydobycia w UE,
- przetwarzanie ma odpowiadać co najmniej 40% zużyciu UE,
- recykling ma wynosić co najmniej 15% rocznego zużycia w UE.

Ponadto nie więcej niż 65% rocznego zużycia każdego surowca krytycznego może pochodzić z jednego z krajów spoza UE. Załącznik do rozporządzenia zawiera wykaz surowców krytycznych i strategicznych surowców krytycznych. Na liście surowców krytycznych jest magnez (metal) który najczęściej pozyskuje się z magnezytu poprzez kalcynację do MgO. Magnezyt jest traktowany jako surowiec pośredni – źródło magnezu. W praktyce oznacza to, że projekty wydobywania magnezytu mogą być traktowane jako strategiczne jeśli służą do pozyskania magnezu. Obecnie europejski przemysł stosujący magnezyty i magnezje lobbuje za uwzględnieniem na liście także magnezytu argumentując jego znaczenie dla dekarbonizacji przemysłu i niezależności od głównego dostawcy, Chin.

6. PODSUMOWANIE

Pomimo rosnącego znaczenia magnezytu i pochodnych jego szersze wykorzystanie w Polsce napotyka istotne bariery technologiczne, ekonomiczne i organizacyjne. Jednocześnie rozwój innowacyjnych technologii produkcji ognioodpornych materiałów budowlanych, magazynowania ciepła, energii i wodoru, stwarza szereg nowych możliwości dla branży magnezowej. Polska posiada ograniczone zasoby magnezytu naturalnego oraz duże zasoby soli potasowo-magnezowych i siarczanu magnezu. Uwzględniając realizowane w UE, a także u nas kierunki transformacji energetycznej i strategicznych potrzeb gospodarki surowcowej, na szczególne podkreślenie nasuwają się dla kraju wyzwania i możliwości w dotyczące rozwoju produkcji i zastosowań magnezytu i surowców magnezytowych. Ponieważ w kraju żyłowe złoża magnezytów zalegają w otoczeniu skał przeobrażonych (serpentytyny) i minerałów, mających lub mogące mieć znaczenie użyteczne, w zagospodarowaniu tych złóż ważne znaczenie ma kompleksowe wykorzystanie kopalin towarzyszących, m.in. do produkcji kruszyw, a być może także odzysku niklu (surowiec strategiczny do produkcji baterii).

LITERATURA

- [1] *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2024*, Wyd. PIG-PIB, Warszawa 2025.
- [2] *Bilans Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polski i Świata 2012*, T. Smakowski, R. Ney, K. Galos (red.), IGSMiE PAN, PIG-PIB, Warszawa 2014.
- [3] *Bilans perspektywicznych zasobów złóż kopalin 2018*, K. Szamałek i in. (red.), PIG-PIB, Warszawa 2020.
- [4] BOBIL M., LABUS K., *Metody odsalania wód kopalnianych w praktyce przemysłowej – stan obecny technologii i nowe wyzwania*, Przegląd Górniczy, 2014, 4, 99–105.
- [5] CSIKÓSOVÁ A., ÈULKOVÁ K., ANTOŠOVÁ M., *Magnesite industry in the Slovak Republic*, Mineral Resources Management, 2013, Vol. 29, No. 3, 21–35, <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/99533/edition/85830/content>, doi: 10.2478/gospo-2013-0028.

- [6] *Critical Raw Materials Act. EU*, Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/102 Fasihi, 2021, Brussels EC.
- [7] DUBIŃSKI J., *Ochrona środowiska w górnictwie*, Ekologia, 2022, nr 4, s. 5–8.
- [8] DURKOWSKI K., WOJCIECHOWSKI K., *Polihalit w globalnym rynku nawozów K-Mg a rola i perspektywy złóż w Polsce*. XXXIII Konferencja „Aktualia i perspektywy gospodarki surowcami mineralnymi”, IGSMiE PAN, 2024, 39–42.
- [9] GALOS K., *Magnezyty i magnezje*, [w:] T. Smakowski, R. Ney, K. Galos (red.), *Bilans Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polski i Świata 2012*, IGSMiE PAN, PIG-PIB, Warszawa–Kraków 2014, 591–600.
- [10] GALOS K., SZLUGAJ J., *Gospodarka surowcami magnezytowymi w Polsce oraz perspektywy jej rozwoju na tle trendów światowych. Surowce mineralne Polski. Surowce skalne węglanowe*, R. Ney (red.), IGSMiE PAN, Kraków 2000, 359–378.
- [11] *Gospodarka surowcami mineralnymi w Polsce w latach 2015–2024*, E. Lewicka, J. Szlugaj (red.), IGSMiE PAN, Kraków 2025.
- [12] https://www.rhimagnesita.com/wp-content/uploads/2018/11/bulletin-2018-1-181120-mon_hyperlink.pdf, MOS udziały%składników. Overview of Magnesite, Thomas L. Drnek, Matheus Naves Moraes and Paschoal Bonadia Neto.
- [13] Jelšava, <https://www.szmjelsava.sk/en>
- [14] KOZIÓŁ W., BAIC I., MIROS A., *Opracowanie technologii wykorzystania surowców odpadowych do wytwarzania mieszanin antypirogennych*, Praca statutowa nr 14-70/411-01/2019, SBL-IMBiGS, Katowice–Warszawa 2019, s. 47.
- [15] LEWICKA E., *Magnez*, [w:] T. Smakowski, Ney R., Galos K. (red.), *Bilans Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polski i Świata 2012*, IGSMiE PAN, PIG-PIB, 2014, 581–590.
- [16] *Magnesium-Based Hydrogen Storage Alloys: Advances, Strategies and Future Outlook...*, 2024, MDPI.com+ 1researchgate.net+1.
- [17] *Magnesium Compounds*, 2024, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-magnesium-compounds.pdf>
- [18] *Magnesium Metal*, 2025, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-magnesium-metal>
- [19] *Magnezyty*, 2025, <https://magnezyty.com.pl/produkty-magnezytowe/29.06.25>
- [20] *Mineral commodity summaries*, 2025 (end 2011, 2020); <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2024>; <https://doi.org/10.3133/mcs2024>; <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/65a6e45fd34e5af967a46749>
- [21] MOKRZYCKI E., RAŻNY J., *Processing and processing of magnesite*, [w:] R. Ney (red.), *Surowce mineralne Polski. Surowce skalne węglanowe*, IGSMiE PAN, Kraków 2020, 351–358.
- [22] NIEĆ M., *Złoża magnezytu*, [w:] R. Ney (red.), *Surowce mineralne Polski. Surowce skalne węglanowe*, IGSMiE PAN, Kraków 2020, 339–348.
- [23] *Sole potasowo-magnezowe PIG-PIB*, <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/foldery-instytutowe/foldery-surowcowe-2018/6222-folder-sole-potasowe-1/file.html>
- [24] Regulation of the European Parliament and of the council (EU) 2024/1252 of April 11, 2024, establishing a framework for ensuring secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252, 29.05.25.
- [25] Ropczyce, 2025, <https://ropczyce.com.pl/oferta>, 12.09.2025.
- [26] SROGA C., *Magnezyty*, [w:] K. Szamałek K. i in. (red.), *Bilans perspektywicznych zasobów złóż kopalin*, PIG-PIB, Warszawa 2020, 350–352.
- [27] STEFANICKA M., PIERZGA A., MAJCHRZAK W., *Wybrane aspekty racjonalnej gospodarki złożem magnezytu „Braszowice”*, Mining Science–Mineral Aggregates, 2016, Vol. 23 (1), 167–176.

- [28] *Strategic raw materials for a low-carbon economy*, PIPC, Warszawa 2022.
- [29] SZEWCZYK S., *Oddzielić żółto-brązowe od szarego*, SiMB, BMP Racibórz 2013, 4, 60–62.
- [30] *Top Countries for Magnesite Mining*, 2024, <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/magnesium-investing/top-magnesite-producing-countries/>
- [31] TUŚNIO R., MIROS A., SZYMAŃSKI J. E., *Phyty o wysokiej impendancji ogniowej – nowy standard odporności ogniowej w budownictwie i infrastrukturze*, Wakcji, 2025, 4, <https://wakcji.pl>
- [32] USGS 2025, <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-341/of01-341.pdf>
- [33] *What is Magnesite?* 2018, <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/magnesium-investing/magnesite-magnesia-mgx-minerals-globex-mining/>
- [34] World Integrated Trade Solution (WITS), 2025, <https://wits.worldbank.org/> 8.07.2025
- [35] Wikipedia 2025a, https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_sulfate
- [36] Wikipedia 2025b, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyhalite#Production>

MAGNESITE – A STRATEGIC RAW MATERIAL

Magnesite (MgCO_3) is the basic raw material for the production of magnesium oxide. It is used as a semi-finished product or component for the production of refractory materials – crucial for metallurgy, cement production, glass and many other high-temperature processes. It is also used in the production of some artificial fertilizers, water and sewage treatment products, mineral feed additives, in medicine, etc. Currently, its economic and strategic importance is undergoing dynamic changes due to the use of modern fire-resistant building materials (boards, binders, etc.) and materials necessary in the processes of energy transformation and green economy. The article presents modern directions of application of magnesites and magnesia, an assessment of global and domestic magnesite resources and their strategic importance for the EU and the country. Magnesite exploitation in Poland (Grochów mine) is associated with the extraction of serpentinite rocks, lying in the overburden and in the vicinity of magnesite veins, which are used for aggregate production.

Zbigniew KRYSA
Robert KRÓL
Radosław ZIMROZ

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

OD ENERGOCHŁONNOŚCI KRUSZENIA PRZEZ ZAAWANSOWANĄ DIAGNOSTYKĘ PO CYFROWE ROZWIĄZANIA – NOWOCZESNE ZAPLECZE BADAWCZE WYDZIAŁU GEOINŻYNIERII, GÓRNICCTWA I GEOLOGII

Referat prezentuje ewolucję kompetencji Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej w stronę zaawansowanej analityki terenowej i diagnostyki cyfrowej. Głównym filarem nowej oferty jest mobilne laboratorium badań środowiskowych, wyposażone w urządzenia do szybkiej składu pierwiastkowego surowców oraz monitoringu wód i gleb bezpośrednio w terenie. Umożliwia to natychmiastowe reagowanie na zmiany w otoczeniu kopalni bez czasochłonnego transportu próbek. W obszarze górnictwa kruszywowego oferta wydziału skupia się na optymalizacji procesów rozdrabniania pod kątem minimalizacji energochłonności, co realnie wspiera ekonomiczne i ekologiczne cele produkcji. Diagnostykę infrastruktury uzupełniają systemy skanowania taśm oraz prace nad metodami ograniczania hałasu i trwałości krążników. Całość procesów wspiera autonomiczna robotyka inspekcyjna i skanowanie przestrzenne wspomagający bezpieczny nadzór nad wyrobiskami i precyzyjną inwentaryzację terenu. Przedstawione zaplecze oferuje dostęp do rozwiązań cyfrowych, które promują zrównoważoną eksploatację zasobów i podnoszą standardy bezpieczeństwa w regionie.

1. WPROWADZENIE

Współczesna gospodarka opiera się na wiedzy i innowacyjnych rozwiązaniach technologicznych. Kluczową rolę w analizowanym procesie pełnią jednostki naukowe, w tym przede wszystkim uczelnie techniczne, których działalność, poza kształceniem wysoko wykwalifikowanych kadr, obejmuje prowadzenie badań naukowych, a także rozwój i wdrażanie nowych technologii oraz rozwiązań znajdujących zastosowanie w sektorze przemysłowym.

W kontekście rosnących wymagań technologicznych oraz środowiskowych koniecznością staje się rozwijanie nowoczesnych metod badawczych w tym tych umożliwia-

jących analizę właściwości surowców, optymalizację procesów technologicznych oraz monitorowanie pracy maszyn i urządzeń. Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej od wielu lat prowadzi badania związane z szeroko rozumianą gospodarką surowcową, obejmującą eksploatację złóż, przeróbkę kopalin, transport materiałów, tematykę BHP po zagadnienia rekultywacji terenów.

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie oraz analiza potencjału infrastrukturalnego Wydziału GGiG w kontekście realizowanych projektów badawczych, a także określenie ich znaczenia dla rozwoju technologii w przemyśle surowcowym, ze szczególnym uwzględnieniem sektora kruszyw.

2. KIERUNKI ROZWOJU DOLNEGO ŚLĄSKA A ROZWÓJ WYDZIAŁU GEOINŻYNIERII, GÓRNICTWA I GEOLOGII

Rozwój regionów opiera się na systemach innowacji. Strategia innowacji Dolnego Śląska podkreśla, że rozwój nie wynika wyłącznie z działalności przedsiębiorstw, ale jest pochodną funkcjonowania regionalnego systemu innowacji, w którym współpracują nauka, biznes, administracja i społeczeństwo. Model współpracy określany jako potrójna helisa innowacji wskazuje, że różne podmioty wspólnie tworzą i wdrażają nowe rozwiązania technologiczne, które powstają w układach instytucjonalnych, a nie tylko w pojedynczych przedsiębiorstwach.

Dolny Śląsk należy do najbardziej innowacyjnych regionów w Polsce, jednak nadal wskazuje się na istotne ograniczenia jego rozwoju, w szczególności w zakresie poziomu nakładów na działalność badawczą i rozwojową [1]. Region ten charakteryzuje się rozwiniętym przemysłem wydobywczym obejmującym zarówno eksploatację rud metali, jak i surowców skalnych wykorzystywanych w budownictwie i w realizacji inwestycji infrastrukturalnych. „Surowce naturalne i wtórne” to jedna z siedmiu Inteligentnych Specjalizacji Dolnego Śląska, co podkreśla znaczenie sektora.

W Polsce w ciągu ostatnich 30 lat nastąpił bardzo duży wzrost wydobycia kruszyw budowlanych. W 2024 r. wydobycie piasków przekroczyło 180 mln t, a kamieni łamanych i blocznych 84 mln t, z czego na Dolny Śląsk przypadło ~42% [2]. Prognozy dla kolejnych lat również są optymistyczne i wskazują na średnioroczny przyrost w przeliczeniu 4,2–6,3% [3].

Politechnika Wrocławska – największa uczelnia techniczna regionu, a w szczególności Wydział GGiG nie stoi obok tych trendów i wpisuje się w strategiczne kierunki rozwojowe, wspierając rozwój nowoczesnych technologii stosowanych w przemyśle surowcowym.

3. ROZWÓJ ZAPLECZA BADAWCZEGO WYDZIAŁU W OSTATNIEJ DEKADZIE

Kamieniami milowymi tworzącymi 58-letnią historię wydziału i wyznaczającymi cezu-ry czasowe były zmiany siedziby. Ostatnia przeprowadzka do kompleksu GEOCENTRUM przy ul. na Grobli we Wrocławiu stanowiła istotny etap w rozwoju zaplecza badawczego, umożliwiając lokalizację laboratoriów w nowoczesnych obiektach. W pierwszym etapie tworzenia kompleksu wyposażono zaplecze dydaktyczne w budynku L1. W 2019 r. w ramach projektu GEO3-EM oddano do użytku drugi budynek, tym razem o stricte badawczym przeznaczeniu, co otworzyło nowe perspektywy przed wydziałem [4].

3.1. PROJEKT GEO3-EM – ENERGIA, EKOLOGIA, EDUKACJA

Projekt GEO3-EM, rozpoczęty już po przeniesieniu siedziby wydziału, miał na celu utworzenie na Dolnym Śląsku nowoczesnego centrum badań i transferu technologii w zakresie zrównoważonego wykorzystania surowców i energii. W efekcie projektu, współfinansowanego przez Regionalny Program Operacyjny Województwa Dolnośląskiego w ramach działania 1.1 Wzmacnianie potencjału badawczo-rozwojowego i wdrożeniowego uczelni jednostek naukowych, powstał obiekt badawczy GEO-3EM o powierzchni 4584 m² oraz zakupiono specjalistyczną aparaturę przeznaczoną dla 12 laboratoriów i 5 wydziałów Politechniki Wrocławskiej, w tym naszego wydziału.

W założeniach projektu wpisana była idea objęcia jego efektami całego łańcucha innowacji surowcowej:

eksploracja → przeróbka → materiały → wykorzystanie → recykling

Szczególną rolę pełniły laboratoria związane z technologiami surowcowymi i górnictwami, w tym 5 laboratoriów Wydziału GGiG:

- Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej,
- Laboratorium Technik Modelowania w Górnictwie,
- Laboratorium Systemów Maszynowych w Górnictwie,
- Akredytowane Laboratorium Transportu Taśmowego,
- Akredytowane Laboratorium Bezpieczeństwa Pracy.

Wydział, a w szczególności jego jednostki naukowe – Katedra Górnictwa oraz Katedra Geodezji i Geoinformatyki zostały wyposażone w 48 pozycji nowoczesnej i często unikatowej aparatury badawczej, z czego większość o uniwersalnym charakterze; wykorzystywana w rozwiązaniach górnictwa podziemnego i odkrywkowego.

Projekt GEO3-EM był największym projektem inwestycyjnym w historii wydziału, którego celem było stworzenie nowoczesnego zaplecza laboratoryjnego, umożliwiającego prowadzenie badań w wielu obszarach związanych z gospodarką surowcową, ochroną środowiska oraz nowoczesnymi technologiami pomiarowymi.

W tabeli 1 zestawiono najważniejsze elementy infrastruktury badawczej, zakupionej w ramach projektu wraz z ich podstawowym przeznaczeniem badawczym. Istotnym założeniem projektu było zrównoważone wyposażenie wszystkich kluczowych obszarów działalności badawczej wydziału, dzięki czemu rozwój infrastruktury objął w sposób pro-

Tabela 1. Aparatura badawcza zakupiona w ramach projektu GEO3-EM wg obszarów badawczych
Table 1. Research equipment purchased under the GEO3-EM project divided into research areas

Obszar badawczy	Aparatura naukowo-badawcza
Eksploracja złóż i analizy mineralogiczne	Zestaw georadarowy z zestawem anten, akcesoriami i oprogramowaniem
	Grawimetr oraz magnetometr cezowy
	Mikrosonda elektronowa model SX Five-FE CAMECA
	Zestaw urządzeń pomocniczych do badań w lab. inżynierii materiałowej
Przeróbka kopalin	Maszynki flotacyjne
	Młyn tarczowo-palcowy (dezintegrator) MTP-400
	Laserowy analizator uziarnienia Mastersizer 3000
	Wytrząsarka do sit (wraz z zestawem sit)
	Zestaw urządzeń do przygotowywania materiałów do badań
	Zestaw do badania kopalin skalnych
Analizy materiałowe	Zestaw pełzarek
	Komplet relaksometryczny
	Maszyna wytrzymałościowa
	Pręt Hopkinsona do badań dynamicznych własności skał
Technologie informatyczne i modelowanie	Oprogramowanie do analiz geostatystycznych i projektowania kopaliń
	Oprogramowanie do modelowania i wizualizacji obiektów
	Mobilne stan do modelowania numerycznego w terenie
	Oprogramowanie specjalistyczne do symulacji materiałów sypkich DEM 3.0
	Stan. do analiz numer 2D i 3D
Transport kopalniany i diagnostyka	Stanowiska do badań napędów przenośników taśmowych
	Stanowisko do badań oporów przeginalania taśmy przenośnikowej
	Stanowisko do badań oporów ruchu przenośników taśmowych
	Stanowisko do badań ścieralności krążników
	Stanowisko do badań dynamicznych połączeń taśm przenośnikowych
	System monitoringu przenośnika taśmowego
	Zrywarka pozioma i zrywarka TiraTest
	Zrywarka TiraTest
	Aparatury do monitoringu i diagnostyki maszyn, procesów i środowiska oraz mobilnej robotyki inspekcyjnej
Pomiary i analizy geoprzestrzenne	Samochód terenowy – mobilna platforma do transportu urządzeń
	Skaner mobilny z oprogramowaniem
	Oprogramowanie do obsługi danych geodezyjnych TRIMBLE 4D
	Oprogramowanie fotogrametryczne eCognition
	Oprogramowanie do analizy wielowątkowej
	Skaner laserowy RIEGL VZ-400i

porcjonalny zarówno laboratoria zajmujące się badaniami surowców mineralnych, jak i jednostki prowadzące analizy środowiskowe oraz badania procesów technologicznych.

Realizacja projektu GEO-3M umożliwiła przejście do nowego poziomu wykorzystania rozwiązań cyfrowych w badaniach, w tym systemów pomiarowych pozwalających na automatyczną rejestrację danych, ich cyfrowe przetwarzanie oraz zaawansowaną analizę, co podkreśla rozwój wydziału w kierunku kolejnej horyzontalnej specjalizacji Dolnego Śląska, jaką jest Przemysł 4.0.

3.2. PROJEKT CENTRUM TECHNOLOGII BEZPIECZEŃSTWA PUBLICZNEGO (CTBP)

Kolejnym etapem rozwoju infrastruktury badawczej oraz rozbudowy zaplecza laboratoryjnego jest realizowany w latach 2024–2026 projekt Centrum Technologii Bezpieczeństwa Publicznego. W tabeli 2 zestawiono planowaną do zakupu aparaturę, grupując ją według głównych obszarów i zakresów badawczych.

W ramach tego przedsięwzięcia aparatura badawcza Wydziału zostanie wzbogacona o kolejne 18 urządzeń i zestawów badawczych. Łączna szacunkowa wartość zakupów, według stanu na moment rozpoczęcia projektu, przekraczała 4,2 mln zł. Realizacja projektu wiązała się również ze zmianą struktury laboratoriów oraz jej dostosowaniem do nowych kierunków badawczych, czego efektem było wyodrębnienie dwóch nowych laboratoriów badawczych:

- Laboratorium Monitorowania Bezpieczeństwa Środowiska Naturalnego i Infrastruktury przy Katedrze Geodezji i Geoinformatyki,
- Mobilne Laboratorium Badań Środowiskowych przy Katedrze Górnictwa.

O ile realizacja projektu GEO3-EM stworzyła podstawową bazę infrastrukturalną, o tyle projekt CTBP stanowi ważny krok naprzód, polegający zarówno na uzupełnieniu istniejącego zaplecza badawczego, jak i wprowadzeniu najnowocześniejszej aparatury badawczej.

Tabela 2. Aparatura badawcza zgłoszona do projektu CTBP
Table 2. Research equipment submitted to the GEO3-EM project

Laboratorium	Nazwa aparatury naukowo-badawczej
Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej	Urządzenie do badania prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych i pomiaru dynamicznego modułu sprężystości, konduktometru.
	Tester indeksu Bonda
	Komora do badań solnych
	Urządzenie typu Boretrak do skanowania otworów strzałowych
Mobilne Laboratorium Badań Środowiskowych	Przenośny analizator laserowy z technologią LIBS do analizy najbliższych pierwiastków (Li, Be, B, C, F, Na, Mg, Al, Si) w materiałach stałych
	Przenośny analizator laserowy z technologią LIBS do analizy litu w cieczach, glebach i skałach
	Przenośny spektrofotometr

Tabela 2 cd.
Table 2 continued

Laboratorium Systemów Maszynowych w Górnictwie	Stanowisko do badań oceny jakości krażników przenośników taśmowych w zmiennych parametrach środowiskowych wraz z osprzętem do badań oceny jakości zasilania przenośników i strat energii
	Stanowisko do badań w małej skali wpływu konstrukcji taśmy przenośnikowej na emitowany hałas
	Platforma krocząca z zestawem LiDAR 3D
	Zestaw kamer hiperspektralnych do platformy mobilnej
Laboratorium Monitorowania Bezpieczeństwa Środowiska Naturalnego i Infrastruktury	Fazowy skaner laserowy o wysokiej dokładności, z rejestracją wibracji w trakcie pomiaru, wbudowaną kamerą RGB oraz zintegrowaną kamerą termowizyjną
	Bezzałogowy, multisensoryczny statek powietrzny wyposażony w LiDAR, kamerę RGB, kamerę multispektralną i pozycjonowanie GNSS RTK
	Zestaw trzech pakietów oprogramowania do kompleksowego przetwarzania danych geometrycznych i obrazów na potrzeby analiz zjawisk środowiskowych oraz wpływu infrastruktury na środowisko naturalne
	Infrastruktura IT do zaawansowanej analityki danych przestrzennych
	Zintegrowany zestaw pomiarowy do bezpośredniego i zdalnego monitorowania zmian położenia i kształtu obiektów naturalnych i antropogenicznych pod kątem ich wpływu na środowisko naturalne za pomocą pomiarów kątowno-liniowych i satelitarnych
Akredytowane Laboratorium Transportu Taśmowego	Urządzenia do skanowania taśm tekstylnych
Technik Modelowania w Górnictwie	Oprogramowanie specjalistyczne w zakresie cyfrowych modeli procesów przemysłowych oraz urządzenia wspomagające analizy

4. IDENTYFIKACJA I ROZWÓJ NOWYCH KIERUNKÓW BADAŃ NA WYDZIALE

Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii jest jednostką o wieloletniej tradycji badawczej, rozwijającą kompetencje w zakresie geoinżynierii, górnictwa, geologii oraz monitorowania środowiska z wykorzystaniem nowoczesnych technologii pomiarowych i cyfrowych. Rozwój naukowy wydziału od lat opiera się na łączeniu klasycznych obszarów badań związanych z gospodarką surowcową z nowoczesnymi rozwiązaniami technologicznymi i narzędziami analitycznymi. W ramach realizowanego obecnie projektu CTBP określono jeden wspólny dla całego Wydziału cel projektu, który sformułowano jako „*rozwój nowych sposobów monitorowania środowiska naturalnego i infrastruktury w oparciu o teledetekcję, robotykę inspekcyjną i diagnostykę*”.

Tak szeroko zdefiniowany kierunek rozwoju obejmuje szereg szczegółowych obszarów badawczych związanych zarówno z rozwojem nowych technologii pomiarowych, jak i z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi przetwarzania danych. Obejmuje

on w szczególności rozwój pomiarów i analiz geoprzestrzennych, zastosowanie bezzałogowych systemów pomiarowych i robotyki inspekcyjnej, a także rozwój cyfrowych rozwiązań diagnostycznych oraz systemów monitorowania środowiska i infrastruktury. Realizacja tych działań umożliwi integrację danych pochodzących z różnych źródeł pomiarowych oraz ich przetwarzanie z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi cyfrowych, co wpisuje się w szerszy trend cyfryzacji badań oraz rozwój rozwiązań związanych z koncepcją Przemysłu 4.0.

4.1. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA TECHNOLOGII W SEKTORZE KRUSZYW

Procesy kruszenia i mielenia należą do najbardziej energochłonnych operacji jednostkowych w przemyśle surowcowym. Szacuje się, że w wybranych instalacjach przeróbki kopalin udział tych procesów w całkowitym zużyciu energii w układzie technologicznym może przekraczać 50%. Jednym z kluczowych obszarów badań prowadzonych na Wydziale jest analiza procesów rozdrabniania surowców mineralnych. W celu analizy energochłonności procesów rozdrabniania wykorzystuje się między innymi specjalistyczne urządzenia laboratoryjne umożliwiające wyznaczanie wskaźników technologicznych. Jednym z podstawowych parametrów określających podatność surowca na rozdrabnianie jest indeks pracy Bonda, który określa ilość energii potrzebnej do zmniejszenia rozmiaru ziaren materiału. Badania tego typu prowadzone są z wykorzystaniem specjalistycznych laboratoryjnych młynów bębnowych umożliwiających kontrolowane rozdrabnianie próbek surowców mineralnych.

Rozbudowa infrastruktury laboratoryjnej w ostatnich latach znacząco zwiększyła możliwości prowadzenia tego typu badań. W laboratoriach Wydziału dostępne są stanowiska umożliwiające zarówno przygotowanie próbek, jak i szczegółową analizę produktów rozdrabniania. W przygotowania materiału wykorzystywane są laboratoryjne kruszarki szczękowe oraz stożkowe i młyny bębnowe do mielenia na mokro i sucho, co pozwala na odtworzenie w warunkach laboratoryjnych etapów technologicznych stosowanych w przemysłowych instalacjach przeróbki kopalin. Otrzymane produkty mogą być poddawane szczegółowej analizie granulometrycznej przy wykorzystaniu standardowej klasyfikacji mechanicznej, jak i klasyfikacji optycznej analizatorem uziarnienia działającego w oparciu o dyfrakcję laserową, umożliwiającego pomiar rozkładu wielkości cząstek w szerokim zakresie od frakcji submikronowych do kilku milimetrów.

Laboratorium Nauk o Ziemi w ramach projektu CTBP rozszerza zakres swoich kompetencji; jednym z planowanych elementów rozbudowy aparatury badawczej jest komora solna przeznaczona do badań odporności korozyjnej materiałów i elementów konstrukcyjnych. Urządzenie umożliwia prowadzenie przyspieszonych testów w środowisku symulującym agresywne warunki eksploatacyjne, co pozwoli na ocenę trwałości materiałów stosowanych w urządzeniach i instalacjach przemysłowych, w tym w systemach transportu materiałów sypkich wykorzystywanych w górnictwie.

4.2. MOBILNA ANALITYKA ŚRODOWISKA IN-SITU

Ważnym i nowym elementem rozwijanej infrastruktury badawczej jest mobilna analityka środowiska in-situ, umożliwiająca prowadzenie szybkich analiz składu chemicznego materiałów bez konieczności transportu próbek do laboratoriów stacjonarnych. Podejście to ma szczególne znaczenie w badaniach środowiskowych oraz w monitorowaniu oddziaływania przemysłu wydobywczego na otoczenie, gdzie szybka identyfikacja zmian w składzie chemicznym materiałów pozwala na bieżącą ocenę stanu środowiska.

W ramach infrastruktury badawczej zostały zakupione przenośne analizatory laserowe wykorzystujące technologię LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) oraz mobilny spektrofotometr do prowadzenia analiz bezpośrednio w terenie. Zastosowanie tych urządzeń pozwala na szybkie pozyskiwanie danych analitycznych w miejscu poboru próbki oraz znacząco skraca czas pomiędzy wykonaniem pomiaru a uzyskaniem wyników.

Przenośne analizatory LIBS umożliwiają analizę składu pierwiastkowego materiałów stałych i ciekłych, w tym skał, gleb, sprasowanych proszków oraz solanek, bez konieczności skomplikowanego przygotowania próbki. Urządzenia te pracują w szerokim zakresie spektralnym (ok. 190–950 nm) i pozwalają na jednoczesną identyfikację wielu pierwiastków chemicznych. Szczególną rolę w projekcie odgrywa możliwość oznaczania pierwiastków lekkich, jak lit, beryl, bor czy sód, co ma znaczenie zarówno w badaniach środowiskowych, jak i w analizie potencjału surowcowego materiałów mineralnych.

Zastosowana w analizatorach technologia rasteryzacji wiązki laserowej umożliwia wykonywanie wielu pomiarów w obrębie niewielkiego obszaru próbki, a następnie tworzenie map rozkładu pierwiastków pokazujących przestrzenne zróżnicowanie składu chemicznego materiału. Funkcja ta pozwala na szczegółową analizę heterogenicznych materiałów, jak gleby czy osady, a także na identyfikację lokalnych koncentracji wybranych pierwiastków.

Uzupełnieniem tej aparatury jest przenośny spektrofotometr wykorzystywany do analiz chemicznych próbek wód powierzchniowych, gruntowych oraz roztworów powstających w wyniku oddziaływania procesów przemysłowych na środowisko. Urządzenie to umożliwia szybkie oznaczanie wybranych parametrów chemicznych wody; zawartość jonów, związków azotu czy innych składników rozpuszczonych, co pozwala na bieżącą ocenę jakości środowiska wodnego.

Połączenie obu technik analitycznych umożliwia prowadzenie kompleksowych badań środowiskowych w warunkach terenowych, obejmujących zarówno analizę składu pierwiastkowego materiałów stałych, jak i ocenę jakości wód. Rozwiązanie to jest szczególnie przydatne w badaniach obszarów pogórnictwa, monitorowaniu składowisk odpadów, analizie osadów oraz w ocenie wpływu infrastruktury przemysłowej na środowisko naturalne.

Zastosowanie mobilnej analityki środowiska stanowi ważny element rozwijanej koncepcji mobilnego laboratorium badań środowiskowych, w którym różne systemy

pomiarowe mogą być wykorzystywane bezpośrednio w terenie lub integrowane z platformami mobilnymi i robotycznymi. Takie podejście umożliwia prowadzenie zintegrowanych badań środowiskowych oraz szybkie reagowanie na pojawiające się zagrożenia środowiskowe.

W perspektywie dalszego rozwoju infrastruktury badawczej urządzenia mobilnej analityki środowiskowej mogą być integrowane z platformami pomiarowymi wykorzystywanymi w projekcie, w tym z mobilnymi robotami inspekcyjnymi oraz bezzałogowymi systemami pomiarowymi. Pozwoli to na prowadzenie zautomatyzowanych pomiarów i analiz składu chemicznego materiałów oraz komponentów środowiska bezpośrednio w miejscu ich występowania, a także na łączenie danych chemicznych z informacją przestrzenną pozyskiwaną metodami teledetekcyjnymi.

4.3. DIAGNOSTYKA TRANSPORTU PRZENOŚNIKOWEGO

Istotnym kierunkiem badań prowadzonych na wydziale jest diagnostyka infrastruktury górniczej, w szczególności systemów transportu materiałów. W wielu kopalniach podstawowym środkiem transportu surowców są przenośniki taśmowe, których niezawodność ma kluczowe znaczenie dla utrzymania ciągłości produkcji. W celu monitorowania stanu technicznego elementów przenośników wykorzystywane są nowoczesne systemy diagnostyczne umożliwiające analizę uszkodzeń taśm oraz ocenę parametrów pracy krążników.

Wydział GGiG poprzez Akredytowane Laboratorium Transportu Taśmowego i udział w projekcie CTBP wzmacnia ofertę o nowatorski system skanowania 3D taśm o rdzeniu tekstylnym. Jest to odpowiedź na zapotrzebowanie rynku, który do tej pory miał ograniczony dostęp do usług diagnostycznych dla tych taśm. Dotychczasowe rozwiązania skanowania taśm, głównie ze względu na ich właściwości fizyczne przeznaczone były głównie dla taśm z linkami stalowymi.

Równocześnie w ramach projektu CTBP projektowana jest aparatura służąca rozwojowi metod badań krążników. Opracowywane są aktualnie dwa specjalne stanowiska laboratoryjne umożliwiające ocenę jakości krążników w kontekście ich energochłonności oraz wpływu parametrów konstrukcyjnych na poziom emitowanego hałasu. Badania te mają istotne znaczenie zarówno z punktu widzenia efektywności energetycznej systemów transportowych, jak i poprawy warunków pracy w zakładach górniczych.

4.4. CYFROWE METODY MONITORINGU I ANALIZY TERENU

Dynamiczny rozwój technologii cyfrowych powoduje coraz szersze wykorzystanie metod skanowania przestrzennego oraz robotyki w badaniach związanych z górnictwem i geoinżynierią. W ramach infrastruktury badawczej wydziału wykorzystywane są m.in.:

- skanery laserowe umożliwiające wykonywanie bardzo dokładnych pomiarów przestrzennych,

- bezzałogowe statki powietrzne wyposażone w kamery multispektralne i systemy LiDAR,
- autonomiczne platformy mobilne do prowadzenia badań w trudno dostępnych obszarach.

Nowoczesne skanery laserowe stosowane w badaniach charakteryzują się wysoką rozdzielczością pomiarową oraz możliwością rejestracji nawet ponad miliona punktów pomiarowych na sekundę, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej dokładności pomiaru odległości. Umożliwia to tworzenie szczegółowych modeli przestrzennych obiektów, infrastruktury przemysłowej oraz terenów górniczych, które mogą być następnie wykorzystywane w analizach deformacji, monitorowaniu zmian geometrii wyrobisk czy dokumentacji stanu infrastruktury technicznej.

Istotnym elementem infrastruktury pomiarowej są również bezzałogowe statki powietrzne (UAV) wyposażone w zaawansowane systemy pomiarowe, w tym kamery wysokiej rozdzielczości, sensory multispektralne oraz skanery LiDAR. Platformy te mogą być wykorzystywane do realizacji autonomicznych misji pomiarowych na dużych obszarach, umożliwiając szybkie pozyskiwanie danych przestrzennych, inwentaryzację wyrobisk odkrywkowych, analizę zmian morfologii terenu oraz monitoring środowiska. Dzięki zastosowaniu systemów precyzyjnego pozycjonowania GNSS RTK możliwe jest uzyskanie bardzo wysokiej dokładności lokalizacji pozyskiwanych danych.

Zestaw urządzeń skanujących, w tym fazowy skaner laserowy oraz bezzałogowe statki powietrzne (drony) z kamerami hiperspektralnymi pozwalają na kompleksową inwentaryzację geometrii wyrobisk i monitorowanie deformacji terenu. Dane te mogą być integrowane w celu m.in. tworzenia cyfrowych bliźniaków (Digital Twins) procesów przemysłowych. Pozwala to na dalszym etapie na wirtualną symulację procesów technologicznych w górnictwie.

5. PODSUMOWANIE

Rozwój infrastruktury badawczej stanowi jeden z czynników wspierających innowacyjność gospodarki i transfer technologii pomiędzy sektorem nauki oraz przemysłu. W tym procesie w przypadku Politechniki Wrocławskiej istotną rolę odgrywają projekty infrastrukturalne, umożliwiające tworzenie nowoczesnych laboratoriów oraz wyposażenie ich w zaawansowaną aparaturę badawczą. Realizacja dwóch projektów GEO3-EM oraz CTBP oznaczała dla wydziału ilościową, ale przede wszystkim jakościową zmianę oferty badawczej.

Obejmuje ona cały cykl życia projektów górniczych od eksploracji przez produkcję po rekultywację i tzw. post-mining. Przedstawione zaplecze badawcze obejmuje zarówno laboratoria analizy surowców jak i nowoczesne systemy diagnostyczne oraz technologie cyfrowe wykorzystywane w monitorowaniu infrastruktury górniczej. Szczególną rolę odgrywają rozwiązania umożliwiające prowadzenie badań bezpośrednio w terenie jak mobilne laboratoria, drony, czy roboty inspekcyjne. Rozwój nowych metod monito-

rowania środowiska naturalnego i przekształconego przez człowieka wspiera realizację koncepcji zrównoważonego rozwoju w sektorze surowcowym.

LITERATURA

- [1] *Bilans Zasobów Złóż Kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2024 r.*, PIG-PIB, Warszawa 2025.
- [2] *Dolnośląska Strategia Innowacji 2030*, Załącznik do Uchwały nr 3270/VI/21 Zarządu Województwa Dolnośląskiego, Wrocław 2020.
- [3] BAIC I., KOZIOŁ W., MIROS A., *Analiza zmian wydobywania kruszyw mineralnych w latach 2000–2024. Prognoza na lata 2025–2027*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 8, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2025, 5–15.
- [4] *55 lat Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej 1968–2023: księga jubileuszowa*, J. Blachowski (red.), Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2023.

FROM ENERGY CONSUMPTION OF CRUSHING THROUGH ADVANCED DIAGNOSTIC TO DIGITAL SOLUTIONS: MODERN RESEARCH INFRASTRUCTURE OF THE FACULTY OF GEOENGINEERING, MINING AND GEOLOGY

The paper presents the development of the research infrastructure of the Faculty of Geoengineering, Mining and Geology at Wrocław University of Science and Technology in the context of contemporary challenges of the mineral resources economy. The importance of laboratory infrastructure and modern measurement technologies used in research on the extraction and processing of mineral resources is discussed. Particular attention is given to the application of mining infrastructure diagnostic systems, spatial scanning, unmanned technologies, and analytical tools that enable rapid assessment of raw material properties. The role of research infrastructure in the development of the regional innovation system and in supporting the transformation of industry toward more sustainable and efficient use of natural resources is also highlighted.

Natalia KUREK¹
Żaklina KONOPACKA¹
Dagmara SOLATYCKA²

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

² Okręgowy Urząd Górniczy we Wrocławiu

BADANIE SKUTECZNOŚCI SZKOLEŃ OKRESOWYCH BHP JAKO ELEMENTU SYSTEMU ZARZĄDZANIA BEZPIECZEŃSTWEM PRACY

Artykuł prezentuje wyniki badania ankietowego dotyczącego efektywności okresowych szkoleń BHP w różnych branżach. Pokazuje, że szkolenia przynoszą lepsze efekty, gdy są praktyczne, dopasowane do stanowiska i angażujące, natomiast formy wykładowe oceniane są jako mniej skuteczne. Badanie zwraca uwagę na znaczenie nowoczesnych form szkoleń, takich jak symulacje VR, które ułatwiają naukę procedur w realistycznych warunkach. Jest to szczególnie ważne w górnictwie odkrywkowym, gdzie szkolenia te powinny skupiać się na scenariuszach zadaniowych, podejmowaniu decyzji i analizie zdarzeń potencjalnie wypadkowych.

1. WSTĘP

Bezpieczeństwo i higiena pracy (BHP) stanowią jeden z kluczowych obszarów funkcjonowania współczesnych organizacji, niezależnie od ich wielkości czy branży. Ich znaczenie wynika nie tylko z wymagań przepisów prawa, ale przede wszystkim z potrzeby ochrony życia i zdrowia pracowników oraz zapewnienia stabilnego i efektywnego funkcjonowania przedsiębiorstw. Odpowiednio zaprojektowany i konsekwentnie realizowany system szkoleń przyczynia się do ograniczenia liczby wypadków przy pracy, minimalizacji ryzyka zawodowego oraz budowania kultury bezpieczeństwa, sprzyjających większemu zaangażowaniu pracowników i poprawie wyników organizacji [1, 9].

Jednym z podstawowych narzędzi systemu zarządzania bezpieczeństwem pracy są szkolenia, obejmujące zarówno szkolenia wstępne, jak i okresowe. Ich celem jest nie tylko formalne spełnienie obowiązków wynikających z przepisów prawa, lecz przede wszystkim przekazywanie praktycznej wiedzy, rozwijanie umiejętności oraz kształtowanie postaw sprzyjających bezpiecznemu wykonywaniu pracy. Odpowiednio zaplanowane szkolenia pozwalają pracownikom na identyfikację zagrożeń występujących na

stanowisku pracy oraz poznanie skutecznych metod ich eliminacji lub ograniczania [10]. Istotnym aspektem funkcjonowania systemu bezpieczeństwa i higieny pracy są obowiązujące normy prawne. Najważniejszym aktem regulującym prawa pracowników w Polsce jest Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej [6], gwarantująca każdemu prawo do pracy w warunkach zapewniających bezpieczeństwo i higienę (art. 66). Uzupełnieniem tego zapisu jest art. 24, wskazujący, że praca znajduje się pod ochroną państwa oraz art. 68, zapewniający obywatelom prawo do ochrony zdrowia. Szczegółowe regulacje w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy zawiera Kodeks pracy [5], w szczególności dział X, określający obowiązki zarówno pracodawców, jak i pracowników. Przepisy te jednoznacznie nakładają na pracodawcę odpowiedzialność za stan bezpieczeństwa w zakładzie, zobowiązując m.in. do organizowania pracy w sposób bezpieczny oraz zapewnienia pracownikom odpowiednich szkoleń dostosowanych do charakteru wykonywanych obowiązków i występujących zagrożeń.

Obowiązek prowadzenia szkoleń BHP wynika również z przepisów prawa unijnego, z Dyrektywy Rady 89/391/EWG [3], określającej podstawowe zasady poprawy bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników. Pracodawca zobligowany jest do zapewnienia odpowiedniego poziomu szkoleń, adekwatnych do rodzaju wykonywanej pracy oraz specyfiki stanowiska. Powyższe regulacje podkreślają, że szkolenia te nie stanowią jedynie elementu organizacyjnego, lecz są prawnym i systemowym narzędziem prewencji zagrożeń zawodowych.

W literaturze przedmiotu podkreśla się jednak, że sama realizacja szkoleń nie jest wystarczająca do zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa. O ich rzeczywistej skuteczności decyduje szereg czynników, jak jakość merytoryczna przekazywanych treści, kompetencje i doświadczenie prowadzących, stopień zaangażowania uczestników, a także dostosowanie formy i zakresu szkolenia do specyfiki stanowiska oraz poziomu ryzyka zawodowego [2, 4]. Szkolenia o charakterze wyłącznie teoretycznym, oderwane od realnych warunków prac rzadko prowadzą do trwałych zmian w zachowaniach pracowników. Brak osadzenia treści w konkretnych zadaniach, zagrożeniach i ograniczeniach organizacyjnych, np. presji czasu, dostępności narzędzi, procedur, kultury bezpieczeństwa, powoduje, że uczestnicy nie mają możliwości przećwiczenia wymaganych reakcji w sytuacjach zbliżonych do rzeczywistych ani otrzymania informacji zwrotnej korygującej błędy. W konsekwencji szkolenia takie częściej wzmacniają deklaratywną znajomość zasad niż rozwijają umiejętności wykonawcze i nawyki, co sprzyja szybkiemu wygaszaniu efektu po zakończeniu interwencji oraz powrotowi do wcześniejszych wzorców postępowania.

Współczesne organizacje coraz częściej wykorzystują zróżnicowane metody dydaktyczne w procesie szkoleniowym, jak ćwiczenia praktyczne, warsztaty, studia przypadków, symulacje czy e-learning. Badania wskazują, że metody angażujące uczestników sprzyjają lepszemu przyswajaniu wiedzy oraz trwałemu kształtowaniu bezpiecznych nawyków zawodowych [4]. Jednocześnie dynamiczny rozwój technologii oraz zmiany w organizacji pracy powodują konieczność weryfikacji, czy tradycyjne formy szkoleń

okresowych BHP nadal odpowiadają aktualnym potrzebom pracowników i wyzwaniom współczesnego środowiska pracy.

W tym kontekście zasadne staje się podejmowanie badań empirycznych dotyczących oceny skuteczności tych szkoleń z perspektywy samych uczestników. Pracownicy, jako bezpośredni odbiorcy procesu szkoleniowego, są ważnym źródłem informacji o realnej użyteczności przekazywanych treści, ich zrozumiałości oraz możliwości praktycznego zastosowania w codziennej pracy. Analiza ich opinii pozwala na identyfikację zarówno mocnych stron obecnych rozwiązań, jak i obszarów wymagających usprawnień.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badania dotyczącego oceny skuteczności szkoleń okresowych BHP, przeprowadzonego wśród pracowników zatrudnionych w różnych sektorach gospodarki oraz analiza czynników wpływających na odbiór i efektywność tych szkoleń. Choć badanie ma charakter międzybranżowy, to jego wyniki mają istotne znaczenie również dla górnictwa odkrywkowego, w którym poziom ryzyka zawodowego jest podwyższony ze względu na pracę w zmiennych warunkach terenowych, współwystępowanie wielu podmiotów i procesów na jednym obszarze (np. roboty urabiające, transport, prace serwisowe, zwałowanie, roboty strzałowe), a także wykorzystanie maszyn „wielkogabarytowych”. W tym środowisku szczególnego znaczenia nabiera jakość szkoleń okresowych, rozumiana nie tylko jako przekaz wiedzy formalnej, lecz także jako zdolność do kształtowania bezpiecznych zachowań, wspierania identyfikacji zagrożeń oraz podejmowania trafnych decyzji w warunkach presji czasu i zmienności organizacyjnej.

Na podstawie uzyskanych wyników oraz odniesienia do literatury przedmiotu sformułowano rekomendacje dotyczące usprawnienia procesu szkoleniowego oraz wzmocnienia kultury bezpieczeństwa w organizacjach, z uwzględnieniem możliwości ich adaptacji do realiów zakładów górnictwa odkrywkowego. Artykuł stanowi też próbę odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu obecne modele szkoleń okresowych BHP odpowiadają rzeczywistym potrzebom pracowników, w tym pracowników wykonujących zadania o wysokiej ekspozycji na ryzyko.

2. METODYKA BADAŃ

W celu realizacji przyjętego celu badawczego przeprowadzono badanie ilościowe metodą sondażu diagnostycznego, z wykorzystaniem autorskiego kwestionariusza ankiety. Narzędzie badawcze zostało przygotowane w formie elektronicznej i zdalnie rozpowszechnione, co umożliwiło dotarcie do respondentów z różnych regionów kraju. Badanie zostało przeprowadzone w okresie od 28 kwietnia do 25 maja, co zapewniło odpowiedni czas na zebranie danych oraz uzyskanie przekrojowego obrazu opinii pracowników na temat szkoleń okresowych BHP [7].

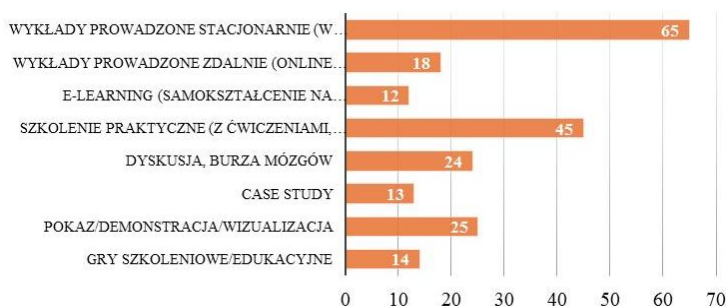
W badaniu wzięła udział zróżnicowana grupa 100 pracowników z różnych sektorów gospodarki, m.in. z przemysłu, handlu, usług, administracji oraz IT. Respondenci róż-

nili się pod względem wieku, płci (69% kobiet i 31% mężczyzn), stażu pracy, zajmowanego stanowiska oraz wielkości przedsiębiorstwa. Pozwoliło to uzyskać przekrojowy i wiarygodny obraz skuteczności szkoleń w różnych środowiskach zawodowych. Wśród uczestników znaleźli się zarówno pracownicy biurowi i techniczni, jak i produkcyjni oraz przedstawiciele kadry kierowniczej.

Kwestionariusz ankiety składał się z 27 pytań, w tym 6 pytań metryczkowych dotyczących danych demograficznych. Pozostałe pytania obejmowały kluczowe aspekty szkoleń BHP, jak ich przebieg, częstotliwość, forma prowadzenia, zakres przekazywanej wiedzy, zaangażowanie prowadzących oraz możliwość praktycznego wykorzystania zdobytych informacji w codziennej pracy. W ankiecie uwzględniono również pytanie otwarte, które pozwoliło respondentom wyrazić własne opinie i wskazać potrzeby lub propozycje zmian. Odpowiedzi przeanalizowano zarówno ilościowo i jakościowo, co umożliwiło sformułowanie wniosków oraz rekomendacji dotyczących usprawnień systemu szkoleń.

3. WYNIKI BADAŃ ANKIETOWYCH

Wyniki badań jednoznacznie pokazują, że pracownicy najwyżej oceniają szkolenia angażujące i praktyczne, pozwalające na realne przełożenie wiedzy na codzienne obowiązki. Najczęściej wskazywaną jako efektywną formą były stacjonarne wykłady, które uznało za najlepsze 65% respondentów, głównie ze względu na możliwość bezpośredniego kontaktu z prowadzącym (rys. 1). Jednocześnie wysoko oceniono szkolenia praktyczne (45%), oparte na ćwiczeniach, symulacjach i demonstracjach, które jak podkreślali uczestnicy, ułatwiają zrozumienie zagrożeń i uczą właściwego reagowania w sytuacjach zawodowych. Pokazy i demonstracje doceniło 25% badanych, dyskusje i burze mózgów 24%, natomiast wykłady zdalne wskazało 18% respondentów. Gry edukacyjne i case study uzyskały odpowiednio 14 i 13%, co sugeruje, że choć mają pewien potencjał, są rzadziej stosowane.

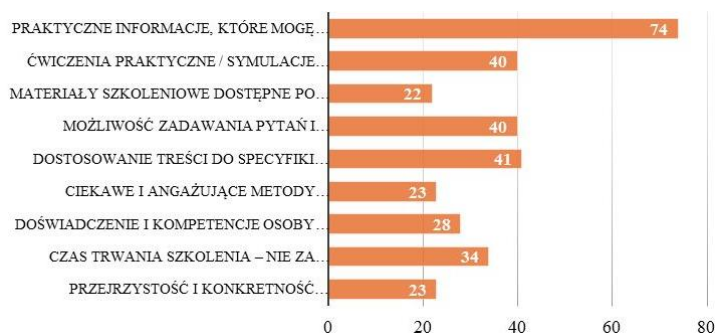


Rys. 1. Forma szkoleń BHP uznawana przez respondentów za najbardziej efektywną
Fig. 1. The form of OHS training considered by respondents to be the most effective

Wyniki te korelują z ustaleniami P. Ziółkowskiego [10], że szkolenia o charakterze praktycznym w istotnym stopniu zwiększają skuteczność działań prewencyjnych i sprzyjają trwałemu kształtowaniu bezpiecznych zachowań pracowników. Alarmujące jest natomiast to, że 14% badanych zadeklarowało całkowity brak szkoleń BHP w miejscu pracy, co świadczy o poważnych zaniedbaniach ze strony pracodawców.

W badaniu proszono o wskazanie najważniejszych elementów szkoleń (rys. 2). Respondenci najczęściej wybierali praktyczne informacje możliwe do wykorzystania w codziennej pracy – wskazało 74% uczestników, co potwierdza, że największą wartość mają treści bezpośrednio związane z realnymi zagrożeniami i obowiązkami zawodowymi. Duże znaczenie przypisywano także ćwiczeniom praktycznym i symulacjom (40%) oraz możliwości zadawania pytań i interakcji z prowadzącym (40%). Elementy te sprzyjają lepszemu zrozumieniu omawianych zagadnień i zwiększają zaangażowanie uczestników. Ważnym czynnikiem okazało się również dostosowanie treści szkolenia do specyfiki stanowiska – wskazało 41% badanych, co potwierdza potrzebę odejścia od zbyt ogólnych programów szkoleniowych.

Mniejsza liczba respondentów doceniała angażujące metody, jak quizy, filmy czy gry edukacyjne oraz dostęp do materiałów po szkoleniu, jednak wskazane elementy mogą poprawiać atrakcyjność i efektywność szkoleń. Dane te świadczą o tym, że pracownicy oczekują przede wszystkim praktycznego, interaktywnego i dopasowanego do stanowiska podejścia, które pozwala im skuteczniej przyswajać wiedzę i lepiej przygotować do działania w sytuacjach zagrożenia.

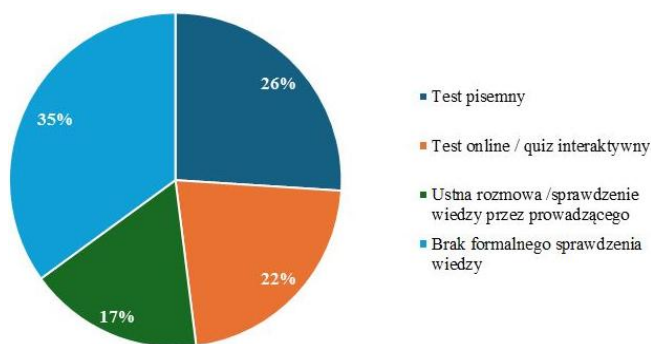


Rys. 2. Elementy szkoleń BHP uznawane przez respondentów za najbardziej istotne
Fig. 2. Elements of OHS training considered by respondents to be the most important

W pytaniu przedstawionym na rysunku 3 respondenci wskazywali, w jaki sposób weryfikowano ich wiedzę po szkoleniu BHP. Uzyskane odpowiedzi ujawniają duże zróżnicowanie stosowanych metod oraz niepokojące odstępstwa od obowiązujących przepisów. Największa grupa badanych (35%) zadeklarowała całkowity brak egzaminu sprawdzającego, co pozostaje w sprzeczności z wymaganiami §16 rozporządzenia [8] o obowiązku przeprowadzenia egzaminu po szkoleniu wstępnym i okresowym. Wśród

odpowiedzi zgodnych z wymaganiami przepisów prawa 26% uczestników wskazało test pisemny, a 22% test online lub interaktywny quiz, co świadczy o rosnącym wykorzystaniu narzędzi cyfrowych w szkoleniach. U 17% ankietowanych sprawdzenie wiedzy odbyło się w formie rozmowy ustnej z instruktorem, co mimo mniejszej formalności, może być skuteczne w mniejszych grupach i szkoleniach praktycznych.

Wyniki badań wskazują, że część pracodawców nie realizuje obowiązkowego egzaminu zgodnie z przepisami, co podważa zarówno formalną ważność szkolenia, jak i jego praktyczną skuteczność. Dane te wyraźnie pokazują potrzebę weryfikacji stosowanych procedur oraz wprowadzenia jednolitych, zgodnych z prawem metod oceny wiedzy, rzeczywiście potwierdzających przygotowanie pracowników do bezpiecznego wykonywania pracy.

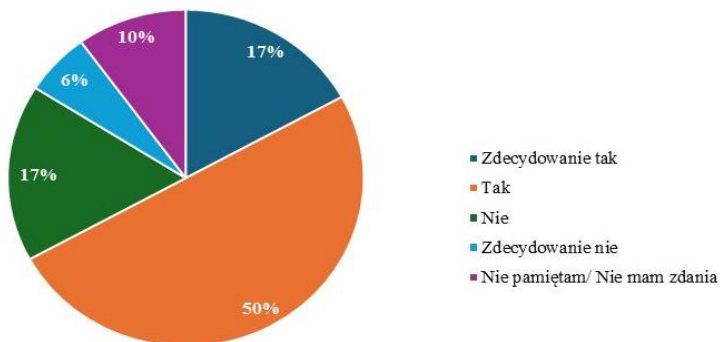


Rys. 3. Sposoby sprawdzenia zdobytej wiedzy po szkoleniu BHP według respondentów
Fig. 3. Methods of assessing acquired knowledge after OHS training according to respondents

W pytaniu przedstawionym na rys. 4 respondenci oceniali, czy szkolenie BHP zwiększyło ich gotowość do zgłaszania niebezpiecznych sytuacji lub naruszeń przepisów. Wyniki wskazują na wyraźny, pozytywny wpływ szkolenia na postawy pracowników w tym zakresie. Aż 67% badanych odpowiedziało „Tak” lub „Zdecydowanie tak”, co świadczy o skuteczności szkoleń w kształtowaniu kultury bezpieczeństwa oraz poczucia odpowiedzialności za siebie i innych. Deklaracje te są spójne z wcześniejszymi odpowiedziami co do wzrostu świadomości zagrożeń i zmiany zachowań w miejscu pracy.

Jednocześnie część pracowników nie odczuła takiego wpływu – 17% respondentów wskazało odpowiedź „Nie”, a 6% „Zdecydowanie nie”. Może to oznaczać, że nie wszyscy czują się na tyle pewni lub zmotywowani, by zgłaszać zauważone zagrożenia. Dodatkowo 10% osób nie miało.

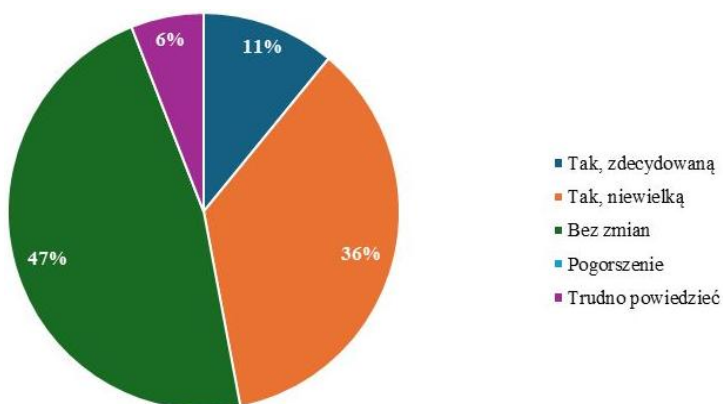
Wyniki te pozwalają stwierdzić, że choć większość pracowników dostrzega pozytywny wpływ szkolenia na gotowość do reagowania na zagrożenia, nadal istnieje potrzeba dalszego wzmacniania zaangażowania uczestników oraz promowania otwartości w zgłaszaniu nieprawidłowości w miejscu pracy.



Rys. 4. Wpływ szkolenia BHP na gotowość respondentów do zgłaszania niebezpiecznych sytuacji lub naruszeń przepisów

Fig. 4. Impact of OHS training on respondents' willingness to report hazardous situations or violations of regulations

Ocena wpływu szkolenia na poprawę bezpieczeństwa w miejscu pracy przyniosła zróżnicowane rezultaty, co może wynikać z odmiennych doświadczeń pracowników lub różnej jakości wdrożenia zasad BHP w poszczególnych firmach. Jak pokazano na rys. 5, 36% respondentów dostrzegło niewielką poprawę, a 11% poprawę wyraźną, co świadczy o pozytywnym, choć najczęściej umiarkowanym wpływie szkoleń na warunki pracy. Jednocześnie 47% badanych nie zauważyło żadnych zmian, a 6% odpowiedziało „trudno powiedzieć”. Sugeruje to, że dla części uczestników efekty szkolenia nie były wystarczająco widoczne. Ważne jest, że nikt nie wskazał pogorszenia bezpieczeństwa, co potwierdza stabilność dotychczasowych standardów.



Rys. 5. Ocena poprawy bezpieczeństwa w miejscu pracy po odbyciu szkolenia według respondentów

Fig. 5. Assessment of workplace safety improvement after completing training according to respondents

Wyniki te pokazują, że choć szkolenia podnoszą świadomość zagrożeń, ich przełożenie na realne, zauważalne zmiany w środowisku pracy nie zawsze jest oczywiste. Może to wynikać z braku działań organizacyjnych po stronie pracodawców, niewystarczającego wsparcia kadry zarządzającej lub potrzeby wdrażania dodatkowych inicjatyw wspierających budowanie kultury bezpieczeństwa.

Respondenci zostali także zapytani o to, które elementy szkoleń wymagają poprawy (rys. 6). Uzyskane odpowiedzi w wyraźny sposób pokazują, w jakim kierunku powinny zmierzać działania modernizacyjne. Najsilniej akcentowaną potrzebą było zwiększenie liczby przykładów praktycznych oraz sytuacji. Ten aspekt wskazało aż 63% uczestników. Kolejne 40% podkreśliło znaczenie dodatkowych ćwiczeń praktycznych, jak symulacje zdarzeń czy scenariusze awaryjne, pozwalających przełożyć teorię na konkretne działania.

Bardziej angażująca forma szkolenia, wyróżniona przez 37 respondentów, potwierdza rosnące oczekiwania wobec szkoleń interaktywnych i dynamicznych. Dodatkowo 27% uczestników zwróciło uwagę na konieczność aktualizacji przepisów omawianych podczas zajęć, a 22% na potrzebę ściślejszego dopasowania treści do specyfiki wykonywanej pracy.

Na dalszych miejscach znalazły się takie elementy jak poprawa jakości materiałów szkoleniowych (21%), częstsze szkolenia przypominające (18%), większe urozmaicenie formy (17%) oraz możliwość prowadzenia pogłębionej dyskusji z prowadzącym (13%). Jedyne 7% ankietowanych uznało, że obecna forma szkoleń nie wymaga żadnych zmian, co wyraźnie podkreśla skalę oczekiwań dotyczących usprawnienia obecnego systemu.



Rys. 6. Elementy szkoleń wskazane przez respondentów jako wymagające popraw

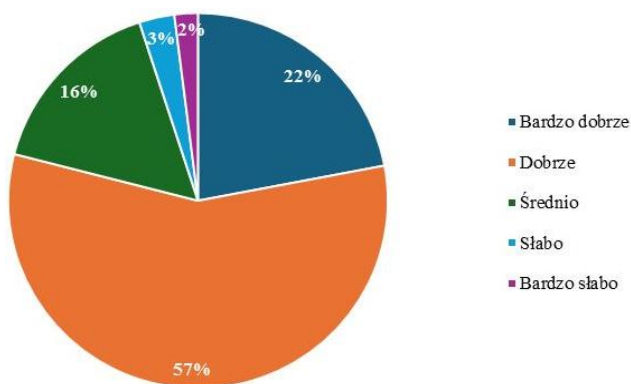
Fig. 6. Elements of occupational health and safety training indicated by respondents as requiring improvement

W jednej z części badania respondenci oceniali przystępność i zrozumiałość treści przekazywanych w trakcie szkoleń (rys. 7). Zdecydowana większość uczestników pozytywnie ocenia sposób prowadzenia zajęć. Najliczniejszą grupę stanowią osoby, które uznały szkolenie za „Dobre” (57%), a kolejne 22% oceniło je jako „Bardzo dobre”.

Łącznie 79% badanych potwierdziło, że informacje były przekazywane w sposób jasny i zrozumiały, co świadczy o wysokiej jakości realizowanych szkoleń.

Jednocześnie 16% respondentów oceniło przystępność treści jako „Średnią”, co może wskazywać na pewne trudności w odbiorze materiału u części uczestników. Nieliczne opinie negatywne – 3% ocen „Słabych” i 2% „Bardzo słabych” – choć marginalne, to sygnalizują potrzebę dopracowania formy przekazu, zwłaszcza w odniesieniu do osób mających problemy z przyswajaniem wiedzy w obecnej formule szkoleniowej.

Uzyskane wyniki pokazują, że szkolenia BHP są generalnie postrzegane jako czytelne i dobrze przygotowane, jednak pojedyncze oceny niższe mogą stanowić wskazówkę do wprowadzenia pewnych udoskonaleń, które pozwolą dotrzeć z treściami do wszystkich grup pracowników w równym stopniu.



Rys. 7. Ocena respondentów dotycząca przystępności i zrozumiałości przekazywanych informacji podczas szkoleń

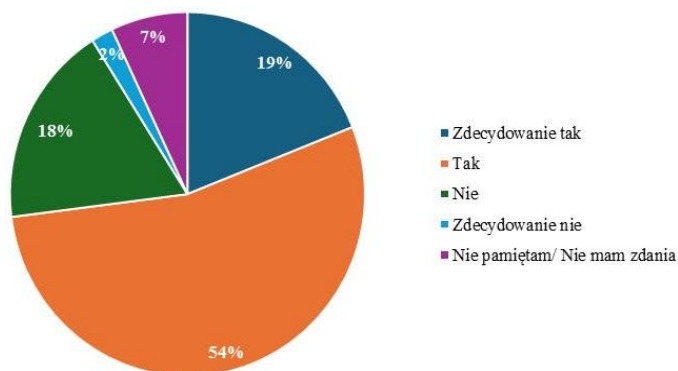
Fig. 7. Respondents' assessment of the accessibility and clarity of the information provided during training

W pytaniu według rys. 8 respondenci oceniali, czy szkolenia BHP wpływają na zmniejszenie liczby wypadków przy pracy. Wyniki badania jednoznacznie wskazują, że większość pracowników postrzega je jako istotny element profilaktyki wypadkowej. 54% ankietowanych odpowiedziało „Tak”, a kolejne 19% „Zdecydowanie tak”, co oznacza, że ponad 70% respondentów dostrzega realny wpływ szkoleń na poprawę bezpieczeństwa i ograniczanie incydentów w miejscu pracy. Wynik ten potwierdza, że odpowiednio prowadzone szkolenia BHP mogą zwiększać świadomość zagrożeń oraz kształtować właściwe zachowania pracowników.

Jednocześnie 18% badanych uważa, że szkolenia nie wpływają na obniżenie wypadkowości, a 2% wyraziło zdecydowanie negatywną opinię. Może to wskazywać na brak zauważalnych efektów w ich środowisku pracy, niewystarczające wdrożenie zasad BHP lub słabą jakość samych szkoleń. Dodatkowe 7% respondentów wskazało odpowiedź „Nie pamiętam / Nie mam zdania”, co sugeruje, że część pracowników nie po-

trafi jednoznacznie ocenić wpływu szkolenia na poziom bezpieczeństwa, być może z powodu braku bezpośrednich doświadczeń związanych z incydentami lub ograniczonej świadomości działań prewencyjnych.

Zestawienie odpowiedzi wskazuje, że chociaż większość zatrudnionych dostrzega wartość szkoleń, istnieje również grupa osób sceptycznych lub niezdecydowanych. Może to świadczyć o konieczności jeszcze lepszego dopasowania programów szkoleniowych do specyfiki stanowisk, większej liczby przykładów z praktyki oraz wyraźniejszego pokazania, w jaki sposób przestrzeganie zasad BHP przekłada się na realne zmniejszenie ryzyka wypadków.



Rys. 8. Wpływ szkoleń BHP na zmniejszenie liczby wypadków przy pracy według respondentów

Fig. 8. Impact of occupational health and safety (OHS) training on reducing the number of workplace accidents according to respondents

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badanie potwierdza, że okresowe szkolenia BHP stanowią istotny element budowania kultury bezpieczeństwa w organizacjach, a ich efektywność zależy w dużej mierze od sposobu prowadzenia, jakości materiałów oraz stopnia zaangażowania uczestników. Wyniki pokazują, że pracownicy najwyżej oceniali szkolenia praktyczne i interaktywne, w których treści były bezpośrednio powiązane z rzeczywistymi zagrożeniami na stanowisku pracy oraz z decyzjami podejmowanymi w codziennych sytuacjach zawodowych. Jednocześnie widoczna jest potrzeba dalszej modernizacji systemu szkoleń, zwłaszcza w kierunku większej liczby ćwiczeń praktycznych, analiz zdarzeń potencjalnie wypadkowych oraz lepszego dopasowania treści do specyfiki zadań i środowiska pracy.

Wyniki badania wskazują na konieczność stosowania bardziej angażujących metod dydaktycznych, ponieważ tradycyjne, monotonne wykłady w ograniczonym stopniu

wspierają trwałe uczenie się i zmianę zachowań. Uczestnicy szczególnie wysoko oceniali formy umożliwiające aktywny udział, zadawanie pytań i wymianę doświadczeń, a także szkolenia projektowane „pod stanowisko” – od zagadnień ergonomii i obciążenia psychicznego w pracy biurowej po zagrożenia związane z obsługą maszyn, hałasem czy ruchem środków transportu w pracach fizycznych. Za najmniej przydatne uznawano szkolenia ogólne, nieuwzględniające realiów organizacyjnych i operacyjnych, co ogranicza ich przydatność w praktyce.

Wnioski te mają szczególne znaczenie także dla górnictwa odkrywkowego, gdzie bezpieczeństwo zależy nie tylko od znajomości procedur, lecz przede wszystkim od umiejętności rozpoznawania zagrożeń i podejmowania właściwych decyzji w dynamicznych warunkach pracy. Zmienność frontu robót, współdzielenie przestrzeni przez ludzi i maszyny, urządzenia oraz instalacje, prace prowadzone w terenie oraz częsta koordynacja wielu zespołów sprawiają, że największą wartość mają szkolenia o wysokim stopniu realizmu: scenariusze zdarzeń, ćwiczenia decyzyjne, praca na przypadkach oraz trening komunikacji i współdziałania (np. w obszarze zgłaszania nieprawidłowości i reagowania na sytuacje niebezpieczne). W takim kontekście dopasowanie treści do konkretnych procesów technologicznych i ról stanowiskowych staje się warunkiem uzyskania mierzalnego efektu szkoleniowego.

Istotnym kierunkiem modernizacji jest również wykorzystanie nowoczesnych technologii, w tym symulacji VR, które pozwalają przećwiczyć realistyczne scenariusze w bezpiecznych, kontrolowanych warunkach. Zastosowanie gogli VR w szkoleniach PPOŻ. i ewakuacyjnych może zwiększać zaangażowanie uczestników, poprawia zapamiętywanie procedur, a także ograniczać bariery organizacyjne związane z koniecznością tworzenia infrastruktury szkoleniowej. Z perspektywy górnictwa odkrywkowego potencjał technologii immersyjnych: dotyczy także treningu sytuacji rzadkich, lecz wysokiego ryzyka (np. zdarzeń w strefach ruchu maszyn, błędów komunikacyjnych czy nieprawidłowych reakcji w warunkach ograniczonej widoczności), które trudno bezpiecznie odtworzyć w warunkach rzeczywistych.

Ważnym wnioskiem jest również to, że większość respondentów dostrzega pozytywny wpływ szkoleń na zwiększenie gotowości do zgłaszania niebezpiecznych sytuacji, zmianę zachowań oraz potencjalne ograniczenie liczby wypadków w miejscu pracy.

Jednocześnie część pracowników nie zauważa wyraźnych efektów szkoleń, co sugeruje potrzebę większej spójności między tym, co podano na szkoleniu, a tym, co jest konsekwentnie wzmacniane w codziennym zarządzaniu bezpieczeństwem przez: pracodawcę, kadrę kierowniczą, bezpośrednich przełożonych czy instruktorów szkoleń. Oznacza to, że skuteczność szkoleń powinna być wspierana działaniami wdrożeniowymi po ich zakończeniu, np. krótkimi odprawami stanowiskowymi, obserwacjami zachowań, przypomnieniami proceduralnymi. Jest to szczególnie istotne w środowiskach o podwyższonym ryzyku, jak zakłady górnictwa odkrywkowego.

Podsumowując, skuteczne szkolenia powinny łączyć aktualną wiedzę teoretyczną z praktycznymi ćwiczeniami, interaktywnymi formami nauki oraz możliwością wymia-

ny doświadczeń, a także uwzględniać specyfikę stanowisk i procesów pracy. Dopiero tak zorganizowany proces szkoleniowy, powiązany z codziennymi praktykami zarządzania bezpieczeństwem i kulturą BHP w firmie, może realnie wpływać na ograniczenie ryzyka zawodowego i poprawę poziomu bezpieczeństwa pracy. Wyniki badania stanowią ważny punkt wyjścia do formułowania rekomendacji dotyczących usprawniających system szkoleń i wskazują kierunki rozwoju, które mogą wspierać organizacje w odpowiadaniu na rosnące oczekiwania pracowników i wymagania współczesnego środowiska pracy, w tym także w warunkach charakterystycznych dla górnictwa odkrywkowego.

LITERATURA

- [1] CHOMĄTOWSKA B., 2011. *Zarządzanie bezpieczeństwem i higieną pracy*, Uniwersytet Ekonomiczny, Wrocław 2011.
- [2] CHOMĄTOWSKA B., *Odpowiedni poziom bezpieczeństwa i higieny pracy jako źródło konkurencyjności współczesnych przedsiębiorstw*, Zarządzanie i Finanse, 2015.
- [3] DYREKTYWA RADY 89/391/EWG ws. wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy (DzUUUE L 183).
- [4] FORTUNA P., ŁAGUNA M., *Przygotowanie szkolenia, czyli jak dobry początek prowadzi do sukcesu*, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk 2009.
- [5] Kodeks pracy z dnia 26 czerwca 1974 r. (t.j. DzU 2025.1610).
- [6] Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 2 kwietnia 1997 r. (DzU 1997.78.483).
- [7] KUREK N., *Ocena skuteczności szkoleń okresowych BHP*, praca dyplomowa, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii PWr, Wrocław 2025.
- [8] Rozporządzenia MGIP z dnia 27 lipca 2004 r. ws. szkolenia w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny pracy (DzU 2004.180.1860).
- [9] WRÓBEL A., *Bezpieczeństwo i higiena pracy – pojęcie i odpowiedzialność*, Difin, Warszawa 2020.
- [10] ZIÓŁKOWSKI P., *Metodyka szkoleń z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy*, Wyd. Uczelniane Wyższej Szkoły Gospodarki, Bydgoszcz 2018.

EFFECTIVENESS STUDY OF PERIODIC OHS TRAINING AS AN ELEMENT OF THE OCCUPATIONAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM

The article presents the results of a survey study on the effectiveness of periodic occupational health and safety (OHS) training across various industries. It shows that training programs yield better results when they are practical, job-specific, and engaging, while lecture-based formats are assessed as less effective. The study highlights the importance of modern training methods, such as VR simulations, which facilitate learning procedures in realistic conditions. This is particularly important in open-pit mining, where OHS training should focus on task-based scenarios, decision-making, and the analysis of potentially hazardous incidents.

Łukasz MACHNIAK¹
Konrad SŁOWIŃSKI²

¹ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

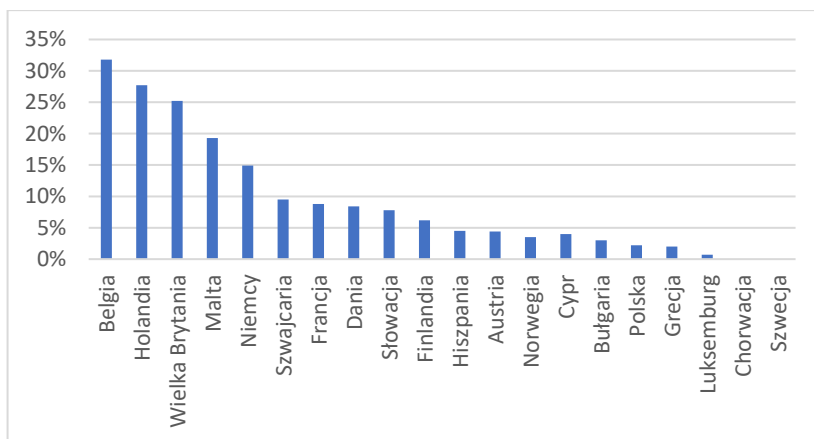
² Polski Związek Producentów Kruszyw, Kielce

RECYKLING ODPADÓW BUDOWLANYCH ELEMENTEM DYWERSYFIKACJI BAZY SUROWCOWEJ DO PRODUKCJI KRUSZYW

Kruszywa z recyklingu – z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej, mimo stosunkowo ograniczonego potencjału ilościowego, mogą stanowić ważne uzupełnienie bazy zasobowej do produkcji kruszyw, wspierać zrównoważone budownictwo i w przyszłości zwiększać bezpieczeństwo surowcowe kraju. W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy mogą one stanowić istotny element łańcucha dostaw surowców na rynek kruszywowy.

1. WPROWADZENIE

Kruszywa stanowią podstawowy surowiec wykorzystywany w budowie infrastruktury. Jednak, jak w przypadku każdego zasobu nieodnawialnego, obecna baza surowcowa powinna wystarczyć jeszcze na wiele lat. W przypadku kamieni łamanych, wydobycie



Rys. 1. Udział kruszyw z recyklingu w wybranych krajach europejskich
Fig. 1. Share of recycled aggregates in selected European countries

koncentruje się głównie w trzech województwach: dolnośląskim, świętokrzyskim i małopolskim. W przyszłości może to powodować narastające problemy logistyczne związane z dostarczaniem odpowiedniego surowca, a także generować istotny wzrost kosztów transportu. Jednocześnie wprowadzane są coraz bardziej rygorystyczne wymagania odnoszące się do ograniczania śladu węglowego, redukcji ilości odpadów oraz promowania bardziej zrównoważonych modeli produkcji i konsumpcji [1].

Z tych względów coraz częściej poszukuje się nowych możliwości dywersyfikacji źródeł surowców. Jednym z potencjalnych rozwiązań są kruszywa pochodzące z recyklingu (RA). Choć w Polsce nie cieszą się one jeszcze dużą popularnością, to w wielu krajach Unii Europejskiej są coraz powszechniej wykorzystywane w budownictwie (rys. 1).

2. BARIERY WDROŻENIOWE

Kruszywa pochodzące z recyklingu, mimo rosnącej dostępności rynkowej, nadal napotykać na liczne bariery o charakterze prawnym, technologicznym oraz wizerunkowym. Sytuacja prawna kruszyw z recyklingu pozostaje nie w pełni uregulowana. Dyrektywa 2008/98/WE [1] stanowi, że materiał poddany recyklingowi może utracić status odpadu wyłącznie wówczas, gdy spełni określone kryteria tzw. End-of-Waste. W Polsce nadal brakuje jednak szczegółowych wytycznych odnoszących się bezpośrednio do kruszyw z odpadów budowlanych. W konsekwencji utrata statusu odpadu wymaga przeprowadzenia szeregu czynności formalno-technicznych mających na celu wykazanie, że dany materiał może zostać wprowadzony do obrotu jako pełnoprawne kruszywo.

Dodatkowo uzyskanie zezwolenia na przetwarzanie odpadów w znacznym stopniu zależy od lokalizacji prowadzonej działalności. Kompetencje administracyjne w tym zakresie są rozproszone pomiędzy starostwami, urzędami marszałkowskimi oraz regionalnymi dyrekcjami ochrony środowiska. Istotnym zagadnieniem są również planowane zmiany interpretacyjne w ramach rozporządzenia REACH [9]. Rozważana jest możliwość reklasyfikacji kruszyw z recyklingu jako substancji chemicznej, co mogłoby wiązać się z obowiązkiem ich rejestracji. Proces ten jest złożony, czasochłonny oraz generuje znaczące koszty [9].

Kolejną problematyczną kwestią pozostaje jakość kruszyw z recyklingu, a przede wszystkim niepewność dotycząca ich parametrów technicznych. Choć właściwości kruszyw naturalnych również mogą różnić się w zależności od miejsca pozyskiwania, a niekiedy nawet w obrębie tego samego złoża lub miejsca składowania, to w przypadku kruszyw pochodzących z 17 grupy odpadów [4] sytuacja jest bardziej złożona. Kluczowy wpływ na właściwości kruszyw z recyklingu ma rodzaj pierwotnego materiału zastosowanego w produkcji bazowym [2]. Materiał wsadowy kierowany do recyklingu może zawierać liczne zanieczyszczenia negatywnie oddziałujące na parametry końcowego produktu. Destrukt pochodzący z rozbiórek i remontów bywa zanieczysz-

czony, m.in. masami bitumicznymi, metalami, gipsem, cegłą, płytkami ceramicznymi, szkłem, drewnem oraz tworzywami sztucznymi. Obecność mas bitumicznych istotnie ogranicza możliwości ponownego wykorzystania destruktu oraz może negatywnie wpływać na właściwości betonu, obniżając jego wytrzymałość. W przypadku metali szczególne zagrożenie stanowi aluminium, które w wyniku utleniania powoduje powstawanie spękań w strukturze materiału. Szkło może natomiast uczestniczyć w reakcji alkalicznej, prowadząc do zwiększenia objętości materiału, a w skrajnych przypadkach do uszkodzenia elementów wykonanych z betonu zawierającego zanieczyszczone kruszywo.

Obecność cegieł, drewna, tworzyw sztucznych czy płytek ceramicznych obniża właściwości mechaniczne produktu końcowego. Szczególnie niebezpiecznym zanieczyszczeniem są pozostałości gipsu, powszechnie stosowanego we współczesnym budownictwie. Jego obecność może prowadzić do korozji siarczanowej. Nie da się również wykluczyć zanieczyszczenia materiału związkami chemicznymi wynikającymi z eksploatacji obiektu, jak sole drogowe czy związki siarki.

Jednocześnie należy podkreślić, że obecnie producenci dysponują zaawansowanym zapleczem technicznym umożliwiającym skuteczną przeróbkę materiału wsadowego. Proces obejmuje kontrolę jakości surowca, jego selekcję, kruszenie, sortowanie oraz usuwanie zanieczyszczeń. Dzięki temu kruszywa z recyklingu mogą charakteryzować się powtarzalnymi i kontrolowanymi parametrami użytkowymi [3].

Odmierna sytuacja dotyczy kruszyw wytwarzanych w sposób nielegalny, które nie podlegają żadnym procedurom kontrolnym. W związku z tym kluczowe znaczenie ma korzystanie wyłącznie ze sprawdzonych i certyfikowanych źródeł dostaw.

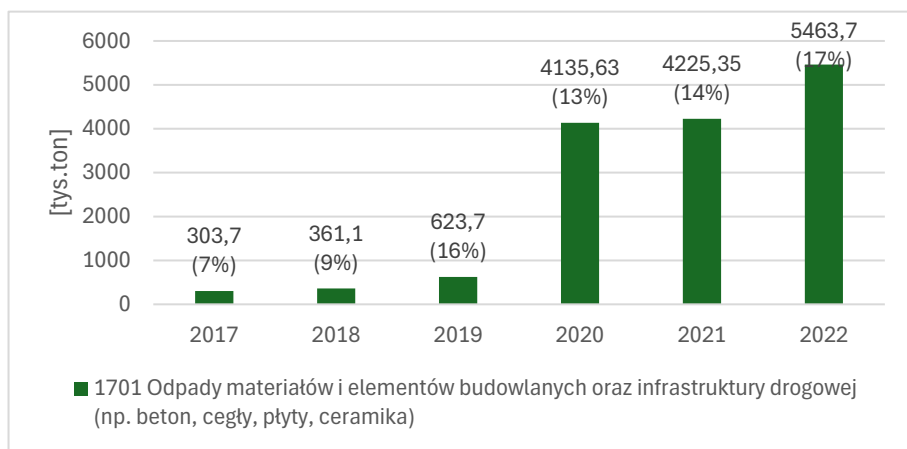
Kolejną barierą, wynikającą pośrednio z opisanych wcześniej uwarunkowań prawnych i jakościowych, jest podejście branży budowlanej do kruszyw z recyklingu. W dokumentacjach przetargowych nierzadko wprost ogranicza się możliwość ich stosowania, a projektanci i inwestorzy wykazują ograniczone zainteresowanie wykorzystaniem tego typu materiałów. Postawa ta wynika przede wszystkim z obaw dotyczących niepewności parametrów technicznych oraz potencjalnego ryzyka eksploatacyjnego.

3. ILOŚĆ ODPADÓW

W celu określenia wielkości wytwarzanych odpadów w grupie 17 [4] przeanalizowano sprawozdania z Krajowego Planu Gospodarki Odpadami. Dokument ten stanowi zestawienie danych pochodzących z systemu BDO (Bazy danych o produktach i opakowaniach oraz o gospodarce odpadami) dla całego kraju [10]. Analiza dostępnych danych wykazała, że szczególnie istotne z punktu widzenia branży kruszyw są odpady o kodzie 17 01, obejmujące odpady materiałów i elementów budowlanych oraz infrastruktury drogowej, np. beton, cegły, płyty, ceramika [4]. Masę wytworzonych odpadów tej grupy przedstawiono na rys. 2.

W latach 2017–2019 ilość raportowanych odpadów była stosunkowo niewielka. Wynikało to przede wszystkim z faktu, że obowiązek pełnej sprawozdawczości w systemie

BDO obowiązuje od 2020 roku. Z tego względu dane sprzed tego okresu należy traktować ostrożnie, a za bardziej miarodajne uznać dane z lat 2020–2022.



Rys. 2. Masa wytworzonych odpadów w grupie 17 01 [4], w latach 2017–2022

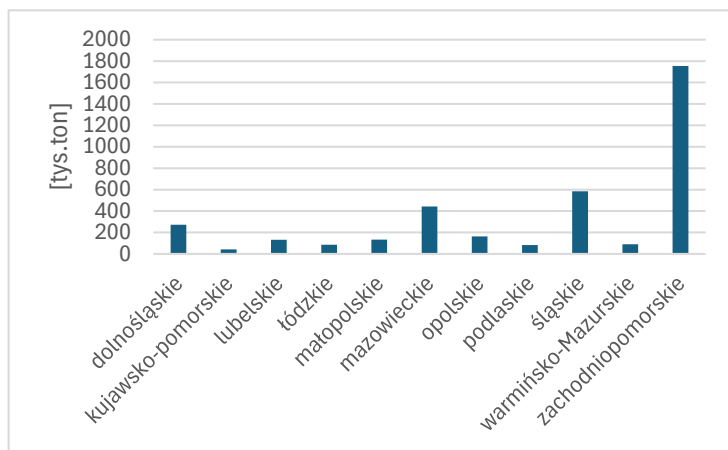
Fig. 2. Mass of waste generated in group 17 01 [4], in 2017–2022

W 2022 r. łączna masa odpadów budowlanych wynosiła 32 528 tys. t. Odpady o kodzie 17 01 odpowiadały za blisko 17% łącznej masy w całej grupie 17, tj. ich masa wynosiła 5463 tys. t. Zgodnie z ustawą o odpadach [6] ~70% masy odpadów budowlanych powinno zostać poddane ponownemu użyciu lub recyklingowi. Oznacza to, że w optymistycznym wariacie można rozpatrywać ~3800 tys. t materiału jako potencjalny zamiennik surowca naturalnego. Dla porównania, w 2022 r. wydobyte kamieni łamanych w Polsce wynosiło 79,94 mln t [5]. Oznacza to, że kruszywa z recyklingu tej grupy odpadów mogłyby potencjalnie pokryć ~5% zapotrzebowania na kruszywa ze skał zwięzłych, a w całym rynku kruszyw posiadać udział ~1,8%.

Jeśli chodzi o sytuację w poszczególnych województwach, publikowane sprawozdania regionalne często różnią się między sobą strukturą oraz poziomem szczegółowości wykazywanych danych. W szczególności zauważalne są różnice w sposobie agregowania informacji dotyczących poszczególnych kodów odpadów. Z tego względu konieczne było pozyskanie części danych bezpośrednio z departamentów właściwych urzędów marszałkowskich. Nie udało się jednak uzyskać informacji ze wszystkich województw. Z tego powodu w artykule analizowano jedynie te regiony, dla których uznano, że dostępne dane są wiarygodne i kompletne. W analizie wykorzystano ostatni rok dostępny w sprawozdaniach regionalnych, najczęściej były to sprawozdania z lat 2020–2022 (rys. 3).

Łączna masa wytworzonych odpadów w wybranych województwach wyniosła 3789 tys. t, co stanowi 70% całościowej masy wytworzonych odpadów grupy 17 w ujęciu całego kraju. Najwięcej, aż 1754 tys. t wytworzono w województwie zachodniopo-

morskim – 1600 tys. t odpadu o kodzie 17 01 81, tj. odpady z remontów i przebudowy dróg [4]. Najprawdopodobniej wynika to z realizacji licznych inwestycji modernizacyjnych infrastruktury drogowej na terenie województwa. Kolejne miejsca pod względem ilości wytwarzanych odpadów zajmuje województwo śląskie (584 tys. t) oraz mazowieckie (443 tys. t). Obecność dużej ilości odpadów budowlanych w tych regionach nie jest zaskoczeniem, ponieważ znajdują się tam duże ośrodki miejskie wymagające ciągłych nakładów inwestycyjnych oraz modernizacji infrastruktury.



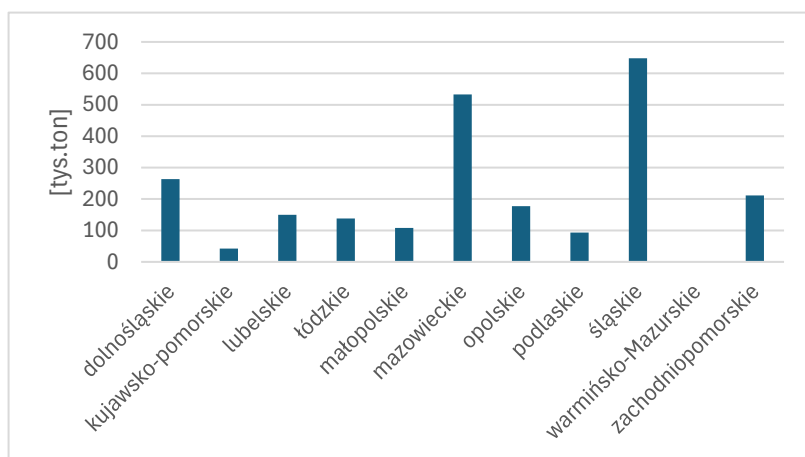
Rys. 3. Masy wytworzonych odpadów w grupie 17 01, dla wybranych województw
Fig. 3. Mass of generated waste in group 17 01, for selected voivodeships

4. ILOŚĆ ODPADÓW PODDANA ODZYSKOWI

Odzysk stanowi pojęcie szersze niż recykling. W przypadku recyklingu, określane również jako odzysk materiałowy, mamy do czynienia z procesem przetworzenia odpadu w materiał lub surowiec, który może zostać ponownie wykorzystany w procesach produkcyjnych. Natomiast przez odzysk rozumie się jakiegokolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku, którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce [6]. Do odzysku zalicza się zarówno recykling, ale też prace ziemne. Na rysunku 4 przedstawiono masę odpadów z grupy 17 01 poddanych odzyskowi w analizowanych województwach.

Analiza mas odpadów poddanych odzyskowi wskazuje, że wciąż dominują województwa śląskie oraz mazowieckie, a znaczący udział ma również dolnośląskie. Warto zwrócić uwagę, że masa odpadów poddanych odzyskowi jest znacząco większa niż masa odpadów poddanych recyklingowi (odzysk materiałowy). Zmiana kolejności „na podium”

pokazuje, że w przypadku odzysku przewagę osiągnęło województwo śląskie nad mazowieckim. W województwie warmińsko-mazurskim proces odzysku w danym roku nie był realizowany. Ciekawym zjawiskiem jest tzw. surplus odpadów, w aż 7 województwach ilość odpadów poddanych procesom odzysku była większa niż ilość odpadów wytworzonych, co potwierdza hipotezę o nadwyżkach odpadów w niektórych regionach.



Rys. 4. Masy odpadów poddanych odzyskowi w grupie 17 01, dla wybranych województw

Fig. 4. Mass of waste recovered in group 17 01, for selected voivodeships

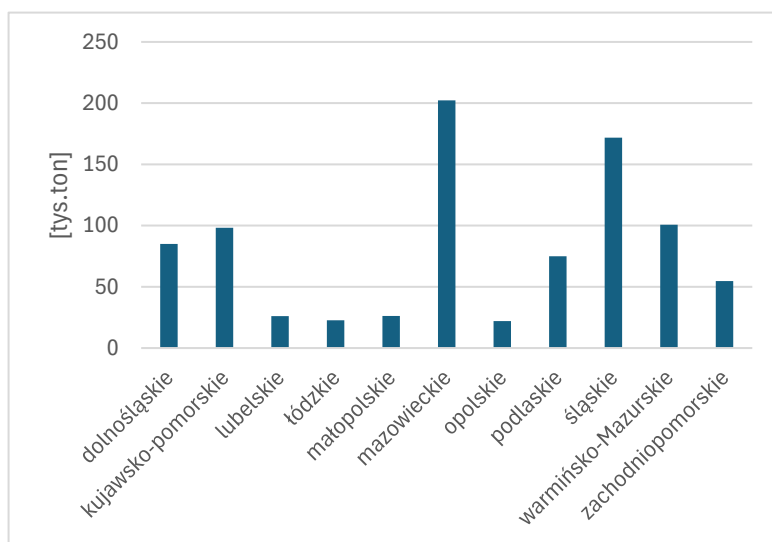
5. ILOŚĆ ODPADÓW PODDANA RECYKLINGOWI

Przez recykling rozumie się odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach; obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego (recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do prac ziemnych [6]. Z punktu widzenia rynku kruszyw szczególnie istotny jest zatem taka forma odzysku, gdyż prowadzi bezpośrednio do wytworzenia pełnowartościowego produktu w postaci kruszywa wtórnego. Pozwala to na ograniczenie eksploatacji naturalnych złóż surowców mineralnych oraz zmniejszenie ilości odpadów kierowanych na składowiska [7].

W przypadku odpadów budowlanych recykling najczęściej obejmuje procesy technologiczne, jak selekcja materiału wsadowego, kruszenie, sortowanie oraz usuwanie zanieczyszczeń, których celem jest uzyskanie materiału spełniającego określone wymagania jakościowe. W rezultacie powstały produkt może zostać ponownie wykorzy-

stany jako surowiec wtórny. Z tego względu wielkość strumienia odpadów poddanych recyklingowi może stanowić przybliżony wskaźnik aktualnego poziomu wykorzystania kruszyw pochodzących z recyklingu odpadów budowlanych w gospodarce.

Największą masę odpadów poddanych recyklingowi odnotowano w województwie mazowieckim (202 329 t) oraz śląskim (171 820 t) – rys. 5. Regiony te wydają się odgrywać wiodącą rolę w zakresie przetwarzania odpadów budowlanych.



Rys. 5. Masy recyklingowych odpadów w grupie 17 01 dla wybranych województw

Fig. 5. Masses of recycled waste in group 17 01 for selected voivodeships

Znaczące ilości odpadów poddawanych recyklingowi występują również w województwach warmińsko-mazurskim i kujawsko-pomorskim. Stosunkowo niski poziom recyklingu w województwie zachodniopomorskim może być zaskakujący, biorąc pod uwagę wysoki poziom wytwarzanych tam odpadów. Wskazywać to może to na konieczność dalszego rozwoju infrastruktury przetwarzania odpadów w tym regionie.

Łączna ilość odpadów poddanych recyklingowi w analizowanych województwach wynosi 885 tys. t, co przy zachowaniu proporcji do udziału tych województw w ilości odpadów ogółem – może dać ~1264 tys. t odpadów poddanych recyklingowi w Polsce. Odnosząc te liczby do najbardziej optymistycznego wariantu zakładającego recykling ~70% tej grupy, jedynie 32% odpadów została poddana procesowi recyklingu. Oznacza to, iż potencjał wskazanej grupy na ten moment jest niższy niż zakładano, jednak niesie to za sobą możliwości wprowadzania optymalizacji, celem uzyskania 70% recyklingu w tej ścisłej grupie.

W części województw ilość odpadów poddanych recyklingowi przewyższa ilość odpadów wytworzonych w danym roku sprawozdawczym. Taka sytuacja występuje m.in.

w województwie warmińsko-mazurskim oraz kujawsko-pomorskim. Może to wynikać z przetwarzania zapasów odpadów zgromadzonych w poprzednich latach lub z transportu odpadów z innych regionów kraju.

6. PODSUMOWANIE

Kruszywa z recyklingu nie są obecnie powszechnie stosowane w Polsce, choć w wielu krajach europejskich ich wykorzystanie systematycznie rośnie. Przykładem może być budowa Stadionu Olimpijskiego w Londynie na potrzeby igrzysk w 2012 r., podczas której ~40% materiałów stanowiły surowce pochodzące z recyklingu odpadów analizowanej w artykule grupy [8].

Odpady z grupy 17 stanowią istotne źródło materiału do produkcji kruszyw RA, jednak nawet przy znacznym rozwoju technologii recyklingu oraz powstawaniu nowych zakładów przetwórczych, udział kruszyw z recyklingu w rynku kruszyw w Polsce prawdopodobnie nie przekroczy kilku procent rocznego zapotrzebowania.

Największe ilości odpadów z remontów i rozbiórek odnotowuje się w regionach o intensywnym rozwoju infrastrukturalnym, jak województwa zachodniopomorskie, śląskie i mazowieckie, przy czym największe wolumeny recyklingu obserwowane są w mazowieckim i śląskim. Wykorzystanie materiałów pochodzących z remontów i rozbiórek napotyka jednak liczne bariery prawne. Kluczowe trudności to uzyskanie odpowiednich pozwoleń na przetwarzanie odpadów oraz spełnienie warunków utraty statusu odpadu.

Kwestia jakości kruszyw z recyklingu wciąż budzi wątpliwości wśród uczestników rynku. Istnieje ryzyko zanieczyszczenia materiału substancjami mogącymi wpływać na parametry techniczne obiektów budowlanych. W praktyce obowiązują jednak normy określające dopuszczalną zawartość niepożądanych składników, a producenci często stosują jeszcze bardziej rygorystyczne wymagania jakościowe, aby zapewnić bezpieczeństwo i trwałość wytwarzanych produktów.

Warto również uwzględnić zjawisko funkcjonowania szarej strefy poza systemem BDO [10]. Część odpadów z remontów i rozbiórek trafia do obrotu nieformalnego, co oznacza, że nie wszystkie dane o masach odzysku i recyklingu są rejestrowane w oficjalnych systemach. Zjawisko to może prowadzić do niedoszacowania rzeczywistej ilości materiału potencjalnie dostępnego do recyklingu, a jednocześnie stwarza ryzyko niekontrolowanego składowania lub nielegalnego przetwarzania odpadów, co wpływa na bezpieczeństwo środowiskowe i prawne.

Mimo stosunkowo ograniczonego potencjału ilościowego, kruszywa z recyklingu mogą stanowić ważne uzupełnienie krajowej bazy surowcowej, wspierać zrównoważone budownictwo i zwiększać bezpieczeństwo surowcowe kraju w przyszłości. Ich rola będzie tym większa, im skuteczniej uda się ograniczyć szarą strefę i zwiększyć przejrzystość obrotu odpadami w systemie formalnym.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE ws. odpadów.
- [2] JASKOWSKA-LEMAŃSKA J., *Impurities of recycled concrete aggregate - types, origin and influence on the concrete strength parameters*, 2019 IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 603, 042056, DOI: 10.1088/1757-899X/603/4/042056.
- [3] www.holcim.pl/kruszywa-z-recyklingu-kruszywa-naturalne-czy-jakosc-moze-byc-taka-sama/ [dostęp: 20.02.2026].
- [4] Rozporządzenie MŚ z dnia 9 grudnia 2014 r. ws. katalogu odpadów (DzU 2014.1923).
- [5] *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2022 r.*, PIG-PIB, Warszawa 2023.
- [6] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (t.j., DzU 2026.174).
- [7] www.odpady.katowice.eu/recykling-a-odzysk/ [dostęp: 20.02.2026].
- [8] www.olympics.com Flexible and sustainable: *London's Olympic Stadium sets new standards*, [dostęp: 20.02.2026].
- [9] Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. ws. rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH), <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1907/oj>
- [10] BDO, <https://www.biznes.gov.pl/pl/portal/00273>

RECYCLING OF CONSTRUCTION WASTE AS AN ELEMENT OF DIVERSIFICATION OF THE RAW MATERIAL BASE FOR AGGREGATE PRODUCTION

Aggregates are a fundamental construction product, a raw material without which no construction project can be implemented. The minerals used to produce them are a non-renewable resource, meaning the existing resource base must last for many years to come. Therefore, diversifying the material base for aggregate production is particularly important. The use of recycled aggregates, although they carry many limitations, is becoming increasingly common in European Union countries. In Poland, this is not yet a widespread phenomenon, especially considering the legal issues related to waste management. Despite numerous challenges, producers are increasingly choosing to include aggregates from demolition and the removal of previously existing infrastructure in their offerings. This paper examines waste from group 17 (waste from the construction, renovation, and dismantling of buildings) as a potential alternative source for aggregate production.

Jerzy MALEWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

EFEKTYWNOŚĆ SEPARACJI MIESZANIN WIELOSKŁADNIKOWYCH

Pojęcie separacji (segregacji) użyte jest tu jako operacja rozdziału składników wcześniej połączonych w postaci agregatu. Kruszywa naturalne, rudy polimetaliczne, odpady gospodarcze to typowe przykłady agregatów, które są przedmiotem eksploatacji dla pozyskania z nich użytecznych składników. Żadne dobro w naturze nie występuje w czystej postaci, czyli jest ono skażone obecnością innego lub więcej składników agregatu. Uzysk czystego składnika w produkcie rozdziału jest miarą sprawności jego ekstrakcji. Z reguły odbywa się to w szeregu następujących po sobie operacjach rozdziału, poczynając od składnika najłatwiej (najmniej kosztownie) separującego, do najtrudniejszych. Przedmiotem tego artykułu jest pokazanie na przykładach problemu oceny efektywności takiej makrooperacji i ewentualnego wykorzystania tej informacji jako kryterium optymalizacji procesów rozdziału składników agregatu dowolnej natury.

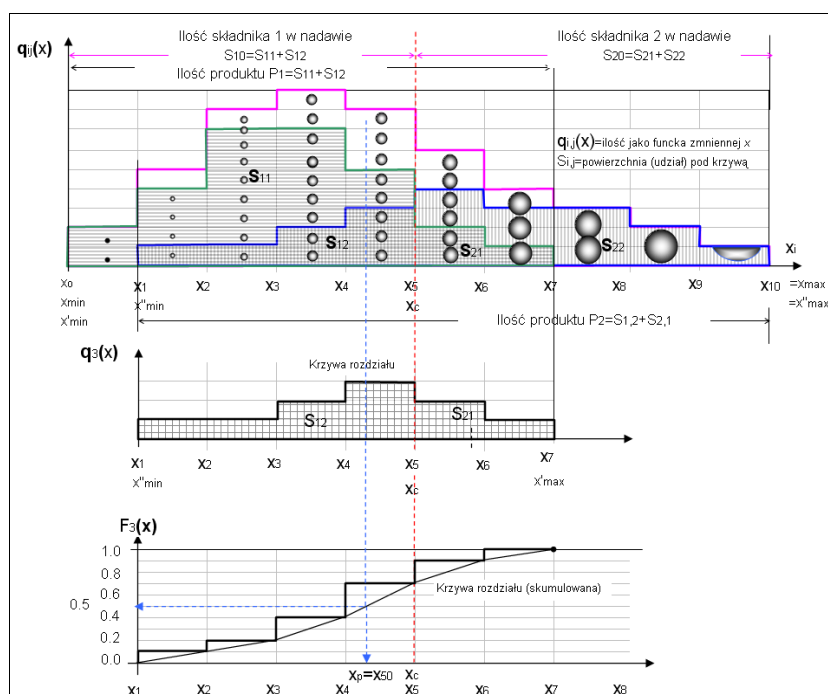
1. TECHNOLOGIA ROZDZIAŁU

Technologia rozdziału polega na wykorzystaniu w procesie rozdziału pewnych cech fizycznych lub geometrycznych (morfologicznych) rozdzielanych składników. I tak, jeśli kryterium rozdziału jest wymiar cząstek, to mówimy o *klasyfikacji* ziarnowej; jeśli gęstość, to mamy do czynienia ze wzbogacaniem *grawitacyjnym*; jeśli właściwość elektryczna (zdolność do gromadzenia ładunków elektrycznych) – ze wzbogacaniem *elektrycznym*; zdolność/niezdolność magnesowania – ze wzbogacaniem *magnetycznym*; niepodatność na zwilżanie (hydrofobowość) – ze wzbogacaniem *flotacyjnym* i inne, w tym także kształt lub kolor cząstek poszczególnych składników. Efektywność procesów rozdziału jest tym większa, im większa jest różnica fizycznych cech rozdzielanych składników.

Teorie rozdziału najlepiej wyjaśniać na przykładzie klasyfikacji (frakcjonowania), ponieważ w tym wypadku mamy do czynienia z jednym czynnikiem różnicującym poszczególne składniki – jest to wymiar ziarn. Klasyfikacja jest procesem separacji związana z pojęciem *klasy ziarnowej*. Jest więc operacją rozdzielania zbioru ziaren według ich wielkości. Wyróżnione w nadawie klasy ziarnowe (lub grupy klas) nazywamy *skład-*

nikami nadawy, a klasy ziarnowe uzyskane w wyniku operacji klasyfikacji – *produktami* klasyfikacji.

Aby wydzielić z nadawy m -frakcji ziarnowych do $n = m + 1$ produktów klasyfikacji musimy ten proces przeprowadzić w m pojedynczych operacjach rozdziału/klasyfikacji. Operacje te nie są perfekcyjne, więc produkty rozdziału są mieszaninami różnych składników w różnych proporcjach. Problem ten zilustrowano w tab. 1 i na rys. 1.



Rys. 1. Wynik rozdziału mieszaniny dwóch składników S_{ij} na dwa produkty P_j ($i, j = 1, 2$) według kryterium wielkości x_c : nadawa – linia czerwona, produkt 1 – zielona (kreska pozioma), produkt 2 – niebieska (kreska pionowa); wykres górny – struktura ziarnowa nadawy i produktów; wykresy dolne – krzywa rozdziału: przekrój zbiorów obu produktów ($q_3(x)$, na dole funkcja skumulowana $F_3(x)$)

Fig. 1. Result of the separation of a mixture of two components S_{ij} into two products P_j ($i, j = 1, 2$) according to the size criterion x_c : feed – red line, product 1 – green (horizontal line), product 2 – blue (vertical line); upper chart – grain structure of the feed and products; lower charts – separation curve: cross-section of both product sets ($q_3(x)$, below the cumulative function $F_3(x)$)

Wielkość x_c w operacji klasyfikacji jest w jakiś sposób kontrolowana i sterowana, więc można ją nazwać *parametrem* operacji, a x_p – *kryterium klasyfikacji*. Realne procesy klasyfikacji nie są perfekcyjne, więc jeden lub oba produkty będą zanieczyszczone ziarnami nieodpowiednimi dla danych klas ziarnowych. Stopień zanieczyszczenia produktów będzie zależny od sprawności operacji i może być sterowany m.in. parametrem x_c .

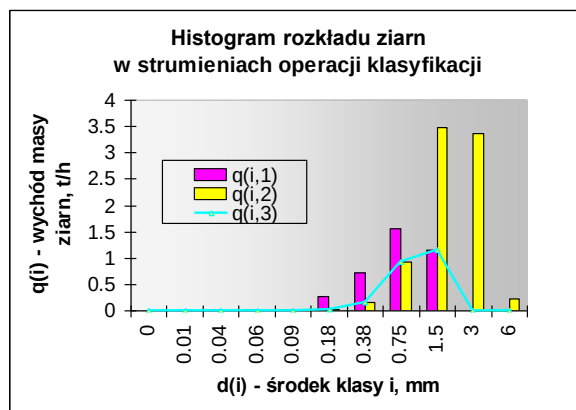
W dalszym ciągu, w przypadku podziału zakresu wymiarów ziarn $d \in [0, d_{\max}]$ na m klas ziarnowych, funkcje nieciągłe (wychody) składu ziarnowego $q_i(d_i)$, $F_j(d_i)$, $\varepsilon_j(d_i)$ etc. zapisywane będą w wygodniejszej formie jako: $q(i, j)$, $F(i, j)$, $\varepsilon(i, j)$, a nawet ε_{ij} , gdzie argumentami są numery klas oraz numery produktów operacji rozdziału.

2. PRZYKŁAD 1. KLASYFIKACJA ZIARN NA DWA PRODUKTY

W hydrocyklonie klasyfikowany jest strumień nadawy o uziarnieniu $F(i, 0)$ i natężeniu Q , t/h. Kontrolowanym parametrem rozdziału jest wielkość d_c . W wyniku operacji rozdziału powstają produkty ziarn drobnych (przelew) i grubych (wylew). Sprawność rozdziału określona jest funkcją $\varepsilon(d)$. Efekt klasyfikacji przedstawiono w tab. 1.

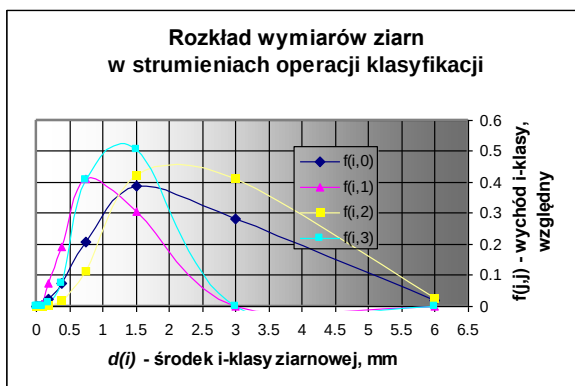
Tabela 1. Nadawa i wyniki klasyfikacji. Wymiary d w mm, masy $q(i, j)$ w kg
Table 1. Feed and classification results. Dimensions d in mm, masses $q(i, j)$ in kg

0	i	$d(i-1)$	$d(i)$	$d_{sr}(i)$	$F(i,0)$	$q(i,0)$	$q(i,1)$	$q(i,2)$	$q(i,3)$
Składnik 1	0	$-\infty$	0		0				
	1	0	0.025	0.0125	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000
	2	0.025	0.05	0.0375	0.001	0.012	0.012	0.000	0.000
	3	0.05	0.075	0.0625	0.003	0.020	0.019	0.001	0.001
	4	0.075	0.1	0.0875	0.005	0.027	0.026	0.001	0.001
	5	0.1	0.25	0.175	0.030	0.301	0.275	0.026	0.026
	6	0.25	0.5	0.375	0.105	0.895	0.727	0.168	0.168
Składnik 2	7	0.5	1	0.75	0.313	2.494	1.559	0.935	0.935
	8	1	2	1.5	0.700	4.643	1.161	3.482	1.161
	9	2	4	3	0.980	3.370	0.000	3.370	0.000
	10	4	8	6	1.000	0.234	0.000	0.234	0.000
suma q						12.000	3.783	8.217	2.2921



Rys. 2. Histogram rozkładu produktów klasyfikacji, przy kryterium rozdziału $d_c \approx d_p \approx 1$ mm

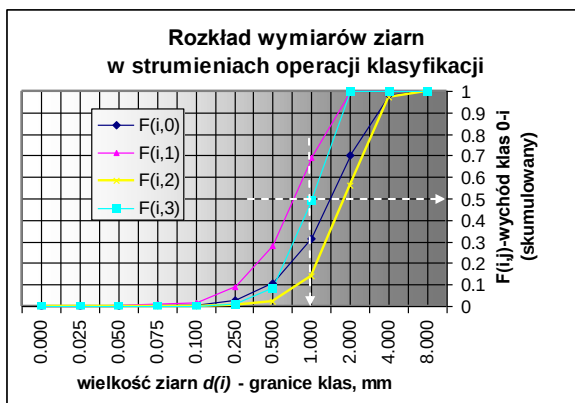
Fig. 2. Histogram of the distribution of classification products, for the separation criterion $d_c \approx d_p \approx 1$ mm



Rys. 3. Funkcje gęstości $f(i, j)$ rozkładu wymiarów ziarn: nadawy $f(i, 0)$, produktów klasyfikacji $f(i, 1-2)$ i krzywej rozdziału $f(i, 3)$, przy zadanym $d_c \approx d_p \approx 1$ mm

Fig. 3. Density functions $f(i, j)$ of grain size distribution: feed $f(i, 0)$, classification products $f(i, 1-2)$, and separation curve $f(i, 3)$, for a given $d_c \approx d_p \approx 1$ mm

Na rysunkach 2–4 pokazano liczbowy przykład typowej operacji klasyfikacji w hydrocyklonie. Nadawą jest zbiór ziarn od 0 do 8 mm o strukturze jak w tab. 1. Kryterium rozdziału jest wielkość kontrolna d_c równa 1 mm. Zatem składnikami nadawy są dwie klasy: 1) ziarn drobnych $[0-d_c]$ i 2) ziarn grubych $[d_c-d_{\max}]$. W wyniku tej operacji otrzymano dwa produkty o znacznie większym (niż jest to pożądané) rozstępie wymiarów ziarn: 1) $\{d\}_1 \subset [0-d'_{\max} > d_c]$ i 2) $\{d\}_2 \subset [0-d_{\max}]$. Przekrój zbiorów obu produktów klasyfikacji tworzy pewien nowy (wirtualny) zbiór oznaczony numerem 3, jest to *zbiór rozmyty* ziarn klasy $\{d\}_3 \subset [d'_{\min}-d'_{\max}]$, utworzony z elementów o mniej-



Rys. 4. Funkcje skumulowane $F(i, j)$ rozkładu wymiarów ziarn nadawy, produktów klasyfikacji i krzywej rozdziału odpowiadające danym na rys. 3

Fig. 4. Cumulative functions $F(i, j)$ of the grain size distribution of feed, classification products, and the separation curve corresponding to the data in Fig. 3

szej wartości z par elementów obu produktów rozdziału, tj. $\inf\{q(i, 1), q(i, 2)\}$. W tabeli 1 są to elementy z podświetlonego obszaru. Rozkład wielkości ziarn w trzecim podzbiorze nazywamy *krzywą rozdziału*. Ziarno 50-procentowe dla tej krzywej nazywane jest *ziarnem podziałowym* d_p (rys. 4).

Ziarno podziałowe określa się po wyniku klasyfikacji (*a posteriori*) jako ziarno 50% na krzywej rozdziału. Tymczasem parametr kontrolowany d_c klasyfikacji jest wielkością zadaną *a priori* i może się znacznie różnić od ziarna podziałowego (tak jak to ma miejsce w przypadku przesiewania). Na rysunku 4 wartość tę wyznacza na osi odciętych d linia przerywana. Nie jest to, jak się często uważa, wartość odpowiadająca maksimum wartości funkcji gęstości rozdziału $f_3(d)$ pokazanej na rys. 1 lub 2.

3. UZYSK I SPRAWNOŚĆ OGÓLNA OPERACJI ROZDZIAŁU

Rozpatrzmy najpierw przypadek pojedynczej operacji klasyfikacji na sicie, w cyklonie lub innych tego typu urządzeniach. Strumień nadawy który oznaczmy numerem 0 jest mieszaniną dwóch składników: 1 – ziarn drobnych i 2 – ziarn grubych w ilościach bezwzględnych $q_{10} : q_{20}$ i względnych $\lambda_{10} : \lambda_{20}$. W wyniku klasyfikacji otrzymano 2 produkty: 1 – ziarn drobnych i 2 – ziarn grubych w ilościach bezwzględnych P_j , w których w każdym z nich znajdują się dwa składniki w ilościach względnych λ_{ij} . W takim razie uzysk względny składnika i w produkcie j wyniesie

$$\varepsilon_{ij} = \frac{q_{ij}}{q_{i0}} = \frac{\lambda_{ij}P_j}{\lambda_{i0}Q_0} = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{i0}}\gamma_j. \quad (1)$$

Równania bilansu mas procesu rozdziału są następujące:

$$\begin{aligned} \lambda_{11}P_1 + \lambda_{12}P_2 &= \lambda_{10}Q_0, \\ \lambda_{21}P_1 + \lambda_{22}P_2 &= \lambda_{20}Q_0 \end{aligned} \quad (2)$$

lub po podzieleniu stron tych równań przez $\lambda_{10}Q_0$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} &= 1, \\ \varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Gdy nie interesuje nas ocena uzysku konkretnego składnika, lecz sprawność całości separacji miarą efektywności rozdziału dwu składników będzie wyznacznik macierzy

$$E = \det \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} = \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{22} - \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{12} = \frac{\beta - \alpha}{\alpha(1 - \alpha)} \cdot \frac{\alpha - \vartheta}{\beta - \vartheta}, \quad (4)$$

gdzie po prawej stronie tego wyrażenia pokazujemy ten wynik i zapis w popularnej formie stosowanej w przeróbce kopalin; *alfa*, *beta*, *theta* są odpowiednikami λ_{10} , λ_{11} , λ_{12} . Koncentracje (udziały) składników w produktach rozdziału są oznaczane na drodze eksperymentu. Wielkości γ_j mogą być obliczone rozwiązując układ równań liniowych (2) jeśli zadana jest struktura udziałów α_i składników w nadawie.

4. PRZYKŁAD 2 DLA POJEDYNCZEJ OPERACJI KLASYFIKACJI

Do ilustracji tego zagadnienia weźmy dane z tabeli 1, dla których rozkłady uziarnienia (funkcje skumulowane), będą jak w tab. 2 i na rys. 4. Ziarna w nadawie poniżej wielkości d_c stanowią składnik 1 (przelew, ziarna drobne), który jest sumą klas od 1 do 7, a składnik ziarn grubych – sumą klas od 8 do 10. Granicę klas rozdzielanych podzbiorów wyznacza ziarno kontrolne d_p , które w danym wypadku wynosi 1,0 mm.

Tabela 2. Wychody produktów $\gamma(j) = P(j)/Q$ i wartości liczbowe funkcji składu ziarnowego $F(i, j)$ opisujące wynik klasyfikacji

Table 2. Product yields $\gamma(j) = P(j)/Q$ and numerical values of the grain composition functions $F(i, j)$ describing the classification result

i	$\gamma(j):$ d(i)	1	0.3152	0.6848
		$F(i, 0)$	$F(i, 1)$	$F(i, 2)$
0	0	0	0	0
1	0.025	0.000	0.001	0.000
2	0.05	0.001	0.004	0.000
3	0.075	0.003	0.009	0.000
4	0.1	0.005	0.016	0.000
5	0.25	0.030	0.089	0.003
6	0.5	0.105	0.281	0.024
7	1	0.313	0.693	0.138
8	2	0.700	1.000	0.561
9	4	0.980	1.000	0.971
10	8	1.000	1.000	1.000

Z tabeli odczytujemy dane liczbowe $\alpha(7) = \lambda_{10}$, $\beta(7, j) = \lambda_{11}$ i $\gamma(j)$, zapisane w formie macierzowej:

$$\begin{matrix} \mathbf{B} & \mathbf{\Gamma} & \mathbf{A} \\ \begin{pmatrix} 0,693 & 0,138 \\ 0,307 & 0,862 \end{pmatrix} & \times & \begin{pmatrix} 0,315 \\ 0,685 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,313 \\ 0,687 \end{pmatrix}. \end{matrix}$$

Sprawność wydzielenia i -tego składnika do j -tego produktu wynosi:

$\varepsilon(i, j)$	1	2
1	0,6985	0,3015,
2	0,1407	0,8593

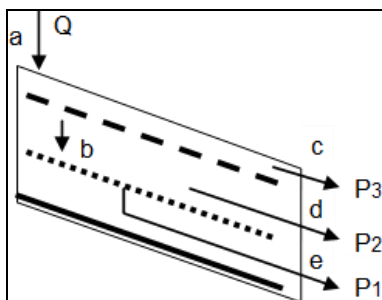
a stąd sprawność ogólna rozdziału jest wyznacznikiem tej macierzy:

$$E = \det|\varepsilon(i, j)| = 0,6985 \times 0,8593 - 0,3015 \times 0,1407 = 0,558.$$

5. UKŁADY OPERACJI

Równania (2) bilansu mas mogą być rozszerzone na kompleks (układ) operacji rozdziału realizowanej w kolejnych operacjach cząstkowych. Ilustrację tego problemu przedstawimy na przykładach operacji: przesiewania na przesiewaczu dwupokładowym, przesiewania laboratoryjnego (tzw. analizy sitowej), ale może być uogólniony na zagadnienia podobne jak np. segregację odpadów, a nawet tak odległe jak podziały społeczne wokół problemu modelu ustroju.

6. PRZYKŁAD 3. OPERACJA PRZESIEWANIA W PRZESIEWACZU 2-POKŁADOWYM



Rys. 5. Schemat i oznaczenia strumieni w przesiewaczu 2-pokładowym
Fig. 5. Diagram and stream designations in the two-deck screener

Niech nadawa i wyniki przesiewania na przesiewaczu 2-pokładowym będą jak w tab. 3. W celu uniknięcia pomyłek w oznaczeniach strumieni i produktów przesiewania strumienie w tym układzie sit oznaczone są literami a, b, c, d, e, a klasy ziarnowe, składniki

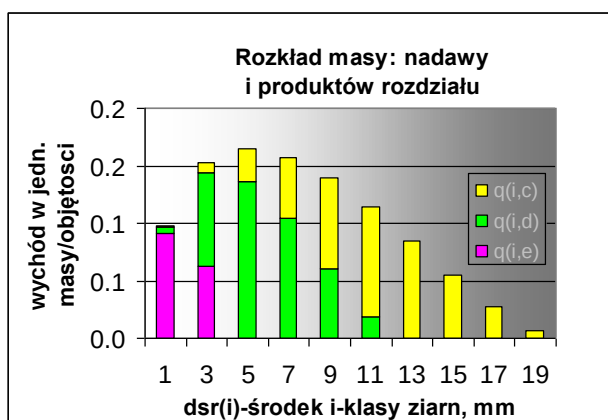
nadawy i produkty przesiewania – numerami 1, 2, 3 w kierunku od ziarn drobnych do grubych. Klasy ziarnowe przynależne do poszczególnych składników i odpowiadającym im produktom przesiewania oznaczono kolorami.

Sposób obliczeń jest tu podobny do omówionych wyżej obliczeń pojedynczych operacji klasyfikacji; w tym wypadku rozdziału 3 składników na 3 produkty. Ten przykład jest o tyle interesujący, że pokazuje metodologię obliczania efektywności układów operacji jako kompleksu makrooperacji, które są powszechnie występujące w praktyce.

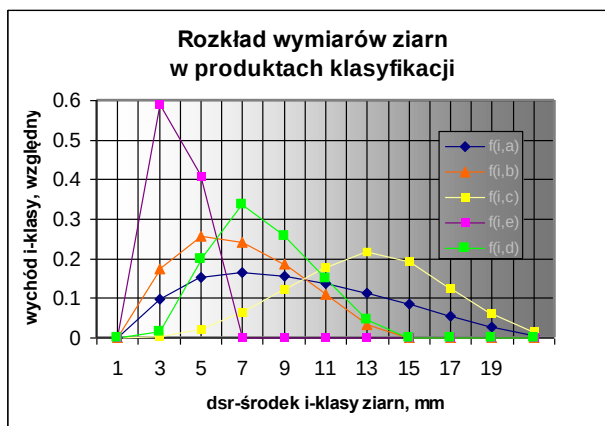
Tabela 3. Wyniki przesiewania dla zadanych wielkości oczek sit:
górnego $d_a = 4$ mm i dolnego $d_e = 12$ mm oraz zadanego składu ziarnowego nadawy $F(i, a)$,
ilości nadawy $Q = 1$, funkcji sprawności przesiewania (uzysków) $\varepsilon(i, b)$ i $\varepsilon(i, e)$

Table 3. Screening results for given mesh sizes: upper $d_a = 4$ mm
and lower $d_e = 12$ mm, as well as the given feed particle size distribution $F(i, a)$,
feed quantity $Q = 1$, screening efficiency functions (yields) $\varepsilon(i, b)$ and $\varepsilon(i, e)$

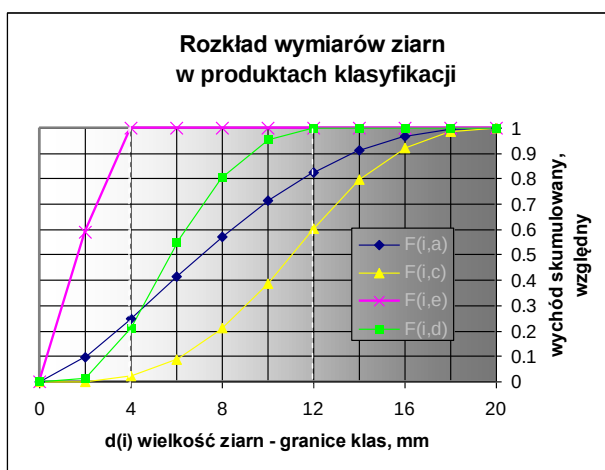
i	d(i-1)	d(i)	dsr(i)	F(i,a)	q(i,a)	$\varepsilon(i,b)$	q(i,b)	q(i,c)	$\varepsilon(i,e)$	q(i,d)	q(i,e)
S ₁	0	—∞	0	0	0		0	0		0	0
	1	0	2	1	0.0979	0.0979	0.993	0.097	0.001	0.938	0.006
	2	2	4	3	0.251	0.1531	0.938	0.144	0.010	0.438	0.081
S ₂	3	4	6	5	0.4157	0.1647	0.826	0.136	0.029	0.000	0.136
	4	6	8	7	0.5731	0.1574	0.660	0.104	0.054	0.000	0.104
	5	8	10	9	0.7122	0.1391	0.438	0.061	0.078	0.000	0.061
	6	10	12	11	0.8261	0.1139	0.160	0.018	0.096	0.000	0.018
S ₃	7	12	14	13	0.9111	0.085	0.000	0.000	0.085	0.000	0.000
	8	14	16	15	0.9663	0.0552	0.000	0.000	0.055	0.000	0.000
	9	16	18	17	0.9938	0.0275	0.000	0.000	0.028	0.000	0.000
	10	18	20	19	1	0.0062	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000
suma:=					1.000		0.560	0.440		0.406	0.154
					Q		P ₃			P ₂	P ₁



Rys. 6. Histogram struktury uziarnienia w strumieniach operacji przesiewania
Fig. 6. Histogram of the particle size distribution in the screening operation streams



Rys. 7. Rozkłady $f(i, x)$ w strumieniach $x = a - d$ operacji przesiewania
 Fig. 7. Distributions $f(i, x)$ in streams $x = a - d$ of the screening operation



Rys. 8. Rozkłady $F(i, x)$ strumieniach $x = a - d$ operacji przesiewania
 Fig. 8. Distributions $F(i, x)$ in streams $x = a - d$ of the screening operation

Stosując metodologię obliczeń i tabelaryczny sposób prezentowania wyników jak w poprzednich przykładach, otrzymamy wynik jak w tab. 4.

Z obliczeń tych wynika wniosek, że produkt 3 zawiera składnik 3 w całości (ziarna grube $d \geq d_a$), ale jednocześnie jest zanieczyszczony ziarnami klasy środkowej i dolnej w znacznych ilościach. Podobnie jest z produktem 2. Ogólnie, sprawność rozdzału całego układu wynosi 34%. Przykład ten pokazuje złożoność procesu optymalizacji takich układów w celu maksymalizacji efektu rozdzału zależnego od struktury uziarnienia produktów rozdzału.

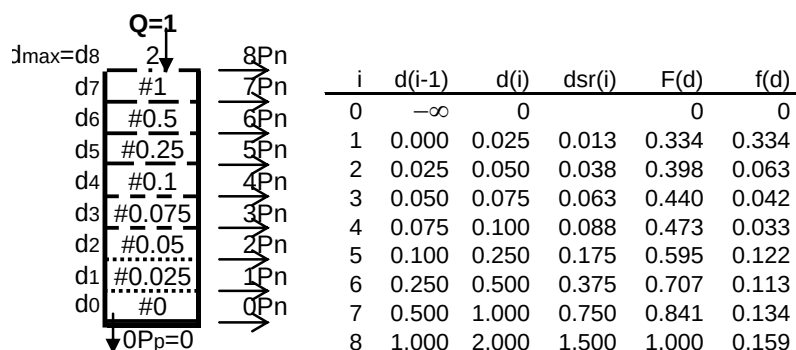
Tabela 4. Struktura składników i produktów oraz wynik separacji
Table 4. Structure of components and products and result of calculation

$q(i,j)$	P1	P2	P3	$\alpha(i)$	$\beta(i,j)$	P1	P2	P3	$\gamma(j)$	$\alpha(i)$
S1	0.154	0.087	0.010	0.251	S1	1.000	0.214	0.023	0.154	0.251
S2	0.000	0.319	0.256	0.575	S2	0	0.786	0.582	0.406	0.575
S3	0.000	0.000	0.174	0.174	S3	0	0.000	0.395	0.440	0.174
sumaP	0.154	0.406	0.440	1.000	suma β	1	1	1	1.000	1.000
$\gamma(j)$	0.1539	0.4058	0.440	1						
$\varepsilon(i,j)$	P1	P2	P3	suma ε						
S1	0.6132	0.3459	0.0408	1						
S2	0	0.5547	0.4453	1						
S3	0	0	1	1						

$$\det|\varepsilon(i,j)| = 0.340$$

7. PRZYKŁAD 4. LABORATORYJNA ANALIZA ZIARNOWA

Analizy sitowe są podstawowym badaniem jakości granulowanych materiałów, a zestawy sit laboratoryjnych są elementarnym wyposażeniem wszelkich laboratoriów. Analizy te wykonywane są wg odpowiednich procedur, gdzie kontrolowanym parametrem jest czas przesiewania. Na ogół nie zdajemy sobie sprawy z tego, jak bardzo wyniki tych testów mogą być zniekształcone, albo nieporównywalne, jeśli wykonane będą niestandardowo, albo pochodzić będą z różnych laboratoriów. Pokażemy to na przykładzie przesiewania jednostkowej próbki ziarn od 0 do 2 mm na zestawie sit jak na rys. 9. Do eksperymentu przyjęto, że rzeczywisty rozkład wymiarów ziarn w tych granicach jest równomierny, tj. każda klasa ma jednakowy udział w całości. Następnym założeniem jest zależność sprawności przesiewania od względnej wielkości ziarn $x = d/\#d$ oraz od czasu przesiewania.



Rys. 9. Zestaw sit laboratoryjnych, model przesiewania i dane użyte do obliczeń
Fig. 9. Set of laboratory sieves, screening model, and data used for calculations

Tabela 5. Wynik przesiewania w postaci struktury uziarnienia produktów nadsitowych (Pn), np. 1Pn oznacza pozostałość na sicie nr 1 zgodnie z oznaczeniem jak na rys. 9.

Wartości liczbowe są ilościami $q(i, j)$. Ilość próbki Q_0 wynosi 1, a czas przesiewania 2 jednostki czasowe

(w modelu matematycznym sprawności przesiewania)

Table 5. Screening results in the form of particle size distribution of oversize products (Pn).

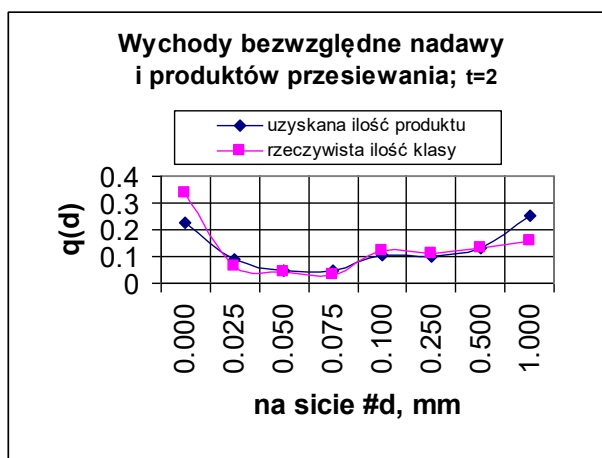
For example, 1Pn denotes the residue on sieve no. 1 according to the designation in Fig. 9.

Numerical values represent quantities $q(i, j)$. The sample quantity Q_0 is 1, and the screening time is 2 time units

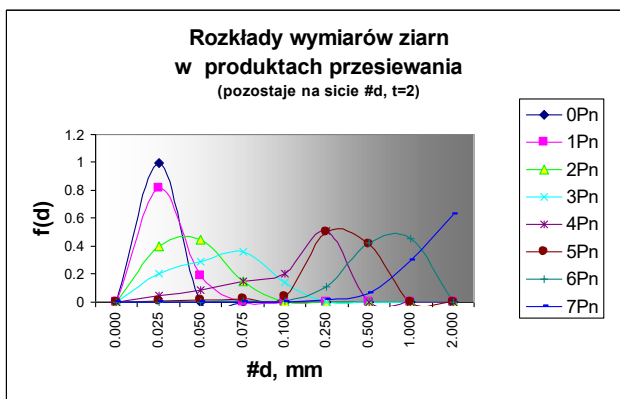
(in the mathematical model of screening efficiency)

i	#d	0Pn	1Pn	2Pn	3Pn	4Pn	5Pn	6Pn	7Pn	8Pn	suma
0	0	0.334	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.334
1	0.025	0.000	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063
2	0.05	0.000	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
3	0.075	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033
4	0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122
5	0.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.113	0.000	0.000	0.000	0.113
6	0.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.134	0.000	0.000	0.134
7	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.159	0.000	0.159
8	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
suma:		0.334	0.063	0.042	0.033	0.122	0.113	0.134	0.159	0.000	1.000

W tabeli 5 przedstawiono wyniki hipotetycznego przesiewania, a obliczone sprawności wydzielenia i -tego składnika (klasy) do j -tego produktu w tab. 6. Jeśli zestawimy strukturę uziarnienia przed i po eksperymencie jak na rys. 10, to wydawać by się mogło, że oba zbiory są bardzo zbliżone do siebie. Ale dopiero na rys. 11 widzimy jak nieostry jest podział w produktach przesiewania.



Rys. 10. Rzeczywisty i uzyskany skład ilościowy przesiewania
Fig. 10. Actual and obtained quantitative composition of screening



Rys. 11. Rozkłady wymiarów ziarn w produktach przesiewania
Fig. 11. Grain size distributions in screening products

Tabela 6. Uzyski $\alpha(i, j)$ i-tej klasy w j-tym produkcie.

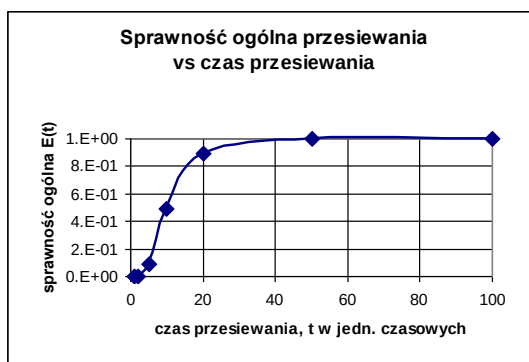
Wartości na głównej przekątnej oznaczają ilości (udziały) właściwej klasy w swoim produkcie.

Czas przesiewania – 2 jednostki czasowe

Table 6. Yields $\alpha(i, j)$ of class i in product j .

Values on the main diagonal indicate the quantities (shares) of the respective class in its product.
Screening time – 2 time units

Klas ziarn \ nr produktu			Eps(i,j)								sumaEps
1	0	0.025	0.671	0.224	0.060	0.027	0.016	0.002	0.001	0.000	1
2	0.025	0.05	0.000	0.274	0.352	0.209	0.136	0.022	0.006	0.001	1
3	0.05	0.075	0.000	0.000	0.171	0.389	0.359	0.061	0.016	0.004	1
4	0.075	0.1	0.000	0.000	0.000	0.198	0.646	0.118	0.030	0.008	1
5	0.1	0.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.434	0.417	0.119	0.031	1
6	0.25	0.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.376	0.483	0.141	1
7	0.5	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.438	0.563	1
8	1	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1



Rys. 12. Dokładność analizy sitowej mierzona sprawnością ogólną zależną od czasu przesiewania
Fig. 12. Accuracy of sieve analysis measured by overall efficiency depending on screening time

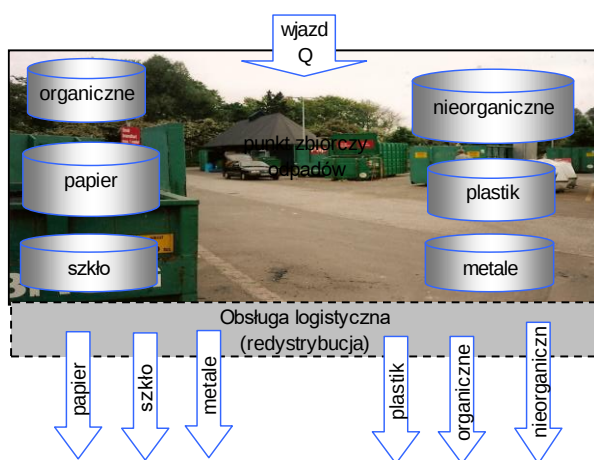
W tabeli 6 przedstawiono rozkład sprawności ekstrakcji i -tego składnika nadawy do j -tego produktu przesiewania. Te sprawności, a więc i rozkład uziarnienia, będą zależne od czasu przesiewania. Jak się zmienia jakość testu od czasu przesiewania, mierzona sprawnością ogólną, pokazano na rys. 12.

8. PRZYKŁAD 5. SEGREGACJA ODPADÓW DOMOWYCH

Kolejnym przykładem jest analiza sprawności systemu segregacji odpadów komunalnych *u źródła*, polegającego na umożliwieniu mieszkańcom przyjęcia odpadów samodzielnie segregowanych (rys. 13). Dla celów tego przykładu wyróżniono następujące rodzaje (składniki) odpadów: papier, szkło, plastik, metale, substancje organiczne i pozostałe, w tym mineralne (nieorganiczne). Problemem przyjmującego jest zagospodarowanie przyjmowanych odpadów i ustalenie ceny za ich obsługę, co wiąże się z kontrolą ich jakości (składu), ilości oraz organizacją transportu do dalszej przeróbki.

Zakładając, że klienci samodzielnie rozdzielają przywożone odpady, a kontrolę ich składu prowadzi się losowo i okresowo i strukturę odpadów dowożonych (wartości $\alpha(i)$), i tych, w oznaczonych pojemnikach (wartości $\beta(i, j)$) jak w tab. 7, to celem jest obliczenie sprawności systemu segregacji i ilości powstałych produktów rozdziału.

Zadanie to nie różni się od poprzednich co do metodologii obliczeń przedstawionej w podrozdziałach i sprowadza się do rozwiązywania układu równań liniowych. Jednakże w tym wypadku przyjęto schemat okresowej kontroli jakości sortowania *u źródła*, aby oceniać i doskonalić system ekonomii, segregacji i logistyki odpadów domowych. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w kolejnych odsłonach macierzy danych.



Rys. 13. Model punktu zbiórki odpadów (w tle tego typu obiekt w Kopenhadze)

Fig. 13. Model of a waste collection point (in the background, this type of facility in Copenhagen)

Tabela 7. Wynik oznaczenia wychodów $\beta(i, j)$ i układ równań liniowych zapisany w formie macierzowej: $\mathbf{B} \cdot \mathbf{P} = \alpha \cdot \mathbf{Q}$ i tabelarycznej; $\mathbf{B}$ jest znane, $\mathbf{P}$ – do ustalenia

Table 7. Result of yield determination $\beta(i, j)$ and the system of linear equations written in matrix form: $\mathbf{B} \cdot \mathbf{P} = \alpha \cdot \mathbf{Q}$ and in tabular form; $\mathbf{B}$ is known, $\mathbf{P}$ – to be determined

$\mathbf{B} = \beta(i, j) $							$\mathbf{p} = p(j) $		$\alpha \cdot \mathbf{Q}$
	papier	szklo	metal	plastik	organ	norg	nieznane	zadane	
papier	0.700	0.020	0.000	0.100	0.150	0.070	p(1)	0.200	
szklo	0.000	0.820	0.010	0.050	0.020	0.120	p(2)	0.100	
metal	0.000	0.000	0.980	0.000	0.000	0.010	p(3)	0.050	
plastik	0.150	0.100	0.000	0.700	0.080	0.020	p(4)	0.100	
organ	0.100	0.050	0.010	0.100	0.600	0.130	p(5)	0.250	
norg	0.050	0.010	0.000	0.050	0.150	0.650	p(6)	0.300	
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	

Wektor $\alpha = |\alpha(i)|$ reprezentuje strukturę odpadów przed segregacją (mieszaninę składników). Może to być informacja statystyczna uzyskana w określonym czasie i miejscu dla konkretnej populacji mieszkańców. Macierz $\mathbf{B} = |\beta(i, j)|$ jest strukturą odpadów w produktach segregacji (jako wynik odpowiednich badań kontrolnych). Zadane wielkości i obliczenia jak niżej. Zauważmy, że gdy $Q = 1$, wtedy $q(i) = \alpha(i)$ oraz $p(j) = \gamma(j)$.

Stąd $\mathbf{P} = \text{inv}\mathbf{B} \cdot \alpha$, a macierz sprawności $\mathbf{E} = (\mathbf{B}/\alpha) \cdot (\mathbf{P}/Q)$; jeśli $Q = 1$ – tab. 8 i 9.

Tabela 8. Odwrócenie macierzy $\mathbf{B}$ w celu wykonania operacji dzielenia macierzy $\mathbf{B}/\alpha$

Table 8. Inversion of matrix $\mathbf{B}$ to perform matrix division operation $\mathbf{B}/\alpha$

$\text{inv}\mathbf{B}$							α		$\mathbf{p}$
	papier	szklo	metal	plastik	organ	norg	zadane	obliczone	
papier	1.518	0.004	0.003	-0.163	-0.335	-0.092	0.200	0.176	
szklo	0.031	1.230	-0.013	-0.078	0.020	-0.232	0.100	0.056	
metal	0.000	0.000	1.020	0.001	0.004	-0.017	0.050	0.047	
plastik	-0.306	-0.168	0.003	1.500	-0.129	0.044	0.100	0.053	
organ	-0.194	-0.078	-0.018	-0.204	1.826	-0.323	0.250	0.292	
norg	-0.049	0.012	0.004	-0.054	-0.386	1.620	0.300	0.376	
							1.000	1.000	

Tabela 9. Wynik dzielenia macierzy $\mathbf{B}/\alpha$

Table 9. Result of matrix division $\mathbf{B}/\alpha$

$\mathbf{C} = \mathbf{B}/\alpha = \text{inv}\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$						
	papier	szklo	metal	plastik	organ	norg
papier	3.500	0.100	0.000	0.500	0.750	0.350
szklo	0.000	8.200	0.100	0.500	0.200	1.200
metal	0.000	0.000	19.600	0.000	0.000	0.200
plastik	1.500	1.000	0.000	7.000	0.800	0.200
organ	0.400	0.200	0.040	0.400	2.400	0.520
norg	0.167	0.033	0.000	0.167	0.500	2.167

Tabela 10. Sprawności $\varepsilon(i, j)$ rozdziału
Table 10. Efficiencies $\varepsilon(i, j)$ of separation

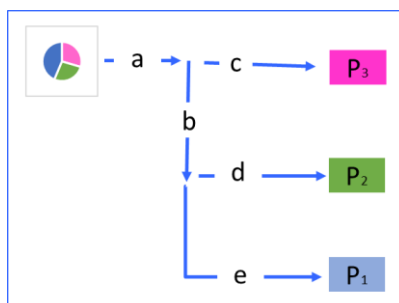
E=C*P							$\Sigma\varepsilon(i,j)$
	papier	szkło	metal	plastik	organ	norg	
papier	0.618	0.006	0.000	0.026	0.219	0.132	1.000
szkło	0.000	0.460	0.005	0.026	0.058	0.451	1.000
metal	0.000	0.000	0.925	0.000	0.000	0.075	1.000
plastik	0.265	0.056	0.000	0.371	0.233	0.075	1.000
organ	0.071	0.011	0.002	0.021	0.700	0.195	1.000
norg	0.029	0.002	0.000	0.009	0.146	0.814	1.000

Stąd sprawność ogólna $\det \mathbf{E} = 0.048$. Analizując dane widzimy, że choć obserwuje się dość wysokie uzyski określonych składników w odpowiadających im pojemnikach, to sprawność ogólna separacji wynosi zaledwie 4,8%.

Obliczone wartości $\mathbf{P} = |p(j)|$ umożliwiają zaprojektowanie harmonogramu odbiorów segregowanych materiałów. Sposób ten może też być użyty do zaprojektowania systemu kar i nagród za jakość/czystość przyjmowanych odpadów. Opisany przykład nie jest jednak ścisłym rozwiązaniem zadania z powodu niezależnego – jak przyjęto oraz szacunkowego związku estymacji wielkości macierzy $\mathbf{B}$ i $\boldsymbol{\alpha}$, stąd adaptacja metody do oceny wydajności produktów rozdziału wymaga ostrożności interpretacyjnej wyników w tym zakresie.

9. PRZYKŁAD 6. OCENA PROCESU WYBORCZEGO

Metody analizy sprawności separacji stosowane w technologiach surowcowych pokazane w przykładach 1÷5 mogą być równie dobrze wykorzystane do zastosowań w tak odległych dziedzinach jak np. badania społeczne, które z natury rzeczy mają charakter analiz statystycznych. Pokażemy to na przykładzie analizy hipotetycznego procesu wyborczego, który w istocie jest kopią analizy procesu rozdziału pokazanego w Przykładzie 3.



Rys. 14. Schemat przepływu głosów w przedmiocie głosowania

Fig. 14. Flow diagram of voting in the subject of voting

W przykładzie tym analizujemy problem oceny skuteczności prognozy wyniku wyborów opartej na badaniu przedwyborczym preferencji wyborców. Skorzystamy przy tym z modelu obliczeniowego z rys. 5, który jest wzorem i odpowiednikiem schematu przepływu danych, co zilustrowano na rys. 14. W tym przykładzie zakładamy podział próby generalnej na trzy podgrupy różniące się poglądami na stosunek do wartości konserwatywnych. Skala przekonań ustalona jest w granicach od 1 do 20 punktów. Po lewej stronie (kolor czerwony) są liberałowie, a po prawej konserwatyści (kolor niebieski). Grupa osób o niezdecydowanych poglądach oznaczona kolorem zielonym. Siła przekonania mierzona jest stopniem poparcia dla takich wartości w modelu ustrojowym. Arbitralnie ustalono podział tej skali na przedziały $W(i)$ tak jak to pokazano w tab. 11.

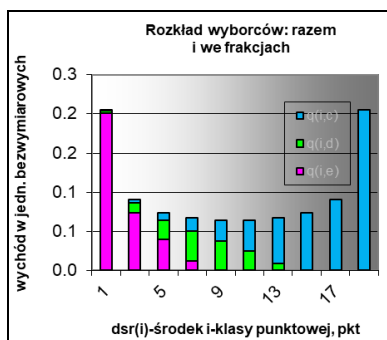
Tabela 11. Skala wartości i rozkłady preferencji społecznych przed i po doświadczeniu: $W(i)$ zakres punktowy wyróżnionych grup, $q(i, j)$ rozkład struktury wyborów przed i po doświadczeniu, $P(j)$ = sumy w granicach

$W(i)$ uzyskanego poparcia dla konserwatyizmu, wyrażone w reprezentacjach wyborczych $P(j)$

Table 11. The scale of values and distributions of social preferences before and after the experience.

$W(i)$ is the point range of distinguished groups, $q(i, j)$ – the distribution of choice structures before and after the experience, $P(j)$ = sums within $W(i)$ of the support obtained for the idea of conservatism, expressed in voter representations $P(j)$

Tablica rozkładów preferencji programowych										P ₃	P ₂	P ₁	
	i	d(i-1)	d(i)	dsr(i)	F(i,a)	q(i,a)	ε(i,b)	q(i,b)	q(i,c)	ε(i,e)	q(i,d)	q(i,e)	
W ₁	0	-∞	0	0	0	0		0	0		0	0	
	1	0	2	1	0.205	0.205	0.995	0.204	0.001	0.984	0.003	0.201	0.205
	2	2	4	3	0.295	0.09	0.954	0.086	0.004	0.859	0.012	0.074	0.090
W ₂	3	4	6	5	0.369	0.074	0.872	0.064	0.009	0.609	0.025	0.039	0.074
	4	6	8	7	0.436	0.067	0.750	0.050	0.017	0.234	0.038	0.012	0.067
	5	8	10	9	0.5	0.064	0.587	0.038	0.026	0.000	0.038	0.000	0.064
	6	10	12	11	0.564	0.064	0.383	0.025	0.040	0.000	0.025	0.000	0.064
W ₃	7	12	14	13	0.631	0.067	0.138	0.009	0.058	0.000	0.009	0.000	0.067
	8	14	16	15	0.705	0.074	0.000	0.000	0.074	0.000	0.000	0.000	0.074
	9	16	18	17	0.795	0.09	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	0.000	0.090
	10	18	20	19	1	0.205	0.000	0.000	0.205	0.000	0.000	0.000	0.205
suma:=					1.000			0.476	0.524		0.150	0.326	1.000



Rys. 15. Rozkład poparcia dla idei konserwatywnych w badanej społeczności
Fig. 15. Distribution of support for conservative ideas in the studied population

Table 12. The structure of declared and actual levels of support for the indicated social model

				
Deklaracje α	Struktura powyborcza β			
0 i\j	1 2 3			
29.5%	1	27.5%	1.5%	0.5%
26.9%	2	5.1%	12.6%	9.2%
43.6%	3	0.0%	0.9%	42.7%
Rezultat wyb.:		32.6%	15.0%	52.4%

Na rysunku 15 i w tab. 12 przedstawiono graficznie i liczbowo wynik i strukturę wyborów. Rozkłady pokazują rozkład poparcia dla konserwatyzmu w praktyce wyborczej w konfrontacji z deklarowanymi poglądami. W tabeli 13 z kolei podano tok obliczeń i końcowy rezultat w postaci wskaźnika (efektu) zróżnicowania i podziału politycznego badanej społeczności, które w tym wypadku wynosi 0,409 (40,9%).

Tabela 13. Szczegóły obliczenia wskaźnika rozdziału $E = \det |\varepsilon(i,j)|$
 Table 13. Details of the calculation of the separation index $E = \det |\varepsilon(i,j)|$

[illegible]

10. PODSUMOWANIE

Efektywność rozdziału ma cechę prawdopodobieństwa trafienia określonego przedmiotu do odpowiedniej przegrody zdefiniowanej w formie geometrycznej lub fizycznej i ma zastosowanie do opisu zjawisk ekstrakcji składników agregatu w toku szeregu operacji rozdziału. Efektywność rozdziału n składników agregatu w $m = n - 1$ operacjach ekstrakcji jest bardzo niewielka nawet gdy uzysk głównych składników w odpowied-

nich produktach jest wysoki. Sprawność ogólna może być podwyższana większym kosztem realizacji makro-operacji rozdziału. Dobrze to pokazuje laboratoryjne analizy sitowe, gdzie kosztem jest czas przesiewania.

Efektywność rozdziału może też służyć jako kryterium optymalizacji procesów separacji, wyrażonego w formie prawdopodobieństwa, lub wartości jednostki produktu rozdziału zależnej od stopnia czystości tego produktu.

Zagadnienie efektywności rozdziału stosowane w geotechnologii ma uniwersalnych charakter i może być w podobny sposób wykorzystane w analizach skutków podziału pewnego aglomeratu na części składowe, jeśli tylko możliwe będzie zidentyfikowanie czynnika separującego jako kryterium podziału.

EFFICIENCY OF THE MULTICOMPONENT MIXTURE SEPARATION

The concept of separation (segregation) is used here as an operation of dividing components that were previously combined in the form of an aggregate. Natural aggregates, polymetallic ores, and industrial waste are typical examples of aggregates that are exploited to obtain their useful components.

No resource in nature occurs in a pure form, meaning it is contaminated by the presence of one or more aggregate components. The yield of a pure component in the separation product is a measure of the efficiency of its extraction. As a rule, this is done through a series of successive separation operations, starting from the component that is easiest (least costly) to separate, to the most difficult.

The purpose of this article is to illustrate, through examples, the problem of assessing the efficiency of such a macro-operation and the potential use of this information as a criterion for optimizing separation processes. The issue of distribution efficiency used in geotechnology has a universal character and can be similarly applied in analyses of the effects of dividing a certain agglomerate into its component parts, as long as it is possible to identify the separating factor as a criterion for division.

Maksymilian OZDOBA
Anna NOWAK-SZPAK
Piotr BORTNOWSKI
Robert KRÓL

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

ZŁOŻA ANTROPOGENICZNE POGÓRNICZE JAKO ŹRÓDŁO KRUSZYW MINERALNYCH W GOSPODARCE CYRKULARNEJ – POTENCJAŁ GEOPOLIMERÓW I WODORU

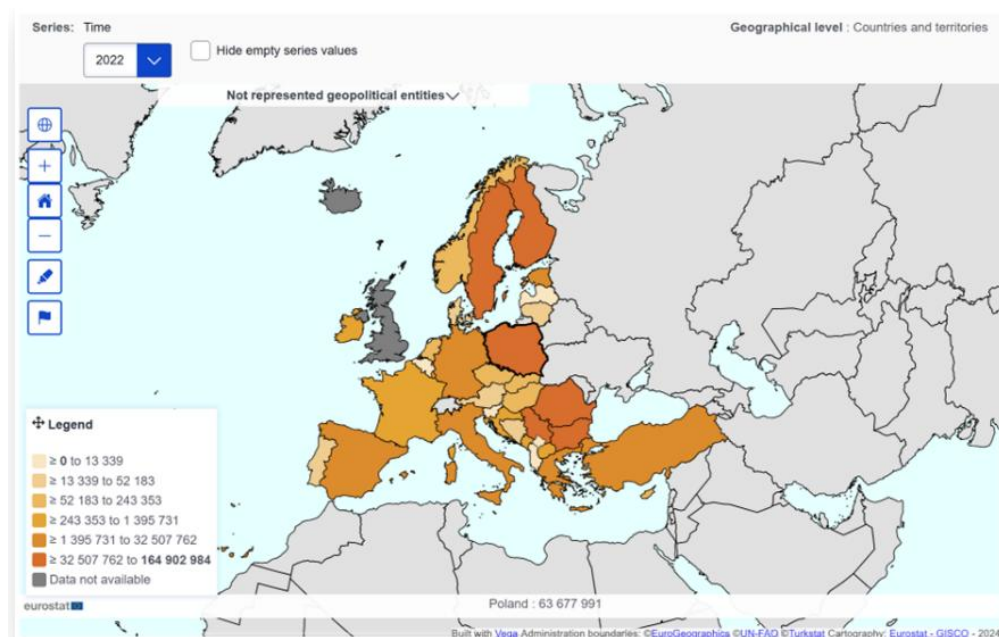
Złoża antropogeniczne pogórnice, stanowiące trwały element krajobrazu obszarów górniczych oraz efekt wieloletniej eksploatacji surowców, w tym węgla kamiennego, są dziś coraz częściej postrzegane nie tylko jako problem środowiskowy, lecz także jako potencjalne źródło kruszyw mineralnych i innych surowców wtórnych. W kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym pojawia się zatem potrzeba ponownego spojrzenia na te obiekty z perspektywy ich zagospodarowania oraz racjonalnego wykorzystania materiałowego. W artykule opisano dwie uzupełniające się ścieżki zagospodarowania materiału zalegającego w złożach antropogenicznych. Pierwsza dotyczy wykorzystania frakcji organicznych do wytwarzania wodoru z zastosowaniem znanych i sprawdzonych procesów termochemicznych, jak gazyfikacja, umożliwiających uzyskanie nośnika energii o wysokiej czystości i wpisujących się w aktualne kierunki transformacji energetycznej, przy jednoczesnym zagospodarowaniu materiału odpadowego. Druga obejmuje wykorzystanie frakcji mineralnych jako surowca do produkcji kruszyw oraz materiałów geopolimerowych, które w zależności od składu ziarnowego i chemicznego oraz właściwości fizykochemicznych, mogą znaleźć zastosowanie m.in. w budownictwie, stabilizacji i wzmacnianiu gruntów, a także jako materiały izolacyjne lub filtracyjne. Klamrą spinającą rozważania jest wskazanie mocnych i słabych stron cyrkularnych kierunków zagospodarowania tych złóż, identyfikacja związanych z nimi wyzwań i ograniczeń, a także nakreślenie perspektyw dalszego rozwoju oraz potencjału rynkowego produktów końcowych, w szczególności w odniesieniu do rynku kruszyw mineralnych.

1. WPROWADZENIE

Transformacja energetyczna oraz rosnące wymagania dotyczące ograniczenia emisji gazów cieplarnianych powodują wzrost zainteresowania technologiami i modelami gospodarowania zasobami, które umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie materiałów w całym cyklu życia produktu. W tym kontekście coraz większą rolę odgry-

wa gospodarka o obiegu zamkniętym, w której strumienie odpadowe oraz historycznie zdeponowane materiały traktowane są jako potencjalne zasoby możliwe do ponownego włączenia do obiegu gospodarczego [10].

Szczególnie istotne staje się to w sektorach surowcowych, gdzie obok eksploatacji złóż naturalnych istnieją liczne, skoncentrowane zasoby materiałowe wytworzone działalnością przemysłową, w tym górnictwem i przeróbką kopalin [6, 12]. Złoża antropogeniczne pogórnice, najczęściej w postaci hałd, zwałowisk oraz składowisk materiałów odpadowych, są trwałym elementem krajobrazu regionów górniczych i równocześnie stanowią istotne wyzwanie środowiskowe [12, 22]. Jednocześnie, w ujęciu surowcowym, mogą być traktowane jako wtórna baza zasobowa, której racjonalne zagospodarowanie pozwala ograniczać presję na złoża pierwotne, zmniejszać ilość materiału pozostającego w środowisku oraz wspierać rozwój rynków surowców wtórnych, w szczególności w obszarze kruszyw mineralnych i materiałów budowlanych [6, 10]. Skala materiałów związanych z działalnością górnictwem i wydobywczą w Unii Europejskiej pozostaje znacząca – dane Eurostatu (rys. 1).



Rys. 1. Ilość materiału powstającego w sektorze górnictwa i wydobywania surowców w krajach UE w 2022 r. (kategoria „Waste generation in kg”, działalność „Mining and quarrying”); opracowanie własne na podstawie danych Eurostat

Fig. 1. Amount of material generated in the mining and quarrying sector in EU countries in 2022 (category “Waste generation in kg”, activity: “Mining and quarrying”), based on Eurostat data

Materiał z hałd pogórnich jest zwykle niejednorodny pod względem uziarnienia, składu mineralnego oraz właściwości fizykochemicznych, co wynika zarówno z naturalnej zmienności litologicznej skał płonnych, jak i z historycznie stosowanych metod wydobywania oraz przeróbki [12, 22]. W praktyce jednak w wielu przypadkach można wyróżnić dwie funkcjonalnie odmienne części: frakcję mineralną oraz węglową [6]. Taki układ materiałowy jest istotny z perspektywy gospodarki cyrkularnej, ponieważ otwiera możliwość wielokierunkowego wykorzystania tego samego obiektu: frakcje mineralne mogą stanowić surowiec dla zastosowań materiałowych (m.in. kruszywa wtórne, komponenty do materiałów budowlanych), a frakcje węglowe potencjalną bazę dla zastosowań energetycznych, o ile zostaną spełnione wymagania jakościowe i środowiskowe [6, 22].

Równolegle do działań stricte materiałowych, w politykach transformacji energetycznej rośnie znaczenie wodoru jako nośnika energii i surowca procesowego, zwłaszcza w sektorach trudnych do bezpośredniej elektryfikacji [13, 14, 18]. Z perspektywy łańcuchów wartości w UE, wódór pozostaje obecnie w duŜej mierze zuŜywany w przemyśle rafineryjnym i chemicznym, a rozwój nowych kierunków wykorzystania wiąŜe się z koniecznością budowy stabilnych, ekonomicznie uzasadnionych ścieŜek podaŜy.

W tym sensie złoŜa antropogeniczne mogą być rozpatrywane jako element szerszej układanki transformacyjnej: zasób materiałowy (dla sektora budowlanego i infrastrukturalnego) oraz potencjalne Źródło frakcji o charakterze węglowym, która przy właściwym doborze rozwiązań technologicznych i ograniczeń emisyjnych, może wspierać zagospodarowanie odpadów w kierunku produktów o wyŜszej wartości dodanej [6, 10, 18]. Przedstawiono dwa komplementarne kierunki podejścia do zagospodarowania materiału ze złoŜ antropogenicznych pogórnich, osadzone w logice gospodarki cyrkularnej:

- ścieŜkę ukierunkowaną na wykorzystanie frakcji węglowej jako zasobu w procesach energetycznych, oraz
- ścieŜkę materiałową, w której frakcje mineralne mogą stanowić bazę do wytwarzania kruszyw wtórnych i materiałów wiążących, w tym rozwiązań o potencjalnie obniŜonego śladu węglowego [6, 7, 10, 19,].

Jednocześnie podkreśla się, Ŝe efektywne zagospodarowanie tych złoŜ wymaga traktowania ich nie jako jednorodnego „odpadu”, lecz jako wtórnego złoŜa o zmiennych parametrach, których rozpoznanie stanowi warunek konieczny do racjonalnego doboru kierunku wykorzystania oraz ograniczenia ryzyk środowiskowych [12, 22].

2. ZŁOŜA ANTROPOGENICZNE POGÓRNICZE JAKO POTENCJALNE ŹRÓDŁO SUROWCÓW MINERALNYCH

ZłoŜa antropogeniczne pogórnice powstają w wyniku długotrwałej eksploatacji oraz przeróbki kopalin i obejmują materiał odpadowy w formie hałd, zwałowisk i składowisk. W ujęciu surowcowym mogą one być traktowane jako wtórne złoŜa (*secondary*

resources), w których koncentracja materiału oraz jego dostępność przestrzenna stwarzają możliwość selektywnego pozyskania frakcji mineralnych o potencjale użytkowym [12, 22]. Z punktu widzenia gospodarki cyrkularnej kluczowe jest przejście od klasyfikowania tych obiektów jako „problemu odpadowego” do ich oceny jako zasobu surowcowego, przy zachowaniu kryteriów jakościowych i środowiskowych właściwych dla planowanych zastosowań [6, 10].

Materiał w hałdach charakteryzuje się istotną zmiennością litologiczną i uziarnienia, wynikającą z genezy (skała płonna, przeróbka mechaniczna, domieszki technologiczne) oraz z procesów następczych: wietrzenia, utleniania minerałów siarczkowych, migracji rozpuszczalnych składników i lokalnych przeobrażeń termicznych [12, 22]. Zmienność ta ma bezpośrednie przełożenie na powtarzalność parametrów jakościowych, a tym samym na możliwość uzyskania produktu o stabilnych właściwościach (np. kruszywo wtórne) i na ryzyka środowiskowe (ługowanie, pylenie). W praktyce, dla potrzeb oceny surowcowej, materiał hałdowy rozpatruje się przez pryzmat dwóch komponentów: frakcji mineralnej stanowiącej dominującą masę materiału oraz frakcji węglowej o znaczeniu funkcjonalnym, jednak w niniejszym rozdziale akcent położono na potencjał surowców mineralnych zawartych w części nieorganicznej [6, 22].

Tabela 1. Minimalny pakiet badań kwalifikacyjnych materiału hałdowego wykorzystania frakcji mineralnej jako surowca wtórnego; opracowanie własne na podstawie [6, 12, 22]
Table 1. Minimum qualification test package for coal mine waste dump material for the utilization of the mineral fraction as a secondary raw material (own elaboration based on [6, 12, 22])

Parametr/badanie	Cel oceny	Znaczenie wykorzystania frakcji mineralnej	Ryzyko przy braku kontroli
Uziarnienie (analiza granulometryczna, udział frakcji drobnej)	określenie rozkładu ziarnowego i jednorodności materiału	warunkuje możliwość uzyskania frakcji kruszywowych i stabilność właściwości produktu	niestabilna jakość, nadmiar pyłów, pogorszenie parametrów użytkowych
Morfologia ziaren (obserwacja/ocena kształtu, porowatości, zwietrzenia)	ocena stopnia degradacji i podatności na rozkruszanie	wpływa na właściwości mechaniczne kruszyw i zachowanie w mieszankach	słaba trwałość, wzrost nasiąkliwości, degradacja w eksploatacji
Skład mineralogiczny (identyfikacja faz)	rozpoznanie dominujących minerałów i faz reaktywnych	umożliwia wstępną kwalifikację do zastosowań materiałowych i ocenę ryzyk geochemicznych	Niespodziewane reakcje, pogorszenie trwałości, ryzyka środowiskowe
Skład chemiczny (główne tlenki i składniki śladowe)	ocena potencjału surowcowego i obecności składników niepożądanych	istotne dla zgodności z wymaganiami technicznymi i środowiskowymi	ryzyko przekroczeń, ograniczenia zastosowań, wzrost kosztów uzdatniania

Tabela 1 cd.
Table 1 continued

Zawartość siarki i form siarki (w tym potencjał siarczkowy/siarczanowy)	ocena ryzyka generacji kwaśnych odcieków i oddziaływań korozyjnych	krytyczne dla bezpieczeństwa środowiskowego i trwałości zastosowań budowlanych	ługowanie, zakwaszenie, degradacja materiałów, niezgodność z wymaganiami
Zawartość materii organicznej/pozostałości węglowych (np. LOI jako wskaźnik)	rozdzielenie frakcji mineralnej od komponentu węglowego	wpływa na stabilność właściwości, możliwość sortowania i jakość produktu mineralnego	zmienność, problemy w procesowaniu, niejednorodność partii
Badania ługowania (testy mobilności składników w kontakcie z wodą)	ocena potencjału uwalniania składników do środowiska	warunkuje dopuszczalność zastosowań w budownictwie i infrastrukturze	ryzyko środowiskowe, bariery formalne, konieczność kosztownej remediacji
Wskaźniki stabilności materiału (np. podatność na rozpad/erozję, pylenie)	ocena zachowania w warunkach magazynowania i użytkowania	kluczowe dla logistyki, bezpieczeństwa i wymagań eksploatacyjnych	pylenie, straty materiałowe, skargi środowiskowe, ograniczenia operacyjne
Ocena jednorodności przestrzennej (próbkowanie wielopunktowe, zmienność w czasie)	określenie zmienności w obrębie obiektu/partii	podstawa do kontroli jakości i projektowania przeróbki/segregacji	brak powtarzalności produktu, ryzyko odrzutów, trudności w certyfikacji

Frakcja mineralna hałd powęglowych obejmuje najczęściej mieszaninę skał osadowych towarzyszących pokładom węgla (m.in. mułowce, iłowce/łupki ilaste, piaskowce), a także wtórne produkty przeobrażeń (np. tlenki i wodorotlenki żelaza, minerały ilaste) tworzące się w wyniku procesów atmosferycznych [12, 22]. W konsekwencji, potencjał surowcowy takich złóż jest w dużej mierze determinowany przez: udział i jakość frakcji gruboziarnowej, udział frakcji drobnej, zawartość składników reaktywnych (np. glinokrzemiany), oraz obecność składników niepożądanych z punktu widzenia środowiskowego i normowego (np. siarka w formach reaktywnych, składniki podatne na wymywanie) [12, 22]. Ocena hałd jako źródła surowców mineralnych wymaga podejścia metodycznego, łączącego rozpoznanie geologiczne z weryfikacją parametrów technologicznych i środowiskowych. Z uwagi na zmienność litologiczną i geochemiczną materiału, kwalifikacja do zastosowań materiałowych powinna obejmować co najmniej podstawowe badania uziarnienia, składu mineralogicznego i chemicznego oraz ocenę mobilności składników (tab. 1).

Na etapie kwalifikacji zasadne jest zastosowanie minimalnego pakietu badań obejmującego analizę uziarnienia i morfologii ziaren, identyfikację faz mineralnych, oznaczenie składu chemicznego oraz badania środowiskowe ukierunkowane na ocenę mobilności składników w warunkach kontaktu z wodą [12, 22]. Wyniki tych badań pozwalają przypisać materiał do potencjalnych kierunków wykorzystania w sposób ograniczający ryzyko niezgodności jakościowej oraz minimalizujący oddziaływania środowiskowe związane z przetwarzaniem i użytkowaniem produktu [6, 12].

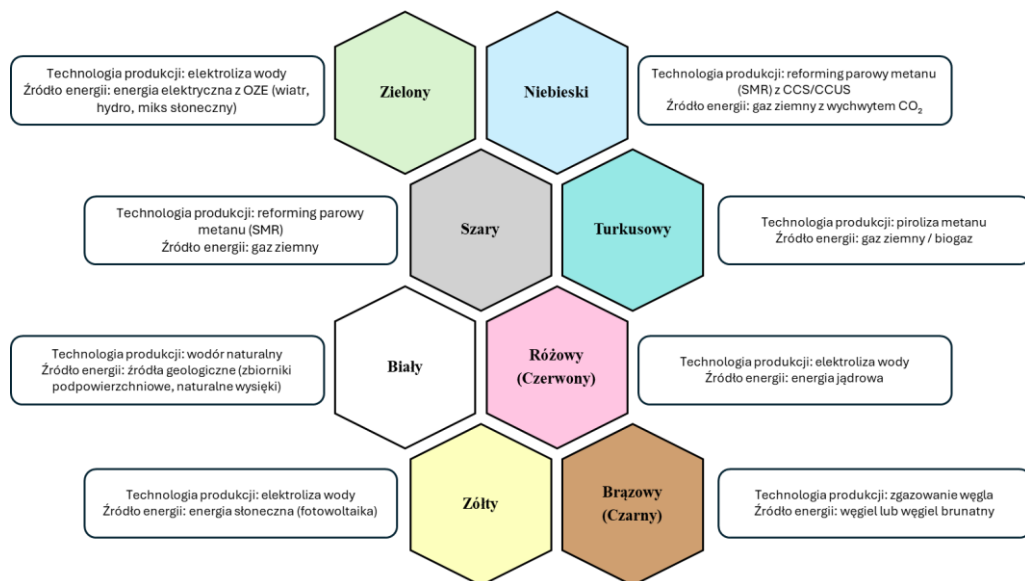
Warto podkreślić, że włączenie frakcji mineralnych ze złóż antropogenicznych do obiegu gospodarczego jest pochodną nie tylko ich właściwości, lecz również uwarunkowań rynkowych i regulacyjnych. Presja na dekarbonizację oraz rozwój łańcuchów wartości dla technologii niskoemisyjnych w UE sprzyjają poszukiwaniu rozwiązań ograniczających zużycie surowców pierwotnych i emisje w sektorach materiałochłonnych [10].

W tym ujęciu złoża antropogeniczne mogą pełnić rolę lokalnych źródeł surowców wtórnych, wspierając stabilność podaży materiałów dla budownictwa i infrastruktury, pod warunkiem spełnienia wymagań jakościowych oraz jednoznacznego rozstrzygnięcia statusu materiału w świetle przepisów [6, 10]. Podsumowując, potencjał złóż antropogenicznych pogórnictwa jako źródła surowców mineralnych wynika z koncentracji materiału, jego dostępności oraz możliwości selektywnego wydzielania frakcji o pożądanych parametrach. Jednocześnie kluczową barierą pozostaje zmienność materiału i związana z nią konieczność standaryzacji procedur kwalifikacji jakościowej i środowiskowej. Z tego względu rozważania odnosi się do nadrzędnej zasady: złoża antropogeniczne jest zasobem tylko wtedy, gdy jego parametry można wiarygodnie rozpoznać, a produkt końcowy spełnia wymagania techniczne i środowiskowe [6, 12, 22].

3. PRODUKCJA WODORU Z MATERIAŁÓW ZE ZŁÓŻ ANTROPOGENICZNYCH

Wodór uznawany jest za jeden z kluczowych nośników energii i surowców procesowych w transformacji energetycznej [13, 18]. Może on być wykorzystywany w wielu sektorach gospodarki. W ujęciu europejskim popyt na wodór pozostaje silnie zdominowany przez zastosowania przemysłowe, co ma znaczenie dla projektowania ścieżek podaży oraz wymagań jakościowych względem produktu.

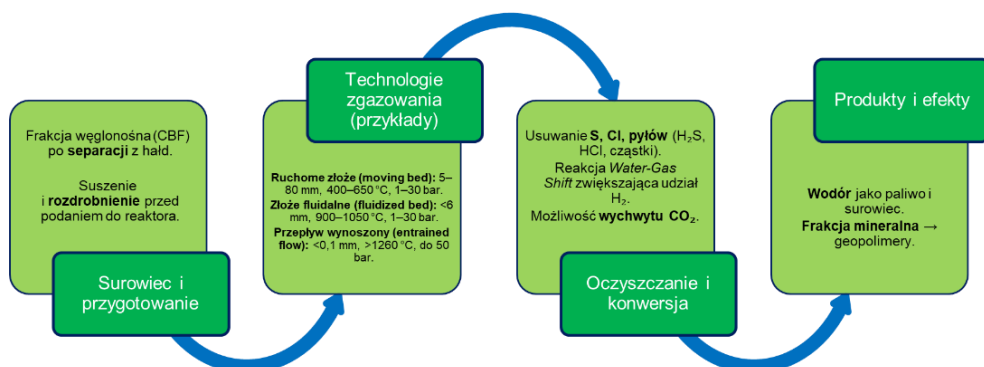
W literaturze i w debacie publicznej rozpowszechniona jest tzw. klasyfikacja „kolorystyczna” wodoru, odnosząca się do technologii wytwarzania i profilu emisyjnego (np. wodór szary, niebieski, zielony). Należy jednak podkreślić, że klasyfikacja ta ma charakter umowny i w praktyce zależy od bilansu emisji w całym łańcuchu wytwórczym, w tym od źródła energii, sprawności procesu oraz ewentualnego wychwytywania i zagospodarowania CO₂. Zestawienie najczęściej stosowanych kategorii przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Klasyfikacja wodoru według „kolorów” w zależności od źródła energii i technologii wytwarzania; źródło: H2GEO

Fig. 2. Colour-based hydrogen classification depending on energy source and production route; source: H2GEO

W kontekście wykorzystania materiałów ze złóż antropogenicznych pogórnich, produkcja wodoru może być rozpatrywana poprzez zagospodarowanie frakcji węglowej w procesach termochemicznych, w szczególności w drodze zgazowania prowadzącego do uzyskania gazu procesowego, a następnie wodoru [5, 11]. Zasadniczy łańcuch wytwór-



Rys. 3. Schemat procesu zgazowania frakcji węglowej pochodzącej ze złóż antropogenicznych pogórnich prowadzący do produkcji wodoru

Fig. 3. Gasification process of the carbon fraction originating from post-mining anthropogenic deposits leading to hydrogen production

czy obejmuje przygotowanie wsadu, konwersję termochemiczną do gazu, jego oczyszczanie i konwersję do strumienia bogatego w H_2 oraz separację wodoru do wymaganej czystości [11, 18]. Schemat procesu zgazowania frakcji węglowej prowadzącego do produkcji wodoru przedstawiono na rys. 3.

W zależności od zastosowanych rozwiązań w zakresie oczyszczania gazu i postępowania z CO_2 , wodór wytwarzany z frakcji węglowej z materiałów złóż antropogenicznych może odpowiadać profilowi zbliżonemu do wodoru „szarego”, natomiast w wariantach uwzględniających wychwytywanie i składowanie lub wykorzystanie CO_2 może być rozpatrywany w kategoriach zbliżonych do „niebieskiego” [18].

W przypadku materiałów ze złóż antropogenicznych szczególne znaczenie ma zmienność właściwości wsadu (udział części palnej i mineralnej, wilgotność, obecność składników generujących zanieczyszczenia w strumieniu gazowym) – czynniki te determinują warunki stabilnej pracy procesu oraz wymagania dotyczące uzyskania jakości produktu końcowego odpowiedniej do docelowych zastosowań [18, 22]. Technologie konwersji termochemicznej materiałów zawierających węgiel stanowią jedną z rozwijanych metod wytwarzania wodoru z surowców wtórnych i strumieni odpadowych, jednak ich ocena w realiach gospodarki cyrkularnej wymaga równoległego uwzględnienia uwarunkowań emisyjnych i jakościowych całego łańcucha wytwarzania [15, 17, 18].

4. GEOPOLIMERY JAKO MATERIAŁY WIAŻĄCE Z SUROWCÓW WTÓRNYCH

Geopolimery stanowią grupę nieorganicznych materiałów wiążących powstających w wyniku reakcji chemicznej pomiędzy materiałami bogatymi w krzem i glin a środowiskiem alkalicznym [7, 19]. W wyniku tej reakcji dochodzi do tworzenia trójwymiarowej struktury polimerowej o właściwościach zbliżonych do tradycyjnych materiałów cementowych. Jedną z istotnych zalet technologii geopolimerowych jest możliwość wykorzystania różnych materiałów pochodzenia przemysłowego jako surowców w procesie ich wytwarzania [2, 16]. Z tego względu geopolimery są coraz częściej rozpatrywane jako potencjalna alternatywa dla cementu portlandzkiego w wybranych zastosowaniach budowlanych [3, 8, 21].

Istotną cechą technologii geopolimerowych jest możliwość wykorzystania różnego rodzaju materiałów mineralnych pochodzenia przemysłowego jako surowców do ich produkcji. Wśród najczęściej stosowanych materiałów znajdują się popioły lotne, żużle hutnicze, metakaolin oraz inne materiały bogate w glinokrzemiany. W aspektach gospodarki cyrkularnej szczególne znaczenie ma możliwość wykorzystania materiału mineralnego w złożach antropogenicznych pogórnictwa jako potencjalnego surowca do produkcji materiałów geopolimerowych.

Frakcja mineralna obecna w tych złożach często zawiera znaczące ilości krzemionki i tlenków glinu, które mogą stanowić odpowiednią bazę dla reakcji geopolimeryzacji.

Odpowiednie przygotowanie materiału, obejmujące jego rozdrobnienie oraz aktywację alkaliczną, umożliwia uzyskanie materiałów o właściwościach mechanicznych i trwałości pozwalających na ich zastosowania w budownictwie, w tym jako komponentów kruszyw wtórnych lub elementów prefabrykowanych.

Technologia geopolimerów wpisuje się w założenia gospodarki cyrkularnej, ponieważ umożliwia wykorzystanie materiałów mineralnych ze złóż antropogenicznych jako surowców wtórnych w produkcji materiałów budowlanych. Jednocześnie proces ten może przyczyniać się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla w sektorze budownictwa w porównaniu z tradycyjną produkcją cementu.

Geopolimery stanowią grupę nieorganicznych materiałów wiążących powstających w wyniku reakcji materiałów bogatych w krzem i glin (prekursorów glinokrzemianowych) z aktywatorami alkalicznymi, prowadzącej do powstania usieciowanej struktury o właściwościach zbliżonych do tradycyjnych spoiw cementowych [7, 19, 20]. W literaturze podkreśla się, że technologia ta jest szczególnie istotna w kontekście gospodarki cyrkularnej, umożliwiając wykorzystanie szerokiej liczby surowców wtórnych i ubocznych, a w wielu scenariuszach pozwala ograniczyć wpływ środowiskowy w porównaniu do cementu portlandzkiego, przy zachowaniu konkurencyjnych parametrów użytkowych [3, 8, 21]. Mechanizm tworzenia struktury geopolimerowej – od rozpuszczania faz reaktywnych, przez polikondensację, aż do tworzenia żelu wiążącego schematycznie przedstawiono na rys. 4, porządkując zależności pomiędzy charakterem prekursora, środowiskiem alkalicznym i warunkami dojrzewania, które w praktyce determinują właściwości materiału końcowego.



Rys. 4. Schemat procesu powstawania geopolimerów z materiałów bogatych w krzem i glin w środowisku alkalicznym; opracowanie na podstawie prezentacji projektu H2GEO

Fig. 4. Schematic representation of geopolimer formation from aluminosilicate materials activated in an alkaline environment; based on the H2GEO project presentation

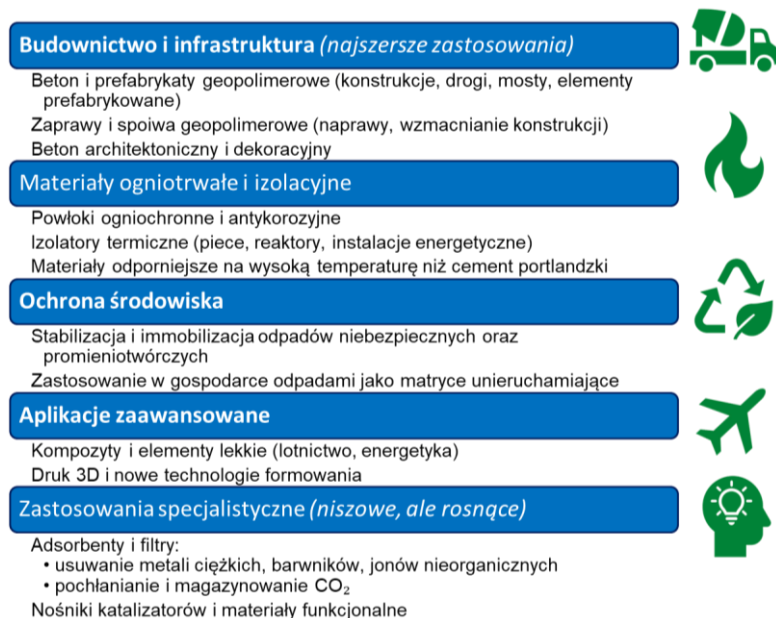
W warunkach europejskich geopolimery wytwarzane z odpadów i produktów ubocznych są rozpatrywane jako jedna z technologii wspierających dekarbonizację sektora materiałów budowlanych oraz rozwój alternatywnych, niskoemisyjnych spoiw. W badaniach uwarunkowań makroekonomicznych w ramach projektu H2GEO wykazano, że wśród zastosowań geopolimerów dominują produkty budowlane, w tym w szczegól-

ności geopolimerowy beton, dla którego typowe zakresy wytrzymałości na ściskanie w analizowanych zastosowaniach europejskich mieszczą się często w przedziale 30–60 MPa, a w sprzyjających przypadkach osiągają wartości wyższe. Jednocześnie liczne badania wskazują na dodatkowe korzyści, m.in. podwyższoną odporność ogniową i chemiczną oraz potencjalnie niską ługowalność, co ma znaczenie przy stosowaniu surowców wtórnych o zmiennym składzie [4, 12, 21].

W kontekście wykorzystania złóż antropogenicznych pogórnicych kluczowe znaczenie ma możliwość wykorzystania frakcji mineralnej jako źródła prekursorów glino-krzemianowych. Zasadność takiego podejścia wynika z dwóch przesłanek. Po pierwsze, geopolimeryzacja jest technologią, która dopuszcza stosowanie różnorodnych prekursorów o pochodzeniu odpadowym i przemysłowym, przy czym efektywność zależy od reaktywności faz mineralnych, uziarnienia oraz właściwego doboru aktywatora i reżimu dojrzewania [19–21]. Po drugie, presja regulacyjna i rynkowa w UE w kierunku ograniczania emisyjności materiałów budowlanych wzmacnia zainteresowanie spoiwami alternatywnymi, zwłaszcza tam, gdzie możliwe jest wykorzystanie lokalnych strumieni materiałowych oraz redukcja kosztów logistycznych [10].

Z punktu widzenia praktyki wdrożeniowej, o konkurencyjności geopolimerów nie decyduje pojedyncza „receptura”, lecz cały łańcuch wartości: dostępność i przygotowanie surowca, stabilizacja parametrów partii, dobór aktywatora, proces formowania i dojrzewania, a także logistyka. W wielu analizach europejskich dominującym składnikiem kosztowym w OPEX są aktywatory (np. NaOH oraz krzemiany sodu), które mogą stanowić 65–70% kosztu mieszaniny, podczas gdy koszty transportu (~0,228 €/tkm w przywołanych studiach) premią krótkie, lokalne łańcuchy dostaw i przetwarzanie „u źródła”. W konsekwencji, geopolimery szczególnie dobrze wpisują się w logikę regionalnych rozwiązań cyrkularnych; minimalizujących dystans transportu, i równolegle szuka się ścieżek obniżenia kosztu aktywacji (np. poprzez alternatywne źródła krzemianów).

Aplikacje geopolimerów można uporządkować funkcjonalnie w kilku głównych grupach, w trzech klastrach: materiały budowlane, materiały adsorpcyjne/środowiskowe oraz zastosowania inżynierskie, podkreślając, że poza budownictwem rośnie znaczenie geopolimerów w unieruchamianiu odpadów niebezpiecznych, sorpcji zanieczyszczeń czy jako nośników/struktur funkcjonalnych dla aplikacji przemysłowych. Jednocześnie w najnowszej literaturze z lat 2018–2025 wskazuje się na trzy nurty rozwojowe: infrastrukturalny (często wyższe TRL), środowiskowy oraz specjalistyczny (materiały wysokotemperaturowe, aplikacje odporne chemicznie, druk 3D, rozwiązania morskie/offshore); przy czym dojrzałość technologiczna jest silnie zróżnicowana, od laboratoriów po demonstratory bliskie wdrożenia. Dane z rys. 5 porządkują obszary aplikacyjne w sposób użyteczny dla dalszych rozważań o kierunkach zagospodarowania frakcji mineralnych w złożach antropogenicznych – bez przesądzania o doborze konkretnej technologii wytwarzania czy receptur mieszanek.



Rys. 5. Główne kierunki zastosowań geopolimerów;
 opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury, w tym raportu H2GEO
 Fig. 5. Main application directions of geopolymers;
 authors' own study based on literature review, including the H2GEO report

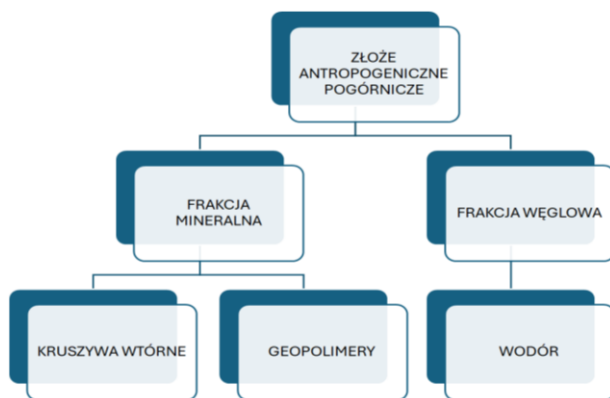
Podsumowując, geopolimery stanowią perspektywiczny kierunek zagospodarowania surowców wtórnych, szczególnie w sektorze budownictwa i infrastruktury, ale także w obszarze ochrony środowiska i aplikacji specjalistycznych. Z perspektywy UE ich potencjał jest wzmacniany przez megatrendy dekarbonizacyjne oraz rosnące znaczenie niskoemisyjnych spoiw jako substytutów cementu portlandzkiego, lecz ostateczna opłacalność rozwiązań geopolimerowych pozostaje silnie zależna od lokalnej dostępności surowca, kosztu aktywatorów oraz logistyki łańcucha dostaw.

5. POTENCJAŁ, WYZWANIA I PERSPEKTYWY ZAGOSPODAROWANIA ZŁÓŻ ANTROPOGENICZNYCH W GOSPODARCE CYRKULARNEJ

Złoża te mogą stanowić istotny element wtórnej bazy surowcowej w regionach o rozwiniętej działalności górniczej. Materiał zgromadzony w hałdach pogórnich, powstały w wyniku eksploatacji i przeróbki kopalin, może być traktowany jako potencjalne źródło surowców wtórnych możliwych do wykorzystania w różnych sektorach gospodarczych. W ujęciu gospodarki cyrkularnej kluczowe jest, że zagospodarowanie takich obiektów może jednocześnie ograniczać presję na eksploatację złóż pierwot-

nych, zmniejszać ilość materiału pozostającego w środowisku oraz wspierać rozwój rynków surowców wtórnych i rozwiązań niskoemisyjnych [6, 10]. Pomimo, że tytuł akcentuje złoża antropogeniczne jako źródło surowców mineralnych (w tym kruszyw), w praktyce podejście cyrkularne uzasadnia rozpatrywanie zagospodarowania zgromadzonego materiału w sposób całościowy, z uwzględnieniem współwystępowania frakcji mineralnej i węglowej oraz konieczności kierunkowania strumieni materiałowych. Oznacza to, że optymalizacja ścieżki materiałowej bez uwzględnienia losu frakcji węglowej (lub odwrotnie) może prowadzić do przesunięcia kosztów i oddziaływań środowiskowych poza granice analizowanego procesu. Takie ryzyko jest sprzeczne z podstawową logiką gospodarki o obiegu zamkniętym oraz z perspektywą cyklożyciową (LCA), wymagającą oceny działań w kategoriach całego systemu, a nie pojedynczego produktu. W niniejszym opracowaniu nie wykonuje się pełnej analizy LCA, jednak przyjęcie perspektywy systemowej jest konieczne dla rzetelnej oceny sensowności zagospodarowania hałd jako zasobów wtórnych. Jednocześnie należy podkreślić, że rzeczywiste spektrum możliwych produktów z takich obiektów jest szersze.

Koncepcyjny model zagospodarowania materiału ze złóż antropogenicznych pogórnich przedstawiono na rys. 6. Model ten ilustruje możliwość równoległego wykorzystania odmiennych frakcji materiału w różnych ścieżkach technologicznych, prowadzących do uzyskania produktów o odmiennych funkcjach rynkowych. Ujęcie to porządkuje logikę działania w gospodarce cyrkularnej: materiał w środowisku jest traktowany jako zasób, a celem jest maksymalizacja wartości surowcowej przy jednoczesnym ograniczaniu ryzyk środowiskowych.



Rys. 6. Koncepcyjny model zagospodarowania materiału ze złóż antropogenicznych pogórnich w gospodarce cyrkularnej – wykorzystanie frakcji mineralnej i węglowej

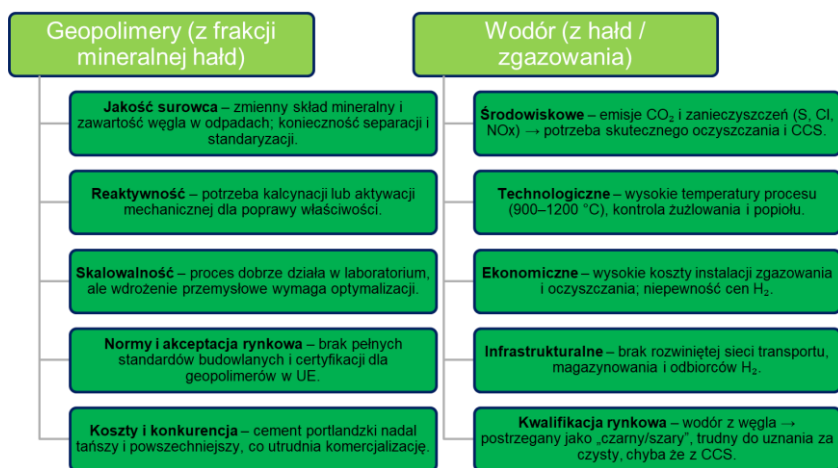
Fig. 6. Conceptual model of circular utilisation of material deposited in post-mining anthropogenic deposits – utilisation of mineral and carbon fractions

Wdrożenie podejścia cyrkularnego do zagospodarowania hałd jest jednak warunkowane przez zestaw czynników, które w praktyce determinują wykonalność i opłacal-

ność całego przedsięwzięcia. Do najważniejszych należą: zmienność materiału, wymagania jakościowe dla produktów końcowych, ograniczenia środowiskowe i formalno-prawne, a także ekonomika łańcucha wartości obejmująca koszty przygotowania surowca, przeróbki, logistyki oraz ryzyka rynkowe.

W przypadku ścieżki materiałowej (geopolimery z frakcji mineralnej) ograniczeniami są przede wszystkim zmienność składu i konieczność separacji/standaryzacji, zapewnienie wymaganej reaktywności materiału oraz bariera normowa i rynkowa wynikająca z faktu, że cement portlandzki pozostaje produktem dominującym, powszechnie certyfikowanym i często tańszym, co utrudnia komercjalizację materiałów alternatywnych.

W przypadku ścieżki energetycznej (wodór) kluczowe są uwarunkowania środowiskowe i emisyjne, wymagania technologiczne procesu oraz kosztowe i infrastrukturalne bariery rozwoju gospodarki wodorowej, w tym dostęp do sieci transportu, magazynowania i stabilnego popytu. Syntetyczne zestawienie kluczowych barier i uwarunkowań dla obu ścieżek (rys. 7), porządkuje problemy wdrożeniowe w sposób pozwalający ocenić, które elementy są krytyczne dla projektowania przedsięwzięć cyrkularnych na hałdach: od jakości surowca i jego zmienności, przez ograniczenia środowiskowe i technologiczne, po kwestie ekonomiczne, infrastrukturalne oraz akceptację rynkową.



Rys. 7. Kluczowe bariery i uwarunkowania wdrożeniowe dla dwóch komplementarnych ścieżek zagospodarowania materiału hałdowego: geopolimery (frakcja mineralna) oraz wodór (frakcja węglowa); opracowanie własne na podstawie przeglądu literatury

Fig. 7. Key implementation barriers and boundary conditions for two complementary utilisation pathways of coal mine waste dump material: geopolymers (mineral fraction) and hydrogen (carbon fraction); authors' own study based on literature review

W perspektywie rozwoju kluczowe znaczenie ma przejście od podejścia „jednorazowego” do podejścia systemowego i powtarzalnego, obejmującego rozpoznanie i kon-

trołę jakości materiału, stabilizację parametrów partii, dobór kierunków wykorzystania adekwatnych do lokalnych uwarunkowań oraz budowę krótkich łańcuchów dostaw. Szczególnie istotne jest to w obszarze surowców wtórnych dla budownictwa i infrastruktury, gdzie popyt rynkowy jest trwały, natomiast dopuszczenie produktów wymaga spełnienia wymagań jakościowych i środowiskowych oraz przejrzystego uregulowania statusu materiału w świetle przepisów (odpadowy vs produkt uboczny/end-of-waste). Jednocześnie transformacja w kierunku technologii niskoemisyjnych w UE wzmacnia zainteresowanie wodorem jako nośnikiem i surowcem procesowym, jednak rozwój tego rynku jest silnie zależny od kosztów, dostępności infrastruktury oraz akceptowalności emisyjnej ścieżek wytwarzania. Stąd zagospodarowanie frakcji węglowej należy rozpatrywać ostrożnie i warunkowo, z uwzględnieniem ograniczeń środowiskowych oraz roli rozwiązań obniżających emisyjność całego łańcucha wytwarzania.

Złoża antropogeniczne pogórnice mogą odgrywać coraz większą rolę w gospodarce surowcowej, szczególnie w regionach o wysokiej koncentracji tych obiektów, pod warunkiem wdrożenia podejścia systemowego, obejmującego równoległe spojrzenie na główne strumienie materiałowe oraz ich produkty. Takie ujęcie umożliwia traktowanie hałd nie jako problemu środowiskowego, lecz jako elementu wtórnej bazy surowcowej, który przy właściwej kwalifikacji, kontroli i uwarunkowaniach rynkowych, może wspierać rozwój gospodarki cyrkularnej oraz transformacji niskoemisyjnej.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Złoża antropogeniczne pogórnice stanowią trwałe element krajobrazu regionów górniczych i jednocześnie potencjalną wtórną bazę surowcową. W ujęciu gospodarki o obiegu zamkniętym ich znaczenie wynika z możliwości ponownego włączenia materiałów zdeponowanych w środowisku do obiegu gospodarczego oraz z redukcji presji na eksploatację złóż pierwotnych, pod warunkiem spełnienia wymagań jakościowych i środowiskowych. Wykazano, że racjonalne zagospodarowanie hałd wymaga podejścia systemowego, wynikającego ze współwystępowania frakcji mineralnej i węglowej oraz konieczności kierunkowania strumieni materiałowych. Z tego powodu analiza obejmuje dwa dominujące kierunki wykorzystania materiału hałdowego: ścieżkę materiałową (kruszywa wtórne i geopolimery) oraz ścieżkę energetyczną (wodór). Takie ujęcie jest spójne z logiką gospodarki cyrkularnej oraz perspektywą cyklu życia, ponieważ ogranicza ryzyko przenoszenia oddziaływań i kosztów poza granice analizowanego procesu.

W obszarze wykorzystania frakcji mineralnej wskazano, że geopolimery mogą stanowić perspektywiczny kierunek zagospodarowania surowców wtórnych, szczególnie w budownictwie i infrastrukturze, ale również w zastosowaniach środowiskowych i spe-

cialistycznych. Warunkiem efektywnego wdrożenia pozostaje jednak stabilizacja parametrów surowca, zapewnienie powtarzalności właściwości produktu oraz uwzględnienie ograniczeń łańcucha wartości, w tym kosztów i dostępności komponentów procesu.

W odniesieniu do ścieżki wodorowej wykazano, że wodór pozostaje w UE przede wszystkim surowcem procesowym, a ocena ścieżek jego wytwarzania powinna uwzględniać nie tylko etap konwersji, lecz również wymagania dotyczące jakości produktu oraz uwarunkowania emisyjne całego łańcucha. W tym kontekście wykorzystanie frakcji węglowej z hałd może być rozpatrywane jako kierunek zagospodarowania materiału odpadowego, jednak jego zasadność jest wrażliwa na czynniki środowiskowe, ekonomiczne i infrastrukturalne, w tym na sposób postępowania z CO₂ oraz warunki rynkowe rozwoju gospodarki wodorowej.

Kluczowym wnioskiem praktycznym jest, że o realnym potencjale zagospodarowania złóż antropogenicznych decydują: zmienność materiału i potrzeba standaryzacji, wymagania techniczne i środowiskowe dla produktów końcowych, jednoznaczność statusu materiału w świetle regulacji (odpadowy vs end-of-waste) oraz ekonomika i logistyka łańcucha wartości. Z tego względu złoża antropogeniczne stają się zasobem dopiero wtedy, gdy jego parametry można wiarygodnie rozpoznać i kontrolować, a produkt końcowy spełnia wymagania użytkowe i środowiskowe przy akceptowalnych kosztach.

W perspektywie dalszych prac zasadne jest rozwijanie podejść integrujących ocenę jakości surowca, ryzyk środowiskowych i parametrów ekonomicznych, w tym w kierunku analiz cyklu życia i porównań substytucyjnych (surowiec wtórny vs pierwotny), które pozwolą lepiej ocenić, w jakich warunkach lokalnych i rynkowych zagospodarowanie hałd daje największy efekt środowiskowy i gospodarczy.

LITERATURA

- [1] ABAH M.A., *Sustainable energy production from mine waste: Opportunities and challenges*, Energy Reviews, 2024, 18, pp. 45–62.
- [2] AHMARI S., ZHANG L., *Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization*, Construction and Building Materials, 2012, 29, pp. 323–331, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.048>
- [3] AHMED H.U., SHAIKH F.U.A., HOSAN A., *Geopolymer concrete as a cleaner construction material. An overview*, Cleaner Engineering and Technology, 2022, 7, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100442>
- [4] AMRAN M., DEBBARMA S., OZBAKKALOGLU T., *Long-term durability of geopolymer concrete. A review*, Construction and Building Materials, 2021, 274, 122019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122019>
- [5] BASU P., *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, Academic Press, Oxford 2010.
- [6] BLENGINI G.A., MATHIEUX F., MANCINI L., NYBERG M., VIEGAS H., SALMINEN J., GARBARINO E., ORVEILLON G., SAVEYN H., MATEOS AQUILINO V., HORCKMANS L., D'HUGUES P., *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2019.

- [7] DAVIDOVITS J., *Geopolymer Cement – A Review*, Geopolymer Institute, Saint-Quentin 2013.
- [8] DUXSON P., PROVIS J.L., LUKEY G.C., VAN DEVENTER J.S.J., *The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete*, Cement and Concrete Research, 2007, 37 (12), pp. 1590–1597.
- [9] European Commission, *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*, European Commission, Brussels 2020.
- [10] GAIROLA S.U., NAUTIYAL A., KUMAR V., *Sustainable mining: Reducing waste and enhancing resource recovery through circular economy approaches*, Circular Economy and Sustainability, 2025, <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00233-9>
- [11] HIGMAN C., VAN DER BURGT M., *Gasification*, 2nd ed., Gulf Professional Publishing, Oxford 2011.
- [12] HUDSON-EDWARDS K.A., JAMIESON H.E., LOTTERMOSER B.G., *Mine wastes: Past, present, future. Elements*, 2011, (6), pp. 375–380, <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.375>
- [13] IEA, *Global Hydrogen Review*, International Energy Agency, Paris 2023.
- [14] IRENA, *Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2022.
- [15] JIANG Y., *Waste gasification for hydrogen production. A review*, International Journal of Hydrogen Energy, 2026, 51, pp. 102–118.
- [16] KOSSOFF D., DUBBIN W.E., ALFREDSSON M., EDWARDS S.J., MACKLIN M.G., HUDSON-EDWARDS K.A., *Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts and remediation*, Applied Geochemistry, 2014, 51, pp. 229–245, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
- [17] LE T.T., NGUYEN T.A., TRAN H.N., *Comprehensive analysis of waste-to-hydrogen systems and their role in circular economy*, International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 50, pp. 2100–2115.
- [18] OSMAN A.I., DEKA T.J., BARUAH D.C., ROONEY D.W., *Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts. A review*, Environmental Chemistry Letters, 2022, 20, pp. 153–188, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
- [19] PROVIS J.L., VAN DEVENTER J.S.J., *Alkali Activated Materials*, State-of-the-Art Report, Springer, Dordrecht 2018.
- [20] PROVIS J.L., *Alkali-activated materials*, Cement and Concrete Research, 2018, 114, pp. 40–48, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- [21] SINGH B., ISHWARYA G., GUPTA M., BHATTACHARYYA S.K., *Geopolymer concrete: A review of some recent developments*, Construction and Building Materials, 2015, 85, pp. 78–90, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- [22] LOTTERMOSER B.G., *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, Springer, Berlin 2010.

H2GEO project has received funding from the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under GRANT AGREEMENT No. 101112386.

Praca naukowa opublikowana w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego ze środków programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pn. „PMW” w latach 2023–2026; umowa nr 5778/FBWIS/2024/21



Co-funded by
the European Union



ANTHROPOGENIC POST-MINING DEPOSITS AS A SOURCE
OF MINERAL AGGREGATES IN THE CIRCULAR ECONOMY
– THE POTENTIAL OF GEOPOLYMERS AND HYDROGEN

Post-mining anthropogenic deposits, which are a permanent element of the landscape of mining regions and the result of long-term exploitation of mineral resources, including hard coal, are increasingly perceived not only as an environmental problem but also as a potential source of mineral aggregates and other secondary raw materials. In the context of the circular economy, there is therefore a need to reconsider these objects from the perspective of their management and rational material utilisation.

The paper presents two complementary pathways for the utilisation of material deposited in anthropogenic deposits. The first involves the use of organic fractions contained in these deposits for hydrogen production using well-established thermochemical processes such as gasification, enabling the generation of a high-purity energy carrier while simultaneously managing waste material. The second pathway concerns the use of mineral fractions from anthropogenic deposits as a raw material for the production of mineral aggregates and geopolymer materials which, depending on their grain size distribution, chemical composition and physicomaterial properties, may find applications in construction, soil stabilisation and reinforcement, as well as in insulation or filtration materials.

The discussion is concluded by identifying the strengths and weaknesses of circular approaches to the utilisation of anthropogenic deposits, outlining the associated challenges and limitations, and indicating future development prospects and market potential of the resulting products, particularly in the mineral aggregates sector.

SPOŁECZNA LICENCJA NA DZIAŁANIE ELEMENTEM STRATEGII SEKTORA GÓRNICZEGO

Pojęcie „społeczna licencja na działanie” (ang. *social licence to operate*, SLO) funkcjonuje od wielu lat zarówno w debatach publicznych, jak i rozważaniach naukowych. Utożsamiane jest z akceptacją społeczną i odnosi się do terminu legitymizacji, jednocześnie będąc istotnym elementem funkcjonowania branży górniczej. Minimalizacja ryzyka związanego ze sprzeciwem interesariuszy na dowolnym etapie prowadzonej działalności wymaga tworzenia strategii sprzyjających budowaniu wzajemnego zaufania między przedsiębiorstwem, a społeczeństwem. W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pytanie czy firmy górnicze eksploatujące surowce skalne uwzględniają zagadnienia społeczne w planach, raportach oraz na stronach internetowych. Przeanalizowano zakres planowanych i faktycznych aktywności firm, co pozwoliło na ocenę sytuacji bieżącej wraz z propozycją zmian.

1. WPROWADZENIE

Pojęcie „społeczna licencja na działanie” (ang. *social licence to operate*, SLO) jest obecne od wielu lat zarówno w debatach publicznych jak i rozważaniach naukowych, będąc utożsamiane z akceptacją społeczną czy odnosząc się do terminu legitymizacji. Doprecyzowywanie znaczenia SLO [1] wpływa na zrozumienie złożoności zjawiska, w tym konsekwencji związanych ze zmianami spowodowanymi działaniami, które ingerują w przestrzeń oraz reakcji jakie wywołuje wśród interesariuszy. Jak zauważyli Lesser i in. [2] badający perspektywę europejską siła SLO jest znacząca w skali lokalnej, bo lokalne społeczności mają realny wpływ na przebieg inwestycji, a tym samym ich interesy powinny być traktowane priorytetowo.

Wymusza to stworzenie płaszczyzny komunikacji. Krytyczna analiza literatury przeprowadzona przez Meesters i in. [3] wykazała potrzebę angażowania różnorodnych interesariuszy na potrzeby SLO oraz tworzenia przestrzeni do debaty, jak również dostępu do wiedzy na temat ryzyk wynikających z działalności wydobywczej [2]. Szczególnie, że stwierdzone są niedostatki w zakresie i formie przekazywania informacji przez firmy górnicze. A spory z lokalnymi społecznościami, w które zaangażowana jest część podmiotów mogą świadczyć, że strategię SLO firm nie są wystarczające [4].

Utrzymanie społecznej licencji na działanie związane jest z realizacją idei zrównoważonego rozwoju przez firmy górnicze. Analiza raportów niefinansowych przedsiębiorstw australijskich uzupełniona o dane z wywiadów wykazała, że kwestie społeczne nie są dominujące w kontekście zrównoważonego rozwoju. Większym zainteresowaniem cieszą się kwantyfikowalne aspekty środowiskowe oraz zatrudnienia. Uznano, że raporty spełniają wymóg społecznej licencji, będąc powszechnie dostępnym źródłem informacji. Zakwestionowano jednak ich przejrzystość i nie dostarczanie pełnych i wyczerpujących informacji (i ujawnianie danych w sposób wybiórczy) [5].

Społeczna licencja nie jest dana raz i na zawsze. Określano ją jako niematerialny, nietrwały wskaźnik „akceptacji działań firmy przez społeczność” [6].

Celem artykułu jest analiza dokumentów (w tym strategii) i materiałów informacyjnych publikowanych przez wybrane firmy eksploatujące kopaliny skalne, uwzględniająca czynnik społeczny i jego wpływ na prowadzoną działalność. Ocena świadomości podmiotów w zakresie społecznej licencji pozwoli na diagnozę bieżącej sytuacji. Wskazane zostaną również propozycje zmian, w tym rozwiązania wspierające komunikację i interakcje między interesariuszami.

2. MATERIAŁY I METODY

Do analiz wybrano dostępne dokumenty publikowane przez przedsiębiorstwa związane z produkcją kruszyw mineralnych, prowadzące działalność w Polsce. Uwzględniono podmioty:

- **Cemex** – firma globalna zajmująca się produkcją materiałów budowlanych podaje na stronie internetowej, że jest „jednym z największych producentów kruszyw na świecie”. Surowiec pozyskuje na lądzie oraz poprzez pogłębianie dna morskiego [7]. Oprócz kruszyw oferują cement i beton, również ich niskoemisyjne wersje. W spółce zatrudnionych jest ponad 44 000 osób. Działalność rozpoczęto w 1906 roku [8]. Cemex Polska eksploatuje 6 złóż. Firma oferuje również beton, cement i chemię budowlaną [9]. Do analizy wybrano zintegrowany raport za rok 2024, który w treści zawiera uwagi na temat strategii [8], jak również Cemex Stakeholder Engagement Policy z 2025 r. [10] oraz Raport zrównoważonego rozwoju 2022–2023 Cemex Polska [11]. Przegląd uzupełniono o informacje zawarte na stronach internetowych.

- **Holcim** – firma z siedzibą główną w Szwajcarii, zatrudniająca ponad 65 000 pracowników na ponad 50 rynkach, w Europie, Ameryce Łacińskiej i Azji, na Bliskim Wschodzie i w Afryce. Klientom oferuje zarówno zrównoważone materiały budowlane, jak i technologię obiegu zamkniętego czy systemy dachowe i izolacyjne [12]. Holcim Polska (wcześniej Lafarge) w portfolio produktów posiada m.in. kruszywa, beton, cement, chemię budowlaną i materiały izolacyjne. Zatrudnia blisko 2 000. osób [13]. Do analiz wykorzystano raporty: Zintegrowany raport roczny Holcim za 2024 [12] oraz Raport ESG Holcim Polska również za rok 2024 [14]. Ponadto uwzględniono opraco-

wanie Dialog społeczny 2022 – podsumowanie działań [15]. Dokonano również przeglądu stron internetowych.

– **CRH** powstało w 1970 roku w wyniku fuzji dwóch wiodących spółek publicznych. Nowy podmiot był jedynym producentem cementu i głównym producentem kruszyw, wyrobów betonowych i asfaltu w Irlandii. Obecnie CRH zatrudnia ponad 80 000 osób i prowadzi działalność w 28 krajach [16]. W Polsce do grupy kapitałowej CRH należą m.in.: produkująca i sprzedająca kruszywa Trzuskawica S.A. (sprywatyzowana przez CRH, 2003 r.) [17], Cement Ożarów S.A. (od 1975 r. 75% udziałów, a od 2001 r. CRH jest jedynym akcjonariuszem) [18]; producent mieszanek mineralno-asfaltowych Masfalt (większościowy pakiet udziałów CRH nabyła w 2000 roku) [19]. Do badań wykorzystano publikowaną przez Trzuskawica S.A. Politykę Zrównoważonego Rozwoju [20], jednostronicowy dokument z 2023 r., który ma na celu “podniesienie aktywności w zakresie otwartości dialogu pomiędzy Spółką a pracownikami oraz lokalną społecznością” oraz Sustainability Performance Report za 2024 rok przygotowany przez Grupę CRH [21]. W Raporcie, przedstawiono informacje na temat jak podmiot stara się sprostać trzem globalnym wyzwaniom związanym z: wodą, gospodarką o obiegu zamkniętym i dekarbonizacją. Uwzględniono również Kodeks postępowania w biznesie z 2025 r. [22], dokument przygotowany przez CRH publikowany w firmach należących do grupy w rodzimych językach. Dokonano również przeglądu stron internetowych zarówno Grupy jak i Spółki w Polsce.

Identyfikację i przegląd dokumentów oraz stron internetowych wykonano wyszukując według słów kluczowych pojedynczych bądź fraz (m.in. strategia/polityka/plan; interesariusze/społeczność/mieszkańcy w języku polskim i angielskim). Wsparto się również analizami z wykorzystaniem sztucznej inteligencji (Google Gemini).

3. REZULTATY I DYSKUSJA

Analiza treści opracowań wykazała co następuje.

Cemex poświęcając interesariuszom osobny dokument [10]. Nie tylko wymienia grupy wpływające i podlegające wpływom przedsiębiorstwa, ale określa cele, kluczowe obszary współpracy, kanały i częstotliwość angażowania rozumiane jako otwarte spotkania, ankietyzacja, publikacja biuletynów, raportów czy katalogów dobrych praktyk. Definiuje również rezultaty swoich działań. Wśród grup interesariuszy uwzględniając: pracowników, klientów, inwestorów, dostawców, lokalne społeczności oraz społeczeństwo obywatelskie, w tym: władze, stowarzyszenia biznesowe, organizacje pozarządowe i uczelnie. Dwie z ostatnich wymienionych grup można traktować jako kluczowe w uzyskaniu czy podtrzymywaniu SLO. Dialog z lokalną społecznością ma prowadzić do budowania wzajemnego zaufania, a współpraca ze społeczeństwem obywatelskim umożliwić przedsiębiorstwu partycypację w procesie tworzenia polityk i regulacji, być głosem w dyskusji. Wśród rezultatów angażowania i zwracania uwagi na potrzeby i możliwości ww. grup interesariuszy wymieniono: poprawę infrastruktury, wzrost udziału

kobiet w lokalnej gospodarce, programy wolontaryjne oraz skuteczną adaptację do nowych lokalnych, regionalnych i krajowych regulacji, tworzenie wspólnych inicjatyw wymagających interdyscyplinarnego podejścia, wzmocnienie pozycji przedsiębiorstwa, umiejętność lepszej oceny ryzyka i in. Pomimo że w dokumencie pojęcie SLO nie pojawia się dosłownie, jest jednak fundamentem strategii budowania relacji i zaufania przez przedsiębiorstwo. Firma dba o długoterminowe relacje z interesariuszami, prowadząc z nimi dialog.

W raporcie zintegrowanym za 2024 rok [8] Cemex oprócz komunikowania o działaniach zamieścił rozdział zatytułowany „Nasza strategia” poświęcając w nim uwagę interesariuszom i zapewniając że zakłada „stawianie ludzi w centrum każdej decyzji biznesowej”, co ma na celu zapewnienie pełnej zgodności działań z oczekiwaniami społecznymi.

Cemex Polska w raporcie zrównoważonego rozwoju [11] pisze wprost o SLO w zawartej w nim Strategii wpływu społecznego. Wymieniając zrealizowane dobre praktyki, zaznacza, że są one zgodne z corocznymi Planami Zaangażowania Społecznego. Strona internetowa firmy [7] ponownie zawiera informacje na temat „strategii wpływu społecznego”. Zawarte tam podstawowe informacje znajdują rozwinięcie w raportach zintegrowanych przedsiębiorstwa, w ich części niefinansowej.

Holcim posiada jedno kilkustronicowe opracowanie poświęcone kwestiom społecznym: Dialog społeczny 2022 – podsumowanie działań [15]. Opisano w nim potrzeby lokalnych społeczności sklasyfikowane według pięciu kategorii: społeczność, zdrowie, edukacja, środowisko oraz infrastruktura. Na każdą z potrzeb odpowiada się. Oprócz reakcji na zgłoszenia mieszkańców, firma wykazała się inicjatywą, przeprowadzając akcje służące społeczeństwu i środowisku, w tym m.in. sadzenie drzew, propagowanie aktywności ruchowej czy promocję edukacji w zakresie ochrony środowiska. Działania dotyczyły rejonu w pobliżu jednego z obiektów firmy (Cementowni Małogoszcz).

W raportach ESG [12, 14] nie pojawia się wprost sformułowanie „społeczna licencja na działanie”, które można jednak identyfikować jako budowanie zaufania, akceptacji oraz trwałych relacji z lokalnymi społecznościami i interesariuszami, co jest ważne w działalności firmy. Główne aspekty SLO w przypadku Holcim:

- zarządzanie ryzykiem reputacyjnym, firma identyfikuje negatywną percepcję ze strony lokalnych społeczności jako istotne ryzyko (np. w kontekście projektów wydobywczych), które może prowadzić do utraty zaufania publicznego i protestów społecznych,
- aktywne zaangażowanie interesariuszy: Holcim prowadzi ciągły dialog z interesariuszami już od fazy planowania projektów, aby zrozumieć ich potrzeby i budować wzajemne zaufanie. W Polsce przejawia się to m.in. poprzez szacunek dla „sąsiadów” oraz dialog z lokalnymi społecznościami,
- transparentność i raportowanie: kluczowym elementem utrzymania licencji społecznej jest przejrzystość w zakresie wpływu na środowisko i działań społecznych,
- tworzenie wartości społecznej: firma realizuje projekty, które mają przynieść realne korzyści otoczeniu.

Ponadto Holcim przygotował polityki dotyczące np. kwestii środowiska, gospodarki obiegu zamkniętego, ale również praw człowieka i spraw społecznych. W ostatniej z wymienionych [24] w sposób ogólny prezentuje zakres działań grupy kapitałowej skupiających się na potrzebach społecznych. Strony internetowe posiadają odnośniki do zakładzek dedykowanych kwestiom społecznym. Holcim Polska w strategii zrównoważonego rozwoju uwzględnia w przyszłych działaniach „rozwój społeczności” rozumiany jako angażowanie pracowników w wolontariat, liczbę beneficjentów objętych wsparciem oraz realizację projektów zaangażowania społecznego [13].

W raporcie **CRH** na poziomie globalnym [21] znajduje się rozdział dotyczący społeczności lokalnych i wpływu na nie. Podkreślane jest znaczenie wzajemnych relacji przedsiębiorstwo–społeczeństwo oraz troski o bezpośrednią komunikację. Utrzymanie społecznej akceptacji ułatwia realizowanie lokalnych Planów Zaangażowania Społeczności. Do 2030 roku wyznaczono cel, aby 100% spółek operacyjnych miało wdrożone ww. plany. Firma przygotowała również Oświadczenie w sprawie utrzymania pozytywnych relacji z interesariuszami [24], w którym określa swoje działania sprzyjające zaufaniu społecznemu, w tym m.in. monitorowanie działań w zakresie angażowania interesariuszy czy utrzymywanie dwustronnej komunikacji poprzez wizyty, spotkania, ankiety online, wywiady telefoniczne i sesje grup fokusowych.

Kolejne opracowanie: Kodeks postępowania w biznesie [22] odnosi się do kwestii społecznych w sposób ogólny (zakładka Postępowanie naszej społeczności). Nie definiuje konkretnych działań, ani planowanych, ani realizowanych.

Trzuskawica S.A. należąca do CRH posiada Politykę Zrównoważonego Rozwoju [20], która ma na celu podniesienie aktywności pomiędzy spółką, a pracownikami oraz lokalną społecznością. W dokumencie, każdej z wymienionych grup (nazwanych adresatami) przypisano działania (nazywane metodami) i określono częstotliwość ich realizacji. Na przykład: lokalna społeczność (adresat) wsparcie lokalnych działań związanych z bezpieczeństwem, zdrowiem, ochroną środowiska, sportem (metoda) kilka razy w roku (ramy czasowe).

Strony internetowe informują o dobrych praktykach kierowanych do społeczności (dotyczy to przede wszystkim strony głównej CRH z poziomu grupy kapitałowej).

4. WNIOSKI

Wszystkie analizowane podmioty są świadome wpływu społecznego na prowadzenie działalności biznesowej na każdym jej etapie. Wskazują na to zarówno raportowane dobre praktyki, jak i plany przyszłych działań. Strategiczne podejście różni się pod względem dokładności opisu przyszłych aktywności. Firmy przygotowujące osobne dokumenty poświęcone działaniom uwzględniającym wpływ i interakcje z interesariuszami najdokładniej definiują działania oraz zamierzone efekty. Wskazuje to na zaangażowanie społeczne przedsiębiorstw i pozwala weryfikować w perspektywie czasu zakres zrealizowanych założeń. Na wzrost transparentności działań i jasność przekazu wpływ

mają czytelnie określone cele. Oprócz powyższego rekomendowane byłoby określenie mierników monitorujących sytuację licencji społecznej na różnych etapach życia kopalni.

LITERATURA

- [1] BREAKY H., WOOD G., SAMPFORD C., *Understanding and defining the social license to operate: Social acceptance, local values, overall moral legitimacy, and "moral authority"*, Resources Policy, 2025, 102, 105488.
- [2] LESSER P., POELZER G., GUGERELL K., TOST M., FRANKS D., *Exploring scale in social licence to operate: European perspectives*, Journal of Cleaner Production, 2023, 384, 135552.
- [3] MEESTERS M., WOSTYN P., VAN LEEUWEN J., BEHAGEL J. H., TURNHOUT E., *The Social Licence to Operate and the legitimacy of resource extraction*, Current Opinion in Environmental Sustainability, 2021, 49, 7–11.
- [4] EEROLA T., *New low-impact mineral exploration technologies and the social license to explore: Insights from corporate websites in Finland*, Cleaner Environmental Systems, 2021, 3, 100059.
- [5] BICE S., *What Gives You a Social Licence? An Exploration of the Social Licence to Operate in the Australian Mining Industry*, Resources, 2014, 3, 62–80.
- [6] BOUTILIER R.G., *Frequently asked questions about the social licence to operate*, Impact Assessment and Project Appraisal, 2014, 32, 4, 263–272.
- [7] <https://www.cemex.com/> [dostęp: 20.02.2026].
- [8] *Our Future in Action, ACCELERATING A SUSTAINABLE WORLD*, Cemex 2024 Integrated Report, 1–275.
- [9] <https://www.cemex.pl/> [dostęp: 20.02.2026].
- [10] Cemex Stakeholder Engagement Policy, Global Policy effective as of March 25, 2025, that amends and replaces the prior policy dated May 2016, 1–10.
- [11] Raport Zrównoważonego Rozwoju 2022–2023 Cemex Polska, 1–138.
- [12] 2024 Integrated Annual Report Holcim, 1–414.
- [13] <https://www.holcim.pl/> [dostęp 20.02.2026]
- [14] Raport ESG Holcim Polska za rok 2024, 1–23.
- [15] *Dialog społeczny 2022 – podsumowanie działań*, Lafarge, Cementownia Małogoszcz, A member of Holcim, 1–7.
- [16] <https://www.crh.com/> [dostęp: 20.02.2026].
- [17] <https://www.trzuskawica.pl/> [dostęp: 20.02.2026].
- [18] <https://ozarow.com.pl/> [dostęp: 20.02.2026].
- [19] <https://masfalt.pl> [dostęp: 20.02.2026].
- [20] *Polityka Zrównoważonego Rozwoju*, Trzuskawica a CRH company, 1 lutego 2023.
- [21] *Building our World. Shaping the Future*, CRH 2024 Sustainability Performance Report.
- [22] *Kodeks postępowania w biznesie CRH*, 1–23.
- [23] *Human Rights and Social Policy*, 2025, 1–4.
- [24] *Maintaining positive stakeholder relationships CRH*, 1–2.

SOCIAL LICENSE TO OPERATE AS AN ELEMENT OF THE MINING SECTOR STRATEGY

The concept of “social license to operate” (SLO) has been present for many years in both public debates and academic discussions. It is associated with social acceptance and refers to the concept of legiti-

mization, simultaneously being a crucial element of the mining industry's operation. Minimizing the risk of stakeholder opposition at any stage of operations requires developing strategies that foster mutual trust between the company and society. This article attempts to answer the question of whether mining companies exploiting rock raw materials consider social issues in their plans, reports, and websites. The scope of planned and actual company activities was analyzed, allowing for an assessment of the current situation and proposals for change.

Oskar SMAGA
Sebastian WOJTCZAK

KGHM Metraco S.A., Legnica

WYKORZYSTANIE KRUSZYW POMIEDZIOWYCH DO WYTWARZANIA BETONOWYCH PREFABRYKATÓW FORMOWANYCH

Kruszywa pomiedziowe powstają w wyniku zagospodarowywania żużli, będących produktem ubocznym wytopu z koncentratów rudy miedzi. Rocznie w hutach miedzi KGHM Polska Miedź produkuje się ok. 1 mln Mg żużli pomiedziowych, w formie lanej i granulowanej, z czego 700 tys. Mg trafia na instalacje KGHM Metraco. Kruszywa łamane produkowane są w Zakładach Produkcji Kruszyw KGHM Metraco w Głogowie i w Legnicy poprzez urabianie, kruszenie oraz przesiewanie żużli lanych na hałdy lub do dołów żużlowych. Powstającymi w ten sposób produktami handlowymi są: kruszywa o uziarnieniu ciągłym: 0–31,5; 0–45 i 0–63 mm, mieszanki do stabilizacji mechanicznej tych frakcji, grysy oraz frakcje specjalnego zastosowania. Kruszywo drobne 0–5,6 mm powstaje z żużli granulowanych pochodzących z pieca elektrycznego Huty Miedzi Głogów II. Zgodnie z normą [1], kruszywa pomiedziowe można zakwalifikować do kruszyw sztucznych. Wykonane badania wykazały, że możliwe jest ich zastosowanie w mieszankach betonowych do produkcji prefabrykatów. Wytwarzane z ich udziałem materiały budowlane nie odbiegają jakością od prefabrykatów opartych jedynie o kruszywa naturalne.

1. KRUSZYWA KGHM METRACO

Głównymi składnikami kruszyw pomiedziowych są: SiO_2 (w formie związanej), Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , CaO i MgO , które stanowią ~95% masy. Pozostała część to niewielkie ilości pierwiastków, S, Zn, Pb i Cu [2]. Skład chemiczny kruszyw pomiedziowych przypomina bazalt i gabbro – kruszywa naturalne wykorzystywane w budownictwie drogowym. Wykonane badania w zakresie, m.in: nasiąkliwości, odporności na rozdrabnianie, odporności na ścieranie powierzchniowe czy szok termiczny pokazują, że kruszywa te nie ustępują kruszywom bazaltowym i granitowym [3]. Oznaczenia zawartości pierwiastków niebezpiecznych w wyciągach wodnych wykazały, że stężenia nie przekraczają wymaganych normatywów. Zanotowano natomiast minimalnie podwyższoną promieniotwórczość kruszyw pomiedziowych, w porównaniu do naturalnych [3]. Nie wyklucza to jednak zastosowania tych materiałów w budownictwie drogowym czy w mieszankach betonowych.

Aktualnie, zdecydowana większość kruszyw pomiedziowych KGHM Metraco wykorzystywana jest jako kruszywa drogowe. Ponadto, kruszywo granulowane używane jest do produkcji ścierniw oraz doziarniania mieszanek. Dzięki takim właściwościom, jak wysoka wytrzymałość, niska ścieralność (do 20% w bębnie Los Angeles), niska nasiąkliwość (średnio 0,74%), mrozoodporność (średnio 0,6) [4] oraz odpowiednia urabialność, istnieje możliwość zastosowania kruszyw pomiedziowych również w innych gałęziach budownictwa. W Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych przeprowadzono badania nad wykorzystaniem kruszyw z żużli pomiedziowych jako substytutu naturalnych kruszyw do produkcji betonów samozagęszczalnych [3]. W rezultacie otrzymano materiał, którego odporność na ściskanie była zbliżona do betonu wzorcowego, a jednocześnie charakteryzował się zwiększoną odpornością na rozciąganie.

Dodatkowo wyniki badań właściwości betonów z dodatkiem kruszywa z żużla pomiedziowego wykazały, że w większości przypadków, dodatek drobnych frakcji tych kruszyw lub częściowe zastąpienie kruszyw naturalnych powoduje poprawę właściwości betonów poprzez wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie, wzrost modułu Younga oraz zwiększenie odporności na oddziaływanie kwasu siarkowego [5]. Optymalna ilość żużla pomiedziowego względem kruszywa naturalnego, pod kątem wytrzymałości na ściskanie wynosi 40–50%. Ponadto, badania mrozoodporności (F150) wykazały, że betony zawierające kruszywa pomiedziowe spełniają wymagania normy w tym zakresie, a ich nasiąkliwość jest niższa niż betonów wzorcowych.

2. NOWY KIERUNEK WYKORZYSTANIA KRUSZYW POMIEDZIOWYCH

2.1. ZAKRES PRAC BADAWCZO-ROZWOJOWYCH

Mając na uwadze pozytywne wyniki wieloletnich badań kruszyw pomiedziowych, jak również chęć zdefiniowania nowego kierunku wykorzystania żużli, KGHM Metraco we współpracy z Katedrą Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, przeprowadziło pracę badawczo-rozwojową, nad zaprojektowaniem mieszanek betonowych z użyciem kruszyw pomiedziowych, wykonaniem prototypów oraz określeniem właściwości użytkowych wyrobów.

2.2. ZAPROJEKTOWANE MIESZANKI

Celem pierwszego etapu było zaprojektowanie mieszanek betonowych, zawierających w recepturze kruszywa KGHM Metraco, pozwalających na wyprodukowanie kilku różnych prefabrykatów formowanych. Etap rozpoczął się od analizy literatury i norm, pod względem wykorzystania kruszyw pomiedziowych w materiałach budowlanych.

Analiza obejmowała zagadnienia związane z: wibroprasowaniem, wymaganiami normowymi dotyczącymi elementów murowych [6] czy promieniotwórczością [7]. W drugiej części wykonano badania kruszyw: (analiza sitowa, wodoządnosć, gęstość nasypowa). W oparciu o metody obliczeniowe zaprojektowano receptury nr 1 i 2, mieszanek do produkcji bloczków betonowych o klasie wytrzymałości 20 MPa, różniące się ilością kruszyw naturalnych, pomiedziowych kruszyw drobnych (0–5,6) i grubych (0–22 mm), a także recepturę betonu lekkiego (nr 3) do produkcji bloczków żużło-betonowych o wytrzymałości 15 MPa. Opracowane receptury zostały poddane optymalizacji w kolejnych etapach projektu.

2.3. OPTYMALIZACJA MIESZANEK

Optymalizacja obejmowała m.in. ilości: wody, cementu, popiołów lotnych, jak również samych kruszyw KGHM Metraco. Każdorazowo, po wprowadzeniu modyfikacji, wykonywano próbki, które po odpowiednim czasie poddawano ocenie wytrzymałości na ściskanie. Ponadto, dla każdej zoptymalizowanej receptury, szacowano wskaźnik stężenia izotopów promieniotwórczych. W wyniku wprowadzanych zmian, otrzymano po kilka wariantów każdej receptury, a większość próbek spełniała założone wymagania wytrzymałościowe. W celu opracowania ostatecznych receptur, przeprowadzono analizę mechaniczno-ekonomiczną, dla wytypowania mieszanki zapewniającej odpowiedni stosunek pomiędzy wytrzymałością prefabrykatów a kosztem ich wytworzenia. Dla wytypowanych receptur określono właściwości mieszanek betonowych oraz stwardniałego betonu. Ocenie poddano: konsystencję metodą opadu stożka, gęstość netto oraz brutto w stanie suchym, nasiąkliwość i wytrzymałość na ściskanie (tab. 1).

Tabela 1. Właściwości mieszanek betonowych oraz stwardniałego betonu;
wg receptur KGHM Metraco
Table 1. Table of properties of concrete mixes and hardened concrete;
according to KGHM Metraco recipes

Właściwości	Receptura 1	Receptura 2	Receptura 3
Konsystencja	wilgotna		
Gęstość netto/brutto w stanie suchym (wartość zalecana)	2290 kg/m ³	1980 kg/m ³	1580 kg/m ³
	brak zaleceń normowych		
Nasiąkliwość	5,9%	5,2%	5,8%
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach – próba laboratoryjna	>6 MPa	>9 MPa	>8 MPa
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach – próba laboratoryjna	>10 MPa	>14 MPa	>12 MPa
Szacowana wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach – próba na wibroprasie	>20 MPa	>20 MPa	>20 MPa

2.4. PREFABRYKATY W SKALI PRODUKCYJNEJ

W ostatnim etapie, przy współpracy z zakładem prefabrykacji wytworzono partie testowe prefabrykatów, w oparciu o opracowane receptury. Podczas prób w skali produkcyjnej, ze względu na konieczność dostosowania do surowców oraz urządzeń dostępnych w zakładzie, dokonano niewielkich zmian w składzie mieszanek. Produkt końcowy – bloczki betonowe o wytrzymałości >20 MPa charakteryzowały się zwartą strukturą, nie obserwowano odpajającego się kruszywa ani większych porów (rys. 1).



Rys. 1. Bloczki betonowe wykonane z kruszyw KGHM Metraco
Fig. 1. Concrete blocks manufactured with KGHM Metraco aggregates

Po wytworzeniu reprezentatywnych partii dla wszystkich trzech receptur przeprowadzono ocenę właściwości wyrobów gotowych, która obejmowała:

- wymiary, równoległość i płaskość powierzchni kładzenia,
- gęstość, wytrzymałość mechaniczną,
- właściwości cieplne,
- absorpcję wody, rozszerzalność pod wpływem wody,
- przepuszczalność pary wodnej,
- promieniotwórczość.

Na podstawie wyników analiz wykazano, że bloczki charakteryzują się właściwościami zbliżonymi do analogicznych prefabrykatów produkowanych z kruszyw naturalnych. Jedynie w przypadku bloczków wykonanych wyłącznie z kruszyw KGHM Metraco (rys. 1), stwierdzono minimalnie przekroczoną wartość promieniowania określoną w obowiązującym na dzień wykonywania badań rozporządzeniu [8]. Przekroczenie tej wartości nie wyklucza jednak wykorzystania prefabrykatów wyprodukowanych w oparciu o tę recepturę do innych zastosowań. Możliwe jest również obniżenie wskaźnika promieniotwórczości poprzez częściowe zastąpienie kruszyw KGHM Metraco kruszywami naturalnymi.

2.5. ZGŁOSZENIE PATENTOWE I WYKORZYSTANIE WYNIKÓW

Ze względu na powstanie, w toku prowadzonego projektu, rozwiązania o znamionach wynalazku, dokonano zgłoszenia patentowego obejmującego receptury mieszanek betonowych do wytwarzania prefabrykatów formowanych, składających się z cementu, kruszywa drobnego i grubego, wody, a także domieszki uplastyczniającej, przy czym kruszywo zawiera żużel pomiedziowy z frakcją ziaren drobnych oraz grubych. Stos okruszowy utworzony jest z mieszaniny dwóch rodzajów kruszyw z żużli pomiedziowych o ciągłych frakcjach ziaren w zakresie 0–5,6 i 0–22 mm. W kompozycji mieszanek, kruszywa pomiedziowe stanowią 90% ($\pm 2\%$) objętości, a cement dodaje się w ilości od 270 do 300 kg, a stosunek wodno-cementowy (w/c) zawiera się w zakresie od 0,20 do 0,30.

3. PODSUMOWANIE

Kruszywa pomiedziowe produkowane przez KGHM Metraco stanowią wysokiej jakości zamiennik dla kruszyw naturalnych. Do tej pory wykorzystywane były przede wszystkim w budownictwie drogowym. Przeprowadzona praca badawczo-rozwojowa, ukierunkowana na znalezienie nowego zastosowania tych kruszyw wykazała, że możliwe jest ich zastosowanie w mieszankach betonowych wykorzystywanych do produkcji prefabrykatów. Wytwarzane materiały budowlane nie odbiegają jakością od prefabrykatów opartych jedynie o kruszywa naturalne.

LITERATURA

- [1] PN-EN 12620+A1:2010. *Kruszywa do betonu*.
- [2] SPECZIK S., BACHOWSKI C., MIZERA A., GROTOŃSKI A., *Stan aktualny i perspektywy gospodarki odpadami stałymi w KGHM Polska Miedź S.A.*, [w:] Warsztaty „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, IGSMiE PAN, Kraków 2023, 155–177.
- [3] RAJCZYK K., ROLKA G., GAMBAL P., *Kruszywa z żużla powstającego przy produkcji miedzi i możliwości ich wykorzystania w świetle wymagań ochrony środowiska*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Opole 2016, R. 9, 27 (27), 84–94.
- [4] DUSZYŃSKI A., JASIŃSKI W., PRYGA-SZULC A., *Kruszywa pomiedziowe z żużli sztabowych – charakterystyka i zastosowanie w budownictwie drogowym*, [w:] Biuletyn PIG, 2017, 469, 75–84.
- [5] KORENTZ J., JURCZAK R., SZMATUŁA F., *Cement Wapno Beton*, 2020, 25(5), 367–375.
- [6] PN-EN 771-3+A1:2015-10. *Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 3: Elementy murowe z betonu kruszywowego (z kruszywami zwykłymi i lekkimi)*.
- [7] Rozporządzenie RM z dnia 17 grudnia 2020 r. ws. materiałów budowlanych, w przypadku których oznacza się stężenie promieniotwórcze izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232, wymagań dotyczących dokonywania tych oznaczeń oraz wartości wskaźnika stężenia promieniotwórczego, o której przekroczeniu informuje się właściwe organy (t.j., DzU 2002.220.1850).
- [8] Rozporządzenie RM z dnia 3 grudnia 2002 r. ws. wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na

pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów (t.j., DzU 2021.33).

COPPER SLAG AGGREGATES AS A COMPONENT OF CONCRETE MIXES FOR THE PRODUCTION OF PREFABRICATED ELEMENTS

A Research and Development project was carried out with the aim of developing a new application for copper slag aggregates, produced by KGHM Metraco. Long term research into copper slag indicated that this material could be an excellent substitute for natural aggregates. In cooperation with scientists from the Wrocław University of Technology, concrete mixes with KGHM Metraco copper slag aggregates for the production of prefabricated elements were developed. The manufactured building materials (concrete blocks) meet the requirements of the relevant standards.

A u t o r z y

- Ireneusz BAIC, ireneusz.baic@wit.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
- Alicja BAKALARZ, alicja.bakalarz@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Ryszard BŁĄŻEJ, ryszard.blazej@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa,
Laboratorium Transportu Taśmowego
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Piotr BORTNOWSKI, piotr.bortnowski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Dariusz FOSZCZ, foszcz@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Magdalena DUCHNOWSKA, magdalena.duchnowska@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Dariusz FOSZCZ, foszcz@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Andrzej GAŁAŚ, agalas@min-pan.krakow.pl
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zakład Gospodarki Zasobami Mineralnymi
ul. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków
- Slávka GAŁAŚ, sgalas@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Analiz Środowiskowych,
Kartografii i Geologii Gospodarczej
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Tomasz GAWENDA, gawenda@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Magdalena GUSZKA-DROSIK, magdalena.gruska@wit.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
- Katarzyna GUZIK, guzik@min-pan.krakow.pl
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zakład Gospodarki Zasobami Mineralnymi
ul. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków
- Yutaka JITSUYAMA, y-jitsu@agr.hokudai.ac.jp
Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo
Kita 9 Nishi 9, Kita ward, Sapporo, Hokkaido 060-8589, Japan
- Leszek JURDZIAK, leszek.jurdziak@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Piotr KARWOWSKI, piotr.karwowski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Urszula KAŻMIERCZAK, urszula.kazmierczak@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Żaklina KONOPACKA, zaklina.konopacka@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Wiesław KOZIOŁ, wieslaw.kozio@wit.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
- Aldona KRAWCZYKOWSKA, aldona.krawczykowska@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Robert KRÓL, robert.krol@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Zbigniew KRYSA, zbigniew.krysa@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

- Natalia KUREK, kureknatalia148@gmail.com
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Łukasz MACHNIAK, machniak@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Górniczej i Bezpieczeństwa Pracy
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Jerzy MALEWSKI, jerzy.malewski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Hajime MATSUSHIMA, matts@agr.hokudai.ac.jp
Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo
Kita 9 Nishi 9, Kita ward, Sapporo, Hokkaido 060-8589, Japan
- Artur MIROS, artur.miros@wit.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
- Anna NOWAK-SZPAK, anna.nowak-szpak@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Maksymilian OZDOBA, maksymilian.ozdoba@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Katarzyna PACTWA, katarzyna.pactwa@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Geodezji i Geoinformatyki
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Izabela POLNISZEK, izabela.polnieszek@icimb.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie
ul. Cementowa 8, 31-983 Kraków
- Aleksandra RZESZOWSKA, aleksandra.rzeszowska@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Daniel SARAMAK, dsaramak@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Konrad SŁOWIŃSKI, konrad.slowinski@kruszpol.pl
Polski Związek Producentów Kruszyw
Al. Solidarności 34/325, 25-323 Kielce
- Oskar SMAGA, oskar.smaga@metraco.pl
KGHM Metraco S.A.
ul. św. M. Kolbe 9, 59-220 Legnica
- Dagmara SOLATYCKA, d.solatycka@wug.gov.pl
Okręgowy Urząd Górniczy we Wrocławiu
ul. Kotlarska 41, 50-151 Wrocław
- Agata STEMPOKOWSKA, stemp@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Tomasz STĘPIEŃ, t.stepien@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Paweł STRZAŁKOWSKI, pawel.strzalkowski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Agnieszka SUROWIAK, asur@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Sebastian WOJTCZAK, sebastian.wojtczak@metraco.pl
KGHM Metraco S.A.
ul. św. M. Kolbe 9, 59-220 Legnica
- Michał WOLNY, michal.wolny@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Marek ZAWALSKI, marek.zawalski@wit.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
- Radosław ZIMROZ, radoslaw.zimroz@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

KÜPER®

POLSKA

Optymalne rozwiązania dla przesiewania kruszyw.

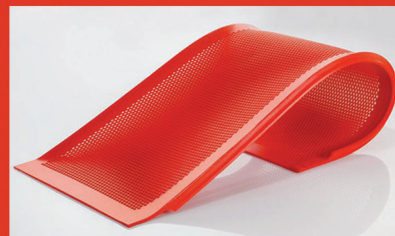
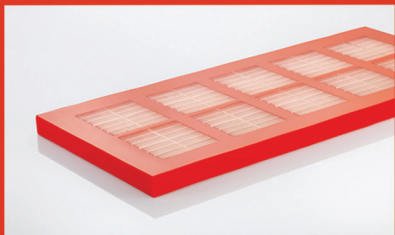
- sita przemysłowe:
gumowe, poliuretanowe, stalowe
segmentowe, napinane, płaskie
- maty do odwadniaczy • płyty poliuretanowe • akcesoria:
dysze natryskowe, kulki czyszczące sita, kołki montażowe, zgarniacze i inne
- sprężyny i części do przesiewaczy, • doradztwo i pomoc w doborze sit

- maszyny i urządzenia:



SCHAUENBURG

Maschinen- und Anlagen-Bau GmbH



Kueper Polska Sp. z o.o.

tel. +48 604 176 066,

604 176 065,

info@kueperpolska.com



www.kueperpolska.com

PUTZ RECYCLING

 **Omega** CRUSHING
& SCREENING

 **BARFORD**

BRUCE
MATERIALS PROCESSING SOLUTIONS

propel

DLACZEGO MY?

- Ponad 25 lat w branży
- Atrakcyjne ceny
- Ekspresowe dostawy
- Największy magazyn części w Polsce



OFERTA:

- Części do kruszarek
 - Szczękowych
 - Stożkowych
 - Udarowych
- Części do przesiewaczy
- Przenośniki
- Separatory magnetyczne
- Maszyny nowe
- Maszyny używane z gwarancją
- Kompletnie zakłady przeróbcze
- Wynajem maszyn

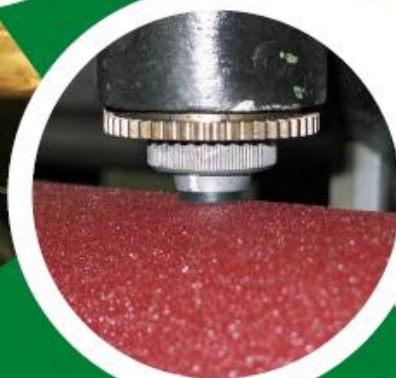
KONTAKT:

ul. Nowowiejska 24
44-153 Trachy
www.putz.com.pl
+48 603 289 104



Badamy taśmy przenośnikowe i ich połączenia, gumę, mieszanki kauczukowe i tworzywa sztuczne

- Badania dotyczące bezpieczeństwa
pożarowego
- Badania właściwości
fizyko-mechanicznych
- Badania rozwojowe
- Badania atestacyjne
- Konsultacje, opinie
i ekspertyzy



POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ GEOINŻYNIERII, GÓRNICTWA I GEOLOGII
KATEDRA GÓRNICTWA
LABORATORIUM BEZPIECZEŃSTWA PRACY

ul. Na Grobli 13, 50-421 Wrocław, tel. 782 070 760, monika.maslakiewicz@pwr.edu.pl



AB 905

LABORATORIUM BEZPIECZEŃSTWA PRACY

**(akredytacja nr AB 905 - pełny zakres dostępny na www.pca.gov.pl)
oferuje:**

a) akredytowane badania środowiska pracy i w środowisku zewnętrznym

- powietrze: pyły przemysłowe, substancje nieorganiczne, stężenie/zawartość krystalicznej krzemionki (kwarc i krystobalit);
- hałas na stanowiskach pracy;
- hałas ultradźwiękowy na stanowiskach pracy;
- drgania mechaniczne działające na organizm człowieka przez kończyny górne;
- drgania mechaniczne o ogólnym działaniu na organizm człowieka;
- hałas pochodzący od instalacji, urządzeń, zakładów przemysłowych;

b) nieakredytowane badania i ekspertyzy

- modelowanie komputerowe rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pyłowych i gazowych (spalin) oraz hałasu w środowisku zewnętrznym na potrzeby kart informacyjnych przedsięwzięć oraz ocen oddziaływania na środowisko;
- ocena wydatku energetycznego metodą pomiarową lub tabelaryczną;
- szkolenia specjalistyczne w zakresie realizacji i walidacji metod pomiarowych;
- projektowanie działań poprawy warunków pracy/bytowania;
- dobór ochronników słuchu;
- porównania międzylaboratoryjne w zakresie akredytowanych metod badawczych.

KONTAKT

inż. Monika Maślakiewicz: 782 070 760, monika.maslakiewicz@pwr.edu.pl

dr inż. Danuta Szyszka: 662 080 102, danuta.szyszka@pwr.edu.pl

Notatki



ISBN 978-83-8134-020-5