



**Komeko 2021**

**INNOWACYJNE I PRZYJAZNE  
DLA ŚRODOWISKA  
TECHNIKI I TECHNOLOGIE  
PRZERÓBKI SUROWCÓW  
MINERALNYCH**

**BEZPIECZEŃSTWO - JAKOŚĆ - EFEKTYWNOŚĆ**

**Instytut Techniki Górniczej**





**Praca zbiorowa**

**INNOWACYJNE I PRZYJAZNE DLA ŚRODOWISKA TECHNIKI  
I TECHNOLOGIE PRZERÓBKI SUROWCÓW MINERALNYCH**

**BEZPIECZEŃSTWO – JAKOŚĆ – EFEKTYWNOŚĆ**

**KOMEKO 2021**



**Redakcja naukowa:**

dr hab. inż. Dariusz Prostański, prof. ITG KOMAG

dr inż. Bartosz Polnik

**Redaktorzy techniczni:**

mgr inż. Marzena Pabian-Macina

mgr inż. Bogna Kolasieńska

**Wydawca:**

Instytut Techniki Górniczej KOMAG

ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice,

Copyright by Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2021



## WPROWADZENIE

Szanowni Państwo,

W kolejnej monografii z cyklu KOMEKO mamy przyjemność zaprezentować Państwu najnowsze prace naukowo-badawcze oraz wdrożeniowe dotyczące technologii, procesów i technik przerobczych służących wzbogacaniu surowców mineralnych, a także nowych rozwiązań z zakresu wytwarzania i magazynowania energii odnawialnej.

Staraniem autorów niniejszej monografii było zaprezentowanie nie tylko różnorodności zagadnień związanych z technikami okołogórnictwymi, ale również z zagospodarowaniem terenów pogórnictwa w sposób przyjazny środowisku i społeczeństwu. Transformacja regionu Śląska w kierunku rozwiązań zielonych, praktycznych dla biznesu i jego mieszkańców jest jednym z najważniejszych zadań na nadchodzące lata. Region Śląska jest pełen miejsc wymagających rewitalizacji, przeobrażenia i dostosowania do wymogów zgodnych z kierunkami Zielonego Ładu.

Pierwsze dwa rozdziały monografii opisują procesy przerobcze związane z zastosowaniem osadzarek ze szczególnym uwzględnieniem węgla koksujących. Możemy zapoznać się z wynikami badań skuteczności węzła osadzarkowego w oparciu o analizy gęstościowe, za pomocą których wyznaczono parametry rozdziału materiału w wąskich klasach ziarnowych 25-0,5 mm. Opisano również efekty wdrożenia osadzarek typu KOMAG, gdzie przedstawiono wyniki badań skuteczności wzbogacania węgla energetycznych i koksowych.

Kolejne dwa rozdziały opisują prace związane z badaniami i określeniem pierwiastków ziem rzadkich zawartych w surowcach mineralnych. W minerałach występujących w Polsce nie odnotowano jak dotąd większych stężeń tych pierwiastków, dlatego tak istotne jest dalsze poszukiwanie tego rodzaju surowców krytycznych. W badaniach zastosowano autorską metodę badawczą spektrometrii mas z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS).

Wygaszanie działalności kopalń węgla i dążenie do wytwarzania energii odnawialnej wymusza konieczność opracowywania coraz to bardziej skutecznych metod magazynowania dużych ilości energii. Jednym z takich rozwiązań jest opisany w monografii hybrydowy magazyn energii, wykorzystujący wodór jako jej nośnik.

Wytwarzanie energii elektrycznej za pomocą coraz popularniejszych paneli fotowoltaicznych wymaga określenia efektywności energetycznej stosowania tego typu rozwiązań. W rozdziale dotyczącym takich rozwiązań opisano założenia techniczne rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów przemysłowych. Autorzy określili, że czas zwrotu takiej inwestycji wynosi 10 lat, a realna ich trwałość ok. 25 lat.

W jednym z rozdziałów poruszono istotny aspekt ochrony zdrowia człowieka poprzez zastosowanie urządzenia odpylająco-dezynfekującego do redukcji zapylenia w miejscu pracy. Urządzenie oprócz funkcji redukcji pyłu posiada również funkcję neutralizacji zanieczyszczeń biologicznych poprzez zastosowanie promieni ultrafioletowych. W monografii znajduje się także rozdział opisujący metodę zwiększenia trwałości powierzchni cylindrów hydraulicznych poprzez nagniatanie powierzchni, co prowadzi do uzyskania znacznie korzystniejszych ich cech użytkowych.

Monografię zamyka rozdział na temat metod weryfikacji wyników symulacji rozkładu pola elektrycznego układów izolacyjnych. W opisie przedstawiono model izolatora i porównanie wyników symulacji z rzeczywistymi pomiarami potencjału pola elektrycznego.

Za opracowaną monografię składamy podziękowania autorom poszczególnych rozdziałów, recenzentom za wnikliwą ocenę i korektę treści oraz zespołowi redakcyjnemu za opiekę nad jakością wydawniczą niniejszej monografii.

dr hab. inż. Dariusz Prostański  
profesor ITG KOMAG

dr inż. Bartosz Polnik

Redaktorzy naukowcy monografii

Gliwice, 2021 r.



## Spis treści

Badania skuteczności osadzarkowego procesu wzbogacania miałow węgla koksowych w wąskich klasach ziarnowych .....	6
Poprawa produktów handlowych poprzez zastosowanie nowych rozwiązań osadzarek typu KOMAG .....	18
Badania zawartości pierwiastków ziem rzadkich w wybranych polskich surowcach skalnych .....	31
Określenie koncentracji pierwiastków ziem rzadkich w odpadach górniczych z hałd Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego .....	44
Hybrydowe obiektowe magazyny energii .....	53
Analiza efektywności energetycznej i założenia techniczne rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów przemysłowych .....	67
Możliwość zastosowania urządzenia odpylająco-dezynfekującego w celu zwalczania szkodliwych czynników środowiskowych .....	83
Dynamiczne nagniatanie powierzchni cylindrów hydraulicznych .....	91
Metoda pomiarowa weryfikacji wyników symulacji rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem woltomierza elektrostatycznego .....	104
Indeks autorów .....	110
Załącznik reklamowy .....	111



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.1>

## **Badania skuteczności osadzarkowego procesu wzbogacania mialów węgla koksowych w wąskich klasach ziarnowych**

**Daniel Kowol** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Piotr Matusiak** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki badań skuteczności wzbogacania mialów koksowych, charakteryzujących się znacznym udziałem klasy ziarnowej 3-0 mm, w oparciu o analizy gęstościowego rozdziału materiału 25-0,5 mm. W celu określenia wpływu udziału drobnych ziaren w nadawie na skuteczność osadzarkowego procesu wzbogacania wyznaczono parametry rozdziału materiału w wąskich klasach ziarnowych. Przedstawiono koncepcje rozwiązań, których zastosowanie pozwoli na wzrost skuteczności procesu wzbogacania węgla koksowych w osadzarkach mialowych ITG KOMAG.

Słowa kluczowe: węgiel koksowy, wzbogacanie, osadzarka pulsacyjna, skuteczność rozdziału

### **Testing the efficiency of jig beneficiation of coking coal fines in narrow grain size classes**

**Abstract:** Results of testing the efficiency of beneficiation of coke fines of a significant share of the grain size 3-0 mm, based on the analysis of density separation of 25-0.5 mm material are presented. In order to determine the impact of the share of fine grains in the feed on the efficiency of the jig beneficiation process, the parameters of material separation in narrow grain classes were determined. Concepts of solutions, the use of which will increase the efficiency of the process of beneficiation of coking coals in the KOMAG's coal fines jig machines are presented.

Keywords: coking coal, beneficiation, pulsating jig, separation efficiency

## **1. Wprowadzenie**

Osadzarki pulsacyjne konstrukcji ITG KOMAG stosowane są do wzbogacania nadaw mialowych w klasie 20-0 mm i średnioziarnowych w klasie 70-0 mm podczas produkcji węgla koksowych. Zakres uziarnienia nadaw węglowych kierowanych do osadzarek wynika z przyjętego, podczas projektowania zakładów przerobczych, modelu układu technologicznego urządzeń realizujących procesy klasyfikacji, wzbogacania i odwadniania materiału oraz zmian wprowadzanych w okresie eksploatacyjnym.

Skuteczność osadzarkowego procesu wzbogacania nadaw węglowych w zakresie gęstościowego rozdziału jest zależna m.in. od:

- charakterystyki nadawy [1, 2, 3],
- równomierności zasilania osadzarki nadawą [4, 5, 6, 7],
- konstrukcji osadzarki i metod sterowania pulsacyjnym przepływem powietrza roboczego oraz odprowadzaniem produktów ciężkich (produkt odpadowy, półprodukt) [4, 8, 9, 10],
- doboru właściwych parametrów powietrza roboczego, natężenia dopływu wody procesowej oraz nastaw w układach regulacyjnych osadzarki [5, 11, 12, 13, 14],
- algorytmów zastosowanych w systemach sterowania osadzarkowym węzłem wzbogacania [15, 16, 17, 18, 19].

Nadawy węgla koksowych w klasie 20-0 mm charakteryzuje bardzo duży udział ziaren poniżej 3 mm, przekraczający 50%. Wynika to z wysokiej podatności na rozdrabniania węgla koksowych,



sposobu ich urabiania podczas wydobycia oraz braku odmulaniania materiału przed jego wprowadzeniem do osadzarki.

W większości węzłów osadzarkowego wzbogacania węgla koksowych nadawa nie podlega odmuleniu na sitach stałych lub wibracyjnych i jest wprowadzana do osadzarek wraz z wodą górną często zawierającą drobnoziarnisty materiał.

Znaczny i często większościowy udział w nadawie drobnoziarnistego materiału negatywnie wpływa na skuteczność procesów technologicznych realizowanych podczas osadzarkowego wzbogacania węgla koksowych [1]. Utrudnia pulsacyjny przepływ wody przez warstwę materiału, co może powodować zarówno zmniejszenie skuteczności jego gęstościowego rozdziału na skutek wzrostu zagęszczenia ośrodka, jak i szkodliwy wpływ powietrza z wnętrza podsitowych komór pulsacyjnych do przestrzeni roboczej osadzarki.

Szeroki zakres uziarnienia nadaw miałowych, znacznie odbiegający od optymalnego stosunku uziarnienia ziaren od największych do najmniejszych wynoszącego 4:1, powoduje, że względu na obecność ziaren równoopadających w warstwach przyrozdziiałowych w proggu rozdzielczym, konieczność stosowania wielostopniowego oddzielania od materiału frakcji odpadowych w kolejnych trzech przedziałach roboczych osadzarki lub dodatkowo w osadzarce przeznaczony do wtórnego wzbogacania półproduktu [20].

Analiza przebiegu rozdziału materiału w osadzarkach wykazała, że oprócz parametrów nadawy najbardziej istotnym czynnikiem mającym wpływ na skuteczność osadzarkowego procesu wzbogacania nadaw węglowych jest sposób ich wprowadzania do koryta roboczego osadzarki [6].

Zapewnienie wymaganego równomiernego, pod względem ilościowym i jakościowym, rozprowadzenia materiału nadawy na wlocie do koryta roboczego osadzarki na całej jego szerokości przy obecnie stosowanych rozwiązaniach jest trudne do uzyskania, zwłaszcza gdy podczas transportu nadawy w kierunku osadzarki znajdują się prostopadłe do jej osi przesypy, w których występuje segregacja ziaren wg prędkości opadania.

Występowanie tego zjawiska ogranicza również skuteczność równomiernego rozprowadzania materiału na szerokości urządzeń wibracyjnych, takich jak podajniki i przesiewacze.

Nierównomierny rozkład materiału nadawy na szerokości wlotu osadzarki negatywnie wpływa na skuteczność gęstościowego rozwarstwienia materiału oraz dokładność jego rozdziału na produkty, co w rezultacie może powodować obniżenie ich parametrów jakościowych i zmniejszenie wychodów koncentratu węglowego przy jednoczesnym zwiększeniu ilości produktu odpadowego i półproduktu.

Negatywne skutki ww. nieprawidłowości w zasilaniu osadzarki nadawą ulegają nasileniu wraz ze wzrostem szerokości koryta roboczego, zakresu uziarnienia nadawy i udziału ziaren frakcji ciężkich.

## 2. Badania własne

Celem badań było określenie wpływu udziału drobnych ziaren w nadawie na skuteczność osadzarkowego procesu wzbogacania węgla koksowych. Przeprowadzono badania skuteczności wzbogacania miałów koksowych charakteryzujących się znacznym udziałem klasy ziarnowej 3-0 mm. Ocenę skuteczności wykonano w oparciu o wyniki gęstościowego rozdziału materiału w wąskich klasach ziarnowych 25-12 mm, 12-6 mm, 6-3 mm oraz 3-0,5 mm [21].



## 2.1. Obiekt badań

Osadzarka OM24 wzbogaca miął węgla koksowego o uziarnieniu 20(30)-0 mm charakteryzujący się znacznym, często przekraczającym 50% udziałem w nadawie klasy ziarnowej 3-0 mm.

Osadzarka posiada trójprzedziałową konstrukcję umożliwiającą uzyskiwanie produktu odpadowego w dwóch pierwszych przedziałach oraz produktu koncentratowego i półproduktu w trzecim przedziale. Produkt odpadowy otrzymywany z dwóch pierwszych przedziałów po połączeniu jest odwadniany w pojedynczym przenośniku kubelkowym analogicznie jak półprodukt z przedziału przerostowego.

W porównaniu do dotychczasowych konstrukcji osadzarek typu KOMAG, w których szerokość koryta roboczego zawierała się w przedziale 2-3 m, w osadzarce OM24 wynosi ona 3,5 m.

## 2.2. Metodyka badań

Materiał do analiz laboratoryjnych wykorzystanych w badaniach uzyskano podczas prób technologicznych zrealizowanych przy obciążeniu osadzarki OM24 nadawą wynoszącą około 580 t/h. Próbkę nadawy i produktu odpadowego pobierano z przenośników taśmowych, półprodukt z przenośnika kubelkowego, a produkt koncentratowy z krawędzi przelewu progę przedziału przerostowego.

W celu wykonania analiz parametrów rozdziału dla całości materiału oraz w klasach ziarnowych próbki nadawy, produktu koncentratowego, półproduktu i produktu odpadowego poddano klasyfikacji na sitach o otworach 12, 6, 3 i 0,5 mm, a następnie materiał klas ziarnowych 25-12 mm; 12-6 mm; 6-3 mm oraz 3-0,5 mm rozdzielono w cieczach ciężkich jednorodnych o gęstościach 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; i 1,8 g/cm<sup>3</sup>. W oparciu o uzyskane wyniki analiz laboratoryjnych opracowano współrzędne rozdziału klasofrakcji oraz określono skuteczność procesu wzbogacania całości materiału w klasie 25-0,5 mm oraz w klasach 25-12 mm, 12-6 mm, 6-3 mm i 3-0,5 mm.

Skuteczność rozdziału materiału była charakteryzowana wartością parametru  $E_p$  (rozproszaniem prawdopodobnym) wyznaczonego w zależności od uzyskanego zakresu współrzędnych krzywych rozdziału dla gęstości  $\rho_{25}$  i  $\rho_{75}$  lub  $\rho_{25}$  i  $\rho_{50}$ . W badaniach przeprowadzono analizę porównawczą parametrów rozdziału materiału ( $\rho_{50}$  i  $E_p$ ) w klasach ziarnowych oraz uzysku frakcji gęstościowych nadawy w produktach wzbogacania.

W oparciu o wyniki rozdziału klasofrakcji przeprowadzono analizę wpływu udziału w nadawie miałowej klasy ziarnowej 3-0,5(0) mm na uzyskiwane w osadzarce parametry ilościowe produktów wzbogacania.

## 2.3. Wyniki badań

### 2.3.1. Analizy granulometryczne i densymetryczne

W nadawie o uziarnieniu 25-0 mm udział ziaren w klasie <3 mm był znaczny i wynosił 52,8%, w tym 20,5% stanowiły ziarna o wielkości <0,5 mm.

W analizowanym gęstościowo zakresie uziarnienia 25-0,5 mm skład granulometryczny nadawy charakteryzował się znacznym udziałem klasy 3-0,5 mm wynoszącym 40,6%. Udziały pozostałych analizowanych klas ziarnowych zawierały się w przedziale od 16,4% do 22,4%.

Skład ziarnowy koncentratu był mocno zbliżony do składu nadawy. Produkt koncentratowy charakteryzował się znacznym, wynoszącym 40,0% udziałem klasy 3-0,5 mm. Udziały w koncentracji





pozostałych klas ziarnowych zawierały się w przedziale od 18,2% (klasa 6-3 mm) do 22,8% (klasa 12-6 mm).

W półprodukcie większościowy udział stanowiła klasa 3-0,5 mm równa 66,3%. Natomiast udziały pozostałych klas ziarnowych były zbliżone i zawierały się w przedziale od 10,2% (klasa 12 – 6 mm) do 12,4% (klasa 25 – 12 mm). Produkt odpadowy charakteryzował się większościowym udziałem ziaren o rozmiarze 25-6 mm wynoszącym 63,7%.

Wyniki analiz granulometrycznych zestawiono w tabeli 1.

#### Skład granulometryczny nadaw i produktów wzbogacania [21]

Tabela 1

Klasa ziarnowa, mm	Nadawa I st.		Odpady	Nadawa II st.	Półprodukt	Koncentrat
	%	%	%	%	%	%
25-12	16,42	20,65	32,34	17,34	12,39	18,9
12-6	17,77	22,35	31,38	19,79	10,16	22,84
6-3	13,01	16,37	15,79	16,53	11,2	18,22
3-0,5	32,30	40,63	20,47	46,34	66,25	40,04
<0,5	20,50					
Suma	100	100	100	100	100	100
Wychód	100	100	22,08	77,92	18,73	59,19

Nadawa w klasie 25-0,5 mm zawierała 61,7% ziaren frakcji koncentratowych o gęstości  $<1,5 \text{ g/cm}^3$ , 5,4% ziaren frakcji przerostowych o gęstości  $1,5 - 1,8 \text{ g/cm}^3$  oraz 32,9% frakcji odpadowych o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$ .

Wyniki analizy densymetrycznej produktu koncentratowego wykazały, że zawierał on w przeważającej części ziarna frakcji koncentratowych ( $<1,5 \text{ g/cm}^3$ ), których udział wynosił 95,6%. Ponadto zawierał 3,8% ziaren frakcji przerostowych ( $1,5-1,8 \text{ g/cm}^3$ ) oraz 0,6% ziaren frakcji odpadowych ( $>1,8 \text{ g/cm}^3$ ).

Analiza densymetryczna półproduktu wykazała, że produkt ten złożony był w większości z ziaren frakcji odpadowych (gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$ ), których udział wyniósł 61,9%. Udziały ziaren frakcji koncentratowych ( $<1,5 \text{ g/cm}^3$ ) i przerostowych ( $1,5-1,8 \text{ g/cm}^3$ ) w półprodukcie kształtowały się na poziomie, odpowiednio 25,2% i 12,9%.

Produkt odpadowy zawierał głównie ziarna frakcji odpadowych ( $>1,8 \text{ g/cm}^3$ ), których udział wyniósł 94,7%.

Wyniki analiz gęstościowych zamieszczono w tabeli 2.

#### Skład gęstościowy nadaw i produktów wzbogacania w klasie ziarnowej 25-0,5 mm [21]

Tabela 2

Gęstość frakcji, $\text{g/cm}^3$	Nadawa I st.	Odpady	Nadawa II st.	Półprodukt	Koncentrat
	%	%	%	%	%
<1,5	61,72	1,90	78,67	25,20	95,60
1,5-1,8	5,43	3,40	6,01	12,92	3,81
>1,8	32,85	94,70	15,32	61,88	0,59
Suma	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



### 2.3.2. Analiza rozdziału klasofrakcji

Analiza rozdziału klasofrakcji w produktach wzbogacania zależnego od przebiegu procesu rozwarstwiania materiału w osadzarce oraz od procesu odprowadzania w niej produktów ciężkich w postaci produktu odpadowego i półproduktu wykazała wpływ wielkości ziaren na rozdział frakcji koncentratowych, przerostowych i odpadowych (tabela 3).

Podczas oddzielania z materiału nadawy frakcji ciężkich w dwóch kolejnych przedziałach odpadowych osadzarki uzysk frakcji o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$  w produkcie odpadowym obniżał się wraz ze zmniejszaniem rozmiaru ziaren w zakresie od 93,3% (klasa 25-12 mm) do 30,7% (klasa 3-0,5 mm). Po przepływie pozostałych w materiale ziaren odpadowych do przedziału przerostowego były one w klasie 25-3 mm całkowicie oddzielone i odprowadzane z półproduktem.

Uzysk klasofrakcji 3-0,5 mm o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$  w półprodukcie wynosił 66,9%, a w produkcie koncentratowym 2,4% i był uzyskany poprzez możliwość wykorzystania do odprowadzania półproduktu, zarówno szczelinowego przepustu produktu ciężkiego i jak i powierzchni sitowej przedziału przerostowego.

Wysoka skuteczność rozdziału ziaren odpadowych 3-0,5 mm w przedziale przerostowym (o dwukrotnie mniejszej powierzchni roboczej w porównaniu do sumarycznej powierzchni przedziałów odpadowych) wynikała z większej efektywności ich odprowadzania przypadkiem przez otwory sit z warstwy o małej zawartości większych ziaren odpadowych, które ograniczają przepływ małych ziaren w kierunku powierzchni sitowej.

Ze względu na znaczny udział ziaren klasy 3-0,5 mm we frakcjach odpadowych nadawy wynoszący 43,4% całkowity uzysk frakcji o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$  w produkcie odpadowym wyniósł 63,7% a w półprodukcie był równy 35,3%. Powyższe rezultaty uzyskano przy udziale frakcji odpadowych  $>1,8 \text{ g/cm}^3$  w nadawie wynoszącym 32,9%.

Uzysk frakcji przerostowych o gęstości  $1,5-1,8 \text{ g/cm}^3$  i niskim udziale w nadawie 25-0,5 mm wynoszącym 5,4% był największy w półprodukcie, gdzie wynosił 44,7% oraz w produkcie koncentratowym, gdzie był równy 41,6%.

Na skutek występowania różnic prędkości opadania ziaren w materiale o szerokim zakresie uziarnienia wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren przerostowych zwiększał się ich uzysk w półprodukcie z 37,2% (klasa 25-12 mm) do 55,2% (klasa 3-0,5 mm) oraz w produkcie koncentratowym z 32,8% (klasa 25-12 mm) do 47,9% (klasa 6-3 mm) za wyjątkiem klasy 3-0,5 mm, dla której uzysk był równy 42%.

Największe różnice rozdziału pomiędzy klasofrakcjami przerostowymi odnotowano w produkcie odpadowym, w którym zmniejszanie wielkości ziaren obniżało uzysk ziaren przerostowych z 30% (klasa 25-12 mm) do 2,8% (klasa 3-0,5 mm).

Powyższe rezultaty uzyskano przy udziale klasofrakcji 3-0,5 mm we frakcjach przerostowych  $1,5-1,8 \text{ g/cm}^3$  wynoszącym 35,1%.

Uzysk frakcji koncentratowych o gęstości  $<1,5 \text{ g/cm}^3$  i udziale w nadawie 25-0,5 mm wynoszącym 61,7% był największy w produkcie koncentratowym równy 91,7%. W półprodukcie i produkcie odpadowym uzysk frakcji koncentratowych wyniósł odpowiednio 7,6% i 0,7%.

W produkcie koncentratowym uzysk frakcji  $<1,5 \text{ g/cm}^3$  zwiększał się wraz ze zmniejszeniem rozmiaru ziaren z 87,8% (klasa 25-12 mm) do 93,5% (klasa 6-3 mm). Dla klasofrakcji 3-0,5 mm uzysk



był nieznacznie mniejszy od maksymalnego i wynosił 92,2%. Odwrotna zależność pomiędzy wielkością ziaren a uzyskiem wystąpiła podczas rozdziału materiału w półprodukcie, gdzie uzysk obniżał się z 11,6% (klasa 25-12 mm) do 5,5% (klasa 6-3 mm). Dla klasofrakcji 3-0,5 mm jej uzysk był zbliżony do średniego uzysku frakcji  $<1,5 \text{ g/cm}^3$  w półprodukcie i wynosił 7,5%.

Uzysk klasofrakcji koncentratowych w produkcie odpadowym zawierał się w przedziale 1,1-1,0% dla ziaren w klasie 12-3 mm oraz w przedziale 0,6-0,4% dla ziaren w klasach 25-12 mm i 3-0,5 mm. Powyższe wyniki uzyskano przy udziale klasofrakcji 3-0,5 mm w frakcjach koncentratowych o gęstości  $<1,5 \text{ g/cm}^3$  wynoszącym 39,6%.

### Rozdział frakcji podstawowych w produktach wzbogacania [21]

Tabela 3

Produkt	$<1,5 \text{ g/cm}^3$				
	25-12 mm	12-6 mm	6-3 mm	3-0,5 mm	25-0,5 mm
Koncentrat	87,80	92,78	93,54	92,16	91,67
Półprodukt	11,63	6,15	5,50	7,46	7,65
Odpady	0,57	1,07	0,96	0,38	0,68
Suma (Nadawa)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Produkt	$1,5-1,8 \text{ g/cm}^3$				
	25-12 mm	12-6 mm	6-3 mm	3-0,5 mm	25-0,5 mm
Koncentrat	32,83	42,60	47,89	42,00	41,62
Półprodukt	37,19	35,20	43,79	55,23	44,57
Odpady	29,98	22,20	8,32	2,77	13,81
Suma (Nadawa)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Produkt	$>1,8 \text{ g/cm}^3$				
	25-12 mm	12-6 mm	6-3 mm	3-0,5 mm	25-0,5 mm
Koncentrat	0,00	0,00	0,00	2,45	1,07
Półprodukt	6,66	8,52	22,83	66,86	35,28
Odpady	93,34	91,48	77,17	30,69	63,65
Suma (Nadawa)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

### 2.3.3. Skuteczność procesu wzbogacania

Proces oddzielania produktu odpadowego (I stopień wzbogacania) przeprowadzany był przy wysokiej gęstości rozdziału  $\rho_{50}=1,98 \text{ g/cm}^3$ . Wskaźnik skuteczności rozdziału  $E_p$  kształtował się na poziomie  $0,22 \text{ g/cm}^3$ , co było wartością relatywnie dobrą dla nadawy o bardzo dużym przekraczającym 50% udziale ziaren poniżej 3 mm.

Analiza parametrów rozdziału w wąskich klasach ziarnowych wykazała znaczne ich zróżnicowanie. Wraz ze zmniejszaniem rozmiaru ziaren zwiększała się gęstość rozdziału oraz obniżała się jego skuteczność. Różnica gęstości rozdziału  $\rho_{50}$  pomiędzy klasami ziarnowymi 25-12mm ( $\rho_{50}=1,634 \text{ g/cm}^3$ ) a 6-3 mm ( $\rho_{50}=1,952 \text{ g/cm}^3$ ) była znaczna i wynosiła  $0,274 \text{ g/cm}^3$ .

Procentowe różnice parametrów rozdziału pomiędzy materiałem klas ziarnowych 25-12 mm i 6-3 mm dla gęstości rozdziału  $\rho_{50}$  wyniosły 16,3% a dla rozproszenia prawdopodobnego  $E_p$  były równe 58%. Niskie wartości współrzędnych rozdziału materiału klasy 3-0,5 mm uniemożliwiły określenie gęstości rozdziału i wartości rozproszenia prawdopodobnego. Większość frakcji ciężkich o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$  klasy 3-0,5 mm przepływała z przedziałów odpadowych osadzarki do przedziału przerostowego, gdzie podlegała rozdziałowi podczas realizacji II stopnia wzbogacania.



Proces rozdziału nadawy II stopnia na produkt koncentratowy i półprodukt realizowany był przy gęstości rozdziału  $\rho_{50}$  równej  $1,595 \text{ g/cm}^3$  ze skutecznością według wartości wskaźnika  $E_p$  równą  $0,114 \text{ g/cm}^3$ , dwukrotnie korzystniejszą w porównaniu do wyników rozdziału podczas realizacji I stopnia wzbogacania.

Analiza parametrów rozdziału w wąskich klasach ziarnowych wykazała ich zróżnicowanie. Dla zakresu uziarnienia materiału 25-3 mm wraz ze zmniejszaniem rozmiaru ziaren zwiększała się gęstość rozdziału  $\rho_{50}$  z  $1,568 \text{ g/cm}^3$  (klasa 25-12 mm) do  $1,607 \text{ g/cm}^3$  (klasa 6-3 mm) oraz jednocześnie obniżała się skuteczność rozdziału  $E_p$  z  $0,081 \text{ g/cm}^3$  (klasa 25-12 mm) do  $0,155 \text{ g/cm}^3$  (klasa 6-3 mm).

Różnica gęstości rozdziału  $\rho_{50}$  pomiędzy klasami ziarnowymi 25-12 mm i 6-3 mm wynosiła  $0,039 \text{ g/cm}^3$  (2,4%) a różnica skuteczności rozdziału według  $E_p$  była równa  $0,046 \text{ g/cm}^3$  (36,2%).

Parametry rozdziału materiału klasy 3-0,5 mm odbiegały od powyższych zależności ze względu na intensyfikację w przedziale przerostowym procesu powierzchniowego odprowadzania drobnych, ciężkich frakcji przez otwory sit. Gęstość rozdziału  $\rho_{50}$  klasy 3-0,5 mm wynosiła  $1,587 \text{ g/cm}^3$  i zawierała się pomiędzy wartościami tego parametru uzyskiwanymi dla klasy 25 – 12 mm i 12 – 6 mm.

Skuteczność rozdziału klasy 3-0,5 mm według  $E_p$  była równa  $0,127 \text{ g/cm}^3$  przy gęstości rozdziału  $\rho_{50}$  wynoszącej  $1,587 \text{ g/cm}^3$ . Parametry procesu rozdziału dla obydwu stopni wzbogacania zebrano w tabeli 4.

#### Parametry procesu rozdziału [21]

Tabela 4

Klasa ziarnowa 25-0,5 mm			
I stopień		II stopień	
$\rho_{50}$	1,980	$\rho_{50}$	1,595
$E_p (\rho_{50}-\rho_{25})$	0,220	$E_p (\rho_{75}-\rho_{25})/2$	0,114
I	0,224	I	0,191
Klasa ziarnowa 25-12 mm			
I stopień		II stopień	
$\rho_{50}$	1,634	$\rho_{50}$	1,568
$E_p (\rho_{50}-\rho_{25})$	0,058	$E_p (\rho_{75}-\rho_{25})/2$	0,081
I	0,091	I	0,142
Klasa ziarnowa 12-6 mm			
I stopień		II stopień	
$\rho_{50}$	1,749	$\rho_{50}$	1,618
$E_p (\rho_{50}-\rho_{25})$	0,108	$E_p (\rho_{75}-\rho_{25})/2$	0,095
I	0,144	I	0,153
Klasa ziarnowa 6-3 mm			
I stopień		II stopień	
$\rho_{50}$	1,952	$\rho_{50}$	1,607
$E_p (\rho_{50}-\rho_{25})$	0,138	$E_p (\rho_{75}-\rho_{25})/2$	0,155
I	0,145	I	0,255
Klasa ziarnowa 3-0,5 mm			
I stopień		II stopień	
$\rho_{50}$	-	$\rho_{50}$	1,587
$E_p$	-	$E_p (\rho_{75}-\rho_{25})/2$	0,127
I	-	I	0,216



### 3. Założenia projektowe nowych rozwiązań konstrukcyjnych

Z analizy danych procesowych wynika uzależnienie możliwości uzyskania zwiększenia efektywności wzbogacania miał węgla koksowych w osadzarkach ITG KOMAG od wzrostu skuteczności oddzielania od nadawy ziaren odpadowych 25-3(6) mm w I przedziale osadzarki.

Dzięki większej skuteczności oddzielania w I przedziale dużych ziaren odpadowych możliwa będzie intensyfikacja w II przedziale odpadowym odprowadzania drobnych ziaren odpadowych przez otwory sit, powodująca korzystne zmniejszenie ilości ziaren odpadowych w materiale wzbogacanym w III przedziale przerostowym. Pozwoli to zarówno na zwiększenie wychodu produktu koncentratowego, jak i na korzystne zmniejszenie uzyskiwanego półproduktu lub poprawę jego parametrów jakościowych.

Warunkiem uzyskania większej skuteczności oddzielania od nadawy ziaren odpadowych w klasie ziarnowej 25-3(6) mm proces wzbogacania materiału w I przedziale odpadowym osadzarki powinien przebiegać w warunkach zapewniających szybkie rozwarstwienie materiału po jego wprowadzeniu do komory roboczej przedziału oraz dokładny rozdział rozwarstwowanego materiału na produkty w końcowej części komory roboczej.

Do czynników umożliwiających spełnienie powyższych wymagań procesowych zalicza się:

- różnicowanie rozluźnienia materiału pod wpływem ruchu pulsacyjnego wody polegające na zmniejszeniu pulsacji wraz z przepływem materiału wzdłuż przedziału,
- równomierne obciążenie materiałem powierzchni roboczej na szerokości przedziału,
- zapewnienie jednorodności składu gęstościowego materiału w warstwie rozdzielczej,
- stabilizację poziomu warstwy rozdzielczej względem krawędzi przelewowej progę przedziału podczas odprowadzania produktu przy nierównomiernym rozprowadzeniu nadawy na wlocie osadzarki.

#### 3.1. Nowe rozwiązania konstrukcyjne

Wśród rozwiązań, których zastosowanie pozwoliłoby na wzrost skuteczności procesu wzbogacania węgla koksowych w osadzarkach miałowych ITG KOMAG można wyróżnić modernizację układów regulacyjnych w I przedziale odpadowym polegającą na poszerzeniu dotychczasowego zakresu regulacji przepływu pulsacyjnego powietrza roboczego, natężenia dopływu wody dolnej oraz wprowadzeniu w osadzarkach posiadających koryta robocze o szerokości przekraczającej 2 m podwójnego, usytuowanego symetrycznie do osi podłużnej osadzarki, układu odprowadzania produktów ciężkich.

##### 3.1.1. Sterowanie powietrzem roboczym

W celu wprowadzenia możliwości regulacji ruchu pulsacyjnego wody na długości przedziału proponuje się zastosowanie dodatkowych przepustnic powietrza w przewodach wlotowo-wylotowych łączących dwie umiejscowione posobnie podsitowe komory pulsacyjne pojedynczym zespołem talerzowych zaworów pulsacyjnych oraz umieszczenie w części podsitowej przedziału pionowej przegrody oddzielającej od siebie strefy oddziaływania komór pulsacyjnych. Dodatkowe przepustnice regulacyjne powinny być umieszczone powyżej poziomu wody w osadzance, najdogodniej pod względem łatwości obsługi, bezpośrednio pod zespołem zaworów pulsacyjnych.

Proponowane rozwiązania umożliwią regulację skoku pulsacji na długości przedziału, a tym samym na odpowiednie różnicowanie rozluźnienia materiału.



Dzięki uzyskaniu na początku rozdziału znacznego rozluźnienia materiału po jego wprowadzeniu do osadzarki możliwe będzie jego szybkie rozwarstwienie według prędkości opadania ziaren. Z kolei poprzez redukcję rozluźnienia rozwarstwowanego łoża na końcu przedziału możliwe będzie stabilne grawitacyjne odprowadzanie produktu odpadowego przy zadanym skoku pulsacji warstwy rozdzielczej, minimalizującym prawdopodobieństwo przepływu większych ziaren odpadowych do kolejnego przedziału.

Dodatkowo maksymalizacja rozluźnienia materiału na początku I przedziału odpadowego ułatwi jego rozproszczenie w przestrzeni roboczej przy nierównomiernym rozproszczeniu nadawy na wlocie osadzarki.

### 3.1.2. Sterowanie wodą dolną

W celu wprowadzenia możliwości regulacji natężenia przepływu wody na długości I przedziału odpadowego proponuje się zabudowę zaworów regulacyjnych na dopływach wody dolnej do przewodów zasilających oddzielnie dwie komory pulsacyjne oraz zastosowanie dodatkowego dopływu wody dolnej z zaworem regulacyjnym do części strefy oddziaływania pierwszej komory pulsacyjnej znajdującej się pomiędzy nią a ścianą przednią osadzarki.

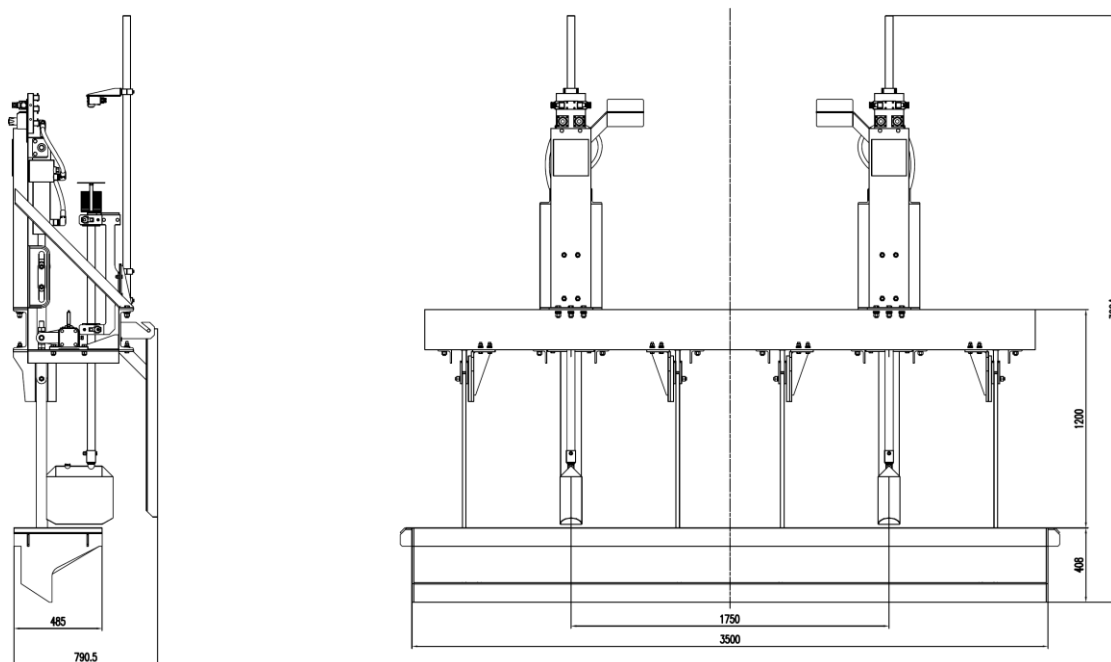
Dodatkowy przewód dopływu wody dolnej może być zlokalizowany na zewnątrz osadzarki, równoległe do jej ściany przedniej i łączyć się z nią poprzez kilka przewodów zasilających, służących do rozprowadzania wody dolnej – przedniej na szerokości obudowy przedziału. Zastosowanie regulacji dopływu wody na długości I przedziału odpadowego służy analogicznie, jak sterowanie dopływem powietrza pulsacyjnego, do różnicowania rozluźnienia materiału w zależności od wymogów procesu jego rozwarstwienia i odprowadzania produktów. Dodatkowy dopływ wody dolnej na początku osadzarki zmniejsza prawdopodobieństwo przepadu przez otwory sit drobnych frakcji lekkich podczas pierwszej fazy rozwarstwienia materiału. Odbywa się to poprzez skrócenie czasu ich wynoszenia do górnej części łoża oraz szybszy transport od początku I przedziału odpadowego w kierunku kolejnych.

### 3.1.3. Odprowadzanie produktu ciężkiego

W celu zwiększenia dokładności rozdziału rozwarstwowanego gęstościowo materiału nadawy, polegającego na skutecznym oddzieleniu od materiału ziaren odpadowych 25-3(6) mm, proponuje się zastosowanie w I przedziale odpadowym, w miejsce pojedynczego, podwójny zasuwowy układ odprowadzania produktu ciężkiego.

Na rysunku 1 podwójny układ odprowadzania produktu ciężkiego, którego zastosowanie zapewni niezależną kontrolę procesu rozdziału łoża na produkty symetrycznie po lewej i prawej stronie I przedziału odpadowego przy jednakowym, automatycznie stabilizowanym poziomie warstwy rozdzielczej i gęstości materiału, co jest szczególnie korzystne przy nierównomiernym rozproszczeniu nadawy na wlocie osadzarki.

Zaletą zastosowania proponowanego rozwiązania jest zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania strat substancji węglowej w produkcie odpadowym, co wynika z dokładniejszej kontroli rzeczywistego położenia warstwy rozdzielczej przy wykorzystaniu dwóch czujników pomiarowych. Podwójny układ odprowadzania produktów ciężkich z pomiarem otwarcia przepustów umożliwia monitorowanie prawidłowego zasilania osadzarki nadawą, co pozwala na sygnalizację zakłóceń równomierności jej wprowadzania dla np. podjęcia działań w celu ich usunięcia.



Rys. 1. Podwójny zasuwowy układ odprowadzania produktu ciężkiego [21]

#### 4. Podsumowanie

Analiza procesu wzbogacania miałów węgla koksowych o uziarnieniu 20(30)-0 mm wskazuje, że do podstawowych czynników mających wpływ na efektywność produkcji koncentratów koksowych w osadzarkach pulsacyjnych zaliczyć należy charakterystykę technologiczną nadawy, skuteczność działania osadzarki oraz prawidłową jej eksploatację.

Szeroki zakres uziarnienia nadawy oraz znaczny, często większościowy udział drobnziarnistego materiału utrudnia realizację w osadzarce procesu gęstościowego rozwarstwienia oraz automatyczną regulację odprowadzania produktów opartą o wskazania pływakowego układu pomiarowego warstwy rozdzielczej

Badania skuteczności wzbogacania miału koksowego 25-0 mm charakteryzującego się większościowym udziałem klasy 3-0 mm, wynoszącym 53%, w nowej trójprzedziałowej osadzarce OM24 typu KOMAG z systemem sterowania KOGA wykazały, że przy obciążeniu jednostkowym 166 t/h na 1 m szerokości, uzysk ziaren odpadowych o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$  w produkcie odpadowym, dla zakresu wielkości ziaren 25-6 mm, zawierał się w przedziale od 93,3% do 91,5%, w klasie 6-3 mm wyniósł 77,2% natomiast w klasie 3-0,5 mm jedynie 30,7%.

Mały uzysk ziaren odpadowych 3-0,5 mm w produkcie ciężkim odprowadzonym w dwóch przedziałach odpadowych, o łącznej powierzchni  $16 \text{ m}^2$ , wynikał ze znacznego, wynoszącego 35,1%, udziału w tej klasie ziaren odpadowych oraz lokalizacji małych i ciężkich ziaren w warstwach przyrodziałowych łóża na skutek występowania, charakterystycznego dla procesu wzbogacania nadaw o szerokim zakresie uziarnienia, zjawiska równoopadania ziaren.

Odprowadzenie w przedziałach odpadowych znaczących ilości frakcji odpadowych (o gęstości  $>1,8 \text{ g/cm}^3$ ) o uziarnieniu 25-3 mm było warunkiem uzyskania bardzo wysokiej skuteczności rozdziału ziaren odpadowych klasy 3-0,5 mm w przedziale przerostowym ze względu na możliwości ich



osadzania w dolnej warstwie łoża oraz powierzchniowe odprowadzanie przez otwory sit. Uzysk ziaren tej klasy w półprodukcie wyniósł 100% w klasie 25-3 mm oraz 96,5% w klasie 3-0,5 mm.

Większościowy udział w nadawie klasy 3-0 mm powodował niekorzystne zwiększenie wychodu półproduktu ze względu na konieczność oddzielenia w przedziale przerostowym, od materiału otrzymywanego z przedziałów odpadowych, pozostałych, głównie drobnoziarnistych frakcji odpadowych.

Zwiększenie efektywności wzbogacania miałó węgla koksowych 25-0 mm o większościowym udziale materiału drobnoziarnistego uwarunkowane jest zwiększeniem dokładności rozdziału ziaren odpadowych 25-3(6) mm w pierwszym przedziale odpadowym. Celem takiego działania jest uzyskanie możliwości intensyfikacji powierzchniowego odprowadzania ziaren odpadowych klasy 3-0,5 mm przez otwory sit w drugim przedziale odpadowym.

Uzyskanie w pojedynczym przedziale odpadowym produktów rozdziału o parametrach zbliżonych do dotychczas otrzymywanych w dwóch przedziałach wymaga zastosowania w I przedziale odpadowym rozwiązań zapewniających szybkie, gęstościowe rozwarstwienie materiału nadawy, jednorodność składu gęstościowego warstwy rozdzielczej oraz stabilizację jej poziomu na szerokości przedziału, również przy nierównomiernym wprowadzaniu nadawy.

Efektywność proponowanych rozwiązań, mających na celu zwiększenie skuteczności rozdziału miałó węgla koksowych w osadarkach OM typu KOMAG, jest zależna od równomierności zasilania nadawą na szerokości wlotu do osadarki oraz od parametrów technologicznych drobnoziarnistego materiału 3-0 mm.

## Literatura

1. Kowol D., Łagódka M., Matusiak P.: Wpływ uziarnienia oraz składu grawimetrycznego klas ziarnowych na wyniki procesu osadarkowego wzbogacania nadaw węglowych. KOMEKO 2013, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2013.
2. Kumar S., Venugopal R.: Coal cleaning using jig and response surface approach for determination of quality of clean coal. *Int. J. Coal Prep. Util.* 2017, 40, 107–115, doi:10.1080/19392699.2017.1346631.
3. Surowiak A., Foszcz D., Niedoba T.: Evaluation of jig work on the basis of granulometric analysis of particle size fractions of beneficiation products in purpose of process optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 641, Mineral Engineering Conference (MEC 2019)
4. Kowol D., Matusiak P.: Improving the quality of hard coal products using the state-of-the-art KOMAG solutions in a pulsating jig nod. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 641, Number 1, 2019.
5. Kowol D., Matusiak P.: Wpływ wybranych parametrów na skuteczność procesu wzbogacania w osadarkach wodnych pulsacyjnych, IV Polski Kongres Górniczy, Materiały Konferencyjne, Kraków 2017.
6. Kowol D., Łagódka M.: Badania laboratoryjne wpływu zmienności nadawy na skuteczność osadarkowego procesu wzbogacania, *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, 2012, Vol. 36, no. 4, s. 49-56.
7. Kowol D., Łagódka M.: Badania rozkładu gęstościowego wzbogacanego materiału w strefie rozdziału/odbioru osadarki pulsacyjnej. KOMEKO 2012, Innowacyjne i przyjazne dla





- środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012 s. 125-137.
8. Matusiak P., Kowol D.: Use of state-of-the-art jigs of KOMAG type for a beneficiation of coking coal. *Mining Machines* 2020 No. 1 pp. 46-55.
  9. Matusiak P., Kowol D.: State-of-the-art pulsating jigs of KOMAG type. Materiały na konferencję: IMTech 2019, Innovative Mining Technologies, Scientific and Technical Conference, Szczyrk, Poland, 25-27 March 2019 s. 1-10, (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 vol. 545) ISSN 1757-899X.
  10. Matusiak P., Łagódka M., Kowol D.: Badania parametrów procesu odprowadzania produktów ciężkich w osadzarce pulsacyjnej. KOMEKO 2013, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2013.
  11. Kowol D., Łagódka M., Matusiak P.: Wpływ charakterystyki pulsacji wody na skuteczność osadzarkowego procesu wzbogacania. *Maszyny Górnicze* 2014 nr 3, s. 37-43, ISSN 0209-3693.
  12. Liu Y., Xie J., Zhang M., Kuang Y.: Study on the Model System of Jig with Flexible Air Chamber and Pulsating Current Characteristics. In XVIII International Coal Preparation Congress; Springer Science and Business Media LLC: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; pp. 797-802.
  13. Matusiak P., Łagódka M., Kowol D.: Badania laboratoryjne wpływu parametrów przepływu powietrza na zmiany poziomu wody i ciśnienia w komorze pulsacyjnej osadzarki. KOMEKO 2014, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2014 s. 299-310, ISBN 978-83-60708-80-4.
  14. Surowiak A., 2018. The analysis of coal fines separation precision exposed to changeable hydrodynamic parameters of jig work. *Archives of Mining Sciences* 63, 2, 437-448.
  15. Cierpisz S., Joostberens J.: Monitoring of coal separation in a jig using a radiometric density meter. *IFAC-Papers On Line* 48 (17), 2015.
  16. Jendrysik S., Jasiulek D., Stankiewicz K., Babczyński J.: Implementation of a jig control system at BUDRYK Coal Mine. Materiały na konferencję: IMTech 2019, Innovative Mining Technologies, Scientific and Technical Conference - part 2, Szczyrk, Poland, 14-16 October 2019 s. 11, (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 vol. 679), ISSN 1757-899X.
  17. Jendrysik, S., Stankiewicz, K., Jasiulek, D.: Innowacyjne rozwiązania ITG KOMAG w zakresie automatyzacji węzłów osadzarkowych. *Maszyny Górnicze* 2018 nr 2 s. 65-77.
  18. Panda L., Sahoo A.K., Tripathy A., Biswal S.K., Sahu A.K. 2012. Application of artificial neural network to study the performance of jig for beneficiation of non-coking coal. *Fuel* 97, 151-156.
  19. Rogala-Rojek J., Stankiewicz K., Jendrysik S.: SCADA class software of the KOGA control system of jig beneficiation node. Materiały na konferencję: IMTech 2019, Innovative Mining Technologies, Scientific and Technical Conference, Szczyrk, Poland, 25-27 March 2019 s. 1-12, (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 vol. 545) ISSN 1757-899X.
  20. Kowol D., Matusiak P., Łagódka M.: Możliwości zwiększenia efektywności procesu produkcji miałów węgla koksowych poprzez wzrost dokładności wtórnego wzbogacania półproduktu w osadzarce pulsacyjnej. *Maszyny Górnicze* 2018 nr 2 s. 53-64.
  21. Łagódka M. i in. 2020. Efektywność produkcji miałów węgla koksowych w osadzarkach. ITG KOMAG. Gliwice (materiały niepublikowane).



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.2>

## **Poprawa jakości produktów handlowych poprzez zastosowanie nowych rozwiązań osadzarek typu KOMAG**

**Piotr Matusiak** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Daniel Kowol** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wdrożenie nowych osadzarek OS18 i OM20 zainstalowanych w zakładzie przeróbki mechanicznej w KWK „Budryk”. Podano wyniki badań skuteczności wzbogacania węgla koksowych i energetycznych. W celu określenia skuteczności węzła osadzarkowego procesu wzbogacania miał w węglowych wyznaczono parametry rozdziału materiału. Opisano zastosowane rozwiązania i parametry techniczno-technologiczne nowych urządzeń. Przedstawiono układy odbioru produktu odpadowego i produktu pośredniego. Zaprezentowano nowe rozwiązania zastosowane w modernizowanych zakładach przerobczych. W przypadku każdej z osadzarek zostały wykonane badania skuteczności wzbogacania, których wyniki zamieszczono w formie tabelarycznej. Przedstawiono podstawowe wskaźniki dokładności wzbogacania oraz parametry produktów rozdziału i bilanse produktów. Omówiono wyniki badań przeprowadzonych na nowo uruchomionych osadzarkach.

Słowa kluczowe: proces wzbogacania, osadzarka, węgiel kamienny

### **Improving the quality of commercial products through the use of new KOMAG jig solution**

**Abstract:** Implementation of new OS18 and OM20 jigs installed in the mechanical processing plant in KWK "Budryk" mine is presented. Results of testing the efficiency in separation process of coking and steam coals are given. To determine the efficiency of the jig node in the coal fine coal separation process, the parameters of material separation were set. The solutions and technological parameters of new devices are described. The systems for collecting the tailings and middlings are presented. New solutions used in the processing plants being modernized, are presented. Separation efficiency tests were carried out for each jig, and the results are presented in a tabular form. Basic indexes for separation accuracy as well as the separation products parameters and product balances are presented. The results of testing the newly commissioned jigs are discussed.

Keywords: separation process, jig, hard coal

## **1. Wprowadzenie**

Decydujący wpływ na parametry ilościowo-jakościowe produktów handlowych ma wzbogacanie, czyli podstawowy proces w polskich zakładach przeróbki mechanicznej surowców mineralnych.

Wzbogacanie węgla kamiennego w osadzarkach stanowi niezwykle ważną część procesu produkcyjnego sortymentów handlowych, służącą podwyższeniu jakości wydobywanego surowca i osiągnięciu wymaganych przez odbiorców parametrów jakościowo produktów. Poprawa jakości węgla następuje poprzez poddanie go szeregowi procesów technologicznych, między innymi wzbogacania w osadzarkach pulsacyjnych [1, 2].

W rozdziale przedstawiono rozwiązania wybranych osadzarek zaprojektowanych w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, oddanych do użytku w latach 2019-2020 r., służących do wzbogacania węgla kamiennego. Szczególną uwagę zwrócono na parametry i nowoczesne rozwiązania osadzarek pulsacyjnych średnioziarnowych OS miałowych OM dla węgla energetycznych i koksujących.

Osadzarki pulsacyjne są podstawowymi urządzeniami do wzbogacania węgla kamiennego w polskich zakładach przeróbki mechanicznej. Pierwsze konstrukcje osadzarek zaczęto opracowywać w ITG KOMAG w roku 1955 r.

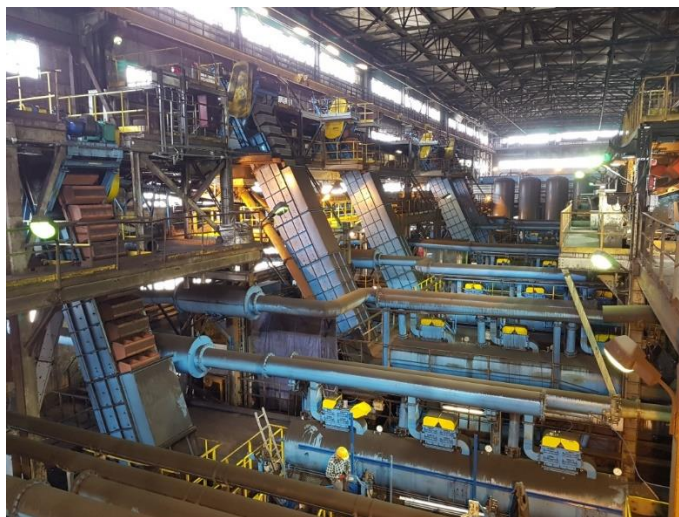
Były to urządzenia, które posiadały komory powietrzne umieszczone obok koryta roboczego, wzdłuż osi osadzarki [3, 4, 5]. Konstruowano wówczas osadzarki typu:

- OBM (osadzarka beztłokowa miałowa),
- ODM (osadzarka beztłokowa miałowa dwukorytowa),
- OBZ (osadzarka beztłokowa ziarnowa).

Osadzarki te charakteryzowały się znacznymi wymiarami i dużą masą.

Obecnie w KOMAG-u konstruowane są osadzarki do wzbogacania różnych klas ziarnowych, w tym osadzarki miałowe - OM (rys. 1) przeznaczone dla ziaren 20-0(0,5) mm, osadzarki średnioziarnowe - OS przeznaczone dla ziaren 80(50)-0(0,5) mm i osadzarki ziarnowe - OZ przeznaczone dla ziaren 120-20 mm.

Ich konstrukcje są stale modernizowane, zgodnie z oczekiwaniami odbiorców, zarówno pod względem geometrii kształtu skrzyń dolnych, mocowania pokładów sitowych, usprawnienia urządzeń automatycznej regulacji odbioru produktów ciężkich, zaworów pulsacyjnych oraz kolektorów powietrza roboczego [6, 7, 8, 9].



Rys. 1. Zabudowa osadzarek i przenośników kbelkowych KWK Budryk [źródło: opracowanie własne]

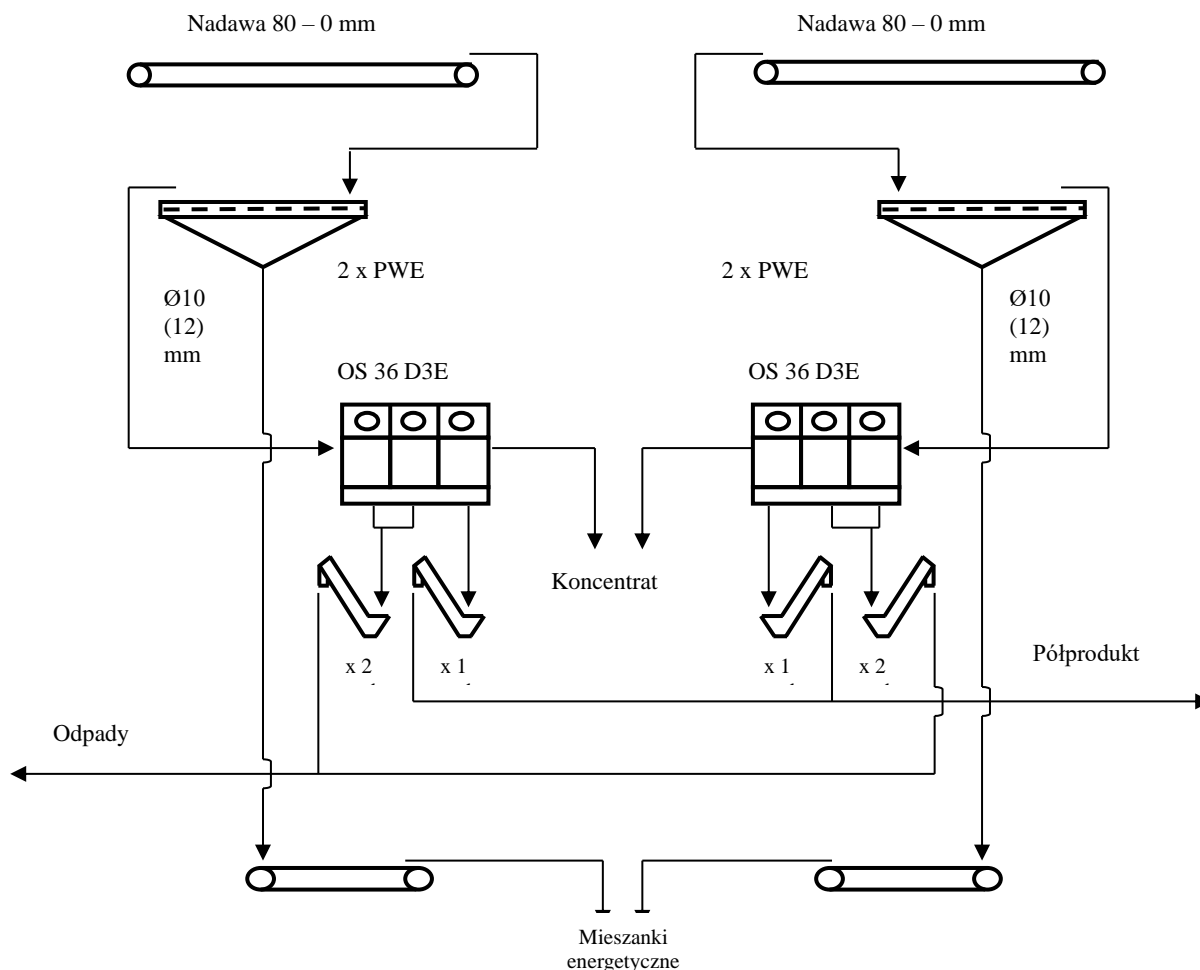
## 2. Stan przed modernizacją

Zakład Mechanicznej Przeróbki Węgla KWK Budryk posiada trzy osadzarki pulsacyjne do wzbogacania nadaw węglowych, w tym dwie osadzarki dwukorytowe OS36D3E oraz jedną osadzkę jednokorytową OM24L4E. Wszystkie osadzarki wyposażone są w system elektronicznego sterowania SSO Zakładu Automatyki BGG [10, 11].

Nadawę na osadzkę OS36D3E stanowi materiał o uziarnieniu 80–10 mm otrzymywany w wyniku klasyfikacji na czterech przesiewaczach PWE1-2,6x6. Produkt dolny przesiewaczy może być kierowany do zbiornika mialu surowego, zbiornika mieszanek energetycznych lub na zwały. Produkt górny

przesiewaczy dostarczany jest do osadzarek OS36 poprzez sita łukowe, pełniące obecnie rolę koryta spławnego, w którego obszarze umieszczono natryski wody górnej.

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat osadzarkowego węzła wzbogacania z osadzarkami typu OS36.



Rys. 2. Schemat osadzarkowego węzła wzbogacania z osadzarką OS36D3E [10]

### 3. Wdrożenia osadzarek typu KOMAG w Zakładzie Mechanicznej Przeróbki Węgla KWK Budryk

Projekt ośmiu osadzarek dla Zakładu Mechanicznej Przeróbki Węgla KWK Budryk wykonano w 2017 r. w Zakładzie Systemów Przeróbczych Instytutu Techniki Górniczej KOMAG. Wdrożenia osadzarek OS18 i OM20 dla węgla energetycznego i koksującego zaprojektowanych w ITG KOMAG i uruchomionych w 2019 i 2020 r. przedstawiono na poniższych przykładach.

Systemy wzbogacania w osadzarkach zostały uruchomione w kolejności przedstawionej w tabeli 1.



## Uruchomienia osadzarek KWK Budryk

Tabela 1

Lp.	Typ osadzarki	Typ nadawy	Nr urządzenia	Uruchomienie
1	Osadzarka mialowa OM20	Przerost z osadzarek OS18, 12-0 mm	4.707B	04.2019 r.
2	Osadzarka średnioziarnowa OS18L	Węgiel typu 35, 70-1 mm	4.604B	04.2019 r.
3	Osadzarka średnioziarnowa OS18P	Węgiel typu 35, 70-1 mm	4.604C	04.2019 r.
4	Osadzarka średnioziarnowa OS18L	Węgiel typu 34, 70-20 mm	4.504A	05.2019 r.
5	Osadzarka średnioziarnowa OS18P	Węgiel typu 34, 70-20 mm	4.504B	05.2019 r.
6	Osadzarka średnioziarnowa OS18L	Węgiel typu 35, 70-1 mm	4.604A	04.2020 r.
7	Osadzarka średnioziarnowa OS18P	Węgiel typu 34, 70-20 mm	4.504C	07.2020 r.
8	Osadzarka mialowa OM20	Przerost z osadzarek OS18, 12-0 mm	4.707A	09.2020 r.

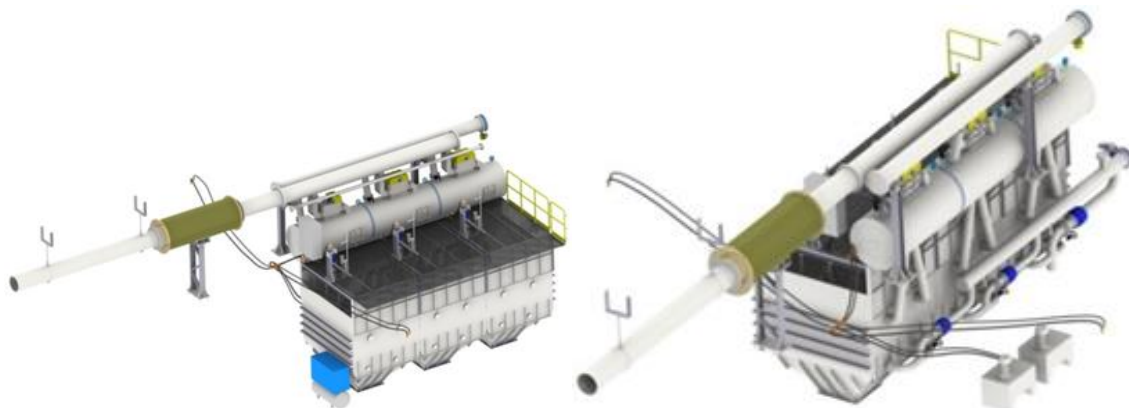
**System wzbogacania węgla typu 34 i typu 35**

Nowe trójproduktowe osadzarki OS18 L i P, oraz OM20 wyprodukowała firma Fugor Sp. z o.o., zostały zabudowane przez firmę Pemug Sp. z o.o. Zastąpiły one dwie wyeksploatowane trójproduktowe osadzarki średnioziarnowe OS36 oraz jedną OM24 typu KOMAG.

Modernizacja Zakładu Mechanicznej Przeróbki KWK Budryk polegała na dostosowaniu zakładu do trójproduktowego wzbogacania węgla typu 34 oraz 35 wraz z możliwością zwiększenia obciążenia węzła wzbogacania mialu do 1500 t/h brutto.

W ZPMW KWK Budryk zainstalowano 6 osadzarek średnioziarnowych OS18, wzbogacających w klasie ziarnowej 70-1 mm (70-20 mm) (rys. 3), zaprojektowanych do wydajności do 250 t/h.

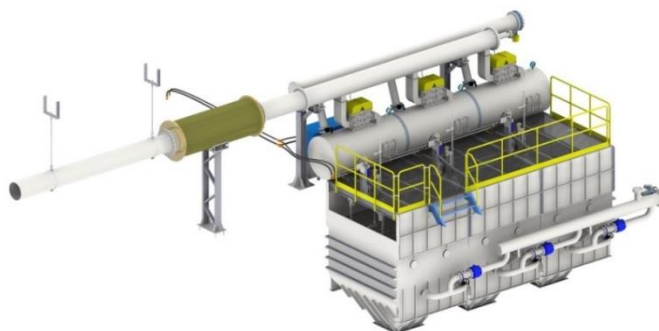
Trzy z nich wzbogacają węgiel kamienny typu 34 (nr 4.504A, nr 4.504B, nr 4.504C), a pozostałe trzy węgiel kamienny typu 35 (nr 4.604A, nr 4.604B, nr 4.604C).



Rys. 3. Osadzarki średnioziarnowe OS18L i OS18P KWK Budryk [9]

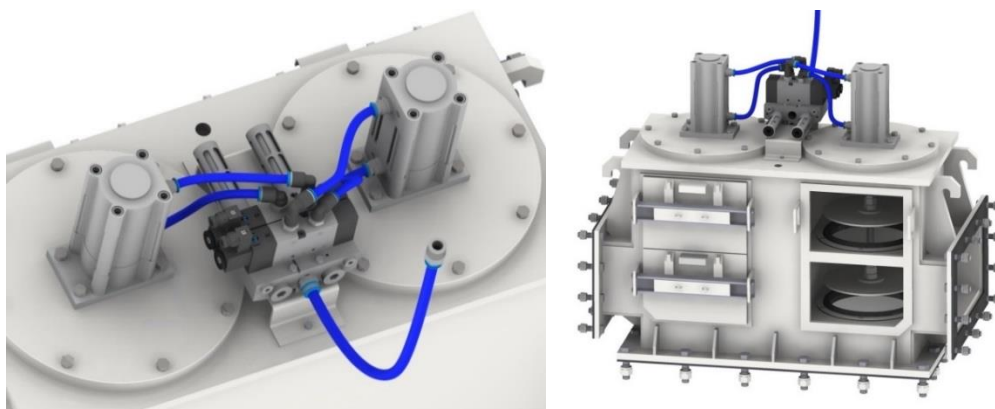
#### System wzbogacania wtórnego

Konstrukcja układu doprowadzania nadawy do wtórnego wzbogacania [12] umożliwia pracę jedynie jednej osadzarki. W osadzarkach miałowych wtórnych OM20 (rys. 4), wzbogacany jest materiał w klasie ziarnowej 12-0 mm z maksymalną wydajnością do 250 t/h. Zastosowano w nich pokład z sit gumowych.

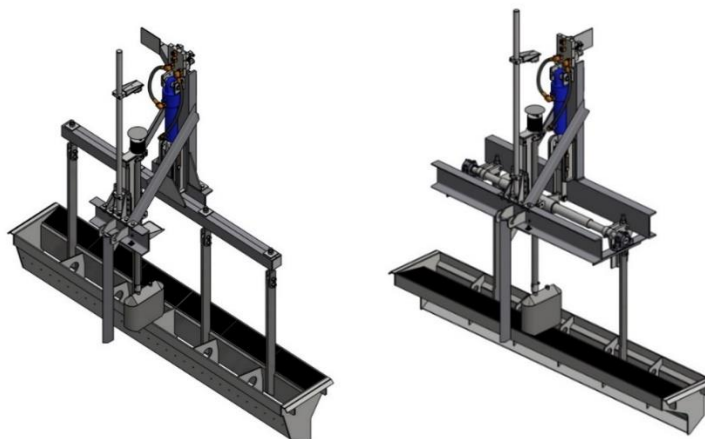


Rys. 4. Osadzarka miałowa OM20 KWK Budryk [9]

W osadzarkach średnioziarnowych OS18 oraz miałowych OM20 zastosowano nowe rozwiązanie zaworu pulsacyjnego mające na celu poprawę ich możliwości regulacyjnych oraz korzystniejsze wyniki wzbogacania (rys. 5). Zastosowano również zasuwowe układy odprowadzenia produktu, które zastąpiły wcześniej stosowane klawiszowe układy odbiorcze (rys. 6).



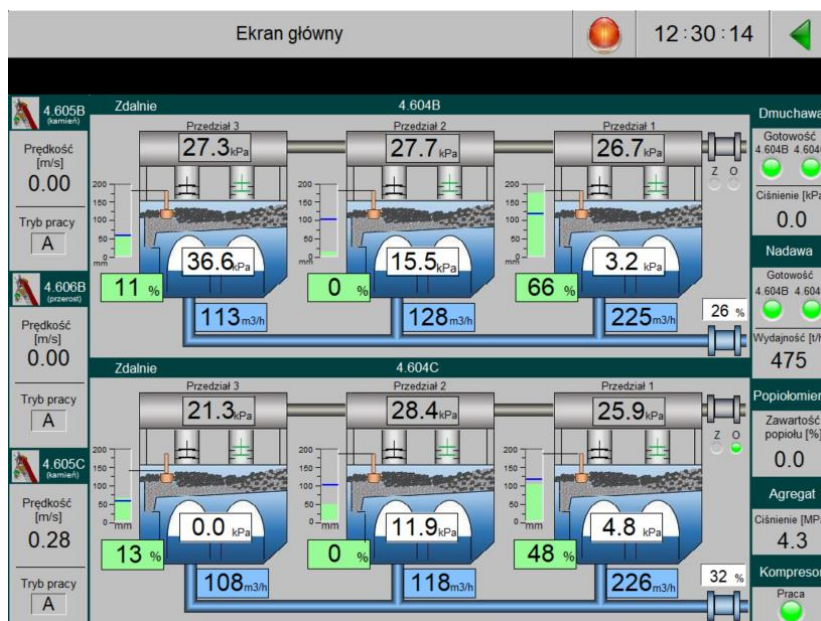
Rys. 5. Zawór pulsacyjny typu KOMAG zastosowany w osadzarkach KWK Budryk [12]



Rys. 6. Układ odprowadzenia produktu osadzarki OS18 oraz OM20 KWK Budryk [12]

### System sterowania

Zmodernizowane systemy węzła wzbogacania kopalni Budryk, zostały wyposażone w nowoczesny system sterowania węzłem osadzarkowym KOGA SSWO (rys. 7).



Rys. 7. Panel operatorski systemu sterowania węzłem osadzarkowym KOGA [źródło: opracowanie własne]

Układ sterowania węzłem sterowania w KWK Budryk charakteryzuje się hierarchiczną, rozproszoną budową, gdzie poziom najniższy stanowią czujniki w pojedynczym przedziale osadzarki, a poziom najwyższy sterownik nadrzędny.

Sterownik nadrzędny zarządza pracą urządzeń nadawczych dostarczających nadawę do osadzarki, jak również realizujący blokady technologiczne, służące do bezpiecznego zatrzymania całego lub częściowego węzła technologicznego. Sterowniki lokalne zarządzają pracą dwóch osadzarek. Sterowniki te łączą się z rozproszonymi układami IO zainstalowanymi w każdym przedziale osadzarki.

Takie rozproszone układy sterowania pozwalają na wprowadzenie zmian sprzętowych, programowych, konfiguracyjnych i wizualizacyjnych bez konieczności zatrzymania produkcji.



Ważną cechą takiego układu jest również decentralizacja układu sterowania, co ułatwia zapewnienie bezpieczeństwa procesu produkcyjnego i nadzoru.

Pośród wielu funkcji systemu umożliwia on między innymi:

- sterowanie procesem pulsacji,
- automatyczną regulację odbioru produktów ciężkich uwzględniającą pomiar otwarcia przepustu,
- sterowanie prędkością przenośników kubelkowych,
- pomiar i rejestrację parametrów monitorowanych.

System umożliwia wyświetlanie aktualnej zawartości popiołu oraz wyliczenie wartości opałowej produkowanego koncentratu węglowego.

## 4. Badania osadzarek

### Analizy laboratoryjne

Pobrane próbki wykwartowano i przetransportowano do zaplecza laboratoryjnego Zakładu Systemów Przeróbczych, w którym poddano je kolejnym analizom.

Badania laboratoryjne zrealizowane zostały zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 z wykorzystaniem aparatury pomiarowej zapewniającej spójność pomiarową. W badaniach wykorzystano nadzorowany sprzęt pomiarowy w postaci wag HR 120, WPT 15H2, B200, pieca komorowego PM-6/1100A oraz kalorymetru AC 350.

Obliczenia oraz wyznaczenie podstawowych parametrów procesu rozdziału (gęstość rozdziału, rozproszenie prawdopodobne, imperfekcja) wykonano zgodnie z normą PN-G-07020:1997.

W uzyskanych frakcjach gęstościowych nadawy i produktów wzbogacania oznaczono zawartości popiołu zgodnie z normą PN-ISO 1171:2002. W nadawach i produktach wzbogacania oznaczono również ciepło spalania i wyliczono wartość opałową zgodnie z normą PN-ISO 1928:2002.

Analizę granulometryczną nadawy wykonano na sitach o otworach 20; 16; 10; 6; 3 i 0,5 mm, uzyskując klasy ziarnowe > 20; 20-16; 16-10; 10-6,3; 6,3-3; 3-0,5 oraz 0,5-0 mm. Powyższą analizę wykonano zgodnie z normą PN-ISO 1953:1999.

Analizom gęstościowym w klasie ziarnowej 0,5 mm poddano nadawę oraz produkty wzbogacania w cieczach ciężkich o gęstości 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8 oraz 2,0 g/cm<sup>3</sup> uzyskując frakcje gęstościowe <1,3; 1,3-1,4; 1,4-1,5; 1,5-1,6; 1,6-1,7; 1,7-1,8; 1,8-2,0 oraz >2,0 g/cm<sup>3</sup>. Analizy gęstościowe wykonano zgodnie z normą PN-G-04559:1997.

Zawartość popiołu i wartość opałową podano w stanie analitycznym. Do obliczenia wartości opałowej przyjęto wilgoć analityczną na poziomie 3% dla wszystkich analizowanych próbek.

### Badania dokładności wzbogacania

Celem badań było określenie skuteczności procesu trójproduktowego wzbogacania grawitacyjnego w nowo zabudowanych osadzarkach średnioziarnowych OS18 (nr 4.504A, nr 4.504B, nr 4.504C) pracujących równolegle w systemie wzbogacającym węgiel typu 34, oraz osadzarkach średnioziarnowych OS18 (nr 4.604A, nr 4.604B, nr 4.604C) pracujących równolegle w systemie wzbogacającym węgiel typu 35.



**Bilans produktów wzbogacania osadzarki OS18 (typu 34)**

Tabela 2

Produkt	Nadawa	Produkt koncentratowy	Produkt pośredni	Produkt odpadowy
Udział, %	100	29,5	5,5	65
Udział, t/h	200	59	11	130
Popiół, %	62,72	15,05	55,49	85,25

Określona została również skuteczność procesu wzbogacania wtórnego w osadzarkach OM20, dla których nadawą jest skruszony produkt przerostowy zainstalowanej w KWK Budryk, w oparciu o wyniki analiz laboratoryjnych, pobranych prób przemysłowych nadawy i produktów wzbogacania, wykonanych w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG.

**Bilans produktów wzbogacania osadzarki OM 20 4.707B**

Tabela 3

Produkt	Nadawa	Produkt koncentratowy	Produkt pośredni	Produkt odpadowy
Udział, %	100,00	16,24	5,06	78,71
Udział, t/h	70,0	11,4	3,5	55,1
Popiół, %	43,47	12,98	47,40	49,50

W osadzarkach średnioziarnowych OS 18 uzyskano współczynniki imperfekcji na poziomie:  
 I st. rozdziału -  $I_1=0,158-0,200$ , przy gęstości rozdziału wynoszącej  $\Delta_1=1,636-1,999 \text{ g/cm}^3$ ,  
 II st. rozdziału -  $I_2=0,172-0,186$ , przy gęstości rozdziału wynoszącej  $\Delta_2=1,395-1,818 \text{ g/cm}^3$ .  
 Średnia wartość wskaźnika imperfekcji dla badanych osadzarek wyniosła  $I=0,169$ .

**Wyniki dokładności wzbogacania w osadzarkach OS18 oraz OM20**

Tabela 4

Parametr	Osadzarka średnioziarnowa OS18			Osadzarka średnioziarnowa OS18			Osadzarka mialowa OM20	
	Węgiel typu 34			Węgiel typu 35			Półprodukt	
System	Węgiel typu 34			Węgiel typu 35			Półprodukt	
Oznaczenie	4.504A	4.504B	4.504C	4.604A	4.604B	4.604C	4.707A	4.707B
Gęstość rozdziału dr, $\text{g/cm}^3$ I stopień	1,976	1,985	1,999	1,960	1,636	1,639	1,348	1,390
Gęstość rozdziału dr, $\text{g/cm}^3$ II stopień	1,794	1,554	1,395	1,410	1,818	1,752	-	1,609
Imperfekcja I stopień	0,183	0,146	0,177	0,172	0,190	0,197	0,359	0,210
Imperfekcja II stopień	0,169	0,193	0,099	0,200	0,158	0,149	-	0,121
Średnia imperfekcja	0,176	0,170	0,138	0,186	0,174	0,173	0,180	0,166

W osadzarkie miałowej OM 20 (4.707B) (rys.8) uzyskano współczynniki imperfekcji na poziomie:  $I_1=0,210$ , przy gęstości rozdziału wynoszącej  $\Delta_1=1,390 \text{ g/cm}^3$  dla I st. rozdziału,  $I_2=0,121$ , przy gęstości rozdziału wynoszącej  $\Delta_2=1,609 \text{ g/cm}^3$  dla II st. rozdziału.

Średnia wartość wskaźnika imperfekcji dla badanych osadzarek wyniosła  $I=0,173$ .

Dla osadzarki OM20 (4.707A) nie określono imperfekcji dla II stopnia rozdziału, z uwagi na śladowe ilości produktu koncentratowego.



Rys. 8. Osadzarka miałowa OM20 KWK Budryk [źródło: opracowanie własne]

## 5. Podsumowanie

Prace prowadzone przez ITG KOMAG realizowane we współpracy z innymi jednostkami badawczo-rozwojowymi [13, 14, 15, 16, 17, 18], producentami, a w głównej mierze ich użytkownikami [19, 20, 21], zaowocowały powstaniem innowacyjnych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych osadzarek [22]. Rozwojowi konstrukcyjnemu osadzarek pulsacyjnych typu KOMAG podlegały wszystkie podzespoły, co dało efekty w postaci wzrostu wydajności, poprawy wskaźników dokładności wzbogacania, zmniejszenia zużycia wody technologicznej [23, 24]. Uzyskano zmniejszenie pola powierzchni zabudowy osadzarek, co skutkuje obniżeniem masy.

Poprawę jakości koncentratu węglowego o zadanych parametrach technologicznych osiągnięto między innymi dzięki: modernizacji układu doprowadzenia nadawy na osadzarkę, jak i modernizację układu doprowadzenia powietrza roboczego, automatycznemu sterowaniu mediami oraz modyfikacji zespołu odbioru produktu ciężkiego. Dodatkowo wprowadzenie własnych systemów sterowania osadzarką KOGA [25, 26, 27, 28, 29, 30] umożliwiło zwiększoną kontrolę prowadzenie procesu wzbogacania.

### Wnioski z badań osadzarek średnioziarnowych OS18

Przeprowadzone badania technologiczne wykazy prawidłową pracę osadzarek średnioziarnowych OS18, w warunkach ciągłego ruchu Zakładu Przerobczego KWK Budryk.

Uzyskano korzystne wyniki współczynników imperfekcji wahające się w przedziale od  $I=0,138$  do  $I=0,186$ . Osadzarki były pracowały z nominalnym obciążeniem wynoszącym 250 t/h, co korzystnie wpłynęło na przebieg procesu wzbogacania materiału i wyniki rozdziału.

### Wnioski z badań osadzarek mialowych OM20

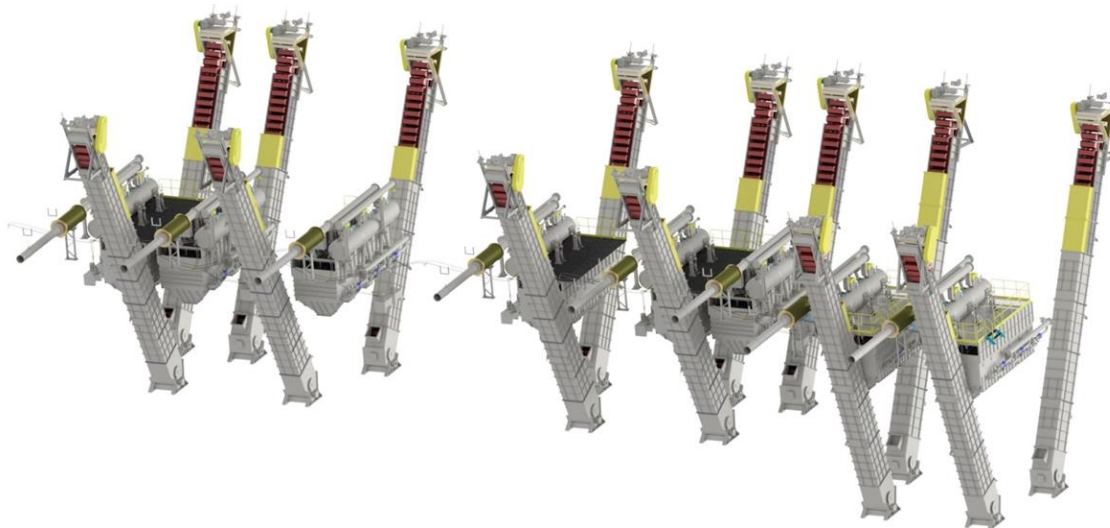
W trakcie badania stwierdzono bardzo niskie, w odniesieniu do rozmiarów osadzarki OM20, obciążenie nadawą zawierające się w przedziale 20-30 t/h, odpowiadające 8-12% nominalnemu obciążeniu wynoszącemu 250 t/h, niekorzystnie wpłynęło na przebieg procesu wzbogacania materiału i wyniki rozdziału.

Z uwagi na znaczną ilość ziaren najdrobniejszych, spowodowanych kruszeniem ziaren nadawy przed jej wzbogacaniem oraz bardzo niskie jednostkowe obciążenie, wynoszące 1,5 t/h na 1 m<sup>2</sup> powierzchni roboczej, produkt odpadowy jak i produkt pośredni odbierane były wyłącznie w postaci przepadu ziaren przez elastyczne gumowe sita o rozmiarach otworów 4 x15 mm.

Poprawę jakości koncentratu węglowego o zadanych parametrach technologicznych (wzrost wydajności, poprawa wskaźników dokładności wzbogacania, zmniejszenie zużycia wody) osiągnięto między innymi dzięki:

- modernizacji układu doprowadzenia nadawy na osadzarki (przesiewacze odmulające),
- zainstalowaniu systemów sterowania osadzarką KOGASTER,
- zautomatyzowaniu sterowania mediami,
- modyfikacji zespołu odbioru produktu ciężkiego,
- modernizacji urządzeń współpracujących, w tym przesiewaczy i przenośników kubełkowych.

Prace modernizacyjne systemów wzbogacania KWK Budryk (rys. 9) prowadzone przez ITG KOMAG realizowano we współpracy z użytkowaniem, co zaowocowało powstaniem innowacyjnych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych.



Rys. 9. Układ przestrzenny modernizowanych węzłów wzbogacania KWK Budryk  
[źródło: opracowanie własne]



## References

1. Blaschke St.: Przeróbka mechaniczna kopalin. Wydawnictwo Śląsk. Katowice 1982.
2. Kowol D., Matusiak P.: Improving the quality of hard coal products using the state-of-the-art KOMAG solutions in a pulsating jig nod. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 641, Mineral Engineering Conference (MEC 2019) 16–19 September 2019, Kocierz, Beskid Mały, Poland
3. Matusiak P., Kowol D., Jędo A.: Rozwój konstrukcji i technologii w osadzarkach pulsacyjnych typu KOMAG do wzbogacania węgla kamiennego i innych surowców mineralnych, KOMEKO 2011. W: Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, ITG KOMAG, Gliwice 2011, s. 73-86.
4. Matusiak P., Kowol D.: Rozwój osadzarek pulsacyjnych typu KOMAG. Maszyny Górnicze 2018 nr 2, s. 40-52, ISSN 2450-9442.
5. Osoba, M. Polskie osadzarki wodne pulsacyjne do wzbogacania surowców mineralnych, Inżynieria Mineralna - Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 2014, pp. 287-294 (in Polish).
6. Matusiak P., Kowol D., Łagódka M.: Nowe wdrożenia wzbogacalników pulsacyjnych typu KOMAG. KOMEKO 2016, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2016 s. 175-189, ISBN 978-83-60708-91-0.
7. Matusiak P., Kowol D.: Maszyny do przeróbki mechanicznej konstruowane w ITG KOMAG. Maszyny Górnicze 2013 nr 2, s. 71-76, ISSN 0209-3693.
8. Matusiak P., Kowol D.: Możliwości poprawy parametrów jakościowych i ilościowych produktów w węźle wzbogacania osadzarkowego. KOMEKO 2012, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012, s. 115-124.
9. Matusiak P., Kowol D.: State-of-the-art pulsating jigs of KOMAG type. Materiały na konferencję: IMTech 2019, Innovative Mining Technologies, Scientific and Technical Conference, Szczyrk, Poland, 25-27 March 2019 s. 1-10, (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 vol. 545) ISSN 1757-899X.
10. Matusiak P. i inni.: Opracowanie koncepcji osadzarki średnioziarnowe OS wraz z urządzeniami współpracującymi na przykładzie wytypowanego zakładu przeróbczego, ITG KOMAG, Gliwice 2013. Materiały niepublikowane.
11. Matusiak P. i inni: „Opracowanie koncepcji osadzarki miałowej OM wraz z urządzeniami współpracującymi na przykładzie wytypowanego zakładu przeróbczego”, ITG KOMAG, Gliwice 2013. Materiały niepublikowane.
12. Kowol D., Matusiak P., Łagódka M.: Możliwości zwiększenia efektywności procesu produkcji miałów węgla koksowych poprzez wzrost dokładności wtórnego wzbogacania półproduktu w osadzarkach pulsacyjnych. Masz. Gór. 2018 nr 2 s. 53-64, ISSN 2450-9442.
13. Gouri Charan T., Chattopadhyay U. S., Singh K. M. P, Kabiraj S., Haldar D. D.: Pilot-Scale Baum Jig Washing for Beneficiation of a High-Ash Indian Noncoking Coal, Volume 29, Pages 130-139, 2009.
14. Surowiak A.: Evaluation of the results of coal jiggling process. E3S Web of Conferences 18, 01030 (2017), Mineral Engineering Conference MEC 2017.



15. Brożek, M.; Surowiak, A. Argument of separation at upgrading in the JIG, *Archives of Mining Sciences*, 2010, vol. 55 iss. 1, pp. 1–40.
16. Surowiak, A. Influence of particle density distributions of their settling velocity for narrow size fractions, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi = Mineral Resources Management*, 2014, vol. 30 iss.. 1, pp. 105–122 (in Polish).
17. Surowiak, A., Foszcz, D., and Niedoba, T. (2019). Evaluation of jig work on the basis of granulometric analysis of particle size fractions of beneficiation products in purpose of process optimization, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 641, *Mineral Engineering Conference MEC2019*.
18. Tripathy, A., Panda, L., Sahoo, A.K., Biswal, S.K., Dwari, R.K. and Sahu, A.K. (2016). Statistical optimization study of jiggging process on beneficiation of fine size high ash Indian non-coking coal, *Advanced Powder Technology*, 27, pp. 1219-1224.
19. Gawliński A., Jendryś S., Kowol D., Rogala-Rojek J., Stankiewicz K., Woszczyński M.: Doświadczenia z badań i wdrożenia systemu sterowania osadzarką pulsacyjną OS36 w KWK Budryk. KOMEKO 2011, *Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność*, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2011 s. 137-144.
20. Pielot, J. (2017). Wtórne wzbogacanie węgla kamiennego w osadzarkach i cyklonach wodnych, *Inżynieria Mineralna - Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2(40), pp. 139–144 (in Polish).
21. Heyduk, A. and Pielot, J. (2014). Economical efficiency assessment of an application of on-line feed particle size analysis to the coal cleaning systems in jigs, *Inżynieria mineralna - Journal of the Polish mineral engineering society*, 2(34), pp. 217-228.
22. Kowol D. i in.: Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych zespołów rozrządu powietrza pulsacyjnego w osadzarkach pulsacyjnych. W: *Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalni*, Materiały konferencyjne, Szczyrk 2009.
23. Kowol D.: Badania dynamiki kształtowania się warstw gęstościowych w osadzare przemysłowej. *Masz. Gór.* 2012 nr 1 s. 32-37.
24. Kowol D., Łagódka M.: Badania rozkładu gęstościowego wzbogacanego materiału w strefie rozdziału/odbioru osadzarki pulsacyjnej. KOMEKO 2012, *Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność*, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012 s. 125-137.
25. Jendryś S., Jasiulek D., Stankiewicz K., Babczyński J.: Implementation of a jig control system at BUDRYK Coal Mine *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 679 2019.
26. Jendryś S., Kost G.: Control of bucket conveyor's output. *Mechatronics 2017 - Ideas for Industrial Applications*, Editors: Jerzy Świder, Sławomir Kciuk, Maciej Trojnecki, *Advances in Intelligent Systems and Computing* 934, Springer Nature Switzerland AG 2019 s. 192-200, ISBN 978-3-030-15857-6; ISSN 2194-5365.
27. Jendryś S., Stankiewicz K., Jasiulek D.: Innowacyjne rozwiązania ITG KOMAG w zakresie automatyzacji węzłów osadzarkowych. *Masz. Gór.* 2018 nr 2 s. 65-77, ISSN 2450-9442.
28. Jendryś S., Woszczyński M., Stankiewicz K., Gawliński A.: Układ sterowania węzłem osadzarkowym. KOMEKO 2013, *Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność*,



Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2013 s. 179-187; 0,53 ark. wyd., ISBN 978-83-60708-71-2.

29. Król J., Krzak Ł., Jendrysik S., Stankiewicz K., Woszczyński M.: Wdrożenie układu sterowania węzłem osadzarkowym w KWK "Sośnica". KOMEKO 2016, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2016 s. 227-237; 0,77 ark. wyd., ISBN 978-83-60708-91
30. Rogala-Rojek J., Stankiewicz K., Jendrysik J.: SCADA class software of the KOGA control system of jig beneficiation node. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 545, Innovative Mining Technologies IMTech 2019 Scientific and Technical Conference 25–27 March 2019, Szczyrk, Poland.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.3>

## Badania zawartości pierwiastków ziem rzadkich w wybranych polskich surowcach skalnych

Paweł Friebe – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** Pierwiastki ziem rzadkich (REE) cieszą się stale rosnącym zainteresowaniem, związanym z ich cenniejszymi właściwościami. Pierwiastki te są szeroko rozpowszechnione w przyrodzie, ale najczęściej występują w niskich koncentracjach. Aktualnie zasoby Polski ograniczają się do kilku ubogich złóż. Ze względu na to podjęto prace mające na celu rozszerzenie wiedzy o zawartości pierwiastków ziem rzadkich w polskich surowcach. Do badań wybrano 5 polskich surowców skalnych. Badania były wykonywane za pomocą metody spektrometrii mas, z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS). Stwierdzono występowanie pierwiastków ziem rzadkich w badanych materiałach w zakresie 14,8-190,0 ppm. Największe koncentracje wykazało kruszywo bazaltowe i haloizyt, a najniższe koncentracje kruszywo granitowe i piasek 2. Następnie wydzielono klasę ziarnową 0,045-0 mm w celu zbadania koncentracji REE w drobnych ziarnach materiałów.

Słowa kluczowe: pierwiastki ziem rzadkich (REE), przesiewanie, surowce skalne

### Determination of the rare earth elements content in the selected Polish rock materials

**Abstract:** There is growing demand for rare earth elements (REE) due to their valuable properties. The elements are widely distributed in nature, but mostly in low concentrations. Poland's resources are currently limited to a few deposits. The project was undertaken to extend the knowledge about the content of rare earth elements in the selected Polish raw materials. Five Polish rock materials were selected for testing. The method of mass spectrometry with inductively coupled plasma ionization (ICP-MS) was used. The rare earth elements content in the tested materials was found to be in the range of 14.8-190.0 ppm. Their highest content was found in basalt aggregate and halloysite, and the lowest content in granite aggregate and sand. Grain class of 0.045-0 mm was separated to determine the REE content in fine grains of materials.

Keywords: Rare Earth Elements (REE), screening, rock materials

## 1. Wprowadzenie

Pierwiastki ziem rzadkich (REE – Rare Earth Elements) to grupa pierwiastków, w skład której wchodzi lantanowce skand i itr. Pierwiastki te cieszą się wielkim zainteresowaniem, które stale rośnie. Zainteresowanie to jest związane z szeregiem pożądanych własności tych pierwiastków. Własności te są wykorzystywane w wielu nowoczesnych technologiach. Istnieje podział tych pierwiastków na lekkie pierwiastki ziem rzadkich – LREE (La-Eu) oraz na ciężkie pierwiastki ziem rzadkich – HREE (Gd-Lu i Y) [1]. W literaturze występuje również inny, bardziej precyzyjny podział, częściej wykorzystywany przy ekstrakcji: lekkie pierwiastki ziem rzadkich – LREE (La-Pm), średnie pierwiastki ziem rzadkich – MREE (Sm-Gd), ciężkie pierwiastki ziem rzadkich – HREE (Tb-Sc i Y) [2].

Pierwiastki ziem rzadkich są pierwiastkami szeroko rozpowszechnionymi w przyrodzie. Jednakże, głównym problemem w ich pozyskiwaniu jest to, że występują najczęściej w niskich koncentracjach. Złoża charakteryzujące się wysoką koncentracją tych pierwiastków występują bardzo rzadko. Aktualnie Polska posiada kilka rozpoznanych zasobów surowcowych, które nie mogą stanowić ekonomicznie uzasadnionego źródła pozyskiwania REE. Ich występowanie w postaci ubogich złóż ogranicza się do rejonu Szklarskiej Poręby, Sudetów, okolic Białegostoku oraz piasków plaż morza Bałtyckiego.



Za potencjalne źródło metali ziem rzadkich uznawane są hałdy odpadów z przemysłu fosfogipsowego oraz popioły z elektrowni ze spalania i współspalania węgla. Odpady te stanowią istotne źródło odzysku pierwiastków ziem rzadkich. W związku z tym Instytut Techniki Górniczej KOMAG podjął prace poszukiwawcze źródeł pozyskiwania pierwiastków ziem rzadkich w Polsce. Badania dotyczące odzysku pierwiastków ziem rzadkich były już prowadzone m. in. przez GiG, PAN, AGH [3, 4, 5].

Ze względu na stwierdzone występowanie pierwiastków ziem rzadkich w surowcach skalnych na świecie [6, 7, 8], podjęto próbę badań polskich surowców. Perspektywicznymi miejscami pozyskiwania pierwiastków ziem rzadkich w Polsce mogą być aktualnie eksploatowane złoża surowców skalnych. Istniejące ciągi technologiczne mogą posłużyć jako etap klasyfikacji wstępnej, surowego materiału ze złoża. Nawet niska zawartość minerałów zawierających pierwiastki ziem rzadkich, stwarza możliwość ekonomicznie uzasadnionej inwestycji w maszyny i urządzenia do separacji. Aktualnie działające zakłady górnicze na świecie eksploatują złoża o koncentracji pierwiastków ziem rzadkich powyżej 500 ppm [9].

Badania będące przedmiotem niniejszego rozdziału skierowane są na potwierdzenie występowania pierwiastków ziem rzadkich w wybranych surowcach skalnych. Występowanie pierwiastków ziem rzadkich w surowcach pochodzenia naturalnego zależna jest od obecności minerałów ziem rzadkich, takich jak [10]:

- bastnazyt,
- monacyt,
- ksenotym,
- apatyt i inne

oraz zależy również od obecności zaadsorbowanych jonów pierwiastków ziem rzadkich (minerały sorpcyjno-ilaste).

W przeróbce mechanicznej surowców zawierających pierwiastki ziem rzadkich wykorzystuje się między innymi: separatory stożkowe, wzbogacalniki strumieniowo-zwojowe, maszyny flotacyjne, separatory magnetyczne, separatory elektrostatyczne czy separatory Multi-Gravity. Wymienione maszyny i urządzenia, można podzielić ze względu na sprawność wzbogacania. Do urządzeń o względnie małej sprawności wzbogacania należy zaliczyć separatory stożkowe oraz wzbogacalniki strumieniowo-zwojowe. Urządzeniami o względnie wysokiej sprawności wzbogacania są np. separatory magnetyczne bądź separatory elektrostatyczne. Jednakże podział urządzeń ze względu na sprawność wzbogacania nie determinuje ich kolejności zastosowania w ciągach technologicznych [11].

Badania wykazały, że pierwiastki ziem rzadkich mogą koncentrować się w ziarnach o mniejszych wielkościach [12]. Z tego powodu przed skierowaniem materiału do wzbogacania powinno się zbadać rozkład interesujących składników (REE) w klasach ziarnowych. Jeżeli wykaże się wyższą zawartość pierwiastków ziem rzadkich, w konkretnej klasie ziarnowej należy ją wydzielić z całości materiału i następnie poddać wzbogacaniu.

## 2. Cel badań

Głównym celem prac badawczych prowadzonych w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG jest zidentyfikowanie takiego materiału, który poddany procesom przerobczym pozwoli uzyskać koncentrat zawierający około 60% minerałów ziem rzadkich. Według literatury warunkiem przydatności materiału, w celu uzyskania pierwiastków ziem rzadkich o wysokiej czystości, jest uzyskanie około 60%





minerałów ziem rzadkich w koncentracji po przeróbce mechanicznej [13]. Aby zrealizować ten cel sporządzony został następujący plan badań:

- a. Wyodrębnienie próbek reprezentatywnych z pozyskanych materiałów. Analiza próbek pod kątem zawartości pierwiastków ziem rzadkich. Wyznaczenie trzech materiałów o najwyższej zawartości REE.
- b. Wydzielenie klas ziarnowych 0,045-0 mm z wyznaczonych wcześniej próbek. Analiza wydzielonych drobnych klas ziarnowych materiałów pod względem zawartości pierwiastków ziem rzadkich oraz zbadanie, czy w najdrobniejszych ziarnach badanego surowca pierwiastki ziem rzadkich koncentrują się w większym stopniu.
- c. Analiza wyników otrzymanych w podpunktach a. i b. Określenie przydatności nowych materiałów. Podsumowanie przeprowadzonych prac.

### 3. Pierwiastki ziem rzadkich w surowcach skalnych – analiza literatury

W przyrodzie brak jest złóż pierwiastków ziem rzadkich w czystej postaci. Pierwiastki te najczęściej występują w postaci minerałów bądź związków powstałych po jonizacji minerałów. Na dzień dzisiejszy nauce znane jest więcej niż 250 minerałów zawierających pierwiastki ziem rzadkich. Z powodu ich niewielkiego nagromadzenia, nieliczne z nich nadają się do eksploatacji. Aktualnie eksploatowane są złoża zawierające głównie następujące minerały: bastnazyt, monacyt, ksenotym oraz minerały sorpcyjno-ilaste [14, 6]. Minerały te zostały scharakteryzowane w dalszej części publikacji.

Bastnazyt należy do grupy minerałów fluorowęgłanowych. Wzór chemiczny jest następujący:  $CeCO_3(OH,F)$ . Cer może być zastępowany przez inne lekkie pierwiastki ziem rzadkich (LREE) np. lantan. Mineral ten można odnaleźć w skałach magmowych, takich jak pegmatyty czy granity. Występuje on również w skałach metamorficznych, w strefach, gdzie dominującą rolę odgrywa metamorfizm kontaktowy [15]. Wraz z tym minerałem mogą współwystępować inne minerały zawierające pierwiastki ziem rzadkich, takie jak allanit lub fluoceryt [16].

Monacyt należy do grupy minerałów fosforanowych. Wzór chemiczny jest następujący:  $(Ce,La,Nd,Th)(PO_4)$ . Cer, lantan, neodym oraz tor występują wymiennie w strukturze minerału. Mineral ten najczęściej występuje jako mineral akcesoryczny. Najczęściej jest spotykany w skałach magmowych lub metamorficznych np. granit, pegmatyt, bazalt, łupki oraz gnejs [17, 18, 19, 20]. Monacyt można również spotkać jako składnik skał osadowych. Mineral ten jest jednym z minerałów bardziej odpornych na działanie atmosfery. Wskutek wietrzenia skał macierzystych, zawierających monacyt, może dochodzić do akumulacji minerału w materiale pozostałym po tym procesie. Powstałe w ten sposób złoża okrucowe o odpowiednich zasobach, może być przedmiotem eksploatacji w celu pozyskania pierwiastków ziem rzadkich oraz toru [21].

Minerały sorpcyjno-ilaste są to minerały o bardzo niewielkich rozmiarach. Dzięki niewielkim rozmiarom ziaren tych minerałów oraz dużej powierzchni właściwej, są one w stanie adsorbować znaczne ilości jonów związków chemicznych. Do powstania złóż minerałów sorpcyjno-ilastych zawierających pierwiastki ziem rzadkich dochodzi w trakcie wietrzenia skał. Zachodzi wtedy jonizacja związków tych pierwiastków i następnie ich adsorpcja na powierzchniach minerałów sorpcyjno-ilastych. Głównymi skałami macierzystymi minerałów sorpcyjno-ilastych są skały magmowe – granity [7]. Minerały te są jednym z głównych źródeł pozyskiwania ciężkich pierwiastków ziem rzadkich. Ze względu na słabsze (sorpcyjne) związanie jonów pierwiastków ziem rzadkich, pozyskanie koncentratu tych pierwiastków jest znacznie łatwiejsze [22]. Złoża minerałów sorpcyjno-ilastych, głównie znajdujących się w Chinach składają się z ilów (40-70%). Iły znajdujące się w tych złożach to haloizyt



(25-50%), illit (5-20%), kaolinit (5-10%) oraz montmorylonit (<1%) [23]. Haloizyt należy do glino-krzemianów warstwowych z podgrupy kaolinitu. Występuje on bardzo rzadko w czystej, jednorodnej postaci, najczęściej jest minerałem towarzyszącym kaolinitowi, ale także minerałom żelazonośnym, skaleniom i piaskom kwarcowym.

Ksenotym należy do grupy minerałów fosforanowych. Wzór chemiczny jest następujący:  $YPO_4$ . Jednym z głównych cech tego minerału jest zawartość itru sięgająca powyżej 50% oraz niska zawartość lekkich pierwiastków ziem rzadkich. W porównaniu do monacytu posiada znacznie niższą zawartość toru [24]. Minerał ten najczęściej można spotkać jako minerał akcesoryczny w skałach magmowych. Ksenotym może również występować w złożach okrucowych, których geneza jest podobna do genezy złóż okrucowych zawierających monacyt [25]. Wykazano, że w ksenotymie może znajdować się również wolfram oraz pierwiastki promieniotwórcze, takie jak uran oraz tor [26].

Ksenotym, monacyt oraz bastnazyt są minerałami mogącymi występować w skałach, takich jak granit, bazalt, pegmatyt i innych wymienionych powyżej. Poniżej scharakteryzowano materiały, które zostały wykorzystane do badań.

Granit jest głębinową skałą magmową o budowie jawnokrystalicznej. Skała ta powstaje z powolnej krystalizacji magmy pod powierzchnią Ziemi. Głównymi minerałami granitu są ortoklaz, plagioklaz, kwarc i biotyt. Zawartość pierwiastków ziem rzadkich w tej skale zależy od zawartości minerałów akcesorycznych. Część minerałów akcesorycznych granitu zawiera REE. Są nimi między innymi: monacyt, ksenotym, allanit, tytanit oraz anataz [27, 28].

Bazalt jest to zasadowa skała lita wylewna (wulkaniczna) o strukturze bardzo drobnoziarnistej (skrytokrystaliczna) lub afanitowej, czasem porfirowej. Głównymi minerałami tej skały są piroksen, plagioklaz, mika, amfibol. W wielu pracach wykazano obecność pierwiastków ziem rzadkich w skałach bazaltowych [8, 29, 30]. Obecność pierwiastków ziem rzadkich również w tych skałach jest związana z zawartością minerałów akcesorycznych [31].

#### 4. Charakterystyka materiałów wykorzystanych w badaniach

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury dokonano wyboru materiałów, które zostały wykorzystane do badań. Wybrano następujące kruszywa ze złóż magmowych: granit, bazalt; kruszywa ze złóż osadowych: piaski; minerał ilasty: haloizyt. Charakterystykę tych materiałów przedstawiono poniżej.

- Granit – kopalnia granitu 1

Kopalnia ta produkuje kruszywa granitowe o wielu zakresach uziarnienia. Złoże kopalni jest urabiane za pomocą robót wiertniczo-strzałowych. Technologia zakładu obejmuje wielostopniową klasyfikację oraz kruszenie. Materiał wykorzystany w badaniach jest jednym z produktów handlowych kopalni: kruszywo granitowe 2-0 mm, masa próbki: 20 kg. Granit został pobrany przez załogę kopalni.

- Bazalt – kopalnia bazaltu 1, kopalnia bazaltu 2

Kopalnie te produkują kruszywa bazaltowe o wielu zakresach uziarnienia. Złóża kopalń są urabiane za pomocą robót wiertniczo-strzałowych. Technologia zakładów obejmuje wielostopniową klasyfikację oraz kruszenie. Materiały wykorzystane w badaniach są jednymi z produktów handlowych kopalni: kruszywo bazaltowe 2-0 mm, masa próbek: 20 kg. Kruszywa zostały pobrane przez załogę kopalni.

- Haloizyt – kopalnia haloizytu 1



Obecnie na świecie zaledwie kilka kopalń wydobywa ten minerał. Haloizyt ze złoża kopalni stanowi produkt wietrzenia skał bazaltowych. Kopalnia ta jest kopalnią odkrywkową. Surowiec ma jednorodny skład w całym przekroju, brak jest przerostów i wtrąceń typu żyłowego.

Skład mineralny kopaliny jest następujący:

- haloizyt: 75-80%,
- tlenki żelaza (głównie hematyt i magnetyt): 18-22%,
- tlenki żelaza i tytanu (głównie ilmenit): 2-4%.

Materiał wykorzystany do badań, jest surowym materiałem, pobranym ze złoża, przez załogę kopalni. Próbką materiału ważyła 20 kg.

- Piasek 1 – kopalnia piasku 1

Kopalnia eksploatuje złożo piaskowo-żwirowe. Technologia zakładu obejmuje wydobycie surowego materiału ze złoża za pomocą pogłębiarki ssącej – refulera. Następnie materiał przechodzi wiele etapów płukania, klasyfikacji i odwadniania. Wykorzystywanymi urządzeniami do tego celu są m.in. przesiewacze wibracyjne, odwadniacz kołowy czy klasyfikator pulsacyjny. Materiał użyty w badaniach jest to przepad z sit klasyfikatora pulsacyjnego o uziarnieniu <2 mm, masa próbki: 20 kg. Piasek został pobrany przez załogę żwirowni.

- Piasek 2 – kopalnia piasku 2

Kopalnia piasku eksploatuje złożo, którego kopalnią główną jest piasek podsadzkowy, a kopalnią towarzyszącą mieszanka piaskowo-żwirowa. Złożo jest urabiane za pomocą koparki wielonaczyniowej. Następnie materiał jest transportowany na zakład przerobczy, gdzie przechodzi proces płukania, klasyfikacji i suszenia. Produktami handlowymi są: piaski budowlane, piaski płukane i suszone oraz żwiry. Surowy materiał został pobrany ze złoża przez pracowników Instytutu Techniki Górniczej KOMAG. Próbką materiału ważyła 20 kg.

## 5. Badania zawartości pierwiastków ziem rzadkich

W pierwszej kolejności dokonano pomniejszenia próbek badawczych do 0,5 kg za pomocą metody kwartowania. Uzyskane w ten sposób próbki zostały przebadane pod względem zawartości pierwiastków ziem rzadkich. Badania zawartości REE zostały przeprowadzone w Laboratorium Inżynierii Materiałowej i Środowiska w ITG KOMAG. Próbki uzyskanych materiałów były poddane mineralizacji w układzie zamkniętym, na mokro.

Urządzeniem wykorzystywanym do tego celu był mineralizator mikrofalowy. Jakość roztwarzania badanych próbek była poddana ocenie wizualnej. W wyniku procesu mineralizacji uzyskano dla większości próbek bezbarwny i klarowny roztwór. Badania zawartości pierwiastków ziem rzadkich wykonano metodą spektrometrii mas, z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS). Otrzymane wyniki przedstawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rysunku 1. Na czerwono zaznaczono HREE, na pomarańczowo MREE, a na niebiesko LREE.

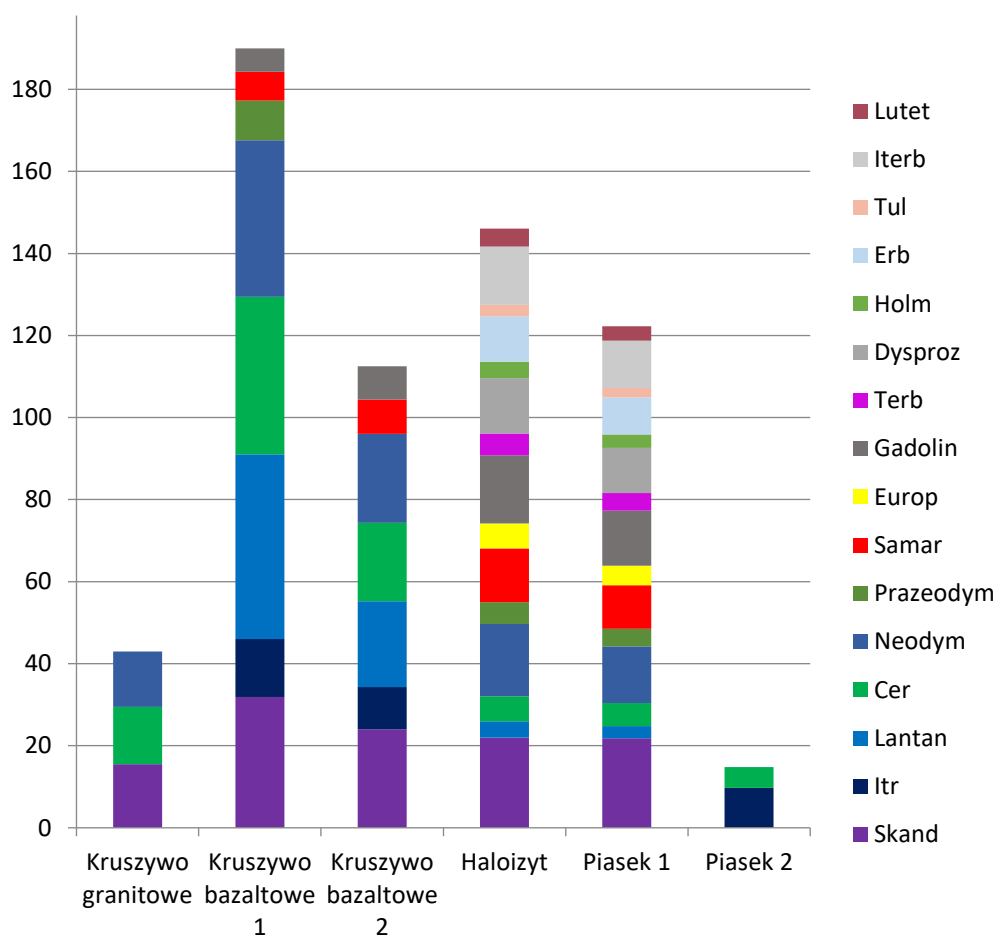
W tabeli 2 przedstawiono zsumowane zawartości HREE, MREE oraz LREE.



## Zestawienie wyników analizy zawartości pierwiastków ziem rzadkich w surowych materiałach

Tabela 1

Identyfikacja próbki	Zawartość pierwiastków ziem rzadkich [ppm]					
	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
Kruszywo granitowe	15,5	-	-	14,0	13,5	-
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
	-	-	-	-	-	-
	Er	Tm	Yb	Lu	Σ=43,0	
	-	-	-	-		
Kruszywo bazaltowe 1	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
	31,9	14,1	45,0	38,4	38,2	9,7
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
	7,0	-	5,7	-	-	-
	Er	Tm	Yb	Lu	Σ=190,0	
	-	-	-	-		
Kruszywo bazaltowe 2	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
	24,0	10,3	20,9	19,1	21,7	-
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
	8,4	-	8,1	-	-	-
	Er	Tm	Yb	Lu	Σ=112,5	
	-	-	-	-		
Haloizyt	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
	22,0	-	4,0	6,1	17,6	5,4
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
	13,1	6,1	16,6	5,3	13,5	4,0
	Er	Tm	Yb	Lu	Σ=146,2	
	11,1	2,8	14,2	4,4		
Piasek 1	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
	21,8	-	3,0	5,6	13,9	4,3
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
	10,7	4,8	13,4	4,3	11,0	3,3
	Er	Tm	Yb	Lu	Σ=122,5	
	9,1	2,3	11,5	3,5		
Piasek 2	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
	-	9,7	-	5,1	-	-
	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
	-	-	-	-	-	-
	Er	Tm	Yb	Lu	Σ=14,8	
	-	-	-	-		



Rys. 1. Zbiorczy wykres wyników analizy zawartości pierwiastków ziem rzadkich w surowych materiałach

[Źródło: opracowanie własne]

Spośród badanych próbek, najwyższą sumaryczną zawartość pierwiastków ziem rzadkich posiada kruszywo bazaltowe i jest to 190,0 ppm. Następnym materiałem, w kolejności pod względem sumarycznej zawartości badanych pierwiastków jest haloizyt – 146,03 ppm i piasek 1 – 122,22 ppm. Z tych materiałów zostaną wydzielone klasy ziarnowe 0,045-0 mm.

**Summaryczne zawartości HREE, MREE oraz LREE w surowych materiałach**

Tabela 2

Identyfikacja próbki	Zawartość pierwiastków ziem rzadkich [ppm]		
	HREE	MREE	LREE
Kruszywo granitowe	15,5	0	27,5
Kruszywo bazaltowe 1	46,0	12,7	131,3
Kruszywo bazaltowe 2	34,3	16,5	61,7
Haloizyt	77,3	35,8	33,1
Piasek 1	66,8	28,9	26,8
Piasek 2	9,7	0	5,1

W celu uzyskania klas ziarnowych 0,045-0 mm wykorzystano laboratoryjny przesiewacz wibracyjny. Za pomocą metody kwartowania wydzielono próbki o masie 1 kg: kruszywa bazaltowego, haloizytu oraz piasku. Proces przesiewania prowadzony był na mokro. Po zakończeniu procesu, produkty wysuszono w suszarce elektrycznej i wyznaczono ich wychody masowe. Następnie obliczono wychody procentowe uzyskanych klas ziarnowych, przedstawione w poniższej tabeli 3.

**Wychody klas ziarnowych 0,045-0 mm w próbkach haloizytu, piasku oraz bazaltu**

Tabela 3

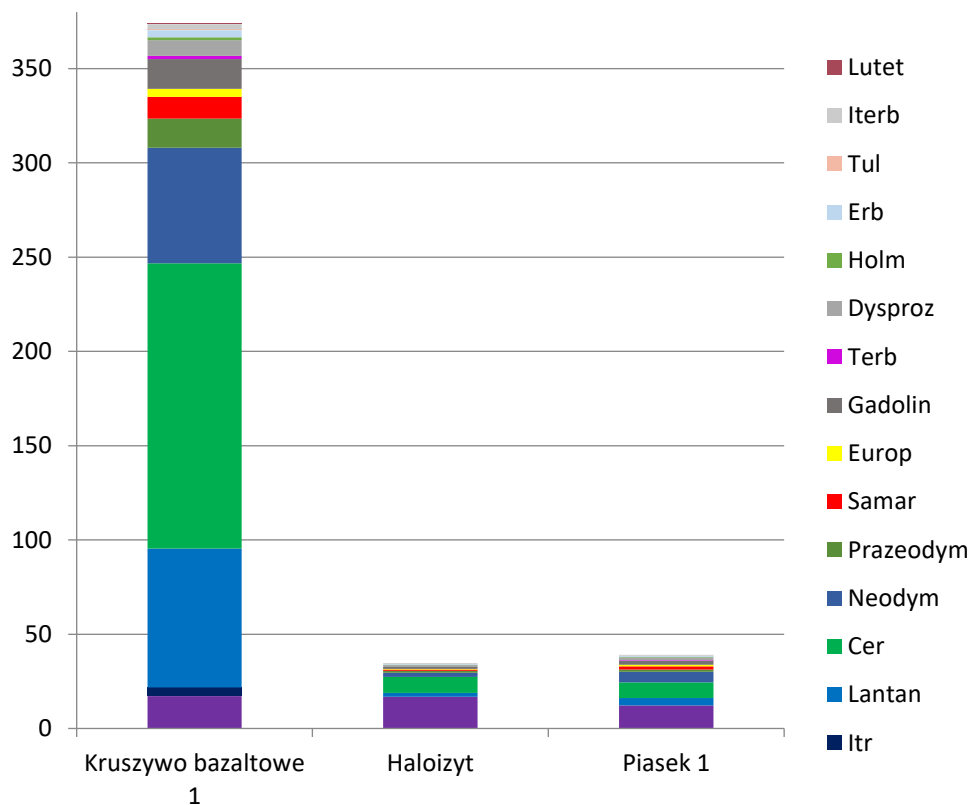
Identyfikacja próbki	Wychód klasy 0,045-0 mm [%]
Bazalt	11,5
Haloizyt	38,7
Piasek	0,65

Po wyznaczeniu wychodów materiału w klasie 0,045-0 mm, zostały one przeanalizowane pod względem zawartości pierwiastków ziem rzadkich. Wykorzystano metodykę ICP-MS opisaną na początku tego rozdziału. Zestawienie wyników analizy przedstawiono w tabelach 4 i 5 oraz na rysunku 2.

Wyniki analizy zawartości pierwiastków ziem rzadkich w klasach ziarnowych 0,045-0 mm

Tabela 4

Rodzaj próbki	Zawartość pierwiastków ziem rzadkich [ppm]					
	Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr
Kruszywo bazaltowe 1	17,2	4,6	73,6	151,4	61,3	15,4
	Sm 11,6	Eu 4,3	Gd 15,8	Tb 1,7	Dy 8,4	Ho 1,5
	Er 3,8	Tm 0,5	Yb 2,9	Lu 0,3	Σ=374,3	
Haloizyt	Sc 16,9	Y -	La 2,0	Ce 8,4	Nd 2,3	Pr 1,0
	Sm 0,7	Eu 0,3	Gd 1,0	Tb 0,1	Dy 0,9	Ho 0,1
	Er 0,5	Tm -	Yb 0,5	Lu -	Σ=34,7	
Piasek	Sc 12,3	Y -	La 3,9	Ce 8,3	Nd 5,6	Pr 1,2
	Sm 1,6	Eu 1,0	Gd 2,0	Tb 0,3	Dy 1,6	Ho 0,3
	Er 0,6	Tm -	Yb 0,5	Lu -	Σ=39,2	



Rys. 2. Zestawienie wyników analizy zawartości pierwiastków ziem rzadkich

[Źródło: opracowanie własne]



## Sumaryczne zawartości HREE, MREE oraz LREE w surowych materiałach

Tabela 5

Identyfikacja próbki	Zawartość pierwiastków ziem rzadkich [ppm]		
	HREE	MREE	LREE
Kruszywo bazaltowe 1	40,9	31,7	301,7
Haloizyt	19,0	2,0	13,7
Piasek 1	15,6	4,6	19,0

## 6. Analiza otrzymanych wyników

Badania kruszywa granitowego wykazały sumaryczną zawartość pierwiastków ziem rzadkich wynoszącą 43,0 ppm, na którą składają się 3 pierwiastki tj. skand 15,5 ppm, cer 14,0 ppm, neodym 13,5 ppm. Na sumaryczną zawartość pierwiastków ziem rzadkich w kruszywie bazaltowym 1 (190,0 ppm) składa się 8 poszczególnych pierwiastków, spośród których największą koncentrację wykazuje lantan i jest to 45,0 ppm. Kruszywo bazaltowe 2 posiada zawartość REE wynoszącą 112,5 ppm, na którą składa się 7 pierwiastków. Spośród pierwiastków, których obecność stwierdzono w kruszywie bazaltowym 2 najwyższą zawartość posiada pierwiastek skand 22,0 ppm. Haloizyt posiada zawartość REE na poziomie 146,2 ppm, na którą składa się 15 pierwiastków. Najwyższą koncentrację spośród 15 pierwiastków posiada skand – 24,0 ppm. Piasek 1 wykazał zawartość REE wynoszącą 122,5 ppm, na którą składa się 15 pierwiastków, spośród których najwyższą zawartość posiada skand – 21,8 ppm. Piasek 2 wykazał koncentrację REE, która wyniosła 14,8 ppm. Spośród wszystkich 16 badanych pierwiastków ziem rzadkich w tym materiale stwierdzono obecność tylko itru 9,7 ppm oraz ceru 5,1 ppm.

W tabeli 2 przedstawiono udział ciężkich, średnich i lekkich pierwiastków ziem rzadkich w badanych surowych materiałach. Kruszywa łamane pochodzenia magmowego: kruszywo granitowe oraz kruszywo bazaltowe posiadają większe powinowactwo do lekkich pierwiastków ziem rzadkich (LREE) ze względu na ich najwyższą koncentrację. Pozostałe materiały jakimi są haloizyt, piasek 1 oraz piasek 2 posiadają większe powinowactwo do ciężkich pierwiastków ziem rzadkich (HREE) ze względu na ich najwyższą koncentrację.

Spośród badanych surowych próbek materiałów, najwyższą sumaryczną zawartość pierwiastków ziem rzadkich posiada kruszywo bazaltowe i jest to 190,0 ppm. Następnym materiałem, w kolejności pod względem sumarycznej zawartości badanych pierwiastków jest haloizyt – 146,2 ppm i piasek 1 – 122,5 ppm. Najniższe sumaryczne zawartości pierwiastków ziem rzadkich zostały stwierdzone dla kruszywa granitowego – 43,0 ppm oraz dla piasku 2 14,8 ppm.

Do badań zawartości pierwiastków ziem rzadkich w klasie ziarnowej <0,045 mm zostały wybrane materiały: kruszywo bazaltowe 1, haloizyt oraz piasek 1. Najwyższą zawartość ziaren <0,045 mm posiada haloizyt – 38,7 %, a najniższą piasek 1 – 0,65 %. Spodziewany wzrost zawartości pierwiastków ziem rzadkich został osiągnięty tylko w przypadku kruszywa bazaltowego z kopalni bazaltu 1. Sumaryczna koncentracja poszukiwanych pierwiastków w tym materiale wzrosła ze 190,0 ppm do 374,3 ppm, co daje wzrost o około 97% (stopień wzbogacenia klasy ziarnowej w stosunku do całej próbki- 1,97). Na podstawie tabeli 5 można stwierdzić, że w największym stopniu wzrosła koncentracja lekkich pierwiastków ziem rzadkich. Przed odsianiem klasy ziarnowej 0,045-0 mm, w surowym





materiale lekkie pierwiastki ziem rzadkich stanowiły 68% całości. W uzyskanej klasie ziarnowej lekkie pierwiastki ziem rzadkich obejmowały 81% całości. Uzyskany wzrost koncentracji jest niewystarczający do dalszego wykorzystania kruszywa bazaltu w celu uzyskania pierwiastków ziem rzadkich z zyskiem.

## 7. Podsumowanie

W 2009 r. międzynarodowa Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju umieściła pierwiastki ziem rzadkich na liście tzw. surowców strategicznych. Unia Europejska w 2020 r. opublikowała listę surowców krytycznych dla Unii, surowców o znaczeniu strategicznym dla rozwoju nowoczesnych technologii. Na liście tej znalazły się m.in. pierwiastki ziem rzadkich. Ze względu na kluczowe znaczenie tych pierwiastków niezbędne jest poszukiwanie alternatywnych źródeł ich pozyskiwania. Z tego powodu przeprowadzono badania zawartości pierwiastków ziem rzadkich w surowcach skalnych.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie czy w analizowanych surowcach skalnych znajdują się pierwiastki ziem rzadkich o koncentracji umożliwiającej ich odzysk z korzyścią ekonomiczną. Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują na obecność pierwiastków ziem rzadkich w badanych próbkach materiałów. Wyniki badań wskazują na przewagę zawartości lekkich pierwiastków ziem rzadkich (LREE) w kruszywie bazaltowym 1 i 2 oraz kruszywie granitowym, a z kolei w haloizycie oraz piasku 1 i 2 w przewadze występują ciężkie pierwiastki ziem rzadkich (HREE). Ponadto, stwierdza się, że najczęściej występującym pierwiastkiem jest cer, ponieważ został oznaczony we wszystkich próbkach badanych materiałów.

W dalszej części badań wytypowano trzy materiały o najwyższej zawartości badanych pierwiastków, z których wyodrębniono klasy ziarnowe 0,045-0 mm. Założono, że w najdrobniejszej klasie ziarnowej koncentracja REE będzie najwyższa. Jednakże, w materiałach: haloizyt 1 oraz piasek 1 zaobserwowano spadek zawartości pierwiastków ziem rzadkich. Jedyny, zanotowany wzrost zawartości poszukiwanych pierwiastków uzyskano dla kruszywa bazaltowego 1. Zawartość poszukiwanych pierwiastków w tym materiale wzrosła z 190,0 do 374,3 ppm, co daje wzrost o około 97%.

Uzyskiwane zawartości pierwiastków ziem rzadkich w pobranych materiałach mieszczą się w granicy 14,8-190,0 ppm. Nawet w przypadku materiału zawierającego największą koncentrację jakim jest kruszywo bazaltowe, jest ona zbyt mała, aby przeprowadzić odzyskiwanie pierwiastków ziem rzadkich z zyskiem (brak przydatności). Spodziewany, wzrost zawartości badanych pierwiastków w najdrobniejszych ziarnach materiałów uzyskano tylko w przypadku kruszywa bazaltowego. Uzyskana, wyższa koncentracja poszukiwanych pierwiastków również jest niewystarczająca do przeprowadzenia uzasadnionej ekonomicznie ekstrakcji pierwiastków ziem rzadkich.

## Literatura

1. King H.: <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/>, dostęp: 30.04.2020
2. Koltun P., Tharumarajah A.: Life Cycle Impact of Rare Earth Elements, ISRN Metallurgy 2014, s. 1-10.
3. Całus-Moszek J., Białecka B.: Potencjał i zasoby metali ziem rzadkich w świecie oraz w Polsce. Artykuł przeglądowy, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko / Główny Instytut Górnictwa 4/2012, s. 61-72.



4. Jarośniński A.: Możliwości pozyskiwania metali ziem rzadkich w Polsce, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, 92/2016, s. 75-88.
5. Jarośniński A., Tora B.: Możliwości pozyskiwania wysokoprocentowych koncentratów metali ziem rzadkich w Polsce: aspekty surowcowo-technologiczne pozyskiwania metali ziem rzadkich w warunkach krajowych, *Inżynieria mineralna*, 2/2017, s. 93-100.
6. Jordens A., Cheng Y., Waters K.: A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals, *Minerals Engineering* 41/2013, s. 97-114.
7. Gupta C., Krishnamurthy N.: Extractive metallurgy of rare earths, *International Materials Reviews* 37(1)/1992, s. 197-248.
8. Sanematsu K., Moriyama T., Sotouky L., Watanabe Y.: Mobility of Rare Earth Elements in Basalt-Derived Laterite at the Bolaven Plateau, Southern Laos, *Resource Geology* 61(2)/2011, s. 140-158.
9. Ganguli R., Cook D.: Rare earths: A review of the landscape, *MRS Energy & Sustainability* 5/2018.
10. P. Friebe: Badania zawartości pierwiastków ziem rzadkich w wybranych materiałach oraz ich odzysk, materiały niepublikowane ITG KOMAG 2019.
11. P. Friebe: Separacja minerałów zawierających pierwiastki ziem rzadkich, materiały niepublikowane ITG KOMAG 2018.
12. Cavalcante F., Belviso C., Piccarreta G., Fiore S.: Grain-Size Control on the Rare Earth Elements Distribution in the Late Diagenesis of Cretaceous Shales from the Southern Apennines (Italy), *Journal of Chemistry* 2014, s. 1-11.
13. <https://www.britannica.com/science/rare-earth-element/Preparation-of-the-metals>, dostęp: 30.04.2020
14. Gupta C., Krishnamurthy N.: Extractive metallurgy of rare earths. Boca Raton: CRC 2005, s. 73-77.
15. Turlin F., André-Mayer A., Moukhsil A., Vanderhaeghe O., Gervais F.: Unusual LREE-rich, peraluminous, monazite- or allanite-bearing pegmatitic granite in the central Grenville Province, Québec, *Ore Geology Reviews* 89/2017, s. 627-667.
16. Encyclopaedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/bastnaesite>, dostęp: 09.10.2019.
17. Broska I., Kubiš M., Williams C., Konečný P.: The compositions of rock-forming and accessory minerals from the Gemic granites, *Bulletin of the Czech Geological Survey* 77/2002, s. 147-155.
18. René M.: REE and Y Mineralogy of the Krudum Granite Body, *Minerals* 8(7)/2018.
19. Mckeough M., Lentz D., Mcfarlane Ch., Brown J.: Geology and evolution of pegmatite-hosted U–Th ± REE–Y–Nb mineralization, Kulyk, Eagle, and Karin Lakes region, Wollaston Domain, northern Saskatchewan, Canada: examples of the dual role of extreme fractionation and hybridization processes, *Journal of Geosciences* 58/2013, s. 321-346.
20. Overstreet W.: The Geologic Occurrence Of Monazite, U.S. Govt. Print. Off. 1967, s. 38-42.
21. <https://geology.com/minerals/monazite.shtml>, dostęp: 30.03.2019.
22. Yaraghi A., Ariffin K., Baharun N.: A Short Review on REE Recovery from Ion-Adsorption Clay, *Aspects in Mining and Mineral Science*, vol. 2(5)/2019.
23. Gao Y., Fan Ch., Xu H.: Experimental study on adsorption of rare earth elements on kaolinite and halloysite, *Acta geologica sinica* 91/2017, s. 80-82.
24. [http://nevada-outback-gems.com/mineral\\_information/Xenotime\\_mineral\\_info.htm](http://nevada-outback-gems.com/mineral_information/Xenotime_mineral_info.htm), dostęp: 19.06.2019



25. Sibon M., Jamil H., Umor M., Hassan W.: Heavy mineral distribution in stream sediment of tapah Area, in Proc. AIP Conference Proceedings 1571 411/2013, s. 411-419.
26. Verplanck P., Hitzman M.: Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits, *Ore Geology Reviews*, vol 81(1)/2017, s. 396-399.
27. Ghaffar A.: Enrichment of rare earth and radioactive elements concentration in accessory phases from alkaline granite, South Sinai- Egypt, *Journal of African Earth Science* 147/2018, s. 393-401.
28. Tanaka T.: Geological significance of rare earth elements in Japanese 43geosynclinal basalts, *Contributions to Mineralogy and Petrology* 52/1975, s. 233-246.
29. Frey F., Haskin M., Poetz J., Haskin L.: Rare Earth abundances in some basic rocks, *Journal of Geophysical Research* 73/1968, s. 6085-6098.
30. Zhang Y., Yu K., Qian H.: LA-ICP-MS Analysis of Clinopyroxenes in Basaltic Pyroclastic Rocks from the Xisha Islands, Northwestern South China Sea, *Minerals* 8(12)/2018, s. 575.
31. Adamczyk Z., Białecka B., Całus-Moszek J., Komorek J, Lewandowska M.: Rare earth elements of Orzeskie beds of south-west part Upper Silesian Coal Basin (Poland), *Archives of Mining Sciences* 60/2015, s. 157-172.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.4>

## Określenie koncentracji pierwiastków ziem rzadkich w odpadach górniczych z hałd Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego

Rafał Baron – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale zawarto wyniki analiz laboratoryjnych, określających zasobności pierwiastków ziem rzadkich (REE) w odpadach górniczych pochodzących z hałdy znajdującej się na obszarze po byłej kopalni Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (DZW). Badania mające na celu analizę ilościową udziału REE w analizowanym materiale, przeprowadzono metodą spektrometrii mas z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS). Przedmiotem badań były odpady górnicze z zamkniętej już kopalni, wydobywającej węgle charakteryzujące się wysokim stopniem uwęglania (węgiel chudy i antracytowe typu 38-41). Analizom określającym współdział cennych pierwiastków poddano muły węglowe pobrane z różnych miejsc hałdy oraz materiał odpadowy pochodzący ze skarpy hałdy. Przeprowadzone badania miały charakter rozpoznawczy, określający perspektywę zastosowania materiału do odzysku pierwiastków ziem rzadkich.

Słowa kluczowe: pierwiastki ziem rzadkich (REE), odpady górnicze, Dolnośląskie Zagłębie Węglowe (DZW)

## Determination of rare earth elements content in mine wastes from the heaps of Lower Silesian Coal Basin

**Abstract:** The chapter contains the results of laboratory analyses determining the content of rare earth elements (REE) in mine wastes from the heap located in the area of the former mine of the Lower Silesian Coal Basin (LSCB). The quantitative analysis of REE content in the analysed material was carried out by mass spectrometry with inductively coupled plasma ionization (ICP-MS) method. Mine wastes from a closed mine, extracting highly carbonized coals (lean coal and anthracite type 38-41) were the analyses subject. Coal mud located in various parts of the heap and the material from the heap slope were analysed. The tests had an exploratory character, determining the prospectiveness of the material for the recovery of rare earth elements.

Keywords: rare earth elements (REE), mine wastes, Lower Silesian Coal Basin

### 1. Wprowadzenie

Pierwiastki ziem rzadkich (REE) to grupa 17 pierwiastków: skand (Sc), itr (Y) i lantanowce – lantan (La) ÷ lutet (Lu), o kluczowym znaczeniu gospodarczym, w perspektywie rozwoju nowoczesnych technologii. Ze względu na swoje właściwości magnetyczne oraz luminescencyjne, są kluczowe w perspektywie rozwoju technologii niskoemisyjnych. Istotą problemu związanego z pozyskaniem pierwiastków ziem rzadkich jest ich rozproszenie w skorupie ziemskiej [1, 2, 3, 4]. Zgodnie z prognozami analityków rynków surowcowych, zapotrzebowanie na REE w najbliższych latach będzie w dalszym ciągu rosnąć, podwajając się do 2060 r. [5]. Polska nie posiada złóż zawierających cenne pierwiastki, wymuszając poszukiwanie alternatywnego źródła, jak węgiel kamienny, kruszywa mineralne czy zużyty sprzęt elektroniczny [6, 7, 8].

W związku z powyższym przeprowadzono analizy koncentracji pierwiastków ziem rzadkich w odpadach górniczych, które mogą stanowić nowe źródło tych cennych pierwiastków. W niniejszym rozdziale, zgodnie z opracowaną metodologią poboru, pozyskano próbki materiału, a następnie określano udział REE, przeprowadzając analizy chemiczne techniką spektrometrii plazmowej.

## 2. Materiał badawczy

Przedmiot badań stanowił materiał odpadowy pochodzenia górniczego, pozyskany z hałdy zlokalizowanej w okolicach Nowej Rudy, powstałej wskutek działalności nieczynnej już kopalni węgla kamiennego. Hałda w swoim składzie posiada znaczny udział węgla kamiennego, czego potwierdzeniem są liczne pożary endogeniczne [9, 10]. Węgiel kamienny, zgodnie z przeprowadzonymi badaniami - Baron R.: „Określenie zasobności oraz analiza możliwości odzysku pierwiastków ziem rzadkich z popiołów węgla kamiennego oraz odpadów elektrowniowych” (materiały niepublikowane), posiada znamiona nośnika pierwiastków ziem rzadkich. Koncentracja cennych pierwiastków w węglu kamiennym osiąga poziom do 27,2 ppm poszczególnego pierwiastka ziem rzadkich (koncentracja ceru) [11].

Instytut Techniki Górniczej KOMAG realizował już badania określające koncentrację pierwiastków ziem rzadkich m.in. w węglu kamiennym, odpadach energetycznych czy odpadach metalurgicznych [12]. W obecnych badaniach analizowano zawartość REE w odpadach górniczych.

Analizowany materiał pod kątem zawartości pierwiastków ziem rzadkich, wybrano z uwagi na:

- określony w poprzednich pracach udział pierwiastków ziem rzadkich w węglu kamiennym,
- typ węgla znajdujący się w hałdzie (typ 38-41), uzupełniający dotychczas analizowany łańcuch węglowy,
- charakter materiału, stanowiący odpady o niskiej przydatności gospodarczej [10].

Odpady górnicze, w skład których wchodzi wszelkie odpady z procesów przerobczych kopalni węgla kamiennego, pobrane zostały ręcznie 16 czerwca 2020 r. z trzech wyselekcjonowanych miejsc:

- próbka 1 – Muły znajdujące się w górnej części hałdy (rys. 1),
- próbka 2 – Muły znajdujące w najniższym położonym miejscu hałdy (rys. 2),
- próbka 3 – Materiał pobrany z pionowej skarpy, w dolnej części hałdy (rys. 3).



Rys. 1. Hałda DZW – miejsce poboru próbek z górnych warstw hałdy (opracowanie własne)



Rys. 2. Hałda DZW – miejsce poboru próbek z dolnych warstw hałdy (opracowanie własne)



Rys. 3. Hałda DZW – miejsce poboru próbek ze skarpy (opracowanie własne)

Z każdego z wytypowanych miejsc (rys. 4) pobrano po około 10 kg materiału. Umieszczony w workach materiał został przetransportowany do Instytutu Techniki Górniczej KOMAG.



Rys. 4. Hałda DZW – miejsce poboru prób (opracowanie własne)

### 3. Przygotowanie próbek

Pozyskane próbki 1, 2, stanowiące zawilgocone muły węglowe zostały przygotowane do badań, poprzez wysuszenie materiału w suszarce laboratoryjnej (rys. 5). Próbka 3 pochodząca ze skarpy hałdy, w związku z dużą wielkością ziaren, została poddana procesowi kruszenia w kruszarce laboratoryjnej (rys. 6). Proces kruszenia przeprowadzono w celu uzyskania ziaren do poziomu uziarnienia  $< 0,5$  mm, wymaganego do przeprowadzenia analizy materiałowej, określającej udział REE w próbce. Następnie wyselekcjonowano dzielnikiem prób, trzy reprezentatywne próbki (0,5 kg każda), które zostały poddane analizie określającej koncentrację cennych pierwiastków.



Rys. 5. Suszarka laboratoryjna  
(opracowanie własne)



Rys. 6. Kruszarzka laboratoryjna  
(opracowanie własne)

#### 4. Wyniki analizy laboratoryjnej pozyskanych próbek

Analizy laboratoryjne próbek charakteryzujące koncentrację pierwiastków ziem rzadkich, wykonano w Laboratorium Inżynierii Materiałowej i Środowiska ITG KOMAG.

Próbki poddano mineralizacji na sucho w mineralizatorze mikrofalowym. Otrzymany roztwór stanowił przedmiot badań określających koncentrację REE z wykorzystaniem metody spektrometrii mas z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS). Analizowaną próbkę, ze względu na charakterystykę przyporządkowano następujące oznaczenia: [13]

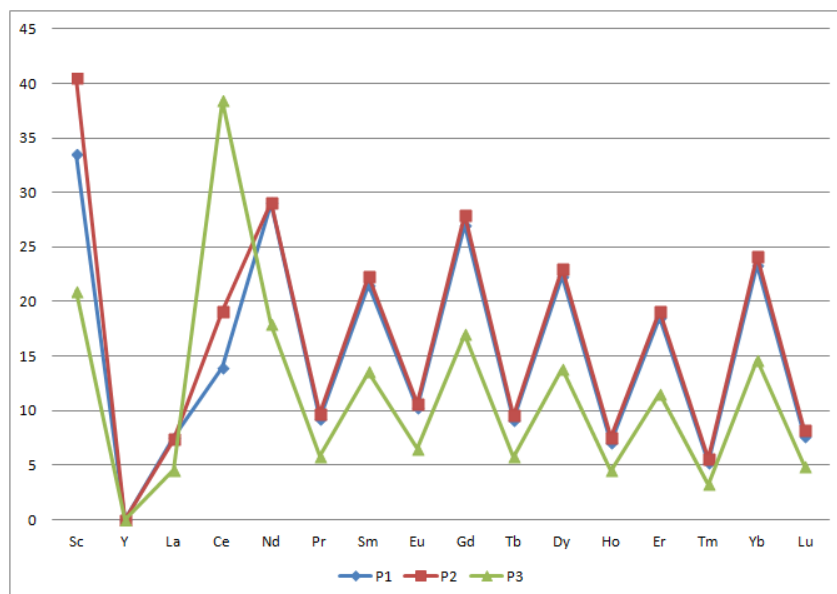
- P1 – odpad górniczy w postaci mułu węglowego (muły węglowe, kamień, ziemia).
- P2 – odpad górniczy w postaci mułu węglowego (muły węglowe, kamień, ziemia), pochodzący z najniższej położonego miejsca hałdy.
- P3 – odpad górniczy w postaci kamienia oraz bliżej nieokreślony udział węgla kamiennego.

Wyniki przeprowadzonych analiz zawartości pierwiastków ziem rzadkich zawarto w tabeli 1 oraz na wykresie liniowym (rys. 7).

##### Zestawienie zawartości pierwiastków ziem rzadkich w odpadach górniczych [15]

Tabela 1

Lp.	Próbka	Zawartość pierwiastków ziem rzadkich [ppm]							
		Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr	Sm	Eu
1	P1	33,49	<1	7,52	14,0	29,03	9,23	21,56	10,34
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		27,03	9,15	22,29	7,13	18,55	5,28	23,36	7,70
2	P2	40,49	<1	7,38	19,1	29,14	9,69	22,34	10,64
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		27,93	9,55	22,99	7,54	19,13	5,56	24,13	8,19
3	P3	20,96	<1	4,56	38,4	17,91	5,82	13,54	6,50
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		16,99	5,77	13,81	4,50	11,56	3,26	14,63	4,87



Rys. 7. Koncentracja poszczególnych pierwiastków ziem rzadkich w próbkach odpadów górniczych

Przeprowadzone analizy laboratoryjne wykazały obecność 15 pierwiastków ziem rzadkich (z wyłączeniem itru). Zawartość poszczególnych REE dla badanych próbek materiału jest zbliżony, praktycznie pokrywając się dla próbek P1 oraz P2. Krzywa koncentracji REE dla próbki ze skarpy hałdy (P3) posiada pewne odchylenia w stosunku do próbek P1 oraz P2, mianowicie dwukrotnie wyższa koncentracja ceru, czy dwukrotnie mniejsza zawartość skandiu. Największą koncentracją REE ma próbka P2, zawierająca 40,49 ppm skandiu.

Łączna koncentracja pierwiastków ziem rzadkich w analizowanych próbkach, przedstawia się następująco:

- P1 – 245,7 ppm,
- P2 – 263,8 ppm,
- P3 – 183,1 ppm.

REE w próbkach składających się w głównej mierze z mułów węglowych posiadają wyraźnie zbliżoną zawartość pierwiastków. Wyższa koncentracja REE w próbkach P1 i P2 może być wynikiem wypłukania tychże pierwiastków z przyległej skarpy, w której to intensyfikacja jest o 60-80 ppm niższa.

## 5. Analiza koncentracji REE w najdrobniejszej klasie ziarnowej

W oparciu o dane literaturowe z zakresu pierwiastków ziem rzadkich [14], wykazujące podwyższoną zawartość REE w klasie ziarnowej <45  $\mu\text{m}$ , przeprowadzono analizę koncentracji cennych pierwiastków w tej klasie. Analiza objęła wszystkie próbki pozyskane z odpadów górniczego.

Celem wydzielenia pożądanej klasy ziarnowej przeprowadzono analizę granulometryczną sitem o oczku 2 mm (pozbywając się klasy o grubym uziarnieniu), oraz sitem o oczku 0,045 mm. Proces klasyfikacji ziarnowej w związku z drobnoziarnistą charakterystyką materiału przeprowadzono na przesiewaczu laboratoryjnym wibracyjnym na mokro (rys. 8).





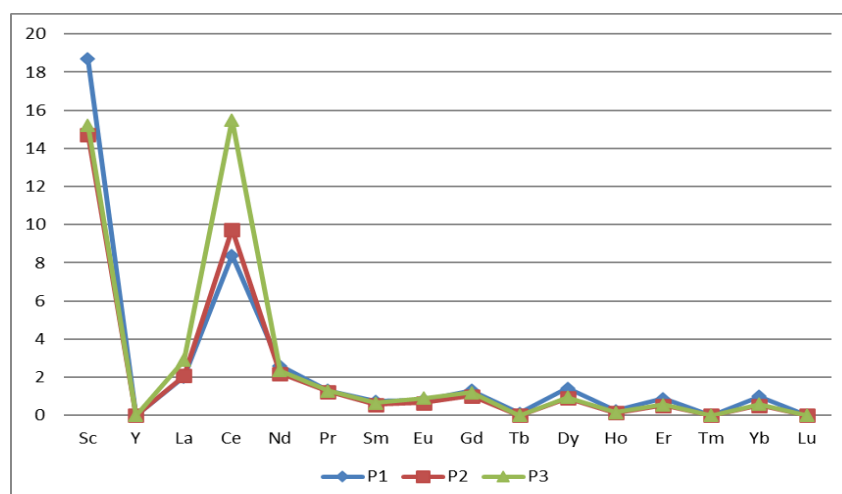
Rys. 8. Klasyfikacja ziarnowa na mokro z zastosowaniem przesiewacza wibracyjnego

Wyniki przeprowadzonych analiz zestawiono w tabeli 2, na wykresie liniowym obrazującym uzyskane wyniki oraz wykresie liniowym zestawiającym uzyskane wyniki dla prób z pełnym zakresem uziarnienia a wydzieloną klasą ziarnową (rys. 9 i 10).

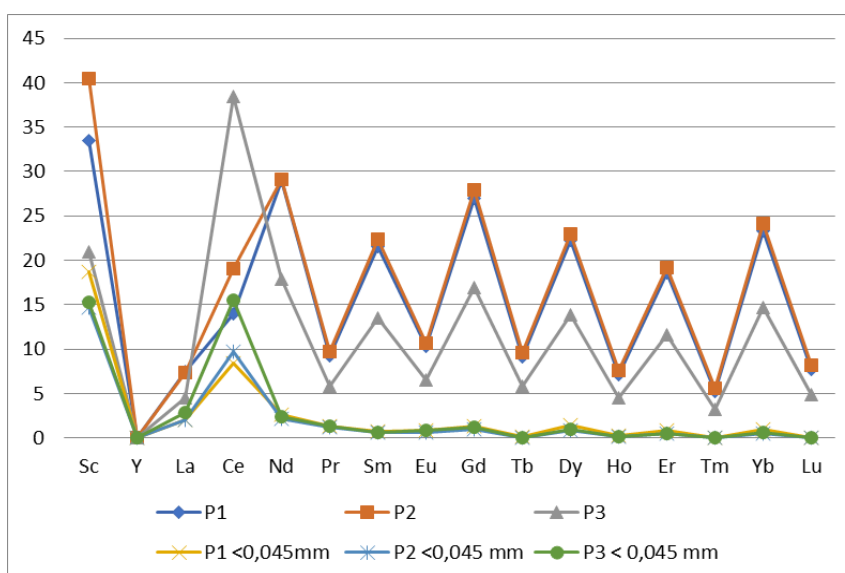
**Zestawienie zawartości pierwiastków ziem rzadkich w odpadach górniczych dla klasy ziarnowej <0,045 mm [15]**

Tabela 2

Lp.	Próbka	Zawartość pierwiastków ziem rzadkich [ppm]							
		Sc	Y	La	Ce	Nd	Pr	Sm	Eu
1	P1	<b>18,68</b>	<0,1	<b>2,00</b>	<b>8,39</b>	<b>2,60</b>	<b>1,31</b>	<b>0,75</b>	<b>0,82</b>
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		<b>1,30</b>	<b>0,11</b>	<b>1,42</b>	<b>0,24</b>	<b>0,88</b>	<0,1	<b>0,99</b>	<0,1
2	P2	<b>14,73</b>	<0,1	<b>2,07</b>	<b>9,75</b>	<b>2,19</b>	<b>1,23</b>	<b>0,56</b>	<b>0,66</b>
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		<b>1,02</b>	<0,1	<b>0,89</b>	<b>0,14</b>	<b>0,51</b>	<0,1	<b>0,52</b>	<0,1
3	P3	<b>15,23</b>	<0,1	<b>2,89</b>	<b>15,49</b>	<b>2,34</b>	<b>1,28</b>	<b>0,65</b>	<b>0,89</b>
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		<b>1,19</b>	<0,1	<b>0,94</b>	<b>0,15</b>	<b>0,55</b>	<0,1	<b>0,59</b>	<0,1



Rys. 9. Koncentracja poszczególnych pierwiastków ziem rzadkich w próbkach zawierających odpady górnicze, w klasie ziarnowej <0,045 mm



Rys. 10. Zestawienie porównawcze koncentracji pierwiastków ziem rzadkich w odpadach górniczych dla pełnego uziarnienia i wydzielonej klasy <0,045 mm

Wbrew założeniom w wyselekcjonowanej drobnej klasie ziarnowej, nastąpił spadek zawartości poszczególnych pierwiastków ziem rzadkich oraz mniejszy współdziału - 13 pierwiastków (z wyłączeniem itru, tulu i lutetu). Koncentracja oznaczonych pierwiastków w poszczególnych próbkach jest bardzo zbliżona, osiągając maksimum dla skandiu w próbce 1- 18,68 ppm.

Łączna koncentracja pierwiastków ziem rzadkich w analizowanych próbkach dla klasy ziarnowej poniżej <0,045 mm, przedstawia się następująco:

- P1 – 39,5 ppm,
- P2 – 34,3 ppm,
- P3 – 42,2 ppm.



Intensyfikacja cennych pierwiastków w najdrobniejszej klasie ziarnowej dla odpadów górniczych nie jest tak wyraźna, jak w przypadku próbek pełnym zakresie uziarnienia. W próbkach o uziarnieniu  $<0,045\text{mm}$ , zdecydowanie największy udział posiada skand oraz cer, stanowiąc ponad połowę ze wszystkich oznaczonych pierwiastków ziem rzadkich.

## 6. Podsumowanie

Zaprezentowane w rozdziale wyniki prac badawczo-rozwojowych Instytutu Techniki Górniczej KOMAG, powiększają spektrum wiedzy dotyczącej REE w kolejnej grupie materiałów.

W rozdziale zawarto wyniki analiz określających koncentrację pierwiastków ziem rzadkich dla wytypowanych odpadów górniczych. Wykazano, iż analizowany materiał odpadowy, nieposiadający zastosowania gospodarczego, co więcej będący zagrożeniem środowiskowym, posiada znamiona nośnika cennych pierwiastków. Niestety uzyskane wyniki nie spełniają aspektu finansowego (wyznaczonego zgodnie z danymi literaturowymi na poziomie min. 1000 ppm) [15], pozwalającego na ekonomicznie uzasadniony odzysk pierwiastków ziem rzadkich z odpadów górniczych z hałdy w Nowej Rudzie.

W klasie  $>0,045\text{ mm}$  nastąpił znaczny spadek udziału pierwiastków ziem rzadkich, w porównaniu do próbek reprezentatywnych, o pełnym zakresie uziarnienia. Interpretując uzyskane wyniki, należy przyjąć, iż wyższą koncentrację REE posiadają klasy ziarnowe o wyższej granulacji. W związku z powyższym należy przeprowadzić analizy pełnego spektrum klas ziarnowych pozyskanych próbek, w celu wyznaczenia klasy ziarnowej o najwyższym współczynniku cennych pierwiastków. Po wykonaniu badań określających zawartość pierwiastków ziem rzadkich w poszczególnych klasach ziarnowych, koniecznym będzie przeprowadzenie analizy ekonomicznej, poddającej zasadność przemysłowej skali odzysku cennych pierwiastków z odpadów górniczych.

## Literatura

1. Balaram V. „Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact”, *Geoscience Frontiers*, volume 10, issue 4, pp. 1285-1303, 2019.
2. Maksymowicz A.: Kryzys pierwiastków ziem rzadkich (REE), „Przegląd Geologiczny”, vol. 67, nr 7, 2019.
3. Case M., Fox R., Baek D., Chien W.: Extraction of Rare Earth Elements from Chloride Media with Tetrabutyl Diglycolamide in 1-Octanol Modified Carbon Dioxide, *Metals* 2019 No 9 (4), 429.
4. Kathryn M. Goodenough K. M., Wall F., Merriman D. „The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations”, *Natural Resources Research* volume 27, pp. 201–216, 2018.
5. Charalampides G., Vatalis K. I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. „Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe”, *Procedia Economics and Finance* 24, pp. 126 – 135, 2015.
6. Całus-Moszko J., Białecka B.: Potencjał i zasoby metali ziem rzadkich w świecie oraz w Polsce. „Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko” – Kwartalnik, tom 4, s. 61-72. Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2012.
7. Jarośniński A.: Możliwości pozyskania metali ziem rzadkich w Polsce. „Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN”, tom 92, s. 75-88. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 2016.



8. Paulo A.: Pierwiastki ziem rzadkich pod koniec XX wieku. „Przegląd Geologiczny”, tom 47, s. 34-41. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, 1999.
9. Frużyński A.: Zarys dziejów górnictwa węgla kamiennego w Polsce. Muzeum Górnictwa Węglowego w Zabrzu, Zabrze, 2012.
10. Kosmaty J.: Wałbrzyskie tereny pogórniczne po 15 latach od zakończenia eksploatacji węgla. „Górnictwo i Geologia”, tom 6, s. 131-148. Politechnika Śląska, Gliwice, 2011.
11. Baron R.: Determination of rare earth elements content in hard coal type 31.1. „Management Systems in Production Engineering” 4/2020. pp. 240 – 246.
12. Baron R.: Determination of rare earth elements in power plant wastes. „Mining Machines” 4/2020. pp. 24-30.
13. Fernandez –Turiel J.L., Llorens J.F., Lopez-Vera F.: Strategy for water analysis ICP-MS. Fresenius Journal of Analytical Chemistry 2000; vol.368, pp. 601-606.
14. Cavalcante F., Belviso C., Piccarreta G., Fiore S.: Grain-Size Control on the Rare Earth Elements Distribution In the Late Diagenesis of Cretaceous Shales from the Southern Apennines (Italy). „Hindawi Publishing Corporation” - Journal of Chemistry, volume 2014.
15. Hordyńska M.: Popioły elektrowniane w procesach stabilizacji odpadów niebezpiecznych. Praca doktorska. Wydz. Inżynieria Materiałowa i Metalurgii, Politechnika Śląska, Katowice, 2003.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.5>

## Hybrydowe obiektowe magazyny energii

**Piotr Hylla** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Andrzej Figiel** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Przemysław Deja** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Marcin Skóra** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono podstawowe idee i możliwości zastosowania hybrydowych, obiektowych magazynów energii wykorzystujących wodór jako nośnik. Zaprezentowano oraz opisano podstawowe układy funkcjonalne magazynów energii. Określono obecny stan prawny odnoszący się do możliwości praktycznego zastosowania w strefach zamieszkania magazynów energii bazujących na wodorze. Opisano również podstawowe stany pracy magazynu energii.

Słowa kluczowe: OZE, Magazyn energii, Wodór, Ogniwo Paliwowe, P2G

### Hybrid object-oriented energy storage

**Abstract:** The chapter presents basic ideas and possibilities of application of hybrid object-based energy storage systems using hydrogen as a medium. The basic functional systems of energy storages were presented and described. The current legal status relating to the possibility of practical application of energy storage facilities based on hydrogen in residential areas has been determined. The basic states of operation of energy storage are also described.

Keywords: RES, Energy storage, Hydrogen, Fuel Cell, P2G

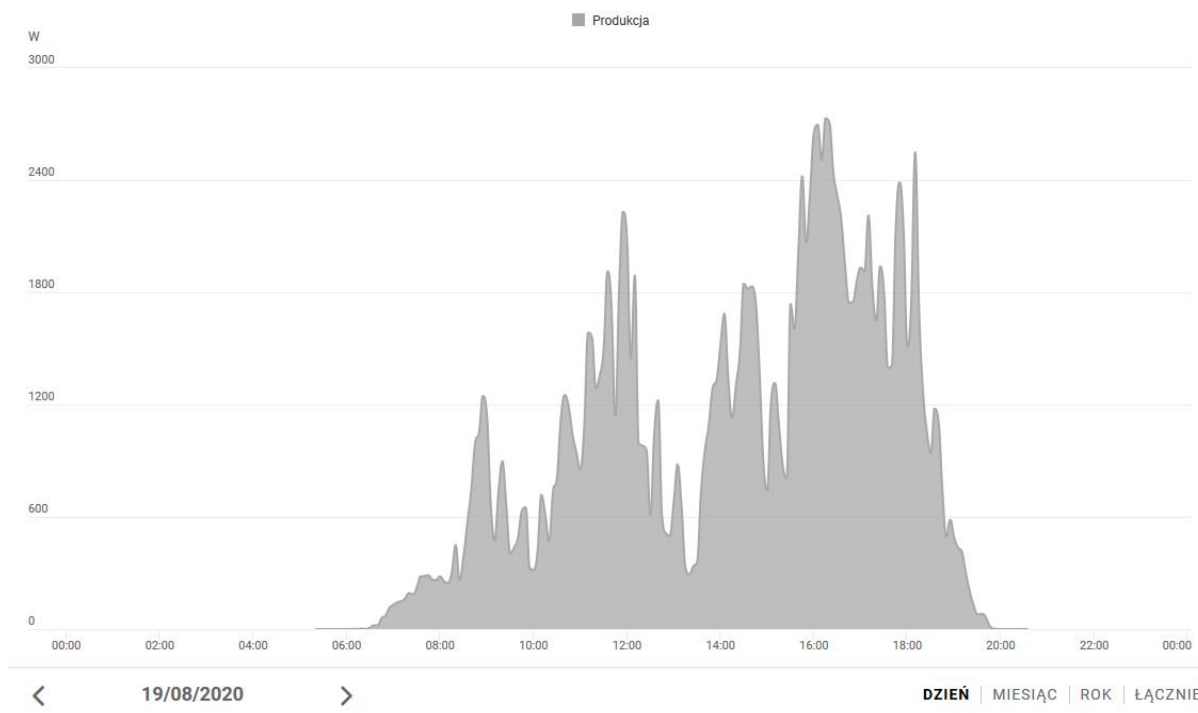
## 1. Wprowadzenie

Od kilkunastu lat zaobserwować można w Polsce rozwój sektora elektroenergetyki opartej w coraz większym stopniu na przyjaznych środowisku naturalnemu instalacjach z odnawialnymi źródłami energii (OZE). Rozwój OZE powodowany jest koniecznością zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> w celu uzyskania tzw. neutralności klimatycznej. Neutralność klimatyczna jest to obecnie jeden z głównych celów polityki Unii Europejskiej, znajdujący swój wyraz w Zielonym Ładzie i polega na tym, że do 2050 roku gospodarka europejska będzie neutralna w odniesieniu do środowiska. Stąd też odnawialne źródła energii stanowią coraz większy udział w bilansie produkcji energii elektrycznej. Obecnie w Polsce zainstalowano instalacje OZE o sumarycznej mocy znamionowej wynoszącej 12,5 GW (grudzień 2020) i jest to wzrost o 30,8% w porównaniu z rokiem poprzednim (grudzień 2019). Obecnie najwięcej energii z OZE jest pozyskiwane z elektrowni wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych, których sumaryczna moc znamionowa zbliżona jest do 6,4 GW. Dynamiczny wzrost odnawialnych źródeł energii korzystających z wiatru oraz promieniowania słonecznego może spowodować destabilizację systemu elektroenergetycznego. Powodem tego jest okresowy i nieprzewidywalny charakter działania OZE. W związku z tym niezbędne jest wprowadzenie odpowiednich mechanizmów i technologii zapobiegających takiemu zagrożeniu. W tym kontekście od lat wskazuje się celowość rozwijania technologii magazynowania energii. Przykładowy dobowy wykres produkcji energii poprzez instalację fotowoltaiczną o mocy 10 kWp przedstawiono na rysunku 1 [1, 2].

Obecnie, wskutek braku infrastruktury umożliwiającej bilansowanie energii z OZE, nie jest możliwe stosowanie odnawialnych źródeł energii bez ograniczeń. Jednym z celów polityki UE jest wprowadzenie



jak najbardziej rozproszonego systemu bilansowania energii, najlepiej już u jej źródeł, w tym także u indywidualnych prosumentów. Szczególnym przykładem układów umożliwiających równoważenie produkcji i konsumpcji energii pochodzącej z OZE mogą być hybrydowe magazyny energii oparte na nośniku wodorowym i baterii litowej, pełniące rolę obiektowych magazynów energii wyprodukowanej przez panele fotowoltaiczne lub turbinę wiatrową. Umożliwią one coraz lepszą integrację OZE z systemem energetycznym. Zastosowanie nowoczesnych instalacji magazynujących energię elektryczną jest jednym ze sposobów zwiększania elastyczności pracy elektrowni konwencjonalnych i jądrowych, stabilizując ich współpracę ze źródłami energii o wydajności trudnej do przewidzenia [2, 3].



Rys. 1. Wykres dobowej produkcji energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych  
[<https://www.solarweb.com/>]

## 2. Hybrydowy obiektowy magazyn energii

Obecnie stosuje się różne rodzaje magazynów (zasobników) energii, różniące się parametrami użytkowymi, takimi jak np. pojemność, liczba cykli pracy, dostępna moc elektryczna, sprawność przetwarzania i magazynowania energii.

- Wodne elektrownie szczytowo-pompowe – przeznaczone do magazynowania dużej ilości energii oraz charakteryzujące się dużymi mocami osiągającymi nawet 4000 MW. Budowa elektrowni szczytowo-pompowych wiąże się z wysokimi nakładami inwestycyjnymi, lecz także długim czasem eksploatacji (czasem życia). Czas generacji jednego pełnego cyklu elektrowni wynosi kilka godzin. Największa w Polsce elektrownia szczytowo-pompowa Żarnowiec o mocy 716 MW znajduje się w województwie pomorskim w miejscowości Czymanowo. Obecnie elektrownie szczytowo-pompowe są najpopularniejszymi magazynami energii o łącznej mocy 184 GW, co stanowi około 95% światowych zasobów.
- Elektrownie wykorzystujące systemy sprężonego powietrza – jest to ciągle rozwijana technologia magazynowania energii. Podobnie jak w przypadku elektrowni szczytowo-

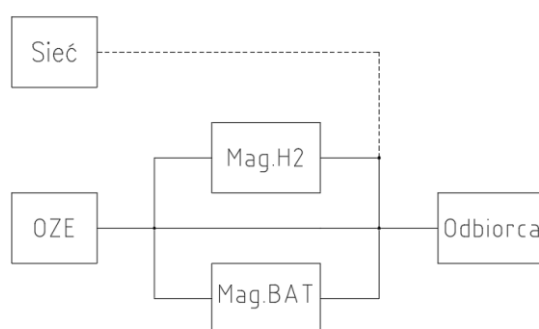


pompowej wymagane są duże nakłady inwestycyjne. Elektrownie wykorzystujące zasobniki pneumatyczne charakteryzują się również dużymi mocami osiagającymi do 400 MW oraz czasem generacji pojedynczego pełnego cyklu wynoszącym kilkanaście godzin. Jedyna w Europie elektrownia wykorzystująca systemy sprężonego powietrza o mocy 321 MW znajduje się w Niemczech w miejscowości Huntorf.

- Zasobniki wykorzystujące masy wirujące – jest to dojrzała technologia magazynowania energii, wykorzystywana głównie do celów regulacyjnych. Elektrownie wykorzystujące masy wirujące charakteryzują się szybkimi czasami reakcji wynoszącymi poniżej 4 s, niskimi kosztami eksploatacji oraz stosunkowo dużą liczbą cykli. Elektrownia wykorzystująca masy wirujące o mocy ok. 20 MW i czasie generacji energii elektrycznej wynoszącym ok. 15 min. znajduje się w Stepentown, Nowy York. Zasobnik przeznaczony jest do regulacji częstotliwości w lokalnym systemie energoelektrycznym.
- Akumulatorowe magazyny energii – jest to ciągle rozwijana technologia polegająca na przemianie elektrochemicznej. Ze względu na zastosowany rodzaj elektrolitu można wyróżnić następujące akumulatory: sodowo-siarkowe, litowo-jonowe, litowo-polimerowe, kwasowo-ołowiowe. Akumulatorowe magazyny energii w połączeniu z OZE umożliwią znaczne zredukowanie poboru energii elektrycznej w sieci. Baterijne magazyny energii wykorzystywane są również jako przemysłowe zasobniki o dużej mocy i pojemności (do kilkudziesięciu megawatów), między innymi do integracji niestabilnych źródeł energii OZE z systemem elektroenergetycznym.
- Zasobniki elektrochemiczne przepływowe – technologia przeznaczona do zastosowań stacjonarnych polegająca na przemianie elektrochemicznej. Cechuje się możliwością skalowania, względnie niskimi kosztami przy stosunkowo wysokiej mocy i pojemności, dodatkowo długą żywotnością. Magazyn energii wykorzystujący baterie wanadowe o mocy 200 kW i pojemności 400 kWh znajduje się w Niemczech w miejscowości Tussenhausen i współpracuje z instalacją ogniw fotowoltaicznych o mocy 560 kW.
- Superkondensatory – technologia polegająca na zastosowaniu elektrolitycznych kondensatorów o specyficznej budowie. Magazyny energii wykorzystujące superkondensatory charakteryzują się niską gęstością energii 10 Wh/kg, dużą gęstością mocy na poziomie 1000 W/kg, wysoką sprawnością wynoszącą nawet 95%, dużą trwałością nawet do 20 lat oraz wysoką liczbą cykli (ładowania i rozładowania) do 1000000 cykli. Superkondensatory umożliwiają stosunkowo szybkie ładowanie (wynoszące około kilka minut). Układy stosujące superkondensatory wykorzystywane są głównie w transporcie, UPS lub jako układy hybrydowe z akumulatorami elektrochemicznymi.
- Wodorowe magazyny energii – to rozwijająca się technologia polegająca na wykorzystaniu wodoru do magazynowania energii. Takie instalacje składają się z trzech głównych układów: elektrolizera służącego do produkcji wodoru, układu do magazynowania gazu oraz ogniwa paliwowego służącego do przekształcania wodoru w energię elektryczną. Wodorowy magazyn energii jest całkowicie bezemisyjny dlatego, że jedynymi produktami ubocznymi są woda i ciepło.
- Inne magazyny energii – do innych rodzajów magazynów energii można zaliczyć nadprzewodzące zasobniki magnetyczne gromadzące energię elektryczną w polu magnetycznym. Kolejnym rodzajem magazynu energii jest technologia zasobników rozproszonych określanych jako V2G wykorzystujących energię zgromadzoną w baterii akumulatorów do przyłączenia do sieci za pomocą ładowarki dwukierunkowej.

Po przeanalizowaniu obecnie stosowanych rozwiązań magazynów należy skłonić się ku opinii, że nowoczesne układy gromadzenia energii powinny być systemami hybrydowymi łączącymi zalety zaprezentowanych zasobników. Obiektowy magazyn energii umożliwiający integrację zainstalowanej na budynku instalacji ogniw fotowoltaicznych powinien składać się z bateryjnego oraz wodorowego magazynu energii.

Hybrydowe magazyny energii oparte na instalacji wodorowej oraz bateriach litowych są niezawodne, bezemisyjne oraz łatwe w obsłudze i konserwacji. Obiektowe magazyny energii są przeznaczone do stosowania w domach jednorodzinnych, zabudowie szeregowej oraz budynkach biurowych. Zaletą stosowania obiektowych instalacji do wytwarzania, magazynowania oraz przetwarzania wodoru jest możliwość wykorzystania ciepła odpadowego do ogrzewania budynku i podgrzewania wody użytkowej. Na rysunku 2 przedstawiono podstawowy schemat blokowy obiektowego hybrydowego magazynu energii [4].



Rys. 2. Schemat blokowy obiektowego magazynu energii  
[opracowanie własne]

Energia pozyskana z OZE w pierwszej kolejności przeznaczona jest do bieżącego zasilania włączonych odbiorników energii elektrycznej. Naddatek wyprodukowanej energii z OZE powinien być przeznaczony do ładowania lokalnych magazynów energii. W przypadku, gdy energia z odnawialnych źródeł magazynu wypełni magazyn, to dalszy naddatek oddany zostanie do sieci. W celu całkowitego odejścia od elektrowni konwencjonalnych zasilanych paliwami stałymi, w ramach procesu tzw. dekarbonizacji, konieczne jest aby obiektowy magazyn energii umożliwiał gromadzenie i dystrybucję energii również w okresie zimowym. Wysoka sprawność urządzenia zagwarantowana jest poprzez zastosowanie kompleksowego układu sterowania zarządzającego energią elektryczną i ciepłą. Obiektowy, hybrydowy magazyn energii składa się z następujących zespołów:

- OZE – odnawialnego źródła energii, wytwarzającego energię okresowo,
- magazynu bateryjnego – przeznaczonego do krótkoterminowego magazynowania energii 1-7 dni,
- magazynu wodorowego – przeznaczonego do długoterminowego magazynowania energii w postaci sprężonego wodoru,
- przyłącza do sieci energetycznej – służącego do odbioru naddatku wyprodukowanej energii oraz zapewnienia zasilania w przypadku rozładowania magazynu energii.
- układu sterowania - przeznaczonego do zarządzania energią pozyskaną i przetwarzaną w obrębie magazynu energii.

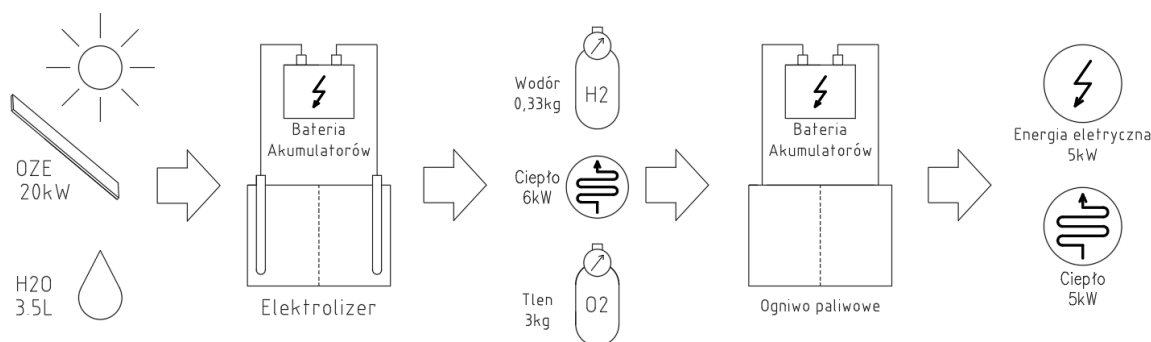


OZE – czyli odnawialne źródła energii to najczęściej instalacje fotowoltaiczne, ale również turbiny wiatrowe. W celu poprawnego działania zaleca się by magazyn energii był dobierany indywidualnie do istniejącej instalacji fotowoltaicznej.

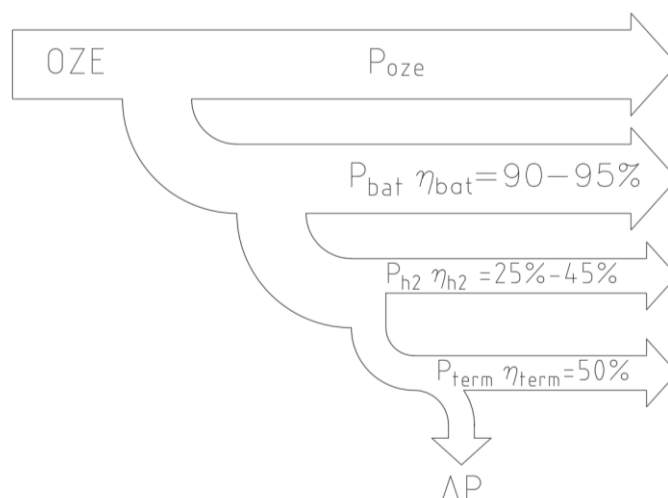
Magazyn bateryjny – najczęściej bateria akumulatorów litowych umożliwiającą zgromadzenie energii przeznaczonej do wykorzystania w okresie od kilku godzin do kilku tygodni. Pojemność pakietu bateryjnego powinna być dobierana indywidualnie, przykładowo do domu jednorodzinnego zamieszkanego przez 4 osoby (2 dorosłe oraz 2 dzieci) o rocznym zużyciu energii elektrycznej wynoszącym około 4000 kWh zaleca się zastosowanie bateryjnego magazynu energii o pojemności 22-30 kWh.

Magazyn wodorowy to zespół elementów umożliwiających produkcję, magazynowanie oraz powtórne przetwarzanie wodoru. Za wytwarzanie wodoru odpowiedzialny jest układ P2G (Power to Gas) umożliwiający za pomocą elektrolizera wytwarzanie wodoru z wody i energii elektrycznej z OZE. Kolejny układ odpowiedzialny jest za magazynowanie wodoru pod wysokim ciśnieniem (ok. 700 bar) w specjalnych zbiornikach. Do powtórnego przetwarzania wodoru w energię elektryczną wykorzystuje się ogniwa paliwowe. Magazyn energii wykorzystujący wodór do przechowywania energii jest całkowicie bezemisyjny i jest jednym z celów PSW (Polskiej Strategii Wodorowej) do roku 2030 z perspektywą do 2040 [5]. Produktem ubocznym podczas wytwarzania i powtórnego przetwarzania wodoru jest m.in. ciepło. Wodorowy magazyn energii pełni funkcję długoterminowego magazynu energii przez okres kilku tygodni a nawet miesiący. Pojemność zbiorników na wodór należy indywidualnie dobrać ze względu na zapotrzebowanie energii oraz dostępną powierzchnię. Dla 4-osobowej rodziny zaleca się zastosowanie wodorowego magazynu umożliwiającego zgromadzenie od 600 do 1500 kWh.

W celu zapewnienia wysokiej wydajności systemu należy zapewnić prawidłowy przepływ energii pomiędzy poszczególnymi elementami magazynu. Kluczowym aspektem jest prawidłowe zagospodarowanie ciepła powstałego w procesie elektrolizy oraz reakcjach zachodzących w ogniwie paliwowym. Konieczne jest więc zastosowanie nowoczesnego systemu sterowania umożliwiającego zarządzanie przepływem energii elektrycznej i cieplnej. Na Rys. 3 przedstawiono schemat blokowy hybrydowego magazynu energii wraz z przykładowym rozplywem energii pomiędzy poszczególnymi elementami układu.



Rys. 3. Schemat blokowy hybrydowego magazynu energii  
[opracowanie własne]



Rys. 4. Wykres Sankeya dla hybrydowego magazynu energii  
[opracowanie własne]

Na Rys. 4 przedstawiono wykres Sankeya dla hybrydowego magazynu energii wraz z uwzględnieniem sprawności poszczególnych elementów układu. Całkowita sprawność układu hybrydowego magazynu energii zależy od rozplywu mocy. Wykorzystanie magazynu wodorowego obniży sprawność końcową, ze względu na straty energii zachodzące podczas przemiany energii elektrycznej w chemiczną (P2G) i chemicznej w elektryczną. Straty w postaci wydzielającego się ciepła mogą i powinny być zagospodarowane i wykorzystane jako ciepło użytkowe zwiększając tym samym sprawność układu do nawet 80%.

Dobór poszczególnych elementów układu w szczególności pojemności bateryjnego oraz wodorowego magazynu powinien być poprzedzony bilansem energetycznym docelowego obiektu. Bilans taki powinien m.in. obejmować następujące zagadnienia:

- roczna ilość produkcji energii z OZE,
- zapotrzebowanie na energię elektryczną w sezonie letnim,
- zapotrzebowanie na energię elektryczną w sezonie zimowym,
- zapotrzebowanie na energię cieplną (ciepła woda użytkowa oraz ogrzewanie budynku)
- charakter dziennych obciążeń w tym obciążenia szczytowych,
- możliwość współpracy z pompami ciepła (klimatyzatorami),
- zapotrzebowania energii elektrycznej związane z ładowaniem samochodu elektrycznego,
- możliwością rozbudowy instalacji OZE.

Po zebraniu tych informacji możliwe jest opracowanie dedykowanego magazynu energii dla docelowego obiektu. Indywidualny dobór komponentów magazynu energii umożliwia osiągnięcie wysokiej sprawności tego urządzenia co jest niewątpliwą zaletą dla użytkownika. Dodatkowo prawidłowo zaprojektowany układ umożliwi stabilizację systemu energoelektrycznego poprzez minimalizację zagrożeń związanych z okresowym charakterem pracy odnawialnych źródeł energii oraz redukcję szczytowych obciążeń sieci. Dobór pojemności poszczególnych magazynów energii (bateryjnego oraz wodorowego) jest obliczany w specjalnie opracowywanym do tego celu modelu symulacyjnym.



### 3. Obecny stan prawny

Gwałtowny rozwój technologii wykorzystujących wodór jest podyktowane możliwościami, jakie stwarza ten pierwiastek jako surowiec, paliwo lub jako nośnik i magazyn energii. Najważniejszą cechą nowoczesnych technologii wykorzystujących wodór jest to, że nie występuje emisja CO<sub>2</sub>, a zanieczyszczenia powietrza są minimalne. Tak jak wspomniano, zastosowanie technologii opartych na wodorze w sposób oczywisty przyczyni się do dekarbonizacji i osiągnięcia neutralności klimatycznej. Wyzwaniem dla świata nauki i gospodarki jest wdrożenie na szeroką skalę technologii wodorowych w przemyśle, transporcie, energetyce oraz w budownictwie, a więc w tych gałęziach gospodarki, które są głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych.

Obecnie większość wodoru jest wytwarzana z paliw kopalnych, w szczególności z gazu ziemnego lub węgla, co skutkuje roczną emisją w krajach Unii Europejskiej 70–100 mln ton CO<sub>2</sub> [6]. Przyszłością jest czysty wodór (wodór odnawialny i niskoemisyjny), produkowany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej pochodzącej z OZE.

Przewiduje się, że:

- do 2030 r. nastąpi wzrost inwestycji globalnych w elektrolizery z 3,2 GW do 8,2 GW (z czego 57 % w Unii Europejskiej),
- do 2050 r. udział wodoru w koszyku energetycznym Unii Europejskiej wzrośnie z obecnego poziomu poniżej 2 % do 13–14 %.

Jednak, aby osiągnąć wyznaczony na 2030 rok cel – ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 50–55 % – należy wykorzystywać czysty wodór na jeszcze większą skalę, instalując do tego czasu elektrolizery o mocy 40 GW.

Powodzenie realizacji polityki klimatycznej jest uzależnione w szczególności od sprzyjających regulacji prawnych i dotyczących finansowania, wspierania badań naukowych, wdrażania innowacyjnych technologii, stworzenia wieloskalowej infrastruktury w ramach jednolitego rynku Unii Europejskiej.

Dokumentami zawierającymi ambitne cele klimatyczne, w tym dotyczące wykorzystania wodoru, są:

- *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.* - dokument tworzony pod auspicjami Ministerstwa Klimatu i Środowiska [5].
- *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu* - Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów [6],
- *Europejski Zielony Ład* - Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów [7],
- *Nowa strategia przemysłowa dla Europy* - Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów [8],
- *Decydujący moment dla Europy: naprawa i przygotowanie na następną generację* - Komunikat Komisji [9].

W wyżej wymienionych dokumentach sformułowano cele i działania, jakie należy zrealizować w najbliższej przyszłości. Powodzenie planów wymaga opracowania i wdrożenia regulacji prawnych



dotyczących postępowania w odniesieniu do instalacji wytwarzających wodór z energii elektrycznej tj. instalacji P2G (Power to Gas), bazujących na elektrolizerach alkalicznych.

Obecnie obowiązujące regulacje prawne dotyczące produkcji wodoru odnoszą się do obszarów przemysłowych i produkcji na dużą skalę.

Konieczność stosowania tych samych przepisów przy produkcji przemysłowej wodoru oraz przy produkcji na potrzeby lokalne, stanowi poważną przeszkodę we wdrażaniu technologii wodorowych w strefach mieszkalnych i usługowych.

Również brak krajowych przepisów dotyczących przyłączenia instalacji P2G do sieci gazowej czy też elektroenergetycznej, powoduje, że na dzień dzisiejszy przyłączenie do tych sieci należy realizować zgodnie z przepisami ogólnymi, dotyczącym wszystkich urządzeń przemysłowych [10].

Zgodnie z Prawem Energetycznym [11] przyłączenie do sieci każdej instalacji wymaga uzyskania zezwolenia przedsiębiorstwa energetycznego zajmującego się przesyłaniem lub dystrybucją paliw gazowych lub energii.

Nie tylko wytwarzanie wodoru, czy przyłączenie instalacji P2G do sieci elektroenergetycznej napotyka na szereg barier prawnych i technicznych. Przechowywanie wodoru w zbiornikach czy butlach, poza strefą przemysłową, wymaga respektowania licznych przepisów technicznych, dotyczących bezpieczeństwa:

- a) przeciwwybuchowego [12],
- b) związanego ze stosowaniem urządzeń ciśnieniowych [13],
- c) przeciwpożarowego [14].

Podsumowując stosowanie instalacji P2G jest związane z koniecznością spełnienia wielu przepisów. W celu osiągnięcia celów polityki klimatycznej priorytetowym zadaniem jest szybkie wdrożenie szczegółowych regulacji prawnych dotyczących instalacji P2G w zakresie wymagań technicznych, warunków przyłączenia do sieci zewnętrznych, warunków użytkowania.

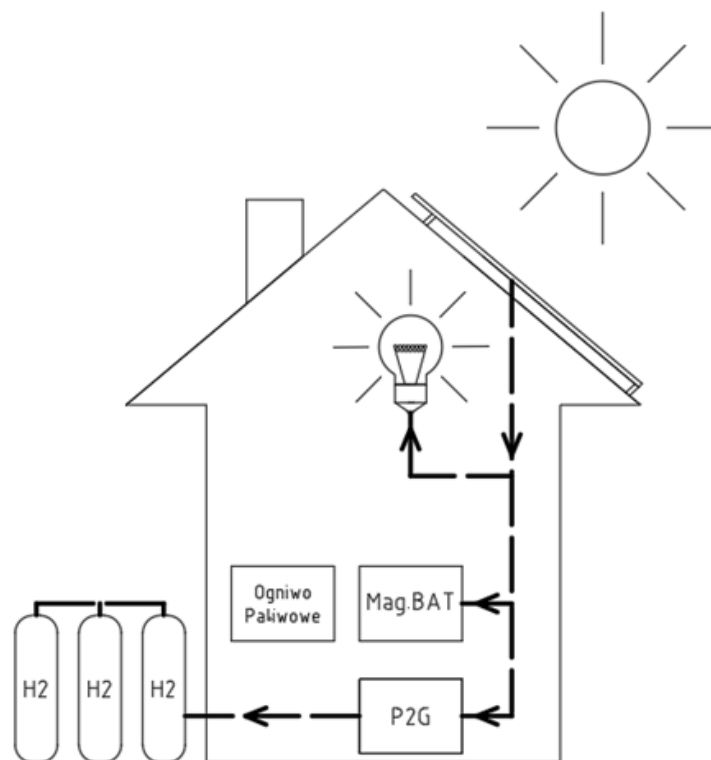
## 4. Podstawowe stany pracy

Jednym z głównych celów Unii Europejskiej jest uzyskanie tzw. neutralności klimatycznej, czyli transformacji gospodarki w celu podjęcia wspólnych działań m.in. zwiększających efektywność energetyczną, udział odnawialnych źródeł w sumarycznym bilansie energetycznym, elektromobilności oraz maksymalne ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> przez gospodarkę. Odejście od konwencjonalnych elektrowni i oparcie produkcji energii elektrycznej na odnawialnych źródłach energii wiąże się z koniecznością opracowania sposobów na długoterminowe magazynowanie energii. Obiektowe magazyny energii eliminują zagrożenia związane ze stosowaniem niestabilnych OZE. Podczas rocznego okresu pracy można wyodrębnić 4 stany działania magazynu energii.

### 4.1. Sezon letni – okres pomiędzy wschodem, a zachodem słońca

Sezonem letnim nazwano okres od kwietnia do września, w którym instalacja fotowoltaiczna pracuje najwydajniej ze względu na duże nasłonecznienie. Na rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy działania obiektowego magazynu energii w sezonie letnim w okresie od wschodu do zachodu słońca. Energia wytworzona w panelach fotowoltaicznych w pierwszej kolejności zużyta zostaje na bieżące potrzeby odbiorcy. W przypadku, gdy występuje nadwyżka wyprodukowanej energii, doładowywany zostaje baterijny magazyn energii oraz poprzez układ P2G (Power to Gas)

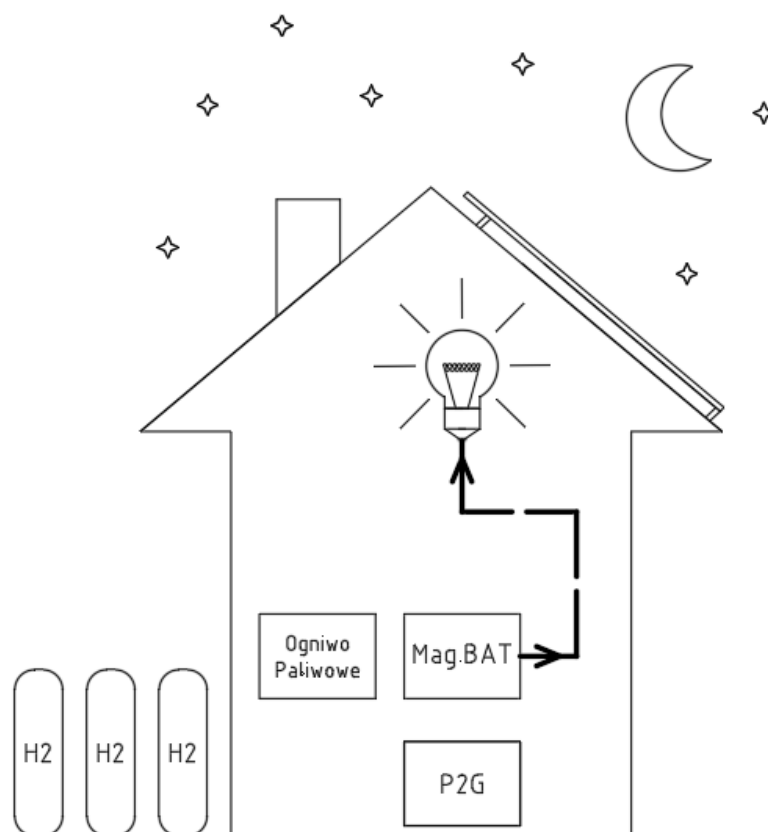
wyprodukowany i zmagazynowany zostaje wodór. Wspecjalizowany układ sterowania magazynem przeznaczony jest do najefektywniejszego zarządzania energią pozyskaną z OZE. Przedstawiony okres jest okresem największej produkcji energii elektrycznej przez OZE.



Rys. 5. Schemat blokowy magazynu energii w sezonie letnim w okresie pomiędzy wschodem a zachodem słońca [opracowanie własne]

#### 4.2. Sezon letni – okres pomiędzy zachodem, a wschodem słońca

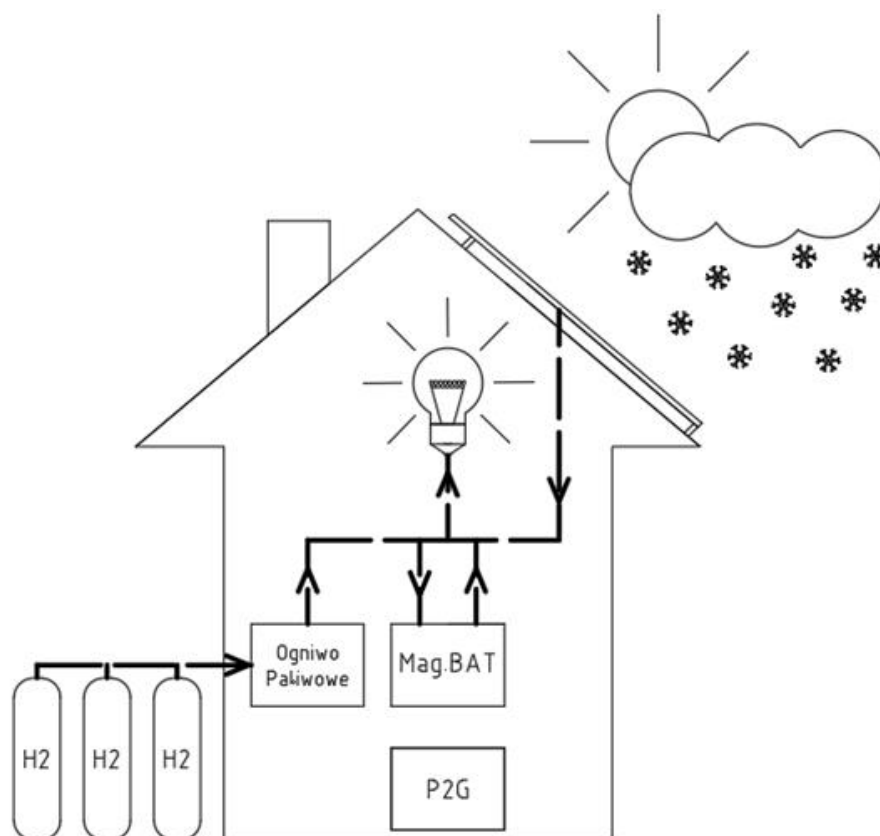
W okresie nocnym, czyli od zachodu do wschodu słońca energia konieczna do zasilania poszczególnych odbiorników pobierana zostaje z baterijnego magazynu energii. Baterijny magazyn energii pełni funkcję bufora umożliwiającego wykorzystanie zgromadzonej energii w zmniejszonej produkcji z OZE np. w nocy. Zastosowanie takiej konfiguracji związane jest z wysoką sprawnością (ok. 85%) bateryjnych magazynów do gromadzenia energii przez okres od jednego dnia to kilku tygodni. Ze względu na krótki okres działania, bateryjne magazyny energii charakteryzują się zdecydowanie mniejszą pojemnością (o ok. 30-50 razy mniejszą) w porównaniu do sezonowego wodorowego magazynu energii. Blokowy schemat działania obiektowego magazynu energii w sezonie letnim w okresie pomiędzy zachodem a wschodem słońca przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy działania magazynu energii w sezonie letnim w okresie pomiędzy zachodem a wschodem słońca [opracowanie własne]

#### 4.3. Sezon zimowy – okres pomiędzy wschodem, a zachodem słońca

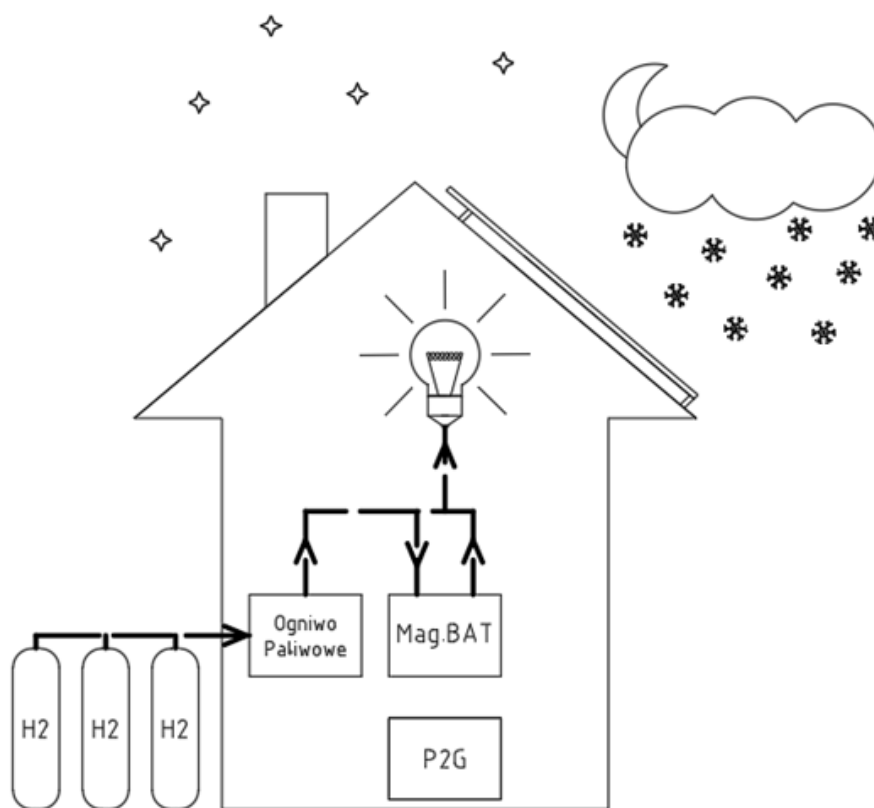
Sezon zimowy jest to okres braku lub minimalnej produkcji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej i obejmuje miesiące od października do marca. Energia potrzebna do zasilania odbiorników elektrycznych pobierana zostaje z długoterminowego wodorowego magazynu energii. Wyprodukowany i zgromadzony w okresie letnim wodór zostaje powtórnie przekształcony w energię elektryczną w ogniwie paliwowym. Otrzymana energia służy w pierwszej kolejności pokryciu potrzeb energetycznych odbiorcy, w celu stabilizacji pracy ogniwa paliwowego część wyprodukowanej energii przeznaczona zostaje na doładowywanie baterijnego magazynu energii. Podczas procesu przekształcania wodoru na energię elektryczną emitowana jest duża ilość ciepła, której wykorzystanie jest kluczowe do osiągnięcia wysokiej sprawności układu. Odzyskane ciepło, szczególnie w okresie zimowym, może być wykorzystane do ogrzewania domu. Sposób działania magazynu energii w sezonie zimowym w okresie pomiędzy wschodem a zachodem słońca przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat blokowy działania magazynu energii w sezonie zimowym w okresie pomiędzy wschodem a zachodem słońca [opracowanie własne]

#### 4.4. Sezon zimowy – okres pomiędzy zachodem a wschodem słońca

Sezon zimowy charakteryzuje się niewielkim nasłonecznieniem wynikającym ze stosunkowo długiej nocy (okresem pomiędzy zachodem a wschodem słońca) a krótkim dniem (okresem pomiędzy wschodem a zachodem słońca). Energia pozyskana z wodorowego magazynu energii zostaje przeznaczona na pokrycie bieżącego zapotrzebowania odbiorcy. Odzyskane ciepło wykorzystane zostanie do ogrzewania domu. Elastyczność zarządzania energią zagwarantowana jest poprzez zastosowanie baterijnego magazynu energii. Umożliwia to pokrycie szczytowego poboru energii elektrycznej, bez konieczności stosowania przewymiarowanego zespołu ogniw paliwowych, co pozytywnie wpływa na obniżenie kosztów całej instalacji. Na rysunku 8 przedstawiono schemat blokowy działania magazynu energii w sezonie zimowym w okresie od zachodu do wschodu słońca.



Rys. 8. Schemat blokowy działania magazynu energii w sezonie zimowym w okresie pomiędzy zachodem, a wschodem słońca [opracowanie własne]

## 5. Podsumowanie

Obecne kierunki rozwoju sektora energetycznego UE oraz krajowego zostały nakreślone w Zielonym Ładzie, Strategii w zakresie wodoru na rzecz Europy, neutralnej dla klimatu, Nowej strategii przemysłowej dla Europy oraz Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. Wszystkie wymienione dokumenty podkreślają konieczność transformacji gospodarki w celu redukcji emisji CO<sub>2</sub>.

Coraz większy udział odnawialnych źródeł energii w sumarycznym bilansie produkcji energii elektrycznej wymusza stosowanie nowoczesnych długoterminowych magazynów energii. Obecnie za najbardziej przyszłościowy nośnik energii uważa się wodór, dlatego że składniki do jego produkcji w procesie elektrolizy, czyli woda i energia elektryczna, są ogólnie dostępne. Dodatkowo proces elektrolizy oraz proces powtórnego przetwarzania wodoru na energię elektryczną w ogniwie paliwowym są prawie bezemisyjne. Stosowanie hybrydowych magazynów energii umożliwi gromadzenie energii pozyskanej z OZE w długim terminie, dzięki czemu możliwe będzie zwiększenie udziału OZE w całkowitym bilansie produkcji energii w wyniku czego nastąpi stopniowy proces dekarbonizacji sektora energetycznego.





Stosowanie instalacji do wytwarzania energii z OZE za pomocą układów P2G jest związane z koniecznością spełnienia wielu przepisów. W celu osiągnięcia celów polityki klimatycznej szybkie wdrożenie szczegółowych regulacji prawnych dotyczących instalacji P2G w zakresie wymagań technicznych, warunków przyłączenia do sieci zewnętrznych, warunków użytkowania jest priorytetowe.

Podczas elektrolizy oraz reakcji w ogniwie paliwowym powstaje ciepło odpadowe, które można wykorzystać do celów użytkowych. Z tego powodu nie należy rozpatrywać wodorowego magazynu energii jedynie jako magazynu energii elektrycznej, ale również jako źródło energii cieplnej. Ciepło powstałe w elektrolizerze może zostać wykorzystane do podgrzania wody użytkowej w zbiorniku. W celu zapewnienia wysokiej sprawności wodorowego magazynu energii należy zapewnić odpowiedni przepływ energii elektrycznej oraz cieplnej.

Przewiduje się coraz większe zainteresowanie instalacjami wodorowymi oraz dynamiczny rozwój przemysłu opartego na wodorze, co przyczyni się do m.in.: zwiększenia inwestycji na instalacje do produkcji wodoru za pomocą elektrolizerów, zwiększenia udziału wodoru jako paliwa w sumarycznym bilansie energetycznym oraz zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>. W dokumencie Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. określono podstawowe cele rozwoju obejmujące: wdrożenie technologii wodorowych w energetyce, wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie, wsparcie dekarbonizacji przemysłu, produkcję wodoru w nowych instalacjach, sprawny i bezpieczny przesył wodoru oraz stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

Ze względu na dynamicznie rozwijającą się branżę związaną z instalacjami wykorzystującymi wodór jako medium, możliwe jest, aby Instytut Techniki Górniczej KOMAG szeroko zaznaczył swoją obecność na tym rynku w zakresie badawczym, certyfikacyjnym oraz projektowym.

Wraz z popularyzacją technologii wodorowych można się spodziewać obniżenia kosztów elektrolizerów oraz ogniw paliwowych. W wyniku czego hybrydowe magazyny energii wykorzystujące wodór staną się powszechnie stosowane w połączeniu z odnawialnymi źródłami energii.

W związku ze przewidywaną na rok 2022 zmianą przepisów dotyczących rozliczenia produkcji energii z OZE celowym stanie się stosowanie systemów magazynowania energii w celu maksymalnego wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Obecnie zgodnie z obowiązującą ustawą, sprzedawca energii elektrycznej rozlicza prosumenta w stosunku ilościowym 1 do 0,8 energii wprowadzonej do sieci wobec energii pobranej z sieci w przypadku mikroinstalacji fotowoltaicznej o mocy do 10kW. W przypadku instalacji powyżej 10 kW stosunek ten wynosi 1 do 0,7. Wraz z początkiem roku 2022 planowana jest nowelizacja przepisów powodująca zmniejszenie opłacalności instalacji PV, poprzez zmianę sposobu rozliczania się z sprzedawcą energii elektrycznej na niekorzyść właścicieli instalacji fotowoltaicznych. Ministerstwo klimatu jednocześnie zapewnia, że m.in. poprzez kolejną odsłonę programu „Mój prąd” wspierane będą instalacje magazynowania energii, systemów zarządzania energią oraz ładowarek samochodów elektrycznych.

## Literatura

1. <https://www.ure.gov.pl/> (dostęp 02.2021)
2. Bartosik M., Kamrat W., Kaźmierkowski M., Lewandowski W., Pawlik M., Peryt T., Skoczkowski T., Strupczewski A., Szelaż A.: Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodorowa, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, r. 92 Nr 12/2016



3. Benysek G., Kazmierkowski M. P., Popczyk J., and Strzelecki R.: "Power electronic systems as crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey", Bull. Pol. Ac.: Tech., vol. 59, no. 4, 2011, pp. 445-473.
4. Hartkopf T.: Mini Storage Systems.MICRO.tec 2000 Proceedings Volume 1 p.435. Expo 2000, Hannover, Germany
5. Projekt Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. - dokument tworzony pod auspicjami Ministerstwa Klimatu i Środowiska.
6. <https://www.gov.pl/web/klimat/rozpoczely-sie-konsultacje-publiczne-projektu-polskiej-strategii-wodorowej>
7. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów - *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu*, Bruksela, 8.07.2020 r. COM(2020) 301 final,
8. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów - *Europejski Zielony Ład*, Bruksela, 11.12.2019 r. COM(2019) 640 final,
9. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów - *Nowa strategia przemysłowa dla Europy*, Bruksela, 11.03.2020 r. COM(2020) 102 final,
10. Komunikat Komisji - *Decydujący moment dla Europy: naprawa i przygotowanie na następną generację*, Bruksela, 27.05.2020 r. {SWD(2020) 98 final},
11. HyLAW. Dokument programowy - <Polska> [https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/2019\\_03\\_07\\_National%20policy%20Paper\\_Poland.pdf](https://www.hylaw.eu/sites/default/files/2019-03/2019_03_07_National%20policy%20Paper_Poland.pdf)
12. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne – Dz. U. 1997, Nr 54 poz. 348 z późn. zm.
13. Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 6 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej – Dz. U. 2016, poz. 817
14. Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 11 lipca 2016 r. w sprawie wymagań dla urządzeń ciśnieniowych i zespołów urządzeń ciśnieniowych – Dz. U. 2016, poz. 1036
15. Ustawa z dnia 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej – Dz. U. 1991, Nr 81 poz. 351



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.6>

## **Analiza efektywności energetycznej i założenia techniczne rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów przemysłowych**

**Mariusz Woszczyński** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Krzysztof Stankiewicz** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono sposób postępowania przy projektowaniu instalacji fotowoltaicznych, począwszy od prac przygotowawczych, poprzez dobór podzespołów, wizualizację instalacji oraz symulację spodziewanych uzysków. Zaprezentowano najważniejsze zasady, które należy uwzględnić przy planowaniu instalacji PV. Omówiono sposoby doboru urządzeń, przewodów oraz zabezpieczeń, a także zasygnalizowano problem obciążenia konstrukcji dachowych. Zaprezentowano ciekawe wyniki symulacji rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na przykładzie budynków ITG KOMAG. Spodziewany okres zwrotu inwestycji, szacowany jest na maksymalnie 10 lat. Biorąc pod uwagę cykl życia paneli fotowoltaicznych, wynoszący 25 lat, inwestycja w fotowoltaikę jest jednym z najbardziej korzystnych sposobów zagospodarowania dachów lub powierzchni nieużytków.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, efektywność energetyczna, projektowanie

### **Energy efficiency analysis and technical assumptions for the development of photovoltaic installations on the roofs of industrial buildings**

**Abstract:** The paper presents a procedure for the design of photovoltaic installations, starting from preliminary work, through component selection, visualisation of the installation and simulation of the expected profits. The most important principles to be considered when planning a PV installation are presented. It discusses the selection of equipment, conductors and protections as well as the problem of roof structure loads. Interesting results of the simulation of the construction of photovoltaic installations on the example of ITG KOMAG buildings were presented. The expected period of return on investment is estimated for up to 10 years. Taking into account the life cycle of photovoltaic panels, which is 25 years, investment in photovoltaics is one of the most beneficial ways to develop roofs or wasteland areas.

Keywords: photovoltaics, energy efficiency, design

## **1. Wprowadzenie**

Działania na rzecz zwiększenia efektywności energetycznej w przedsiębiorstwie mogą przynieść wymierne korzyści zarówno w kontekście oszczędności energii, jak i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko. To jeden z najlepszych sposobów na sprostanie wyzwaniom, przed którymi stoi Polska, a które wynikają z coraz bardziej ograniczonych zasobów energetycznych oraz rosnącego uzależnienia od importu energii z zagranicy. Zwiększenie udziału energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii przyczynia się również do zwiększenia świadomości społecznej dotyczącej efektywności energetycznej. Prezentowane w literaturze [1, 2] dyskusje poruszają problemy wybranych zagadnień związanych z efektywnością energetyczną budynków (również w zakresie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa środowiskowego) oraz działaniach na rzecz jej poprawy. Kluczowy wpływ na poprawę efektywności energetycznej budynków mają instalacje energetyczne, wykorzystujące odnawialne źródła energii. Przewiduje się, że najszybciej będą rozwijać się technologie wykorzystujące energię wiatru oraz energię ze słońca.



Fotowoltaika (PV) jest to dziedzina nauki i techniki zajmująca się bezpośrednim przetwarzaniem promieniowania słonecznego na energię elektryczną, przy wykorzystaniu zjawiska fotowoltaicznego. Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi, jest największym potencjalnym źródłem energii dostępnym dla człowieka.

Panele fotowoltaiczne dzielą się na 3 podstawowe generacje [3, 4]. Panele I generacji, obecnie dominujące na rynku, zbudowane są z ogniw, wytwarzanych z mono i polikrystalicznego krzemu. Sprawność ogniw pierwszej generacji obecnie wynosi około 20-24%, a maksymalna sprawność szacowana jest na 29%. Do 2018 r. największy udział w rynku miały moduły polikrystaliczne, jednak w ostatnim czasie sytuacja zmieniła się na korzyść modułów monokrystalicznych, które obecnie dominują na rynku (98% udziału w nowych instalacjach PV) [5].

Panele II generacji są nazywane ogniwami cienkowarstwowymi, ze względu na to, że materiał półprzewodnikowy (głównie tellurek kadmu (CdTe - 10÷12% sprawności) lub mieszanina miedzi, indu, galu i selenu (CIGS - 12÷14% sprawności) nanoszony jest w postaci cieniutkiej warstwy o grubości ok. 1-3 mikrometrów [6]. Ogniwa III generacji pozbawione są klasycznego złącza P-N, jak w przypadku 2 pierwszych generacji. Największy potencjał mają ogniwa DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) oraz organiczne z wykorzystaniem polimerów. Panele trzeciej generacji bazują na wielu technologiach, np. nietoksyczne materiały organiczne [7] oraz grafen [8]. Największą zaletą takich ogniw jest ich niski koszt produkcji oraz absorpcja (pochłanianie) światła dochodząca nawet do 90%. Niestety obecnie ogniwa tego typu osiągają niską sprawność, na poziomie kilku procent.

Jednym z najnowszych osiągnięć w fotowoltaice jest zastosowanie perowskitów, czyli nieorganicznych związków chemicznych [9]. Technologia ta nie wymaga stosowania skomplikowanych urządzeń i charakteryzuje się szybkim czasem produkcji. Od kilku lat trwają prace nad możliwością produkcji perowskitowych ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem druku atramentowego. Ten sposób pozwoli na budowę modułów fotowoltaicznych o dowolnym kształcie. Obecnie sprawność ogniw perowskitowych dochodzi do 20%, natomiast wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że w przyszłości sprawność może osiągnąć nawet 30%.

W ostatnich latach pojawiło się ciekawe rozwiązanie modułów dwustronnych (określanych jako bifacialne), mogących wykorzystywać również światło odbite, które do nich dociera także z tyłu. Dzięki temu rozwiązaniu wydajność modułu jest wyższa, ponieważ wykorzystywana jest większa ilość światła [10].

Branża fotowoltaiki w Polsce rozwija się bardzo dynamicznie. Do końca 2020 r. instalacje fotowoltaiczne, włączone do polskiego systemu energetycznego, osiągnęły moc blisko 4 GW. Oznacza to przyrost o ponad 250% w skali roku [11]. Taka popularność fotowoltaiki, związana jest głównie z jej licznymi zaletami, m.in.:

- instalacja fotowoltaiczna nie powoduje emisji zanieczyszczeń lub substancji szkodliwych do otoczenia,
- instalacja fotowoltaiczna nie powoduje emisji hałasu,
- instalacja fotowoltaiczna może zapewnić niezależność energetyczną,
- niskie koszty eksploatacji,
- stosunkowo szybki okres zwrotu inwestycji,
- okres realizacji inwestycji zajmuje zaledwie kilka tygodni, zatem jest to tempo nieporównywalnie szybkie w porównaniu do realizacji instalacji innych OZE,
- liczne systemy wsparcia dla posumentów (np. programy Mój prąd, Czyste Powietrze, itp.).

W 2020 r. Centrum Badań Marketingowych „Indicator” przeprowadziło badania, mające na celu ocenę różnych rodzajów źródeł energii [12]. Ceny energii elektrycznej są jednym z najważniejszych zagadnień, a rozwój OZE może pozytywnie wpłynąć na zmniejszenie kosztów wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł nieodnawialnych. Turbiny wiatrowe oraz fotowoltaika są obecnie najtańszymi alternatywami dla tradycyjnego sposobu pozyskiwania energii. Fotowoltaika, w przeciwieństwie do turbin wiatrowych jest korzystnie postrzegana w sąsiedztwie zamieszkania. Zwiększenie produkcji energii poprzez rozbudowę OZE umożliwi zmniejszenie importu energii z zagranicy. Polacy w OZE upatrują szansę na ograniczenie emisji zanieczyszczeń do środowiska oraz przeciwdziałanie zmianom klimatu (rys. 1). Odnawialne źródła energii przyczyniają się do powstawania nowych miejsc pracy.



Rys. 1. Korzyści społeczne z OZE [ankieta]

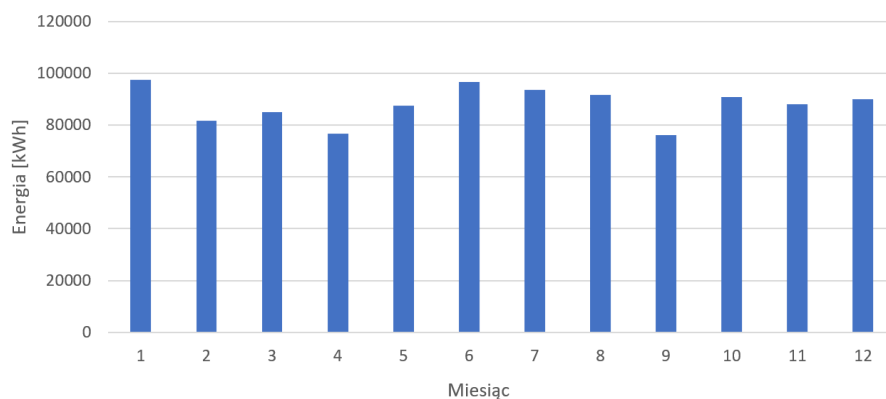
W 2020 r. w KOMAG-u podjęto działania dotyczące poprawy efektywności energetycznej obiektów przemysłowych. Jednym z realizowanych tematów było przeprowadzenie analizy efektywności energetycznej wpływu zbudowania dodatkowych instalacji fotowoltaicznych, na zużycie energii elektrycznej. Analizy wykonywano w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie o zasadność podjęcia tego typu inwestycji. Główne założenie, które przyjęto podczas realizacji pracy to maksymalne wykorzystanie powierzchni dachów obiektów. Analizy wykonano na przykładzie budynków ITG KOMAG, z uwzględnieniem przeszkód, powodujących zacinienie paneli fotowoltaicznych. Zacinienie jest zjawiskiem, które powoduje niejednorodne napromieniowanie paneli fotowoltaicznych i tym samym ma bezpośredni wpływ na zmniejszenie produkcji energii elektrycznej z systemu PV. Aby złagodzić te objawy, w literaturze przedstawiono różne metody, w tym rekonfigurację połączenia paneli PV (Bridge Linked, Series Parallel, Total Cross Tied i Honeycomb) [13], stosowanie optymalizatorów mocy lub usunięcie zaciennionych paneli z instalacji na etapie projektowania, wykorzystując metodę analizy zacinienia.

Analizy wykonywano z zachowaniem zasad zawartych w normie PN-HD 60364-7-712:2016 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania [14]. Analiza efektywności energetycznej została poprzedzona licznymi działaniami, mającymi na celu:

- zidentyfikowanie zużycia i kosztów energii elektrycznej,
- zidentyfikowanie wymiarów budynków oraz zabudowy na dachach,

- utworzenie modeli budynków wraz z elementami mogącymi powodować zacinienie paneli fotowoltaicznych,
- zaproponowanie rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na wytypowanych powierzchniach dachowych, z uwzględnieniem orientacji budynków,
- przeprowadzenie analizy zacinienia i modyfikację rozmieszczenia paneli, uwzględniając równowagę pomiędzy maksymalizacją uzysku energetycznego, a kosztami inwestycji,
- utworzenie wizualizacji instalacji fotowoltaicznych, na wykonanych modelach budynków,
- wstępny dobór podzespołów instalacji, tj. panele PV, falowniki, przewody i zabezpieczenia,
- opracowanie prognozy produkcji energii elektrycznej i określenie okresu zwrotu.
- oszacowanie masy paneli i konstrukcji wsporczych w celu walidacji nośności konstrukcji dachowych (w tym etapie nie przewidujemy samej walidacji),
- oszacowanie kosztów podzespołów instalacji fotowoltaicznych.

Na rysunku 2 przedstawiono roczny profil zużycia energii elektrycznej w KOMAG-u w poszczególnych miesiącach 2019 r. Profil ten uwzględnia uzysk z instalacji fotowoltaicznej o mocy 10,725 kW, która działa w systemie energetycznym KOMAG-u od połowy 2018 r.



Rys. 2. Profil zużycia energii elektrycznej w ITG KOMAG (2019 r.)

Przeprowadzenie takiej analizy wstępnej, za każdym razem jest podstawą do symulacji uzysku i okresu zwrotu inwestycji.

## 2. Zasady projektowania instalacji fotowoltaicznej

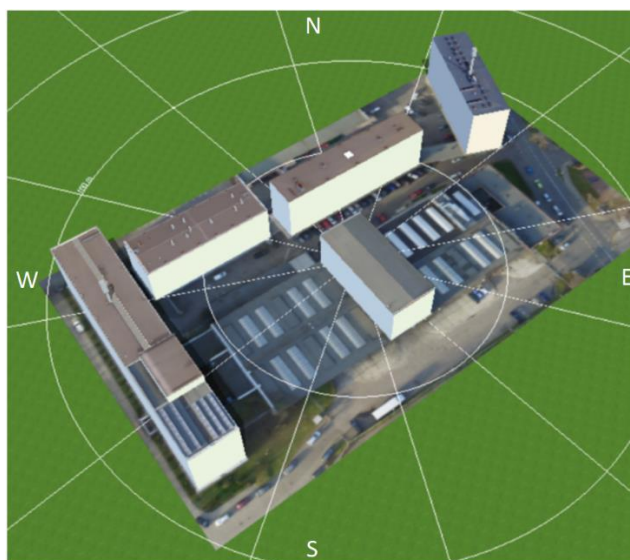
### 2.1. Modelowanie budynków

W celu rzetelnej realizacji pracy, z wynikami, zbliżonymi do uzysków rzeczywistych, konieczne było odpowiednie przygotowanie modeli 3D budynków. Na rysunku 3 zaznaczono powierzchnie dachów, które po wstępnej analizie zostały wytypowane, jako możliwe do zabudowania panelami fotowoltaicznymi. Pozostałe dachy odrzucono, ze względu na całkowite zacinienie poprzez wyższe budynki lub zbyt dużą liczbą elementów ograniczających powierzchnie montażowe.



Rys. 3. Widok terenu KOMAG-u z zaznaczonymi potencjalnymi miejscami montażu instalacji fotowoltaicznych

W procesie projektowania utworzono modele wszystkich obiektów z wykorzystaniem fotogrametrii niskopułapowej (z zastosowaniem drona). Uzyskane modele nie nadawały się jednak bezpośrednio do zastosowania w oprogramowaniu PV\*SOL, ze względu na ograniczenia zastosowanej technologii. Dokładność tworzenia modeli z zastosowaniem fotogrametrii, nie pozwala na wygenerowanie płaszczyzn, które są niezbędne do utworzenia powierzchni do instalacji paneli fotowoltaicznych. W związku z tym, modele budynków zostały utworzone bezpośrednio w oprogramowaniu PV\*SOL, które służy do projektowania instalacji fotowoltaicznych. Modele 3D uzyskane z fotogrametrii, posłużyły do zwymiarowania budynków. Widok modeli wszystkich budynków poddanych analizie pod kątem instalacji fotowoltaicznych, zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Widok zamodelowanych budynków w oprogramowaniu PV\*SOL

Na modelach naniesiono wszystkie elementy, mające bezpośredni wpływ na rozmieszczenie lub działanie instalacji fotowoltaicznych, tj. anteny, świetliki, kominy, nadbudówki lub wyłazy dachowe.

## 2.2. Orientacja budynków

Podczas próby rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych bardzo często pojawia się zagadnienie związane z ich orientacją. Nie zawsze jest możliwość ustawienia paneli PV dokładnie w kierunku południowym, w którym wydajność paneli jest najbardziej korzystna. Odchylenie powierzchni paneli od strony południowej o ponad 30° powoduje znaczne straty. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę kąt pochylenia paneli. Wybór odpowiedniego położenia i pochylenia paneli fotowoltaicznych to bardzo ważna sprawa, od której bezpośrednio zależy uzysk energii. Optymalny kąt nachylenia dla modułów PV w przypadku Polski, mieści się w przedziale od około 20 do 50 stopni, w zależności od lokalizacji i pory roku. Moduł PV ustawiony odpowiednio do kąta nasłonecznienia (azymut 180°) przynosi największy uzysk (tabela 1).

Zestawienie dostępności energii słonecznej w zależności od orientacji i pochylenia [15]

Tabela 1

Nachylenie płaszczyzny	Zachód	Południowy zachód		Południe	Południowy wschód		Wschód
	270°	240°	210°	180°	150°	120°	90°
90°	51%	62%	69%	72%	70%	63%	52%
80°	58%	71%	80%	82%	80%	71%	51%
70°	65%	78%	87%	90%	87%	79%	65%
60°	71%	84%	93%	96%	94%	85%	72%
50°	76%	89%	97%	99%	98%	89%	77%
40°	80%	92%	99%	100%	99%	92%	81%
30°	83%	93%	99%	100%	100%	93%	84%
20°	85%	93%	97%	99%	97%	93%	86%
10°	87%	90%	93%	95%	94%	91%	87%
0°	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%



Pomimo jasno określonych kątów azymutu oraz nachylenia do płaszczyzny, czasem warto rozważyć rozmieszczenie modułów pod innym kątem. Nawet jeśli pojedynczy moduł PV będzie generował mniej energii, to może okazać się, że cała instalacja będzie bardziej wydajna. Zwiększenie kąta nachylenia względem płaszczyzny dachu będzie wymagało zastosowania dodatkowego zabezpieczenia przed wiatrem. Mniejszy kąt ustawienia, np. 10° lub 15°, może pozwolić na montaż większej liczby modułów, ponieważ zmniejszą się odległości między rzędami (ze względu na mniejszy obszar zacienienia za rzędem paneli) i tym samym można osiągnąć większy uzysk energii.

Budynki ITG KOMAG są odchyłone od południa o około 37° w kierunku zachodnim. Na podstawie informacji o położeniu słońca i orientacji analizowanych obiektów, oprogramowanie PV\*SOL wykonuje i analizuje zacienienie paneli fotowoltaicznych. W celu pozyskania wiedzy na temat wpływu rozmieszczenia paneli na spodziewane uzyski, przeprowadzono porównanie wyników podczas ustawienia paneli dokładnie w kierunku południowym (azymut 180°), a rozmieszczeniem równo z krawędzią dachu. W tabeli 2 zaprezentowano najważniejsze dane, umożliwiające porównanie dwóch wirtualnych instalacji fotowoltaicznych.



**Porównanie uzysku z instalacji zorientowanej pod różnymi kątami**

Tabela 2

Panele skierowane na południe (180°)	Panele równo z krawędzią budynku (217°)
	
Moc generatora: 16,5 kW	Moc generatora: 17,4 kW
Liczba modułów PV: 55	Liczba modułów PV: 58
Energia wyprodukowana: 16845 kWh	Energia wyprodukowana: 17477 kWh
Spec. uzysk roczny: 1020,88 kWh/kW	Spec. uzysk roczny: 1004,40 kWh/kW
Stosunek wydajności (PR)*: 88,7%	Stosunek wydajności (PR)*: 89,6%
Koszt inwestycji: 82500 zł	Koszt inwestycji: 87000 zł
Okres amortyzacji: 12,9 lat	Okres amortyzacji: 13 lat

Powyższe porównanie wykazało, że ustawianie paneli fotowoltaicznych równo w kierunku strony południowej jest nieuzasadnione. Dzięki umieszczeniu o 3 paneli więcej, przy tej samej dostępnej powierzchni dachu, okres zwrotu obu inwestycji jest niemal identyczny, a przy zastosowaniu równego ułożenia paneli względem krawędzi dachu, uzyskano większy współczynnik wydajności PR, służący do oceny jakości systemu i wyrażany przez stosunek bieżącej produkcji systemu PV do promieniowania słonecznego odebranego przez instalację.

**2.3. Planowanie rozmieszczenia paneli**

Podczas planowania rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych należy wziąć pod uwagę m.in.:

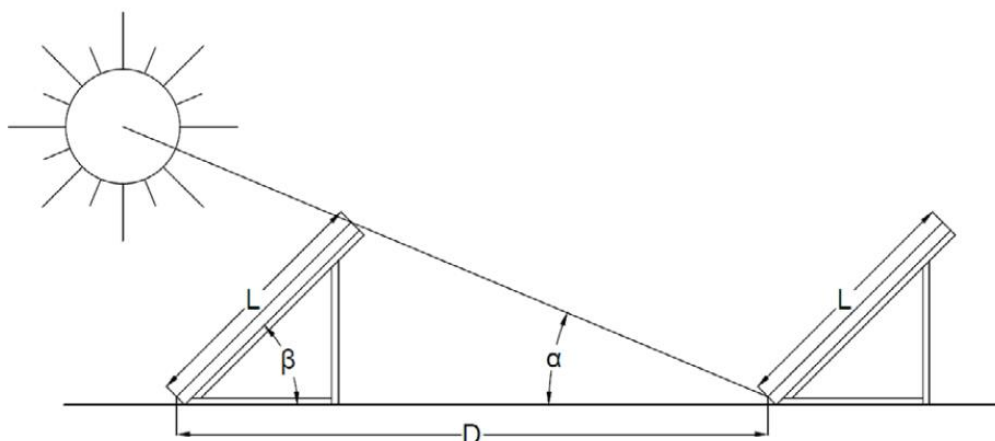
- dostępną powierzchnię,
- odległości między rzędami paneli,
- odległości od krawędzi dachu,
- rodzaj konstrukcji wsporczej (inwazyjna, balastowa),
- kierunek ułożenia paneli PV (pionowy, poziomy),
- kąty nachylenia powierzchni,
- przeszkody.

W instalacji fotowoltaicznej ważne jest, aby kolejne rzędy paneli nie zacięniały się nawzajem (rys. 5). Minimalną odległość między rzędami oblicza się na dzień 22 grudnia (gdy słońce jest najniżej na niebie w ciągu roku) z zależności (1) [15]:

$$D = \frac{L \cdot \sin(180^\circ - (\alpha + \beta))}{\sin(\beta)} \quad (1)$$

gdzie:

- D - odległość pomiędzy rzędami paneli [m],
- L - wysokość panelu PV [m],
- $\alpha$  - kąt padania promieni słonecznych,
- $\beta$  - kąt nachylenia konstrukcji wsporczej.



Rys. 5. Zasada obliczania odległości pomiędzy rzędami paneli PV [15]

Bezpieczeństwo użytkowania i ochrona przeciwpożarowa wymagają zastosowania się do obowiązujących zasad, tj.:

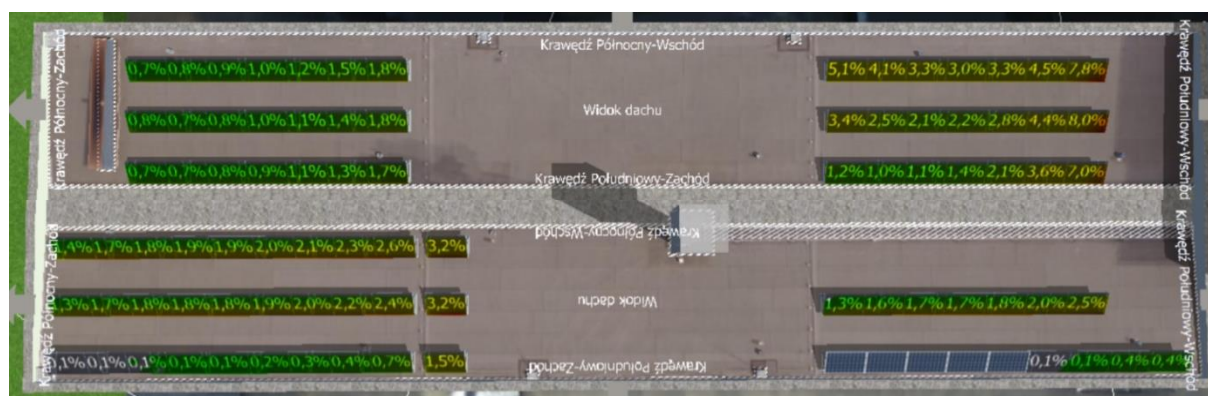
- Nie można pogorszyć funkcji spełnianych przez ściany ogniowe i działowe w budynkach.
- Ściany ogniowe i działowe w budynkach nie mogą zostać zabudowane przez moduły PV.
- Należy zachować dostateczną odległość pomiędzy instalacją PV a ścianami ogniowymi i działowymi w budynku. Odległość ta może zostać określona na podstawie obowiązującej ustawy lub ustalona przez rzeczoznawcę.
- Na etapie projektowania dachowej instalacji PV, należy zadbać o zachowanie odpowiednich odległości modułów PV od krawędzi dachu, w celu umożliwienia konserwacji i zapewnienia bezpiecznego gaszenia w przypadku pożaru. Żadne przepisy nie określają żadnych wymagań, natomiast w praktyce często przyjmuje się, że minimalna odległość modułów od krawędzi dachu wynosi 50 cm.
- Żadna konstrukcja, która jest montowana na dachu, nie może utrudniać usuwania śniegu ani odprowadzania wody podczas deszczu.
- Wszystkie podzespoły instalacji fotowoltaicznej, łącznie z konstrukcją wsporczą, muszą charakteryzować się wysoką odpornością na warunki atmosferyczne.
- Zastosowana konstrukcja nie może zwiększać zagrożenia pożarowego. W przypadku instalacji dachowych należy przewidzieć drogi pożarowe.
- Na etapie projektowania instalacji należy przewidzieć odpowiednie ciągi komunikacyjne, w celu zachowania dostępu do istniejącej infrastruktury dachowej (kominy, anteny, sprężarki klimatyzacji, itp.).
- Należy podłączyć instalację fotowoltaiczną do istniejącej instalacji odgromowej, a w przypadku jej braku, w celu ochrony urządzeń należy przewidzieć konieczność wykonania nowej instalacji odgromowej.
- Należy również pamiętać o często ignorowanej kwestii estetyki budynku. Nie może ona być pogorszona przez instalację fotowoltaiczną.

## 2.4. Analiza zacienienia

Jednym z najistotniejszych zagadnień, które należy wziąć pod uwagę projektując instalację fotowoltaiczną jest możliwość występowania zacienienia. Instalacje fotowoltaiczne, w celu podniesienia napięcia w obwodzie, składają się z szeregowo połączonych ze sobą modułów fotowoltaicznych. W przypadku połączenia szeregowego, ważne jest, aby wszystkie moduły działały

z podobną (najlepiej maksymalną) wydajnością. Zacienienie któregośkolwiek modułu PV będzie wpływało negatywnie na cały obwód, powodując straty mocy elektrowni fotowoltaicznej, dlatego bardzo ważne jest unikanie rozmieszczania modułów fotowoltaicznych w miejscach zacienianych. Ponadto należy wziąć pod uwagę zacieniania poszczególnych rzędów paneli przez rząd poprzedni, stosując zasady przedstawione w rozdziale 2.3.

W realizowanych pracach, przeprowadzono analizę zacieniania w oprogramowaniu PV\*SOL. Obliczenia wykonywane są w procesie rozmieszczania paneli fotowoltaicznych na powierzchniach dachów. Na rysunku 6 przedstawiono średnie procentowe wyniki zacienienia w ciągu dnia, na jednym z budynków. W ramach projektowania instalacji usunięto panele, których stopień zacienienia był zbyt duży. Na dachu budynku jest duża powierzchnia zacieniana przez antenę GSM, w związku z czym w środkowej części dachu nie przewidziano instalacji paneli fotowoltaicznych.



Rys. 6. Wyniki symulacji zacienienia paneli na dachu budynku A (biurowiec)

## 2.5. Dobór falowników

W projekcie instalacji fotowoltaicznej, w pierwszej kolejności należy rozmieścić panele PV na dostępnej powierzchni, zachowując odpowiednie wymagania. Moc falownika dobierana jest do mocy zastosowanych paneli fotowoltaicznych. W projekcie wstępnym zastosowano panele PV LG340N1C-A5 o mocy 340 W.

Podczas doboru falownika do instalacji fotowoltaicznej, można spotkać różne warianty konfiguracji. W tym celu wprowadzono pojęcie stosunku mocy SM, wyrażany zależnością (2) [16].

$$\text{stosunek mocy SM} = \frac{\text{moc pola modułów [W]}}{\text{nominalna moc AC falownika [W]}} * \text{sprawność falownika [\%]} \quad (2)$$

Możliwe są trzy warianty doboru stosunku mocy:

- jeżeli  $SM < 100\%$ , falownik jest niedociążony, ponieważ suma mocy nominalnej modułów jest mniejsza od mocy nominalnej falownika,
- jeżeli  $SM = 100\%$ , falownik jest obciążony mocą nominalną – suma mocy paneli jest równa mocy nominalnej falownika,
- jeżeli  $SM > 100\%$ , falownik jest przeciążony, ponieważ suma mocy nominalnej modułów jest większa od mocy nominalnej falownika.



W Europie Centralnej w przypadku instalacji skierowanych na południe należy przyjąć wartość SM, z przedziału pomiędzy 80% a 125%. Instalacje montowane w kierunkach wschód-zachód mogą być przewymiarowane w stosunku do mocy falownika nawet o 160% (zależy to dodatkowo od nachylenia dachu). Optymalną wartość SM należy obliczyć biorąc pod uwagę specyficzne dane konkretnej instalacji PV, tj.: lokalizację, rodzaj i orientację modułów PV oraz sposób ich połączenia z falownikiem (podział na stringi). Oprogramowanie do projektowania instalacji fotowoltaicznych powinno umożliwiać sprawdzenie parametrów zaprojektowanych stringów w stosunku do zakresów napięć poszczególnych wejść MPPT (Maximum Power Point Tracking) falownika. W analizowanych instalacjach przyjmowano wartość SM zbliżoną do 100%.

## 2.6. Dobór przewodów

Warunkiem bezpiecznej i bezawaryjnej pracy systemu fotowoltaicznego jest właściwy dobór przewodów elektrycznych. Prawidłowo dobrane przewody powodują minimalizację strat mocy całego systemu PV. Panele fotowoltaiczne zwykle wyposażone są oryginalnie w przewody przyłączeniowe o długości 2x1 m oraz o przekroju żyły 4 mm<sup>2</sup>. Przekroje przewodów DC z paneli fotowoltaicznych do falownika, należy wyznaczyć z zależności (3) [15]:

$$S = \frac{I_{MPP} * l_r}{U_{MPP} * \gamma * W} \quad (3)$$

gdzie:

$S$  - przekrój przewodu [mm<sup>2</sup>],

$I_{MPP}$  - natężenie prądu w punkcie maksymalnej mocy [A],

$l_r$  - łączna długość kabla (pętli) między stringiem, a falownikiem [m],

$U_{MPP}$  - napięcie łańcucha fotowoltaicznego [V],

$\gamma$  - współczynnik przewodności właściwej miedzi [ $\frac{S * m}{mm^2}$ ].

$W$  - dopuszczalna strata w przewodach [%].

W obwodach fotowoltaicznych przyjmuje się, że maksymalny poziom strat w przewodach wynosi 1%. Zakłada się zastosowanie przewodów miedzianych o przewodności właściwej 56 [ $\frac{S * m}{mm^2}$ ]. Po przeprowadzeniu obliczeń, należy dobrać przewód, o przekroju najbliższej większej wartości z typoszeregu.

Przekroje przewodów AC z falownika do rozdzielni, wyznacza się ze wzoru (4) [15]:

$$S = \frac{P_f * l_{rf}}{U_r^2 * \gamma * W} \quad (4)$$

gdzie:

$P_f$  - moc nominalna falownika,

$l_{rf}$  - długość przewodu między rozdzielnicą główną, a inwerterem,

$U_r$  - napięcie nominalne wyjścia AC falownika (400 V),

$\gamma$  - współczynnik przewodności właściwej miedzi,

$W$  - dopuszczalna strata w przewodach (1%).



Oprócz doboru przekrojów, należy dodatkowo pamiętać o wymganiach, takich jak odporność izolacji na warunki atmosferyczne (temperatura, wilgotność, promieniowanie UV) oraz uszkodzenia mechaniczne. Przewody dobrane do instalacji fotowoltaicznych powinny się charakteryzować trwałością przez minimum 20 lat.

## 2.7. Dobór zabezpieczeń

Ze względu na charakter działania instalacji fotowoltaicznej, która jest narażona na czynniki zewnętrzne, konieczne jest stosowanie dodatkowej ochrony w postaci ograniczników przepięć (SPD). Ograniczniki mają za zadanie ochronę instalacji przed przepięciami, które mogą zaistnieć zarówno od wyładowań atmosferycznych, jak i występować w momencie łączenia instalacji. Urządzenia te dobiera się w taki sposób, aby napięcie maksymalne wszystkich urządzeń wchodzących w skład instalacji fotowoltaicznej, było mniejsze niż napięcie zadziałania ogranicznika. Zabezpieczenia SPD stosuje się po obu stronach instalacji (AC oraz DC).

### Zabezpieczenia po stronie DC

Sposób ochrony przeciwprzepięciowej zależy od odległości pomiędzy falownikiem a panelami fotowoltaicznymi. Jeżeli odległość ta jest większa niż 10 m, należy umieścić dwa ograniczniki przepięć – jeden przy panelach PV, a drugi przed inwerterem. SPD wymaga bezpośredniego podłączenia do szyn zbiorczych PE, łączonych przewodem o przekroju minimum 16 mm<sup>2</sup>. W związku z koniecznością stosowania zabezpieczeń SPD przy panelach, konieczne jest zastosowanie dodatkowej skrzynki przyłączeniowej, w której zabudowany zostanie SPD, szyna PE oraz trójniki MC4, za pomocą których będą połączone łańcuchy paneli.

W przypadku łączenia stringów fotowoltaicznych równolegle, należy rozważyć zastosowanie bezpieczników gPV. Norma PN-HD 60364-7-712 nakazuje zastosowanie zabezpieczeń przetężeniowych w przypadku równoległego łączenia więcej niż 2 stringów (pkt. 712.433.101). Norma wymaga również zastosowania możliwości odłączenia strony DC od falownika. Współczesne falowniki mają wbudowane wyłączniki DC, w związku z tym nie ma konieczności stosowania dodatkowych wyłączników.

### Zabezpieczenia po stronie AC

Podobnie w przypadku strony DC – jeśli odległość falownika od rozdzielni jest większa niż 10 m, należy zastosować podwójne zabezpieczenia SPD. Ze względów bezpieczeństwa należy zastosować wyłączniki nadprądowe, odpowiednie do mocy podłączanych falowników.

## 2.8. Szacowanie masy

W niniejszym punkcie przedstawiono zestawienie masy poszczególnych instalacji fotowoltaicznych na obiektach ITG KOMAG (tabela 3). Zgromadzone dane umożliwią przeprowadzenie analizy nośności konstrukcji dachowych, które powinny być przeprowadzone przez eksperta, przed montażem instalacji. Masa pojedynczego panelu PV wynosi około 18 kg. Masa konstrukcji wsporczej na 4 panele ułożone poziomo, zależy od kąta pochylenia i wynosi od 16,2 do 17,3 kg. Do obliczeń przyjęto wartość maksymalną. Powierzchnia zajmowana przez konstrukcję wsporczą na 4 panele wynosi około 7 m<sup>2</sup>, więc nacisk konstrukcji z panelami PV na powierzchnię dachu wynosi około 12,7 kg/m<sup>2</sup>.

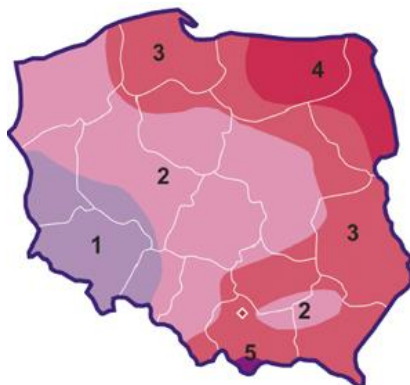
## Zestawienie masy konstrukcji na poszczególnych budynkach

Tabela 3

Budynek	Liczba paneli PV [szt]	Masa paneli [kg]	Masa konstrukcji[kg]	Masa łączna [kg]
Budynek A (biurowiec)	88	1584	380,6	1964,6
Budynek boczny niski	54	972	242,2	1214,2
Budynek boczny wysoki	104	1872	449,8	2321,8
Hala wysoka	138	2484	605,5	3089,5
Biurowiec od ul. Łużyckiej	52	936	224,9	1160,9

Podczas projektowania instalacji fotowoltaicznej, oprócz masy samych ogniw PV (ok. 18 kg/m<sup>2</sup>) i elementów konstrukcyjnych, należy również uwzględnić opady śniegu, który będzie powodował dodatkowe obciążenie konstrukcji dachu. Jeden metr sześcienny śniegu w postaci puchu waży około 200 kg. Ta sama objętość śniegu mokrego waży już około 800 kg, natomiast w przypadku śniegu topniejącego może ważyć nawet 900 kg.

Zgodnie z normą PN-EN 1991-1-3:2005 obszar Polski został podzielony na 5 stref obciążenia śniegiem [15]. Podział ten przedstawiono na rysunku 7. Strefy różnią się obciążeniem śniegu, które zależy głównie od częstotliwości opadów śniegowych. W zależności od strefy, liczba dni z występującymi opadami śniegowymi w Polsce waha się pomiędzy 20 a 80.



Rys. 7. Podział Polski na strefy obciążenia śniegiem [18]

W tabeli 4 zestawiono wartości charakterystycznego obciążenia śniegiem gruntu w Polsce.

**Wartości charakterystycznych obciążenia śniegiem gruntu  $q_s$  w Polsce, w odniesieniu do poszczególnych stref [19]**

Tabela 4

Strefa	1	2	3	4	5
$q_s$ [N/m <sup>2</sup> ]	7H-1,4 $q_s \geq 700$	900	6H-0,6 $q_s \geq 1200$	1600	930exp (0,00134H) $q_s \geq 2000$

Wartość H to wysokość nad poziomem morza wyrażona w metrach



Przedstawione obciążenia dotyczą pionowego nacisku na powierzchnię poziomą, czyli siła nacisku była skierowana prostopadle do powierzchni. Panele fotowoltaiczne zazwyczaj jednak są montowane pod pewnym kątem  $\phi$  do powierzchni ziemi. W takim przypadku ciśnienie obciążeniem śniegu ma niższą wartość w stosunku do działającego na powierzchnię poziomą. Stąd też wartość ciśnienia obciążenia śniegu, działającego na pochyłą powierzchnię generatora PV, można obliczyć z zależności:

$$q_{sk} = q_s * \cos \phi \quad (5)$$

gdzie:

$q_{sk}$  – ciśnienie obciążenia śniegiem działające na powierzchnię pochyłą [ $N/m^2$ ],

$q_s$  – ciśnienie obciążenia śniegiem działające na powierzchnię poziomą [ $N/m^2$ ],

$\phi$  – kąt nachylenia powierzchni do poziomu [ $^\circ$ ].

### 3. Kosztorys

Na podstawie opracowanych założeń technicznych instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów ITG KOMAG, w tabeli 5 zestawiono elementy składowe instalacji (ceny z maja 2020 r.). Przedstawiono koszt poszczególnych podzespołów, bazując na aktualnych cenach w sklepach internetowych. W tabeli ujęto szacunkowy koszt montażu systemów fotowoltaicznych, który przyjmuje się jako 10% wartości instalacji. Suma kosztów (powiększona o szacowany koszt montażu) została wprowadzona do oprogramowania PV\*SOL i była podstawą do oszacowania zysków i okresu zwrotu inwestycji.

Zestawienie kosztów zaplanowanych instalacji fotowoltaicznych

Tabela 5

Lp.	Typ	Nazwa	Ilość	Cena zł/szt	Cena zł/kpl
1	Moduł PV	LG340N1C-A5	436	850	370600
2	Falownik 25kW	SMA Sunny Tripower 25000TL-30	1	12000	12000
3	Falownik 20kW	SMA Sunny Tripower 20000TL-30	1	11800	11800
4	Falownik 17,5kW	FRONIUS Symo 17.5-3-M	4	11000	44000
5	Falownik 15kW	FRONIUS Symo 15.0-3-M	2	10500	21000
6	Optymalizator mocy	TIGO TS4-R-O	20	200	4000
7	Kabel PV	Przewód DC 4 mm <sup>2</sup>	1478	2,5	3695
8	Kabel PV	Przewód DC 6 mm <sup>2</sup>	934	3	2802
9	Kabel PV	Przewód DC 10 mm <sup>2</sup>	460	4	1840
10	Kabel PV	Przewód AC 3-fazowy 6 mm <sup>2</sup>	30	9	270
11	Kabel PV	Przewód AC 3-fazowy 16 mm <sup>2</sup>	100	25	2500
12	Kabel PV	Przewód instalacyjny 16 mm <sup>2</sup> żółto-zielony	150	6	900
13	Komponenty	Złącza MC4	48	4	192
14	Komponenty	Trójnik MC4	16	32	512
15	Komponenty	Zabezpieczenie przeciwprzepięciowe z uziemieniem 1+2	38	800	30400
16	Komponenty	Wyłącznik ochronny przewodu B 32A	6	100	600
17	Komponenty	Wyłącznik ochronny przewodu B 40A	1	123	123
18	Komponenty	Wyłącznik ochronny przewodu B 25A	2	90	180
19	Komponenty	Skrzynka przyłączeniowa	15	126	1890
20	Konstrukcja	Konstrukcja wsporcza (na 4 szt. paneli)	109	720	78480
21	Konstrukcja	Akcesoria montażowe	1	20000	20000
22	Usługa	Montaż instalacji	1	60000	60000
				<b>SUMA</b>	<b>667784</b>



#### 4. Podsumowanie

Pierwszym krokiem w projektowaniu systemu PV było wybranie miejsc zainstalowania paneli fotowoltaicznych na dachach budynków KOMAG-u, uwzględniając dostępną powierzchnię, ekspozycję na promienie słoneczne oraz przeszkody, mogące zacieniać instalacje. Następnie określono sposób montażu paneli PV i dobrano odpowiednie konstrukcje wsporcze. Kolejnym krokiem była analiza rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych na dachach budynków (z uwzględnieniem odpowiednich odległości od krawędzi dachów, instalacji odgromowych, z zachowaniem korytarzy serwisowych) oraz analiza zacienienia paneli. W następnym kroku określono konkretne modele paneli fotowoltaicznych oraz inwerterów, dopasowanych energetycznie do liczby paneli i ich rozmieszczenia. Połączenie paneli fotowoltaicznych i inwerterów wymaga skonfigurowania łańcuchów (stringów) oraz dobrania odpowiednich zabezpieczeń i przewodów po stronie DC i AC.

Wszystkie prowadzone wcześniej prace, tj. modelowanie budynków, rozmieszczenie paneli, analiza zacienienia i dobór podzespołów, umożliwiły przeprowadzenie symulacji działania systemu fotowoltaicznego w oprogramowaniu PVSol Premium. W tabeli 6 zestawiono najważniejsze dane techniczne wszystkich instalacji PV oraz oszacowane roczne uzyski energetyczne. Przyłączenie do sieci energetycznej instalacji powyżej 50 kW (małe instalacje) wiąże się z kilkoma obowiązkami, takimi jak uzyskanie nowych warunków przyłączenia oraz konieczność rejestracji przedsiębiorstwa jako wytwórcy energii elektrycznej. Wytwarzanie energii elektrycznej z małej instalacji fotowoltaicznej nie wymaga uzyskania koncesji. Alternatywnym rozwiązaniem jest podzielenie instalacji na kilka mniejszych (poniżej 50 kW) i podłączenie ich do sieci energetycznej przez odrębne liczniki energii. Dodatkową korzyścią podzielenia instalacji jest wyższy współczynnik opustów podczas rozliczania rachunków za energię elektryczną (małe instalacje: 0.7, mikroinstalacje: 0.8), co może nieznacznie wydłużyć okres zwrotu w stosunku do mikroinstalacji. W przypadku analizowanego przedsiębiorstwa, instalacje fotowoltaiczne będą podłączone do jednego licznika energii, zatem należy spełnić przedstawione wymagania.

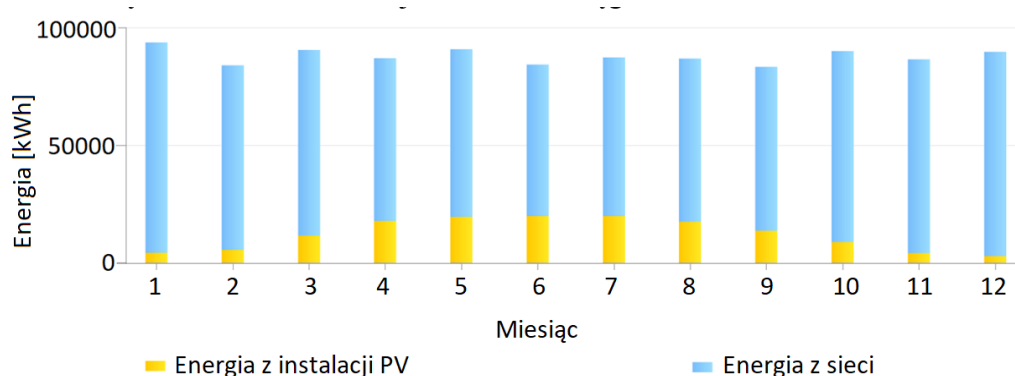
Zestawienie wyników symulacji

Tabela 6

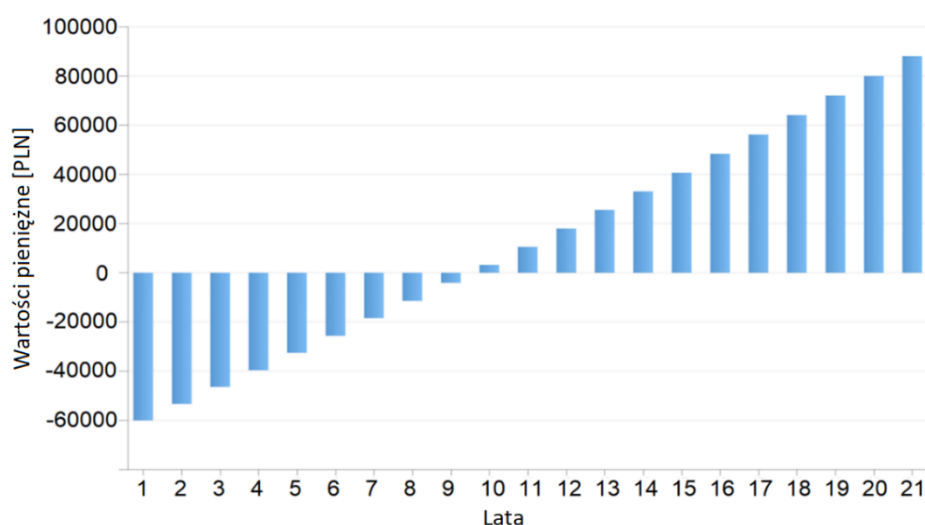
Moc generatora PV	148,2	kW
Spec. uzysk roczny	977,50	kWh/kW
Stosunek wydajności (PR)	87,3	%
Zmniejszenie uzysku na skutek zacienienia	4,1	%/rok
Udział energii słonecznej w pokryciu zapotrzebowania	13,6	%
Energia wyprodukowana przez system PV (sieć AC)	144 904	kWh/rok
Konsumpcja własna energii	142 412	kWh/rok
Energia oddana do sieci	2 492	kWh/rok
Konsumpcja własna wyprodukowanej energii	98,3	%
Emisja CO <sub>2</sub> , której dało się uniknąć:	68 105	kg / rok

Przeprowadzona analiza pokazuje, że energia uzyskana z przedstawionych instalacji fotowoltaicznych pokryje 13,6% zapotrzebowania KOMAG-u na energię elektryczną (rys. 8). Ze względu na charakter działalności instytutu i profil zużycia energii, konsumpcja własna wyniesie ponad 98%. Dzięki temu można będzie uniknąć niemal 70 ton emisji dwutlenku węgla rocznie. Przy wysokim stopniu konsumpcji własnej wyprodukowanej energii elektrycznej (ponad 98%), małe znaczenie ma procent upustów przy rozliczaniu płatności za energię elektryczną.





Rys. 8. Prognoza uzysku rocznego



Rys. 9. Symulacja przychodów z instalacji PV

Całkowity koszt inwestycji, wynoszący blisko 670 tys. zł, zwróci się w 10 roku użytkowania instalacji, a w kolejnych latach przyniesie znaczne korzyści generując około 900 tys. zł po kolejnych 11 latach działania (rys. 9). Okres zwrotu inwestycji (symulowany przez oprogramowanie do projektowania instalacji fotowoltaicznych) może ulec skróceniu w przypadku pozyskania dofinansowania z systemów wsparcia, oferowanych przy tego typu inwestycjach. Korzyści mogą być wyższe, ponieważ okres użytkowania paneli fotowoltaicznych przewidziany jest na ponad 25 lat. Gwarancje udzielane przez producentów paneli mówią o zachowaniu przynajmniej 80% wydajności nominalnej po 25 latach użytkowania.

## Literatura

1. Lis P., Sekret R.: Efektywność energetyczna budynków - Wybrane zagadnienia problemowe. (2016) Rynek Energii, 6 (127), pp. 29-35.
2. Dołęga W.: Efektywność energetyczna w aspekcie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa ekologicznego. (2014) Rynek Energii, 111 (2), pp. 24-28.
3. Din S.: Combined power of perovskites and silicon solar cells. *Vakuum in forschung und praxis*. Volume: 29, Issue: 3, pp. 22-26.



4. Dasari M., Balaraman RP., Kohli P.: Photovoltaics and Nanotechnology as Alternative Energy. Book Series: Environmental Chemistry for a Sustainable World Volume: 14 Pages: 211-241.
5. <https://www.ieo.pl/pl/aktualnosci/1534-dominacja-modulow-monokrystalicznych> [dostęp 27.05.2020].
6. Lima RDC., Gurupad NN., Shinde O., Schneller E., Pinheiro WA., Ferreira CL., Cruz LR., Fonseca MG., de Medeiros RA.: Characterization of CIGS thin film solar cells. *Materia*, Rio de Janeiro, 2017, Volume: 22 Supplement: 1, Article Number: e-11925.
7. Vogelbaum HS., Sauve G.: Recently developed high-efficiency organic photoactive materials for printable photovoltaic cells: a mini review. *Synthetic metals* 2017, Volume: 223, Pages: 107-121.
8. Mahmoudi T; Wang Y; Hahn YB: Graphene and its derivatives for solar cells application. *Nano energy* 2018, Vol. 47, pp. 51-65.
9. Demic S., Ozcivan AN., Can M., Ozbek C., Karakaya M.: Recent Progresses in Perovskite Solar Cells. *Nanostructured solar cells*, 2017, DOI: 10.5772/62516, pp. 277-304.
10. <https://fotowoltaikaonline.pl/panele-bifacial> [dostęp 27.05.2020].
11. Rynek fotowoltaiki w Polsce 2020. Raport Instytutu Energii Odnawialnej (Photovoltaic market in Poland 2020. Report of the Renewable Energy Institute).
12. <https://stowarzyszeniepv.pl/2020/05/10/badanie-opinii-polakow-na-temat-roznych-zrodel-energii> [dostęp 1.03.2020].
13. Sharma M., Pareek S., Singh K.: Performance analysis of various configurations of solar photovoltaic arrays to mitigate the effects of partial shading conditions. (2020) AIP Conference Proceedings, 2294, art. no. 040008.
14. Norma PN-HD 60364-7-712:2016-05 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania.
15. Szymański B.: Instalacje fotowoltaiczne. GLOBEnergia, Kraków, 2017, ISBN 978-83-65874-00-9.
16. <https://www.forum-fronius.pl/moc-instalacji-pv-a-moc-falownikow-fronius> [dostęp 1.03.2020].
17. Norma PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1. Oddziaływanie na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływanie ogólne. Obciążenie śniegiem.
18. <https://inzyrnierbudownictwa.pl/obciazenie-sniegiem-objektow-budowlanych> [dostęp 1.03.2020].
19. Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G.: Wpływ wiatru i śniegu na instalacje fotowoltaiczne w Polsce, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, vol. 74, 2013, Poznań, Polska, str. 253 – 260.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.7>

## **Możliwość zastosowania urządzenia odpylająco-dezynfekującego w celu zwalczania szkodliwych czynników środowiskowych**

**Michał Szelka** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Marek Szygula** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Krzysztof Mazurek** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** Jednym z głównych czynników wpływających na samopoczucie człowieka i jego wydajność jest jakość powietrza w miejscu pracy. Na jakość powietrza oprócz temperatury i wilgotności wpływają również różnego typu zanieczyszczenia, które możemy podzielić na: chemiczne, pyłowe oraz biologiczne. W rozdziale zaprezentowano koncepcję małogabarytowego urządzenia odpylającego, rozbudowanego o moduł dezynfekujący oparty na działaniu promieni ultrafioletowych. Dodatkowy moduł dezynfekujący ma za zadanie zneutralizować zanieczyszczenia biologiczne występujące w powietrzu w postaci tzw. aerozoli biologicznych mogących przeniknąć do układu oddechowego człowieka.

Słowa kluczowe: pył, zwalczanie zapylenia, górne drogi oddechowe, bioaerazol, odpylacz

### **The possibility of using a dedusting and disinfecting device to combat harmful environmental factors**

**Abstract:** One of the main factors determining human well-being and productivity is air quality in the workplace. Apart from temperature and humidity, air quality is also influenced by various types of pollution, which can be divided into: chemical, dust and biological. The article presents the concept of a small-size dedusting device with a disinfecting module based on the action of ultraviolet rays. The additional disinfection module is designed to neutralize biological contamination in the air in the form of the so-called biological aerosols that can penetrate the human respiratory system.

Keywords: dust, dust control, upper respiratory tract, bioaerosol, dust collector

## **1. Wprowadzenie**

Szkodliwe czynniki na stanowisku pracy mogą negatywnie wpłynąć na stan zdrowia człowieka i jego samopoczucie [1]. Jednym z głównych czynników wpływających na samopoczucie człowieka i jego zdrowie jest jakość powietrza w miejscu pracy. Na jakość powietrza oprócz temperatury, wilgotności i ciśnienia wpływają również różnego typu zanieczyszczenia, które możemy podzielić na: chemiczne, pyłowe i biologiczne [2, 3]. W rozdziale przedstawiono koncepcję małogabarytowego urządzenia odpylającego, rozbudowanego o moduł dezynfekujący oparty na działaniu promieni ultrafioletowych.

Dodatkowy moduł dezynfekujący ma za zadanie zneutralizować zanieczyszczenia biologiczne występujące w powietrzu w postaci tzw. aerozoli biologicznych [4] mogących przeniknąć do układu oddechowego człowieka. Poza wymienionymi wcześniej czynnikami mającymi wpływ na jakość powietrza, należy dodać jeszcze obecność drobnoustrojów, wchodzących w skład bioaerozolu. Bioaerozolem nazywamy zbiór cząsteczek biologicznych rozproszonych w powietrzu lub innej fazie gazowej. W jego skład mogą wchodzić: pojedyncze spory, komórki, produkty lub fragmenty grzybní, zarodników grzybów i komórek bakteryjnych, materiał biologiczny unoszony samoistnie lub transportowany przez większe cząstki niebiologiczne np. pył [5, 6]. Zanieczyszczenia biologiczne



występujące w powietrzu w postaci tzw. aerozoli biologicznych mogą odgrywać istotną rolę w przenoszeniu chorób alergicznych, zakaźnych a nawet przyczynić się do epidemii [7].

## 2. Zwalczanie szkodliwych czynników środowiskowych – aseptyka/antyseptyka

Pojęcia: sterylizacja oraz dezynfekcja powszechnie stosowane są równoważnie, jednakże w praktyce opisują dwa różne procesy. Sterylizacja (aseptyka) jest procesem, w wyniku którego zniszczone zostają wszelkiego typu drobnoustroje w formie wegetatywnej oraz zarodniki, natomiast dezynfekcja (antyseptyka) jest procesem mającym za zadanie unieszkodliwienie bakterii i wirusów do poziomu bezpiecznego dla człowieka. Procesu sterylizacji/dezynfekcji można dokonać na wiele sposobów: mechaniczny, chemiczny bądź najczęściej stosowany fizyczny [8]. Sterylizacja, jak i dezynfekcja stosowane są w wielu gałęziach przemysłu, począwszy od branży spożywczej, przez farmaceutyczną, po gospodarstwa domowe [9].

Stan sterylny ze względu na panujące warunki może być bardzo trudny do uzyskania [10], ponadto samo osiągnięcie dezynfekcji powinno już pozytywnie wpłynąć na warunki pracy. Jedną z najtańszych i najskuteczniejszych metod sterylizacji bądź dezynfekcji (w zależności od pasma promieniowania) jest promieniowanie ultrafioletowe [11]. Promieniowanie ultrafioletowe UV należy do falowego promieniowania elektromagnetycznego, podobnie jak promieniowanie rentgenowskie, fale radiowe czy światło [12].

Zakres promieniowania ultrafioletowego można podzielić na trzy obszary:

- UV - A - długofalowe 400 nm - 315 nm,
- UV - B - średniofalowe 315 nm - 280 nm,
- UV - C - krótkofalowe 280 nm - 100 nm.

Promieniowanie ultrafioletowe w zależności od długości fali oraz czasu narażenia na jego działanie może mieć różny, zarówno pozytywny jak i negatywny wpływ na organizmy żywe [13].

- Promieniowanie UV-A - ma najmniej szkodliwy wpływ na organizm człowieka. Prowadzi do uszkodzenia włókien kolagenowych w skórze, przyspiesza tym samym proces starzenia, podnosi stopień pigmentaryzacji skóry. Długotrwały kontakt niesie ze sobą ryzyko zaćmy.
- Promieniowanie UV-B - podobnie jak UV-A indukuje pigmentaryzację skóry, wysokie dawki mogą prowadzić do oparzeń czy rumienia skóry. Ten rodzaj promieniowania może również odpowiadać za wywołanie alergii, zmian nowotworowych jak np. czerniak – złośliwy rak skóry oraz innych typów nowotworów płasko nabłonkowych [14].
- Promieniowanie grupy UV-C – rozkłada wiązania chemiczne i wpływa na struktury białek, RNA oraz DNA (co uniemożliwia reprodukcje bakteriom i wirusom), u człowieka podobnie jak UV-B wywołuje oparzenia skóry oraz podnosi stopień ryzyka choroby nowotworowej [15].

Mechanizm bakteriobójczy polega na absorbowaniu, przez DNA wirusa, energii promieniowania UV-C, która wywołuje reakcje fotochemiczne niszczące zapis genetyczny. W wyniku tego procesu zahamowany zostaje podział komórek, co jest równoznaczne z utratą zdolności reprodukcji [13]. Promieniowanie UV-C w szczególności jest szkodliwe dla: bakterii i wirusów oraz w mniejszym stopniu dla drożdży oraz pleśni [16, 17]. W Komunikacie Głównego Inspektora Sanitarnego z 4 marca 2020 roku czytamy: „Wirus osłonięty jest cienką warstwą tłuszczową, którą niszczą detergenty, mydło, środki dezynfekcyjne, promienie UV.”. W przypadku urządzeń odpylających oprócz promieniowania UV stosowane mogą być również chemiczne metody dezynfekcji/sterylizacji nie wymagające energii



elektrycznej do działania, można wśród nich wyróżnić metody wykorzystujące następujące substancje chemiczne [18]:

- alkohole,
- aldehydy,
- fenole,
- środki utleniające,
- chlorowce,
- sole metali ciężkich,
- barwniki.

Ze względu na swoje działanie, w przypadku urządzeń wentylacyjnych chemiczne metody nie są zalecanym środkiem dezynfekcji, ponadto aby były użyteczne, muszą spełniać wiele wymagań: szerokie spektrum działania, krótki czas ekspozycji, wysoka skuteczność działania w obecności białek, brak nieprzyjemnego zapachu, nie podrażniać skóry i śluzówek, być przyjazne dla środowiska, a przede wszystkim powinny być ekonomiczne.

### 3. Możliwość zaaplikowania rozwiązania w urządzeniu odpylającym

W przypadku urządzeń odpylających [19], zastosowanie lamp ultrafioletowych, w zamkniętej obudowie jaką jest wnętrze urządzenia odpylającego, pozwoli na pracę urządzenia w obecności ludzi. Oficjalne oświadczenie dotyczące stanowiska CIE (International Commission on Illumination) jasno klasyfikuje promieniowanie ultrafioletowe jako skuteczny środek ograniczający ryzyko rozprzestrzeniania się chorób zakaźnych [20]. Promieniowanie UV-C o długości fali 280-100 nm wykazuje najefektywniejsze działanie, eliminując bądź neutralizując: wirusy, bakterie, pleśnie a także grzyby. Zastosowanie odpowiedniego czasu oraz dawki promieniowania prowadzi do zmiany budowy DNA (zmienia się struktura białek cytoplazmatycznych a także kwasów nukleinowych), co w konsekwencji prowadzi do unieszkodliwienia patogenu. Za niskie dawki oraz za krótki czas działania lampy, mogą doprowadzić do nasilonych mutacji w komórkach i tym samym wywołać odmienny skutek [21].

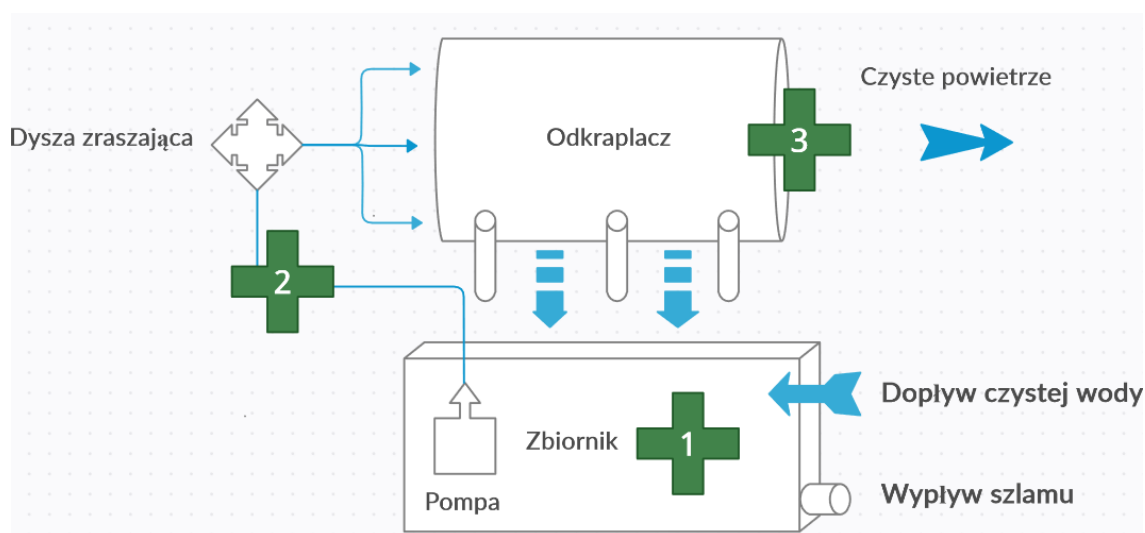
Źródłem promieniowania ultrafioletowego w lampie bakteriobójczej jest promiennik ultrafioletowy. Do wytworzenia promienników wykorzystuje się szkło kwarcowe posiadające wysoki współczynnik transmisji dla promieniowania bakteriobójczego, jego zaletą jest absorpcja promieniowania ultrafioletowego o długości fali poniżej 200 nm, dzięki czemu ograniczono powstawanie produktu ubocznego jakim jest ozon.

Odpylacz dyspersyjny OD-400/Z jest zmodernizowaną wersją małogabarytowego urządzenia przeznaczonego do usuwania pyłów z przepływającego przez nie powietrza, szczególnie powstających lokalnie pyłów węglowych, kamiennie-węglowych oraz kamiennych. Usuwanie pyłów odbywa się metodą moką.

W przypadku rozpatrywanego urządzenia odpylającego OD-400/Z istnieje kilka możliwości lokacji instalacji dezynfekującej. Jako medium przepływające mogą być poddane dezynfekcji wzięto pod uwagę: wodę znajdującą się w obiegu zamkniętym oraz przepływające przez urządzenie medium gazowe (powietrze). Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat obiegu wody i powietrza przez urządzenie odpylające.

Strumień zapyłonego powietrza, zasysany jest do odpylacza przez współpracujący z nim wentylator lutniowy. Następnie strumień dopływa do komory zraszania, gdzie za pomocą dysz zraszających dostarczana jest woda. W wyniku czego następuje wstępny kontakt zapyłonego powietrza z wodą.

Struga powietrza z kroplami wody i cząstkami pyłu przedostaje się na wypełnienie komórkowe skośne, gdzie następuje intensywny kontakt pyłu z wodą i jego wnikanie do kropelek wody. Efekt ten jest potęgowany przez krzyżowanie się i przenikanie strug wodnych, wypływających z wypełnienia, do obszaru stanowiącego część węzła dyspersji wtórnej. Następnie struga ulega zawirowaniu na łopatkach kierownicy, gdzie powietrzu nadawany jest kręt. Wirujący strumień z zawartymi w nim kroplami wody związanymi z cząstkami pyłu, wpływa do przestrzeni wewnętrznej odkraplacza, gdzie wskutek tarcia kropelek o powierzchnie pierścieni odkraplających, wywołanego wirum strumienia zasadniczego, następuje intensywne wytrącenie fazy stałej i ciekłej z powietrza. W przypadku zastosowania wypełnienia odkraplającego, zabudowanego wewnątrz odkraplacza następuje zintensyfikowanie procesu odkroplenia. Wytrącona z powietrza woda oraz zawarte w niej cząstki pyłu są odprowadzane do kieszeni spływowej odkraplacza, a następnie przewodami spływowymi kierowane są do zbiornika [19].



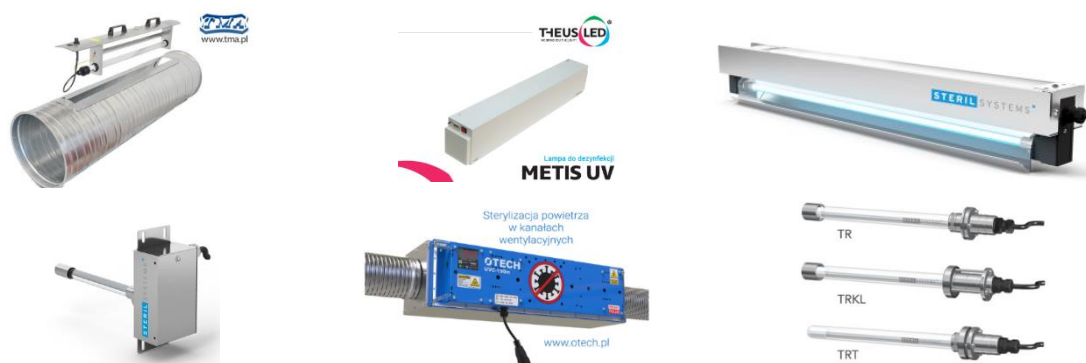
Rys. 1. Ogólny schemat obiegu wody i powietrza przez urządzenie wraz z możliwymi lokalizacjami aparatury dezynfekująco/sterylizującej. Punktami 1 do 3 oznaczono możliwe miejsca usytuowania systemu dezynfekującego

W punkcie pierwszym (rys. 1) specjalnej konstrukcji promienniki zanurzone są w zamkniętym zbiorniku, przepływająca przez niego woda poddana jest dezynfekcji. Ze względu na niewielkie prędkości przepływu rozwiązanie to nie wymaga zastosowania dużej liczby promienników UV. Natomiast wadą rozwiązania jest fakt, iż wraz z czasem pracy urządzenia w zbiorniku nastąpi coraz większe zanieczyszczenie w postaci mułu, który niekorzystnie wpływa na przenikanie przez ciecz promieni ultrafioletowych.

Punkt drugi umiejscowiony jest w przewodzie wodnym między pompą a dyszą zraszającą. W przypadku przewodu wodnego mamy do czynienia z ograniczoną przestrzenią działania promiennika, zwiększonym przepływem medium w stosunku do zbiornika oraz możliwością szkodliwego oddziaływania na promiennik drobnych cząsteczek przepływających przez przewód pod ciśnieniem 1-3 bar (możliwość ścierania się obudowy lampy).

Punkt trzeci umiejscowiony jest w komorze zraszania, pomiędzy kierownicą a wypełnieniem odkraplającym. W tym przypadku promieniowanie UV bezpośrednio działa na czynnik gazowy przepływający przez urządzenie odpylające.

W przypadku promieniowania ultrafioletowego uzyskanie stanu zdezynfekowanego jest łatwiejsze w przypadku powietrza niż wody, szczególnie przy zanieczyszczeniu cząstkami stałymi w wodzie, utrudniającymi przenikanie promieniowania ultrafioletowego. U wylotu z komory odkraplającej czystość powietrza określana jest na poziomie 99%. Ważnym aspektem jest także dobranie promienników, aby przy przepływie  $140 \text{ m}^3/\text{min}$  zdołały one wyeliminować 90-100% zanieczyszczenia biologicznego. Obecnie na rynku istnieje wielu producentów produkujących specjalne lampy ultrafioletowe (rys. 2). W rozdziale zaproponowano kilka rodzajów lamp odpowiadających parametrom przepływowym urządzenia.



Rys. 2. Przykłady rozwiązań lamp ultrafioletowych dostępnych na rynku [22, 23, 24, 25]

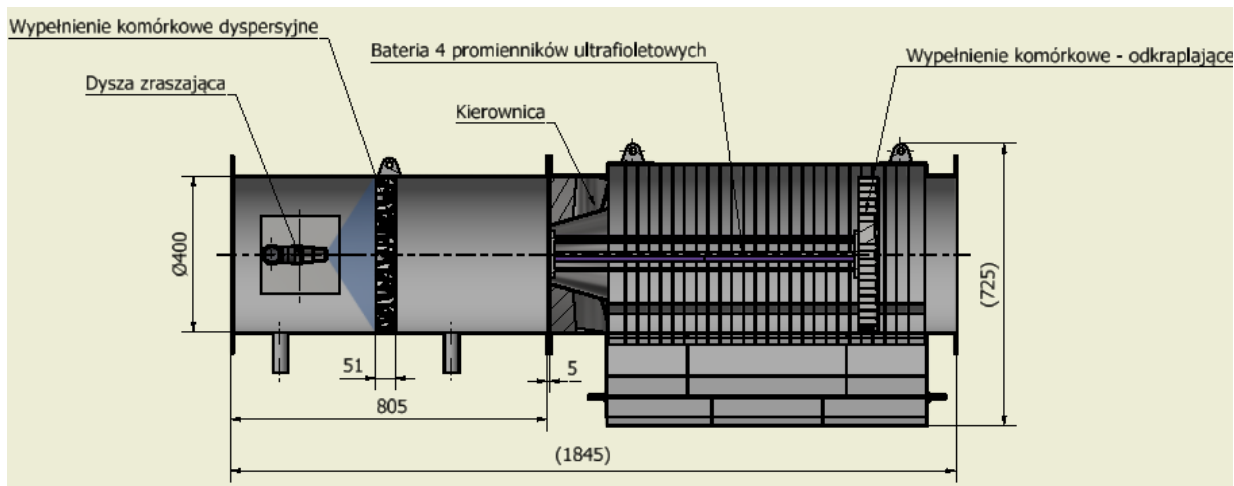
Na rysunku 3 przedstawiono urządzenie odpylające OD-400/Z z zaproponowaną lokalizacją niskociśnieniowych promienników ultrafioletowych. Na podstawie parametrów technicznych urządzenia należy określić niezbędną liczbę promienników.

#### Parametry techniczne urządzenia odpylającego OD-400/Z

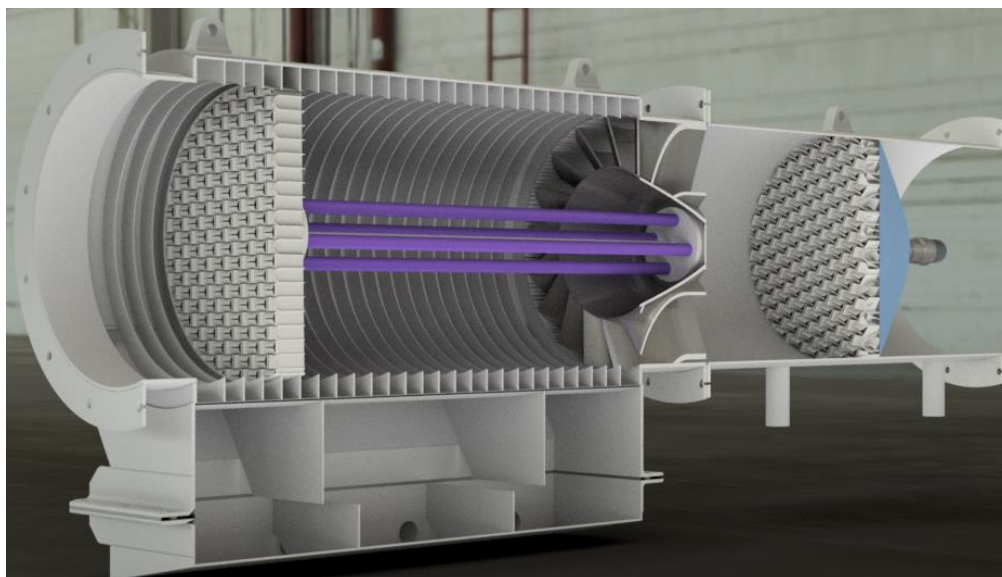
Tabela 1

Parametr	Wartość
Wydajność nominalna	$140 \text{ m}^3/\text{min}$
Zakres wydajności	$80\text{-}180 \text{ m}^3/\text{min}$
Szerokość odpylacza	580 mm
Wysokość odpylacza	725 mm
Długość całkowita	1845 mm

Na podstawie analizy dostępnych promienników zaproponowano rozwiązanie marki PHILIPS. Cztery promienniki o mocy  $4 \times 150 \text{ W}$  (rys. 4.), pozwalają na pracę przy wydajności  $10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . W promiennikach wykorzystano promieniowanie o długości fali 254 nm. Zastosowanie mniejszej długości fali zwiększyłoby energię fotonów, co byłoby korzystnym zjawiskiem, lecz w tym przypadku dochodziłoby również do rozerwania wiązań tlenu  $\text{O}_2$  i w konsekwencji prowadziłyby do powstawania szkodliwego ozonu  $\text{O}_3$  [18].



Rys. 3. Przekrój modelu odpylacza OD-400/Z wraz z zabudowanym zespołem promienników ultrafioletowych



Rys. 4. Trójwymiarowy model urządzenia odpylającego wraz z baterią promienników ultrafioletowych

Na podstawie analizy norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX [26], zastosowanie promienników ultrafioletowych wprost, w zaproponowanej konfiguracji (rys. 4) byłoby niemożliwe. Promienniki powinny zostać obudowane i zabezpieczone w specjalnego typu oprawy spełniające wymogi iskrobezpieczności oraz szczelności. Na rynku istnieją różnego typu oprawy zabezpieczające promienniki, w tym promienniki ultrafioletowe. Oprócz fizycznych zabezpieczeń promienników, należy również zastosować inne zabezpieczenia typu elektrycznego [27].

#### 4. Wnioski/Podsumowanie

W rozdziale przeanalizowano dwie możliwości zastosowania dezynfekcji czynnika przepływającego przez urządzenie odpylające. Zaproponowano trzy lokalizacje dla ww. procesu: zbiornik, przewód wodny oraz odkraplacz. Jako optymalną lokalizację wybrano punkt trzeci znajdujący się wewnątrz odkraplacza. Zespół 4 promienników fal ultrafioletowych o mocy całkowitej 600 W, zabudowany został pomiędzy kierownicą a wypełnieniem komórkowym odkraplającym. Uniemożliwia to dostanie się osób trzecich do pracującego urządzenia, jak i wydostanie się promieniowania poza jego





obręb. W wyniku przeprowadzonej analizy wybrano promieniowanie ultrafioletowe o długości fal promieniowania 254 nm, ze względu na wysoką wydajność oraz brak negatywnego wpływu na działanie urządzenia i otoczenie. Zaproponowano również zabudowanie promienników w specjalnej obudowie spełniającej standardy ATEX oraz IP [28].

Zaproponowane rozwiązanie dezynfekcji czynnika przepływającego przez urządzenie odpylające, pozytywnie wpłynie na jakość powietrza i zdrowie ludzi pracujących w jego otoczeniu, eliminując zanieczyszczenia typu pyłowego oraz mikrobiologicznego [29]. Kompaktowa budowa urządzenia pozwala na łatwą jego relokalizację [30]. Urządzenie świetnie się sprawdzi w przypadku: zakładów przerobczych, dużych hal, magazynów oraz imprez masowych [31].

## Literatura

1. Gołofit-Szymczak M., Ławniczek-Wałczyk A., Górny R. L.: Ilościowa i jakościowa kontrola szkodliwych czynników biologicznych w środowisku pracy. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2013; 2(76): 5–17.
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz. U. Nr 139, poz. 1169 z późn. zm.).
3. Wyższy Urząd Górniczy: Stan bezpieczeństwa i higieny pracy w górnictwie w 2012 roku, Katowice, 2013.
4. Górny R. L.: Aerozole biologiczne – rola normatywów higienicznych w ochronie środowiska i zdrowia. *Med. Środow.* 2010; 13 (1): 41- 51.
5. Gołofit-Szymczak M., Ławniczek-Wałczyk A., Górny R. L.: Bioaerozole w pomieszczeniach pracy źródła i zagrożenia. *Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka* 2013, 9-11.
6. Gąska-Jędruch U., Dudzińska M.R.: Zanieczyszczenia mikrobiologiczne w powietrzu wewnętrznym, *Polska Inżynieria Środowiska pięć lat po wstąpieniu do Unii Europejskiej*, tom 2.
7. Augustyńska D., Pośniak M.: Czynniki szkodliwe w środowisku pracy wartości dopuszczalne 2014. CIOP- PIB. Warszawa, 2014.
8. Rutala W.A., Weber D.J.: New disinfection and sterilization methods. *Emerg Infect Dis.* 2001;7(2):348–353. doi: 10.3201/eid0702.010241
9. Rutala W.A., Weber D.J.: The healthcare infection control practices advisory committee (HICPAC). Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities. Atlanta (GA): 2008.
10. Michałkiewicz M.: Formation, Transmission and Harmfulness of Bioaerosols released Into the Air, *Ochrona Środowiska* ISSN 1230-6169, 2018, 40, 4, 21-30.
11. Duquenne P., Marchand G., Duchaine C.: Measurement of endotoxins in bioaerosols at workplace: A critical review of literature and a standardization issue. *The Annals of Occupational Hygiene* 2012, Vol. 57, No. 2, pp. 137–172.
12. International Ultraviolet Association (IUVA) UV disinfection for COVID-19. <http://iuva.org/iuva-covid-19-faq> [dostęp: 01.05.2021].
13. Kowalski W. J., Walsh T.J, Petraitis V.: 2020 COVID-19 Coronavirus Ultraviolet Susceptibility. March 2020, ResearchGate.
14. Borkowska B., Kardynał A., Słowińska M. i in.: Czerniak u osób korzystających z urządzeń opalających emitujących promienie UV (solariów). *Przeegl Dermatol* 2013, 100, 345-352.
15. Ramirez C., Federman D., Kirsner R.: Skin cancer as an occupational disease: the effect ultraviolet and other forms of radiation. *Int J Dermatol* 2005, 44: 95-100. DOI: 10.1111/j.1365-4632.2005.02301.x



16. Bianco A., Biasin M., Pareschi G., Cavalieri A., Cavatorta C., Fenizia C., Galli P., Lessio L., Lualdi M., Redaelli E., Saulle I., Trabattoni D., Zanutta A., Clerici M.: UV-C irradiation is highly effective in inactivating and inhibiting SARS-CoV-2 replication.
17. James E. Cruver, Ph.D.: Spotlight on Ultraviolet Disinfection, *Water Technology*, June 1984.
18. Dr. Robert W. Legan: Alternative Disinfection Methods-A Comparison of UV and Ozone, *Industrial Water Engineering*, Mar/Apr 1982.
19. Jedziniak M., Loster-Mańka A.: Ochrona środowiska pracy przed zapyleniem w zakładach przeróbki mechanicznej węgla. KOMEKO 2010.
20. Oświadczenie dotyczące stanowiska CIE w sprawie promieniowania nadfioletowego (UV) jako środka ograniczającego ryzyko rozprzestrzeniania się COVID-19: [https://www.steryliailed.pl/wp-content/uploads/2020/06/CIE-Position-Statement-UV-radiation-2020\\_PL\\_0.pdf](https://www.steryliailed.pl/wp-content/uploads/2020/06/CIE-Position-Statement-UV-radiation-2020_PL_0.pdf) [dostęp 01.05.2021].
21. Ata P, Majewski S.: Fotostarzenie skóry. *Przegl Dermatol* 2013, 100, 178-183.
22. <https://tma.pl/> [dostęp 01.05.2021].
23. <https://www.theusled.com/produkty/lampy-do-dezynfekcji/> [dostęp 01.05.2021].
24. <https://www.sterilsystems.at/en.html> [dostęp 01.05.2021].
25. <https://www.otech.pl/> [dostęp 01.05.2021].
26. PN-EN 1710+A1:2010 Urządzenia i podzespoły przeznaczone do stosowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.
27. PN-G-52002:2009 Urządzenia odpylające w górnictwie podziemnym – Wymagania i badania.
28. Figiel A.: Zasady stosowania elektrycznych urządzeń prostych w obwodach iskrobezpiecznych. KOMTECH 2020, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność - niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2020 s. 111-119, ISBN 978-83-65593-22-1.
29. Chmielniak T., Otte J., Frydel W., Roj L.: Instalacja badawcza urządzeń odpylających. *Maszyny Górnicze* 1992 nr 37.
30. Jedziniak M.: Małogabarytowe urządzenie odpylające. *Masz. Gór.* 2013 nr 4 s. 34-38.
31. Olejnik M.: Testing the equipment used in ventilation of mine workings. *Mining Machines* 2020 No. 2 pp. 26-37, DOI:10.32056/KOMAG2020.2.3; ISSN 2719-3306.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.8>

## **Dynamiczne nagniatanie powierzchni cylindrów hydraulicznych**

**Jarosław Mikula** – Politechnika Śląska

**Stanisław Mikula** – Politechnika Śląska

**Stanisław Szweda** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Marek Szygula** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** Opisano efekty użytkowe uzyskiwane w wyniku operacji nagniatania elementów siłownika hydraulicznego. Oprócz większej trwałości zmęczeniowej elementu, uzyskuje się również pożądane cechy tribologiczne współpracujących powierzchni roboczych cylindrów, korzystnie wpływające na trwałość węzłów uszczelniających, a tym samym na mniejsze zanieczyszczenie środowiska wyciekami cieczy roboczej z siłownika. Zaproponowany został sposób oceny wpływu procesu nagniatania na właściwości zmęczeniowe, wykorzystywany do optymalizacji parametrów procesu umacniania zgniotem. Przedstawiono koncepcję urządzenia służącego do realizacji procesu dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznych cylindrów w warunkach przemysłowych. Efektywne chłodzenie i smarowanie obrabianej powierzchni, jak również wykorzystanie zjawiska uderzenia hydraulicznego do zwiększenia siły dynamicznego nagniatania, umożliwią uzyskanie, za pomocą omawianego urządzenia, szczególnie korzystnych cech użytkowych siłownika.

Słowa kluczowe: siłownik hydrauliczny, trwałość zmęczeniowa, dynamiczne nagniatanie, zgniot powierzchniowy

### **Dynamic burnishing of hydraulic cylinder walls**

**Abstract:** The usable effects obtained from the burnishing operation of hydraulic cylinder components are described. In addition to the increased fatigue life of the element, desirable tribological characteristics of the interacting working surfaces of the cylinders are also obtained, favourably affecting the life of the sealing nodes, and thus less environmental pollution is caused by the working fluid escaping from the cylinder. A manner of evaluating the effect of the burnishing process on fatigue properties, used to optimize the parameters of the burnishing strengthening process, is proposed. A concept of a device, used to realize the process of dynamic burnishing of inner surfaces of cylinders in industrial conditions, is presented. Effective cooling and lubrication of the processed surface, as well as the use of the hydraulic impact phenomenon to increase the dynamic pressing force, make it possible to obtain, with the application of the discussed device, particularly advantageous characteristics of the actuator.

Keywords: hydraulic actuator, fatigue life, dynamic burnishing, surface crush.

### **1. Wprowadzenie**

Cylindrom siłowników hydraulicznych stosowanych w górnictwie i budownictwie stawiane są szczególnie wysokie wymagania odnośnie do ich właściwości użytkowych. Siłowniki hydrauliczne wykorzystywane w układach hydrauliki siłowej, a zwłaszcza cylindry stojaków hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, stosowanych w górnictwie węgla kamiennego i innych kopalni użytecznych, narażone są na obciążenie zmienne o szczególnie niekorzystnych parametrach [1]. Dotyczy to zwłaszcza siłowników hydraulicznych zainstalowanych w wyrobiskach zagrożonych występowaniem wstrząsów górotworu i tąpnięć. Cechy użytkowe siłowników stosowanych w układzie podpornościowym sekcji obudowy zmechanizowanej są przedmiotem licznych badań [2, 3, 4], gdyż niezawodność układu podpornościowego sekcji ma zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo stanowiskowe i procesowe w górniczych wyrobiskach podziemnych. Wynikają stąd szczególnie wysokie wymagania odnośnie do wytrzymałości doraźnej, trwałości zmęczeniowej i sztywności cylindrów.



Cylindry siłowników muszą jednocześnie cechować się wysokimi właściwościami plastycznymi, gdyż ich ewentualne zniszczenie eksploatacyjne nie może mieć charakteru kruchego pęknięcia skutkującego natychmiastową utratą podporności i generującego dodatkowe obciążenie dynamiczne innych elementów układu podpornościowego. Wysokie wymagania dotyczą zwłaszcza odporności cylindrów hydraulicznych na zarodkowanie i rozwój pęknięć o charakterze zmęczeniowym.

Duże znaczenie, zwłaszcza dla szeroko rozumianej ochrony środowiska mają właściwości tribologiczne powierzchni siłownika hydraulicznego współpracujących z węzłami uszczelniającymi. Wewnętrzne powierzchnie cylindrów współpracujące z wysokociśnieniowymi uszczelnieniami narażone są na degradujące procesy tribologiczne i korozyjne, które powodują szkodliwe przecieki medium roboczego, jakim zasilane są siłowniki w górnictwie. Przecieki emulsji wodno-olejowej powodują zagrożenie ekologiczne w postaci skażenia wód podziemnych, które pompowane na powierzchnię zanieczyszczają wody powierzchniowe. Powstające przecieki w węzłach uszczelniających generują ponadto straty ekonomiczne związane z koniecznością uzupełniania cieczy roboczej w układzie hydraulicznym sekcji. Na szczelność węzłów uszczelniających, szczególnie badaną zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1804-2 [5], znaczący wpływ ma gładkość powierzchni wewnętrznej cylindra, uzyskiwana poprzez zabiegi dynamicznego nagniatania, dokładnego toczenia lub szlifowania. W odróżnieniu od metod dynamicznego nagniatania, stosowanych obecnie, urządzenie obróbcze opisane w niniejszej monografii, dzięki korzystnym cechom tribologicznym współpracujących powierzchni eliminuje występowanie respirabilnych frakcji pyłu metalicznego generowanych podczas dynamicznego nagniatania i zanieczyszczających drogi oddechowe.

Możliwość ograniczenia wspomnianych procesów niszczących zapewnia wykorzystanie zgniotu powierzchniowego dla polepszenia właściwości trwałościowych cylindrów. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie wpływu procesu nagniatania warstwy wierzchniej cylindra hydraulicznego na poprawę trwałości zmęczeniowej i jakości tribologicznej powierzchni roboczych cylindra, co skutkuje osiągnięciem korzystnych efektów użytkowych. Parametry zabiegu umacniania warstwy wierzchniej zgniotem można optymalizować korzystając z omówionego w niniejszej pracy, sposobu oceny wpływu nagniatania na właściwości zmęczeniowe.

Proces dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznych cylindrów hydraulicznych można zrealizować w warunkach przemysłowych za pomocą urządzenia, którego koncepcję przedstawiono w niniejszym rozdziale. Za pomocą tego urządzenia można uzyskać szczególnie korzystne efekty nagniatania, dzięki efektywnemu chłodzeniu i smarowaniu obrabianej powierzchni oraz wykorzystaniu uderzenia hydraulicznego do zwiększenia siły nagniatania.

## **2. Efekty użytkowe umacniania zgniotem powierzchni elementów maszyn i urządzeń**

Obróbka zgniotem powierzchniowym nazywana również nagniataniem polega na wywołaniu w warstwie o ograniczonej głębokości odkształceń plastycznych „na zimno” tzn. w temperaturze mniejszej od temperatury rekrytalizacji struktury materiału umacnianego metalowego elementu maszynowego. W wyniku zabiegu nagniatania w warstwie wierzchniej poddanej zgniotowi występuje duża anizotropia struktury materiału i jego cech mechanicznych oraz ma miejsce szereg istotnych zmian strukturalnych i własności fizyko-chemicznych wpływających na cechy użytkowe elementów. Jako zabieg technologiczny obróbka zgniotem powierzchniowym znana jest od dawna [6, 7]. Zakres wykorzystywania nagniatania w praktyce wytwarzania elementów maszynowych jest jednak niewielki, a w przypadku maszyn i urządzeń górniczych technologia ta stosowana jest marginalnie, mimo szeregu bardzo korzystnych efektów osiąganych niewielkim nakładem energii i robocizny.



W praktyce przemysłowej najczęściej stosowany jest zabieg w postaci śrutowania (inaczej kuleczkowania) polegający na działaniu strumienia kulek stalowych, żeliwnych lub szklanych padających na umacnianą powierzchnię z dużą prędkością [8]. Do miotania strumieni kulek wykorzystywane jest sprężone powietrze lub wirnikowe wyrzutniki mechaniczne [7, 8].

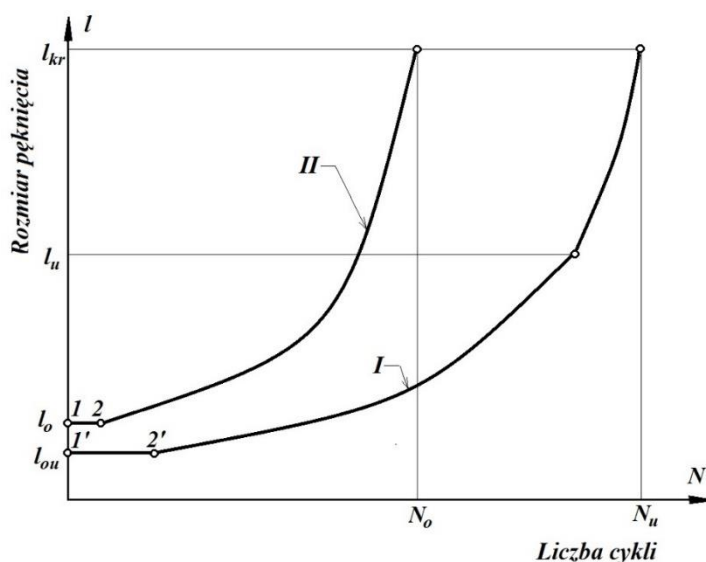
Warunkiem uzyskania pełnych efektów obróbki nagniataniem jest uzyskanie możliwie dużej głębokości zgniotu. Z tego względu śrutowanie jest niewystarczające dla potrzeb umacniania elementów wykonanych ze stali i staliwa poddanych uprzednio utwardzającej obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej. Nie umożliwia ono bowiem uzyskania dostatecznej energii elementów nagniatających. W przypadku pneumatycznych sposobów miotania kulek, energię kinetyczną strumienia limituje fizycznie uzasadnione ograniczenie prędkości strumienia. Uzyskanie większej energii strumienia kulek poprzez zwiększenie masy kulki (a więc i średnicy) jest również niekorzystne, gdyż zwiększa się wtedy powierzchnia kontaktu z obrabianą powierzchnią. Ograniczeniu ulegają więc lokalne naciski stykowe niezbędne dla wywołania zgniotu na żadaną głębokość. Ponadto kulki o większej średnicy z większą trudnością docierają do stref karbów i defektów powierzchniowych. Zwiększenie prędkości strumienia za pomocą wyrzutników wirnikowych skutkuje gwałtownym zwiększeniem tempa zużycia wirników oraz zwiększoną tendencją do generowania drobnodispersyjnego pyłu metalicznego, co stwarza zagrożenie wybuchem pyłu oraz jest bardzo niekorzystne ze względów ekologicznych i zdrowotnych. Częściowa eliminacja wspomnianych zagrożeń poprzez podawanie umacniających kulek w strumieniu cieczy ma również swoje ograniczenia. Z jednej strony porcja cieczy bezpośrednio związana z padającą kulką powoduje pozorne zwiększenie masy kulki, ale z drugiej strony zwilżenie obrabianej powierzchni cieczą utrudnia wywołanie dostatecznie dużych nacisków stykowych, gdyż kulki „przebijając się” przez warstwę cieczy tracą część energii kinetycznej. Przy dużej prędkości odkształcania, warstwa cieczy silnie zmniejsza lokalne naciski stykowe. W opisanym przypadku elementów stalowych, zwłaszcza ze stali stopowych o zwiększonej twardości, dostatecznie dużą głębokość zgniotu powierzchniowego można uzyskać stosując naporowe sposoby nagniatania [9] oraz urządzenia o działaniu dynamicznym.

Pod wpływem zgniotu zwiększa się silnie gęstość dyslokacji w warstwie umocnionej [10]. Z każdą dyslokacją jest związane pole naprężeń sieci krystalicznej metalu. Blokują one ruch pozostałym dyslokacjom i ograniczają możliwości inkubacji pęknięć zmęczeniowych [11]. Zgniot powoduje przemianę austenitu szczątkowego, pozostającego w strukturze stali po obróbce cieplnej, na składniki strukturalne właściwe dla stali po hartowaniu. Struktury powstałe z przemiany austenitu szczątkowego mają zwiększoną objętość właściwą [12, 13]. Prowadzi to, wraz z efektem rozdrobnienia struktury w wyniku zgniotu, do uformowania się stanu naprężeń własnych ściskających w warstwie zgniecionej i bezpośrednio pod nią. Strefa ściskających naprężeń własnych w głównej mierze przyczynia się do wydatnego wzrostu odporności na pęknięcie zmęczeniowe [14]. Jej dodatkowym atutem jest swoista neutralizacja nieuniknionych defektów powierzchniowych elementów maszyn. Takie defekty jak rysy obróbcze zostają zniwelowane, powierzchniowe wtrącenia niemetaliczne podlegają wykruszeniu, a wtrącenia podpowierzchniowe są poddane fragmentacji i spłaszczeniu. Dotyczy również to pęcherzy gazowych, podpowierzchniowych i sięgających powierzchni elementu umacnianego. W przypadku elementów obrotowych poddawanych obróbce skrawaniem, obróbka zgniotem powierzchniowym zwiększa odporność na zarodkowanie pęknięć zmęczeniowych, gdyż w wyniku zgniotu likwidowany jest obwodowy układ mikronierówności obróbczych. Ma to szczególne znaczenie dla elementów, które przenoszą zmienne obciążenie wzdłużne od rozciągania lub zginania.

Duży wzrost trwałości zmęczeniowej elementów powodują następujące czynniki uzyskiwane dzięki nagniataniu:

- zmniejszenie średnich rozmiarów defektów powierzchniowych (dotyczy to głównie ich głębokości),
- wydłużenie okresu inkubacji mikropęknięć zmęczeniowych wskutek wpływu naprężeń własnych ściskających od nagniatania,
- zmniejszenie prędkości rozwoju zaistniałych już pęknięć zmęczeniowych rozwijających się pod działaniem rozciągających naprężeń roboczych pomniejszonych o stałe naprężenia własne ściskające występujące w strefie, której głębokość jest większa od głębokości zgniotu powierzchniowego, średnio o ok. 20% [15].

Wymienione czynniki powodują, że w przypadku elementu umocnionego zgniotem, liczba cykli zmiennych naprężeń roboczych, niezbędna do wywołania pęknięcia o krytycznych rozmiarach powodujących pełne zniszczenie, jest znacznie większa od liczby cykli obciążenia powodującej zniszczenie elementu nie umocnionego zgniotem powierzchniowym. Schematycznie ilustruje to rysunek 1.



Rys. 1. Schematyczny przebieg rozwoju pęknięcia zmęczeniowego

- I* – przebieg rozwoju pęknięcia w elemencie umocnionym zgniotem,
- II* – przebieg rozwoju pęknięcia w elemencie nieumocnionym zgniotem,
- 1-2 – okres inkubacji pęknięcia w elemencie nieumocnionym,
- 1'-2' – okres inkubacji pęknięcia w elemencie poddanym umocnieniu zgniotem powierzchniowym na głębokość  $l_u$ ,
- $l_o$  – średni rozmiar defektu powierzchniowego w elemencie nieumocnionym,
- $l_{ou}$  – średni rozmiar (głębokość) defektu powierzchniowego po zabiegu umacniania zgniotem,
- $l_u$  – głębokość zalegania naprężeń własnych ściskających wywołanych zabiegiem umacniania,
- $l_{kr}$  – krytyczny rozmiar pęknięcia zmęczeniowego,
- $N_o$  – trwałość zmęczeniowa elementów bez umocnienia,
- $N_u$  – trwałość zmęczeniowa elementów po zabiegu umocnienia zgniotem powierzchniowym.

Trwałość zmęczeniową elementów z umocnieniem zgniotowym i bez takiego umocnienia można w przybliżeniu oszacować ilościowo, korzystając z tzw. prawa Parisa opisującego prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych [11]. Z technicznie wystarczającą dokładnością można określić trwałość



zmęczeniową elementu korzystając z dogodniejszej formuły opracowanej przez Frosta – Dugdala. Ma ona postać równania różniczkowego sformułowanego przy założeniu ciągłości funkcji wzrostu pęknięć zmęczeniowych (ze swej natury funkcja ta jest funkcją dyskretną):

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot l \cdot \sigma_a^m \quad (1)$$

gdzie:

- $\frac{dl}{dN}$  – przyrost wielkości (głębokości) pęknięcia zmęczeniowego odniesiony do przyrostu liczb cykli zmian naprężeń o amplitudzie  $\sigma_a$ ,
- $l$  – bieżąca wielkość (głębokość) pęknięcia zmęczeniowego,
- $C$  – stała zależna od proporcji kształtu pęknięcia zmęczeniowego,
- $m$  – wykładnik potęgowy; dla stali:  $m = 3$  [11].

Całkując zależność (1) można określić liczbę cykli zmian naprężeń  $N_o$  odpowiadającą przyrostowi pęknięcia od wielkości –  $l_o$  reprezentującej rozmiar (głębokość) defektu powierzchniowego, do wielkości  $l_{kr}$  odpowiadającej rozmiarowi pęknięcia, od którego rozwija się ono w sposób gwałtowny, prowadzący do pełnego zniszczenia elementu pod działaniem pojedynczych cykli zmian obciążenia:

$$N_o = \int_{l_o}^{l_{kr}} \frac{dl}{C \cdot l \cdot \sigma_a^m} \quad (2)$$

W przypadku, gdy wielkość naprężeń amplitudalnych jest stała, to:

$$N_o = \frac{1}{C \cdot \sigma_a^m} \int_{l_o}^{l_{kr}} \frac{dl}{l} = \frac{1}{C \cdot \sigma_a^m} \cdot \ln \frac{l_{kr}}{l_o} \quad (3)$$

Jeżeli pominąć stosunkowo krótki okres inkubacji pęknięcia zmęczeniowego, to  $N_o$  można traktować jako trwałość zmęczeniową elementu.

Przyjęcie stałości naprężeń amplitudalnych chociaż jest dużym uproszczeniem, jest uzasadnione w przypadku, gdy gabaryty rozpatrywanego przekroju nośnego elementu są duże w porównaniu z krytycznym rozmiarem pęknięcia –  $l_{kr}$ . W rzeczywistych warunkach na ogół, gdy zwiększa się bieżąca głębokość pęknięcia zmęczeniowego, to amplituda naprężeń zmiennych rośnie, nawet przy stałości obciążenia roboczego. Sukcesywnie zmniejsza się bowiem przekrój nośny oraz coraz silniejszy jest wpływ karbu wywołanego pęknięciem. Przyjęcie do rozważań stałości naprężeń amplitudalnych jest dodatkowo uzasadnione tym, że wspomniany sukcesywny przyrost naprężeń wraz z postępującym pękaniem zmęczeniowym, dotyczy w bardzo zbliżony sposób rozważanego elementu umocnionego zgniotem i takiego samego elementu maszynowego bez umocnienia. Określenie rzeczywistej zmienności  $\sigma_a$  jest bardzo utrudnione. Stąd też w rozważaniach porównawczych trwałości zmęczeniowej wspomniane uproszczenie jest uzasadnione.

W elemencie umocnionym przez nagniatanie powstała strefa naprężeń własnych ściskających o średniej wartości  $\sigma_w$ , sięgająca w głąb materiału na głębokość  $l_u$ . W związku z tym liczba cykli –  $N_u$  przy której pęknięcie zmęczeniowe rozwine się od wielkości –  $l_{ou}$ , poprzez głębokość umocnienia –  $l_u$  do rozmiaru krytycznego –  $l_{kr}$  będzie sumą dwóch całek:



$$N_u = \int_{l_{ou}}^{l_u} \frac{dl}{C \cdot l \cdot (\sigma_a - \sigma_w)^m} + \int_{l_u}^{l_{kr}} \frac{dl}{C \cdot l \cdot \sigma_a^m} \quad (4)$$

Czyli:

$$N_u = \frac{1}{C} \cdot \left( \frac{1}{(\sigma_a - \sigma_w)^m} \cdot \ln \frac{l_u}{l_{ou}} + \frac{1}{\sigma_a^m} \cdot \ln \frac{l_{kr}}{l_u} \right) \quad (5)$$

Przy czym:

$$|\sigma_w| < |\sigma_a|$$

Warunek ten jest spełniony w przypadku typowych metod nagniatania elementów pracujących przy dużej amplitudzie naprężeń od obciążeń roboczych. Głębokość umocnienia –  $l_u$  może być określona poprzez pomiar mikrotwardości na przekroju poprzecznym elementu [16], wartość naprężeń własnych można wyznaczyć metodą rentgenograficzną. Wielkość rozmiaru defektów powierzchniowych –  $l_o$  dla elementów nieumocnionych lub –  $l_{ou}$  dla umocnionych zgniotem, można wyznaczyć z wykorzystaniem pomiarów mikroskopowych. Obliczenie z zależności (5) liczby cykli  $N_u$  oraz z zależności (4) liczby cykli  $N_o$  wymaga wyznaczenia stałej C w toku pracochłonnych badań doświadczalnych. Wyznaczenie stałej C nie jest konieczne, jeśli operować ilorazem –  $\eta$  wymienionych liczb cykli:

$$\eta = \frac{N_u}{N_o} \quad (6)$$

Wartość wskaźnika –  $\eta$  może być traktowana jako miara skuteczności nagniatania z punktu widzenia poprawy właściwości zmęczeniowych elementów umocnionych poprzez nagniatanie. Wykorzystując zależność (4) i (5) po przekształceniu uzyskuje się:

$$\eta = \frac{\left( \frac{\sigma_a}{\sigma_a - \sigma_w} \right)^m \cdot \ln \left( \frac{l_u}{l_{ou}} \right) + \ln \left( \frac{l_{kr}}{l_u} \right)}{\ln \left( \frac{l_{kr}}{l_o} \right)} \quad (7)$$

Wielkość krytycznego pęknięcia zmęczeniowego –  $l_{kr}$ , występującą we wzorze (7), można określić znając krytyczną wartość intensywności naprężeń –  $K_{Ic}$  określaną metodami mechaniki pękania i traktowaną jako jedna z właściwości mechanicznych charakteryzujących dany materiał w określonym stanie strukturalnym. [8]:

$$l_{kr} = \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_a} \quad (8)$$

Z zależności (7) wynika, że wzrost trwałości zmęczeniowej uzyskanej w wyniku nagniatania będzie większy, gdy:

- bezwzględna wartość naprężeń własnych ściskających –  $\sigma_w$  będzie większa przy tej samej amplitudzie naprężeń roboczych –  $\sigma_a$ ,
- większa będzie głębokość umocnienia –  $l_u$ , na której ukonstruowane zostały naprężenia własne ściskające –  $\sigma_w$ ,
- materiał zastosowany na element umacniany zgniotem będzie cechował się dużą krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężeń –  $K_{Ic}$ , zapewniającą dużą wartość krytycznej wielkości pęknięcia zmęczeniowego –  $l_{kr}$ ,





- d) możliwie najmniejsze będą rozmiary defektów materiałowych, zwłaszcza powierzchniowych takich jak: rysy obróbcze, wtrącenia niemetaliczne, pęcherze gazowe i inne.

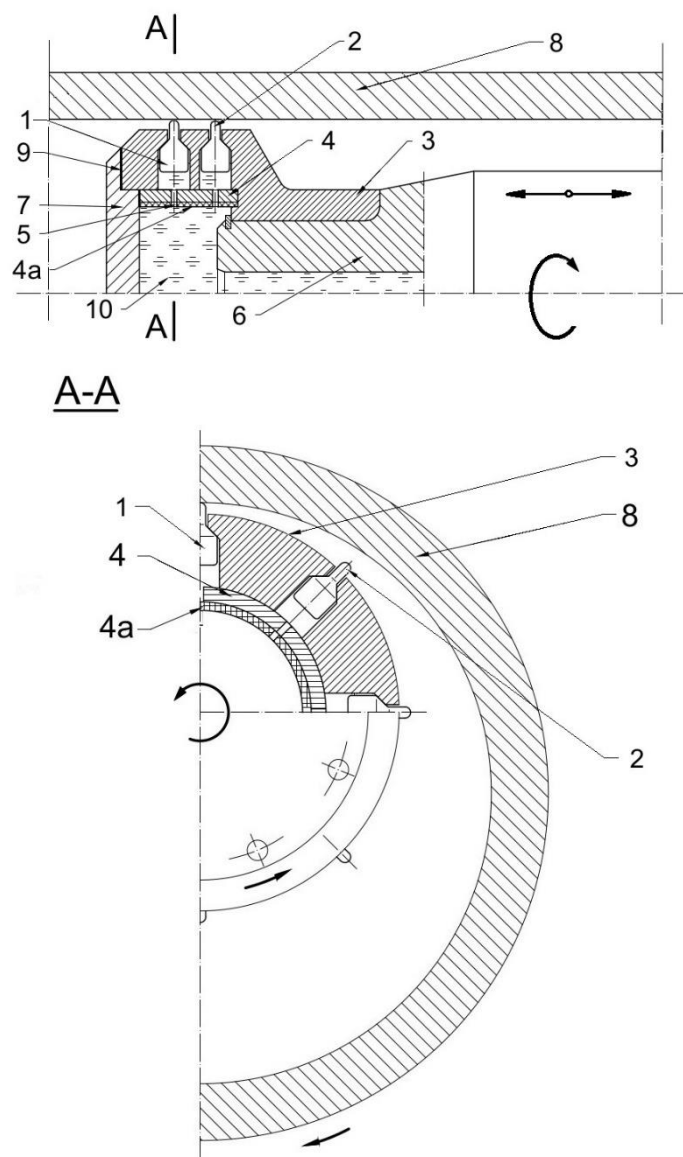
Wymagania a) i b) oraz częściowo d) w największym stopniu mogą być spełnione przy zastosowaniu dynamicznych metod nagniatania.

Oprócz głównego efektu użytkowego, jakim jest poprawa właściwości zmęczeniowych, nagniatanie umożliwia uzyskanie też innych efektów, korzystnych w warunkach różnych zastosowań. Dla elementów pracujących w warunkach tarcia, istotne jest zmniejszenie współczynnika tarcia poślizgowego w warunkach tarcia technicznie suchego nawet o 50% [17]. Dla elementów smarowanych korzystne jest uzyskiwanie w wyniku nagniatania, zwłaszcza dynamicznego, swoistego reliefu powierzchni w postaci kulistych lub elipsoidalnych płytkich zagłębień nachodzących na siebie, a spełniających funkcję kieszeni smarnych, zwiększających przyczepność smarów. Zwiększenie twardości warstwy wierzchniej elementów, uzyskiwane w wyniku obróbki zgniotem powierzchniowym, służy polepszeniu odporności na zużycie ściernie tak w warunkach smarowania jak i przy tarcu suchym [9]. Nagniatanie warstwy wierzchniej elementów, w przypadku których jako obróbkę wykańczającą zastosowano szlifowanie, powoduje wykruszanie ziaren ściernych, które często zostają przez ściernice zainkludowane w obrabianej warstwie. Usunięcie tych szkodliwych zanieczyszczeń powierzchni dodatkowo zwiększa walory tribologiczne warstwy wierzchniej elementów nagniatanych. Nagniatanie może być też wykorzystane dla przygotowania powierzchni do nałożenia różnego rodzaju pokryć ochronnych, w tym antykorozyjnych i przeciwciernych.

Istotnym warunkiem pełnej skuteczności zabiegów obróbki zgniotem jest zapewnienie efektywnego chłodzenia, aby nie dopuścić do niekorzystnych procesów rekrytalizacji struktury materiału umacnianych elementów i relaksacji naprężeń własnych wywołanych zabiegami. Należy mieć również na uwadze, że nadmierny stopień zgniotu może powodować pogorszenie efektów obróbki w postaci łuszczenia się warstwy o nadmiernym zgniocie i pogorszenie gładkości. Stąd też optymalne parametry zabiegu nagniatania należy ustalić w toku prób dla danego rodzaju materiału elementów umacnianych i dla danego sposobu obróbki zgniotem.

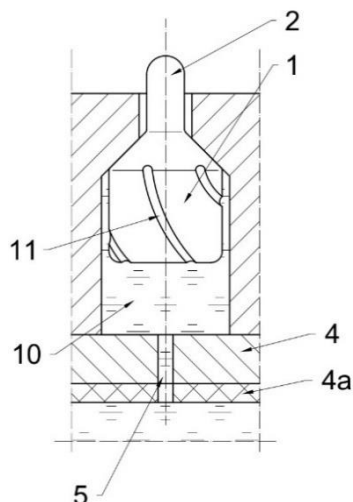
### **3. Urządzenie do dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindrów układów hydraulicznych**

Dla spełnienia częściowo sprzecznych wymagań odnośnie do dużej sztywności, plastycznej charakterystyki odkształceń, odporności na obciążenie zmienne i wysokiej jakości tribologicznej powierzchni wewnętrznej cylindrów siłowników hydraulicznych stosowanych, między innymi w układzie podpornościowym sekcji obudowy zmechanizowanej, pomocne może być urządzenie do dynamicznego nagniatania, którego koncepcję, chronioną patentem [18] opracowano w Politechnice Śląskiej i ITG KOMAG. Celem zwiększenia efektywności nagniatania urządzenie wykorzystuje dynamiczne oddziaływanie mechaniczne połączone z efektem uderzenia hydraulicznego [18]. Rysunek 2 ilustruje przekrój wzdłużny i poprzeczny zasadniczego zespołu urządzenia w wariantcie ze zdwojonym szeregiem bijaków umacniających, natomiast na rysunku 3 przedstawiono szczegół bijaka umacniającego ze spiralnymi rowkami.



Rys. 2. Głowica do dynamicznego nagniatania cylindrów hydraulicznych

1 – bijak, 2 – końcówka nagniatająca, 3 – oprawa, 4 – pierścień, 4a – pierścień regulacyjny, 5 – otwór, 6 – wał napędowy, 7 – pokrywa, 8 – obrabiany cylinder, 9 – uszczelka, 10 – ciecz chłodząco-smarująca



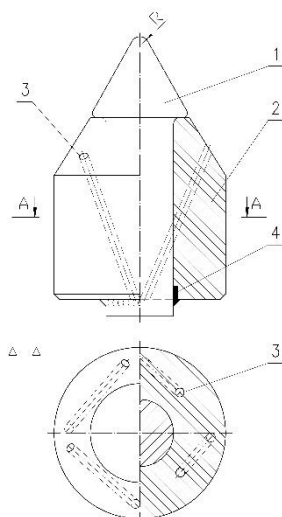
Rys. 3. Szczegół wariantu bijaka do dynamicznego nagniatania

1 – trzon bijaka, 2 – końcówka nagniatająca, 4 – pierścień z dyszami dławiącymi, 5 – dysza, 4a – pierścień regulacyjny, 11 – spiralne rowki dla obrotów bijaka, 10 – ciecz chłodząco-smarująca [18]

Opracowując projekt koncepcyjny urządzenia przedstawionego na rysunku 2 założono, że średnica obiegu bijaków stanowi  $25 \div 35$  % średnicy wewnętrznej obrabianego cylindra. Promień części roboczej bijaka powinien mieścić się w przedziale  $2 \div 3$  mm. Założono, że końcówki robocze bijaków będą uderzały o obrabianą powierzchnię cylindra z prędkością  $60 \div 100$  m/s.

Ciecz chłodząco-smarująca 10 o ciśnieniu  $200 \div 400$  kPa wypełnia przestrzeń wewnętrzną urządzenia. Pełni ona funkcję sprężyny hydraulicznej, której sztywność zależy od luzów osadzenia bijaków w oprawie i oporu hydraulicznego dysz wykonanych w pierścieniu 4. Opór ten jest regulowany poprzez obrót pierścienia regulacyjnego 4a. Po wyjściu ze strefy uderzenia bijaki wskutek działania siły odśrodkowej i ciśnienia podawanej cieczy wracają w położenie wyjściowe. Jednocześnie ciecz w przestrzeniach pod bijakami uzupełniana jest przez dysze w pierścieniu 4.

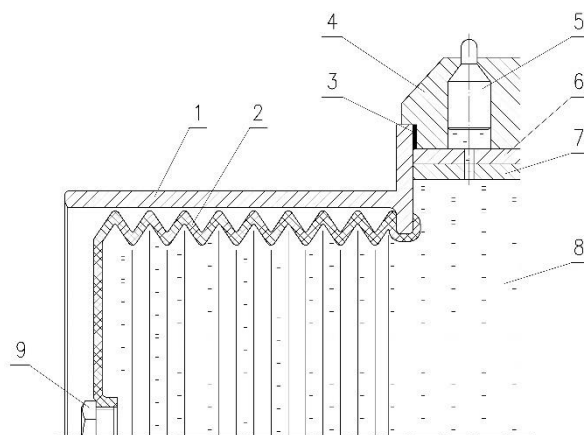
Impulsowy wypływ cieczy powoduje, dzięki spiralnym rowkom 11 na pobocznicach bijaków, powstanie reakcyjnego momentu obrotowego, dzięki któremu bijaki obracają się sukcesywnie względem osi (rys. 3). Służy to zapewnieniu równomierności zużywania się kulistych powierzchni roboczych bijaków. W toku nagniatania następuje stały obrót obrabianego cylindra 8 wokół osi i wzajemny ruch posuwisty urządzenia nagniatającego względem obrabianego cylindra. Bijaki umacniające należy wykonać ze stali o dużej twardości lub z węglików spiekanych. Rysunek 4 ilustruje alternatywną postać bijaków w wersji zespolonej.



Rys. 4. Wariant bijaka zespolonego

- 1 – część robocza z węglików spiekanych, 2 – osłona bijaka z brązu ołowiowego, 3 – otwory wchrowate, 4 – połączenia lutownicze lutem twardym

Część robocza bijaka zespolonego – 1 wykonana jest z węglików spiekanych, a osłona bijaka 2 z brązu ołowiowego zapewniającego korzystne warunki współpracy bijaków z oprawą wykonaną ze stali (poz. 3, rys. 2). Obracanie się bijaków wokół osi dla tego zespolonego wariantu zapewniają otwory 3, wykonane wchrowato względem osi bijaków. Dzięki budowie zespolonej zwiększa się średnia gęstość materiału bijaków, co sprawia, że siła uderzenia bijaka w trakcie obróbki nagniataniem dynamicznym jest większa, poprawiając skuteczność obróbki. Dzięki chłodzącemu działaniu cieczy odbierane jest ciepło, na które zamienia się praca odkształcania plastycznego materiału obrabianego cylindra. Działanie smarujące służy polepszeniu jakości powierzchni obrabianej oraz zmniejsza zużycie elementów układu. Zasilania urządzenia cieczą chłodząco-smarującą poprzez drążony wał, kłopotliwe w praktycznym stosowaniu, można zastąpić stosując, na przykład, elastyczny pojemnik przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Alternatywny sposób zasilania głowicy dynamicznego nagniatania cieczą chłodząco-smarującą

- 1 – tuleja ochronna, 2 – harmonijkowy zasobnik cieczy, 3 – uszczelnienie, 4 – oprawa bijaków, 5 – bijak, 6 – pierścień z dyszami dławiącymi, 7 – pierścień regulujący dławienie dysz, 8 – emulsja wodno-olejowa, 9 – korek do napełniania zasobnika cieczy



Pojemnik 2 jest okresowo napełniany cieczą po odkręceniu korka 9 [19]. Podczas pracy urządzenia, wypływ cieczy ze strefy pod bijakami sprawia, że ciecz z pojemnika jest sukcesywnie wyciągana, a zasobnik pod wpływem ciśnienia atmosferycznego składa się w harmonijkę. Tuleja 1 zabezpiecza pojemnik przed utratą stateczności w czasie wirowania. Ponadto masowy moment bezwładności pojemnika z cieczą i tulei 1 stabilizuje pracę całego układu nagniatającego.

Impulsowy wypływ cieczy ze strefy pod bijakami w trakcie pracy urządzenia sprawia, że w wyniku nagniatania dynamicznego wspomaganego efektem uderzenia hydraulicznego uzyskuje się zwiększoną głębokość zgniotu powierzchniowego i wzrost wartości średniej naprężeń własnych ściskających powstających w umacnianej warstwie. Powoduje to znaczny przyrost trwałości zmęczeniowej umacnianych cylindrów. Parametry zabiegu nagniatania mogą być regulowane w bardzo szerokich granicach. Opracowując koncepcję urządzenia przyjęto, że posuw wzdłużny głowicy przypadający na jeden obrót cylindra, wynosi  $1 \div 2$  mm. Optymalne parametry pracy urządzenia do nagniatania, takie jak: prędkość obrotowa głowicy nagniatającej i obrabianego cylindra, prędkość posuwu wzdłużnego oraz stopień dosunięcia głowicy do obrabianej powierzchni, krotność przejść obróbczych, należy dobrać na podstawie prób w zależności od średnicy wewnętrznej cylindra, rodzaju i twardości materiału jak też oczekiwanego końcowego efektu obróbki zgniotem. Wstępnie parametry zabiegu należy tak dobrać, aby cała obrabiana powierzchnia cylindra została pokryta zachodzącymi na siebie elipsoidalnymi mikro odciskami o zadawalającej wysokości mikrochropowatości i stopniu pokrycia.

Zabieg dynamicznego nagniatania może być stosowany, zarówno w produkcji nowych cylindrów, jak też w procesie regeneracji cylindrów, dla przywrócenia pełnej zdatności użytkowej po określonym stopniu zużycia eksploatacyjnego. Realizacja zabiegu może się odbywać z wykorzystaniem odpowiedniej tokarki po jej adaptacji. Zabieg wykonywany może być przy poziomym usytuowaniu osi cylindra, jak również w układzie pionowym po adaptacji np. frezarki pionowej lub dużej wiertarki słupowej.

#### 4. Podsumowanie

Polepszenie wielu cech użytkowych cylindrów siłowników hydraulicznych, zwłaszcza stosowanych w układzie podpornościowym sekcji obudowy zmechanizowanej można uzyskać wykorzystując zabieg nagniatania, przy dużej jego intensywności. W szczególności uzyskuje się znaczną poprawę odporności na procesy zmęczeniowe i niszczące wpływy tribologiczne występujące w trakcie użytkowania siłowników hydraulicznych. Tym samym zabieg nagniatania powierzchni cylindra przyczynia się do większego bezpieczeństwa użytkowania siłowników. Nie bez znaczenia jest również większa trwałość węzłów uszczelniających zapobiegająca zanieczyszczeniu środowiska przez wyciek emulsji wodno-olejowej.

Wskaźnik  $\eta$  oraz wytyczne szczegółowo sformułowane w rozdziale 2 umożliwiają optymalny dobór parametrów warstwy wierzchniej cylindra hydraulicznego, wzmocnionej przez nagniatanie ze względu na kryteria uzyskania zwiększonej trwałości zmęczeniowej.

Urządzenie do przemysłowej realizacji dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindra siłownika hydraulicznego, którego koncepcję zaprezentowano w niniejszym rozdziale, dzięki wykorzystaniu zjawiska uderzenia hydraulicznego, umożliwia uzyskanie większej głębokości zgniotu powierzchniowego i powstanie w umacnianej warstwie strefy naprężeń własnych ściskających o znacznie korzystniejszych parametrach. Szczegółowe badania dotyczące optymalnego doboru parametrów pracy omawianego urządzenia, uzyskiwanej głębokości zgniotu powierzchniowego oraz wpływu operacji nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindra na właściwości użytkowe siłownika



hydraulicznego zostaną przeprowadzone po wykonaniu prototypu urządzenia. Ich wyniki będą przedmiotem odrębnego opracowania.

Jakkolwiek problem znaczenia dynamicznego nagniatania powierzchni elementów maszyn przedstawiono w niniejszej pracy na przykładzie siłowników hydraulicznych sekcji obudowy zmechanizowanej, to możliwości korzystnego zastosowania tego zabiegu znacznie wykraczają poza górnictwo węgla kamiennego. Wymagania dotyczące zwiększonej trwałości zmęczeniowej oraz korzystnych cech tribologicznych powierzchni cylindra współpracującej z węzłami uszczelniającymi są formułowane również w odniesieniu do siłowników hydraulicznych użytkowanych w innych gałęziach gospodarki. Praktyczne zastosowanie przedstawionych wytycznych i wariantowych urządzeń do dynamicznego nagniatania powierzchni wewnętrznej cylindrów może więc przynieść wiele istotnych efektów technicznych i ekonomicznych oraz posłużyć wzrostowi bezpieczeństwa użytkowania siłowników hydraulicznych.

## Literatura

1. Lech T.: Pressure pulsations in power hydraulics systems. *Min. Mach.* 2020. 4 s. 34-42
2. Szurgacz D., Więcek P., Brodny J.: Badania nieszczelności wewnętrznej stojaka zmechanizowanej obudowy ścianowej. *Bezp. Pr. Ochr. Śr. Gór.* 2020. 8 s. 2-7
3. Turczyński K., Gerlich J., Czubaszek J., Nowaczewski D.: Stand tests of a powered roof support after a long time of operation. Case study. *Min. Mach.* 2020. 3 s. 22-33
4. Madejczyk W.: Badania stanowiskowe sekcji obudowy zmechanizowanej oraz jej elementów. Gliwice: Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2019
5. PN-EN 1804-1:2012+A1 Maszyny dla górnictwa podziemnego. Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej. Część 2: Stojaki i pozostałe siłowniki.
6. Kolman R.: Mechaniczne wzmacnianie powierzchni części maszyn. Warszawa: WNT 1965.
7. Szulc S., Stefko A.: Obróbka powierzchni części maszyn. Warszawa: WNT, 1976.
8. Łunarski J.: Nowe technologie nagniatania i ich zastosowanie w przemyśle elektromaszynowym. Rzeszów: Wydawnictwo ODK – SIMP, 1986.
9. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. Warszawa: WNT 1987.
10. Czechowski F., Kalisz J.: Wybrane aspekty nagniatania, *Mechanik*, nr 5÷6, 2015.
11. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. Warszawa: WNT 1972.
12. Dobrzański L. A.: Podstawy kształtowania struktury i własności materiałów metalowych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
13. Bogdanowicz Z., Nasiłowska B.: Wpływ kulowania na trwałość zmęczeniową stali austenitycznej 1.4593 spawanej metodą TIG, XXVII Sympozjum PKM Zakopane, 22 – 26 września 2015.
14. Kamiński S., Kowalski M., Łagoda T., Owiński R.: Wpływ naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową stali poddanych obróbce kulowania rozproszonego śrutem twardym, XXVII Sympozjum PKM Zakopane, 22 – 26 września 2015.
15. Neimitz A.: Mechanika pękania. Warszawa: PWN 1998.
16. Diel G. D.: Opriedielenije napriazienij w płasticeskoj obłasti po razpriedieleniju twierdosti. Moskwa: Maszynostrojenije, 1971.



17. Grzesik W.: Nagniatanie utwardzonych elementów maszyn. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 2019. 3÷4.
18. Szweđa S., Mikuła S., Mikuła J.: Urządzenie do nagniatania powierzchni wewnętrznych cylindrów siłowników hydraulicznych, zwłaszcza w górniczej obudowie zmechanizowanej. Patent. Polska, nr 233272. Opubl. 03.06.2019.
19. Peczkis G., Mikuła J., Mikuła S.: Tarcza hydrauliczna do dynamicznego nagniatania elementów maszyn z regulacją intensywności zgniotu powierzchniowego. Zgłoszenie patent. Polska, nr P.437079. zgł.19.02.2021.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.9>

## Metoda pomiarowa weryfikacji wyników symulacji rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem woltomierza elektrostatycznego

**Marcin Talarek** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Andrzej Niedworok** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Łukasz Orzech** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale zaprezentowano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi woltomierz elektrostatyczny, umożliwiające weryfikację wyników obliczeń numerycznych pola elektrycznego wokół układów izolacyjnych. Zaprezentowano model izolatora i przedstawiono porównanie wyników symulacji z pomiarami potencjału pola elektrycznego.

Słowa kluczowe: potencjał elektryczny, modelowanie pola elektrycznego, izolator

### Measurement method for verification of electric field simulation results with using of the electrostatic voltmeter

**Abstract:** In chapter described test stand including electrostatic voltmeter, which enables verification of the numerical results of the electric field distribution around insulation systems, is presented in this paper. An insulator model is presented and simulation results are compared with electric field potential measurements.

Keywords: electric potential, electric field modelling, insulator

## 1. Wprowadzenie

Modelowanie komputerowe zjawisk fizycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych stało się w ostatnich latach powszechnie stosowanym narzędziem, wspomagającym proces projektowania [1, 2]. Modele komputerowe mogą być przydatne w całym, szerokim spektrum analiz inżynierskich, na przykład w ocenie zagrożeń związanych ze zjawiskiem elektryczności statycznej w przestrzeniach zagrożonych wybuchem [3, 4]. Niezwykle istotną kwestią, biorąc pod uwagę zastosowanie wyników symulacji komputerowych, staje się zagadnienie weryfikacji opracowanych wirtualnie modeli. Każdy model stanowi pewne uproszczenie rzeczywistości, w związku z czym wyniki obliczeń numerycznych są obciążone błędem. Świadomość tych błędów, jak również umiejętność ich prawidłowego oszacowania, będzie decydujące dla użyteczności opracowanych modeli oraz zgodne z przeznaczeniem i efektywnym wykorzystaniem wyników symulacji. W niniejszym rozdziale zaprezentowano prostą metodę weryfikacji obliczeń komputerowych rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem miernika pola, na przykładzie izolatora. W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi miernik pola elektrycznego Trek, model 341B.

## 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zostało zaprezentowane na rysunku 1. Składa się ono z zasilacza wysokiego napięcia prądu stałego, woltomierza elektrostatycznego Trek, model 341B oraz skanera potencjału. Skaner potencjału umożliwia przemieszczanie sondy kompensacyjnej, współpracującej z woltomierzem elektrostatycznym, określonym krokiem w osiach poziomych x, y płaszczyzny pomiarowej, tworząc w ten sposób siatkę punktów pomiarowych [5]. W niniejszym eksperymencie pomiary potencjału



elektrycznego były wykonywane w jednej osi wzdłuż linii na określonym odcinku pomiarowym (rys. 1). Zasada działania sondy kompensacyjnej (rys. 2) oparta jest na podawaniu na obudowę sondy napięcia równego napięciu mierzonemu, w wyniku czego układ pomiarowy nie narusza stanu energetycznego rozpatrywanego obiektu mierzonego. Poniżej zestawiono podstawowe dane techniczne woltomierza elektrostatycznego Trek, model 341B:

- zakres pomiarowy: 0 do  $\pm 20$  kV (DC lub peak AC),
- dokładność:  $\pm 0,1\%$  zakresu pomiarowego,
- szybkość odpowiedzi (10% do 90%): poniżej 5 ms dla 20 kV,
- stabilność temperaturowa: poniżej 200 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 9. Widok stanowiska badawczego



Rys. 10. Zastosowana sonda kompensacyjna do pomiaru potencjału pola elektrycznego

### 3. Analizowany model izolatora

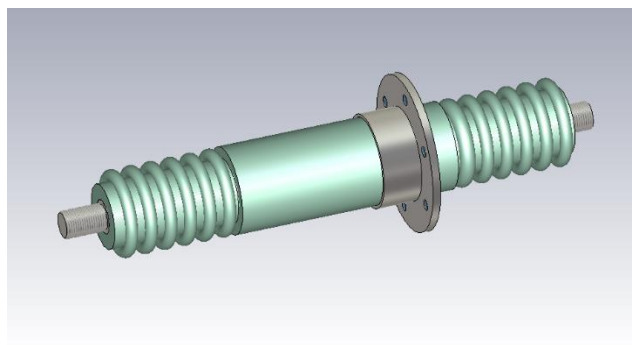
W ramach eksperymentu porównano wyniki symulacji komputerowych pola elektrycznego z wynikami pomiarów potencjału, wykorzystując stanowisko badawcze z miernikiem pola elektrycznego. Na rysunku 3 zaprezentowano rzeczywisty obiekt badań (izolator) oraz poglądowy widok jego modelu wirtualnego. Rysunek 4 prezentuje siatkę elementów skończonych zastosowaną w obliczeniach numerycznych. Rozkład pola elektrycznego wokół izolatora stanowi istotne zagadnienie inżynierskie z punktu widzenia projektowego. Podstawowym warunkiem odpowiedniego zaprojektowania układu izolacyjnego wysokiego napięcia jest taki rozkład pola natężenia pola elektrycznego wokół izolatora, aby w każdym punkcie układu nie zostało przekroczone dopuszczalne natężenie pola i nie doszło do przebicia wytrzymałości dielektrycznej izolacji [6, 7, 8]. Kategorycznym warunkiem komputerowego wspomaganie działań projektowo-konstrukcyjnych jest posługiwanie się modelami, a więc właściwie określonymi systemami o różnym stopniu uszczegółowienia.

W poszukiwaniu rozwiązań optymalnych znaczenie praktyczne mają te modele, które pozwalają symulować działanie projektowanych układów [9].

Zaprojektowane w eksperymencie stanowisko badawcze umożliwia pomiar potencjału elektrycznego, zaś korzystając z podstawowych zależności można w prosty sposób obliczyć rozkład natężenia pola elektrycznego. W ramach przeprowadzonego eksperymentu zastosowano napięcie robocze wynoszące 7200 V.

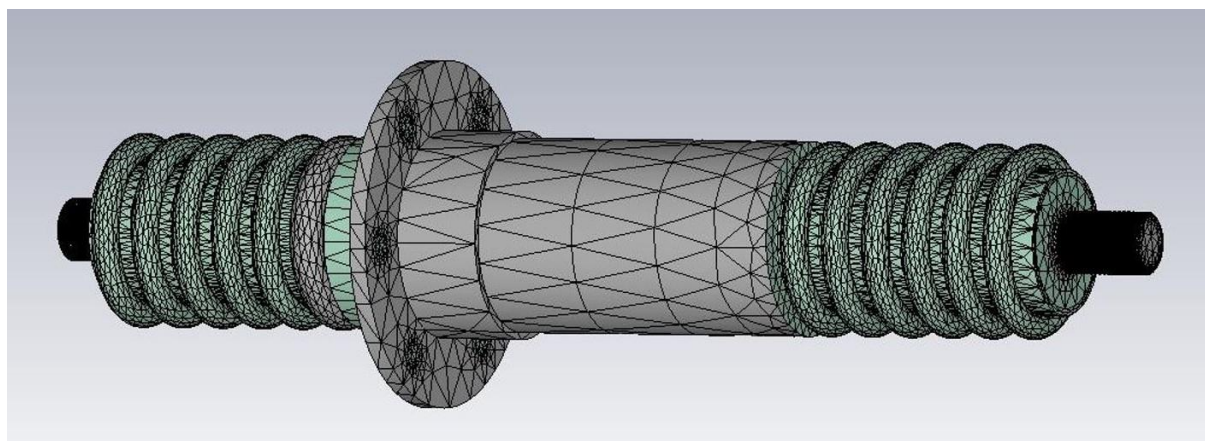


obiekt rzeczywisty



model wirtualny

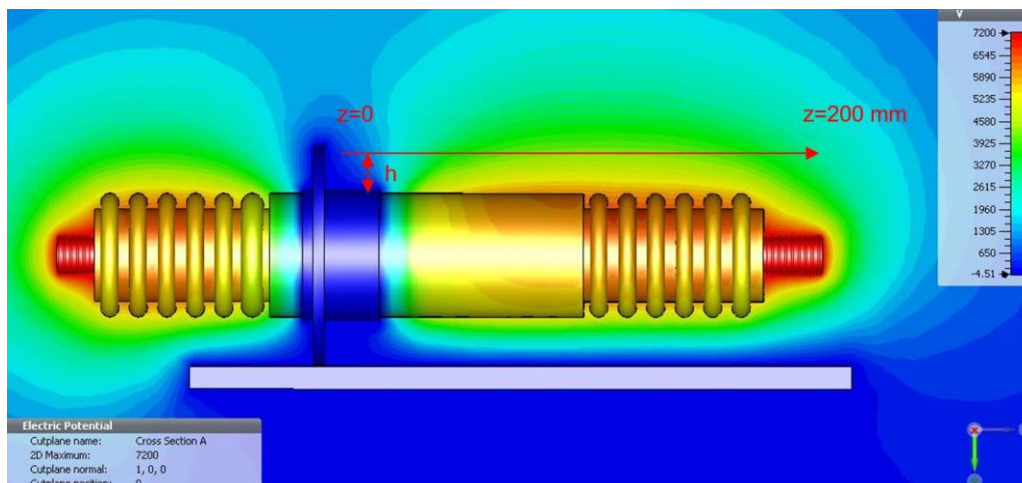
Rys. 11. Widok obiektu badanego



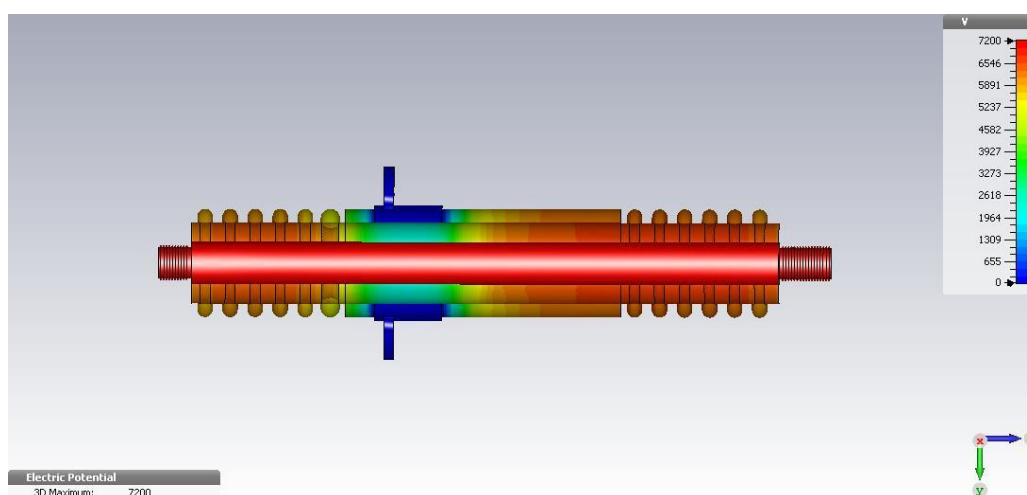
Rys. 12. Siatka elementów skończonych modelu izolatora

#### 4. Wyniki badań

Rezultaty przeprowadzonych obliczeń numerycznych z wykorzystaniem zbudowanego modelu siatki elementów skończonych analizowanego izolatora zostały porównane z wynikami pomiarów potencjału w dwóch odległościach od izolatora wzdłuż linii równoległej do obiektu badań, jak zaprezentowano na rysunku 5. Rysunek prezentuje jednocześnie rezultaty obliczeń numerycznych w zakresie wyznaczenia rozkładu potencjału pola elektrycznego wokół izolatora. Rezultaty obliczeń numerycznych w przekroju izolatora zaprezentowano dodatkowo na rysunku 6.

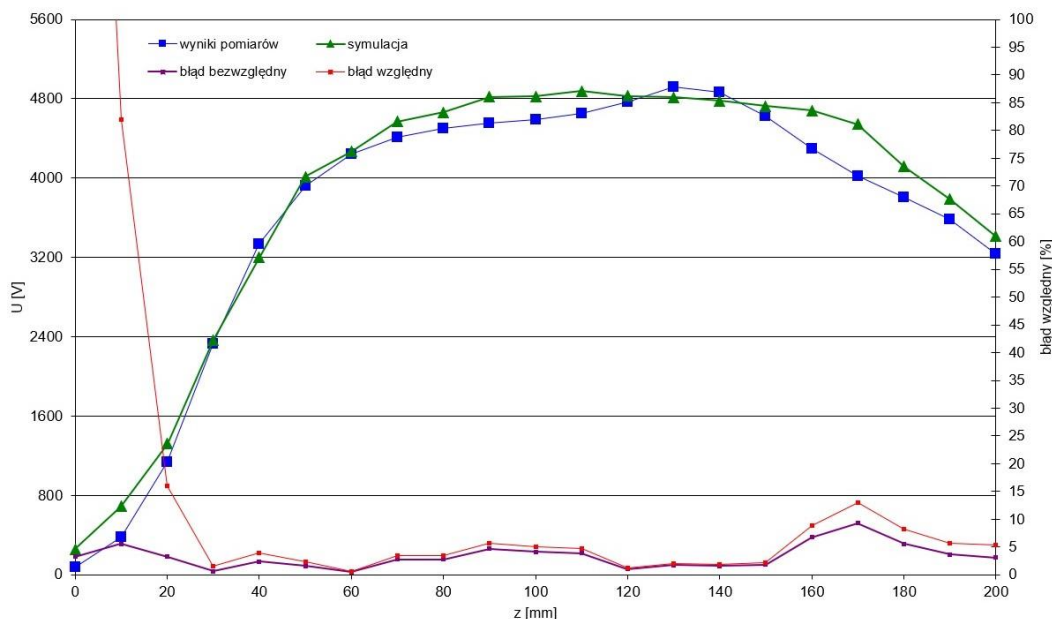


Rys. 13. Zakres walidacji wyników symulacji komputerowych

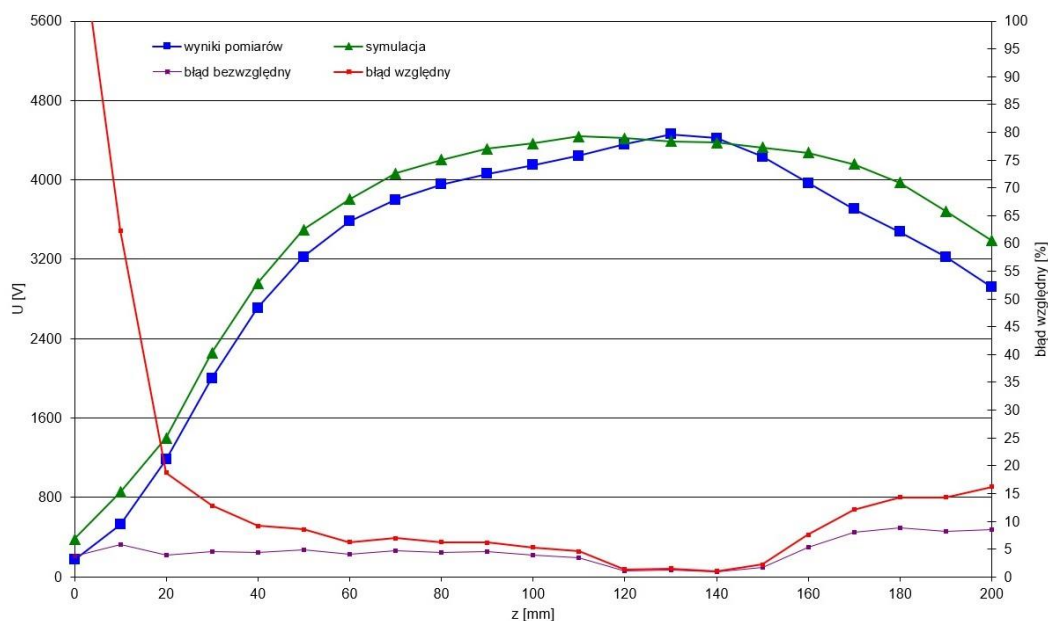


Rys. 14. Rozkład potencjału wewnątrz izolatora w przekroju osi x

Zmierzono potencjał pola elektrycznego, z wykorzystaniem miernika pola Trek model 341B, wzdłuż linii zaprezentowanej na rysunku 5, od  $z = 0$  do  $z = 200$  mm. Pomiary przeprowadzono w dwóch odległościach od izolatora:  $h = 10$  mm i  $h = 15$  mm. Wyniki pomiarów porównano z wynikami symulacji komputerowych. Wynik porównania zaprezentowano na rysunkach 7 i 8.



Rys. 15. Wyniki walidacji symulacji komputerowych w odległości 10 mm od izolatora



Rys. 16. Wyniki walidacji symulacji komputerowych w odległości 15 mm od izolatora

## 5. Podsumowanie

W rozdziale zaprezentowano prostą metodę weryfikacji wyników obliczeń numerycznych rozkładu potencjału pola elektrycznego. Do tego celu zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi miernik pola elektrycznego Trek, model 341B wraz z sondą kompensacyjną, umożliwiającą pomiar w sposób nie naruszający stanu energetycznego obiektu badanego.



Uzyskany w wyniku przeprowadzonej walidacji błąd – zdefiniowany jako różnica między wynikiem symulacji a wynikiem pomiaru – w najgorszym przypadku wynosi 522 V dla  $h = 10$  mm i 497 V dla  $h = 15$  mm, co daje błąd względny na poziomie około 15%. Założono, że dalsze badania modelowe prowadzone są z nie gorszą dokładnością. Ponadto kształt krzywej potencjału uzyskany w wyniku badań symulacyjnych pokrywa się z wynikami badań laboratoryjnych, co jest również istotne. Niezadowalające wyniki z punktu widzenia błędu względnego uzyskano w pobliżu elementu metalowego izolatora od  $z = 0$  mm do  $z = 20$  mm, stąd wniosek, iż należy z pewną ostrożnością analizować wyniki uzyskane w pobliżu elementów metalowych. W obszarach tych występują największe zmiany potencjału elektrycznego.

Zaprojektowane stanowisko badawcze pozwala na precyzyjny pomiar potencjału pola elektrycznego w osiach poziomych  $x$ ,  $y$  płaszczyzny pomiarowej, tworząc w ten sposób siatkę punktów pomiarowych, jednak z punktu widzenia potrzeby użytkowników i projektantów urządzeń wysokiego napięcia może wystąpić możliwość realizacji pomiarów w terenie. Laboratorium Badań Stosowanych dysponuje możliwościami przeprowadzenia mobilnych pomiarów rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem miernika pola elektrycznego Trek, model 341B [10], tj. w zakresie mierzonego napięcia  $\pm 20$  kV.

Symulacje komputerowe mogą być użyteczne w procesie projektowania, jak również w innych obszarach analiz inżynierskich, wyłącznie pod warunkiem weryfikacji modelu obliczeniowego oraz oszacowania niepewności uzyskanych wyników obliczeń numerycznych.

Wyniki symulacji, zaprezentowane w rozdziale, uzyskano za pomocą oprogramowania CST EM STUDIO wersja edukacyjna, dostarczonego przez CST – Computer Simulation Technology AG.

## Literatura

1. Darie E., Pesci R.: The modelling of the electric field generated by the electrical transport lines, *Energy Procedia* 85 (2016), 170-177
2. Adamczyk B., Florkowska B.: Analiza warunków sterowania pola elektrycznego w wysokonapięciowych izolatorach przepustowych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 30/2011
3. Glor M.: Modelling of Electrostatic Ignition Hazards in Industry: too Complicated, not Meaningful or only of Academic Interest?, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 31, 2013
4. Talarek M.: Zastosowanie modelowania komputerowego pola elektrycznego do oceny zagrożeń związanych ze zjawiskiem elektryczności statycznej, *Maszyny Górnicze* Nr 4/2014, s. 11-14
5. Talarek M.: Analiza rozwiązań technicznych układów izolatorów z propozycją usprawnień w zakresie zapobiegania przebiegom układów elektroizolacyjnych, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, praca statutowa (materiały niepublikowane)
6. Gacek Z., Szadkowski M.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna we współczesnej elektroenergetyce, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016
7. Florkowska B.: Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 2003
8. Furgał J.: Układy izolacyjne urządzeń stacji wysokiego napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 1995
9. Gacek Z.: Technika Wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
10. <http://www.trekinc.com> (dostęp: 02.03.2021)



## Indeks autorów

Rafał Baron

Przemysław Deja

Andrzej Figiel

Paweł Friebe

Piotr Hylla

Daniel Kowol

Piotr Matusiak

Krzysztof Mazurek

Jarosław Mikuła

Stanisław Mikuła

Andrzej Niedworok

Łukasz Orzech

Marcin Skóra

Krzysztof Stankiewicz

Micha Szelka

Stanisław Szweda

Marek Szyguła

Marcin Talarek

Mariusz Woszczyński



## **Załącznik reklamowy**

- 1. System zraszania mgłowego**
- 2. Wpływ środowiska na obiekty budowlane**
- 3. Technologia wirtualnej rzeczywistości (VR)**
- 4. Urządzenia typu KOMAG do odzysku surowców z odpadów pogórnich**
- 5. Badania wpływu czynników procesowych na skuteczność wzbogacania w przemysłowych osadzarkach pulsacyjnych**

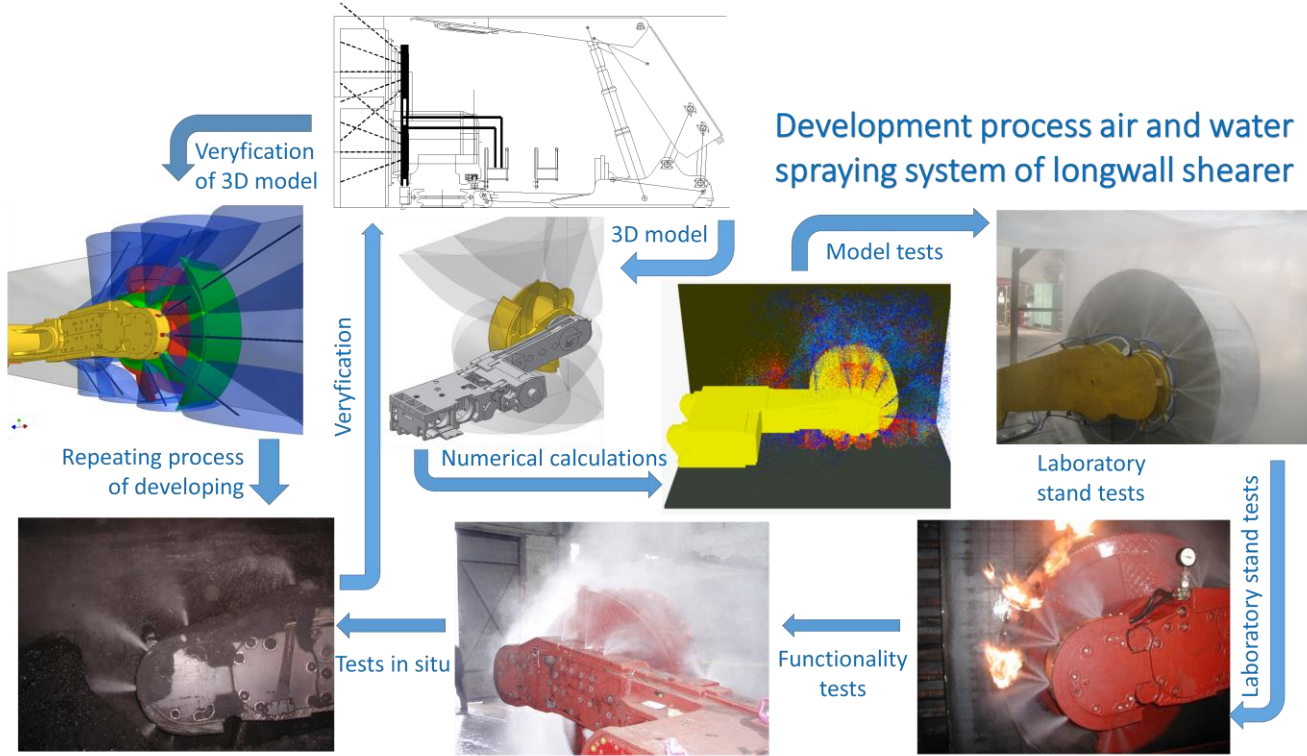
# KOMEKO-IMTech 2021

21. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna

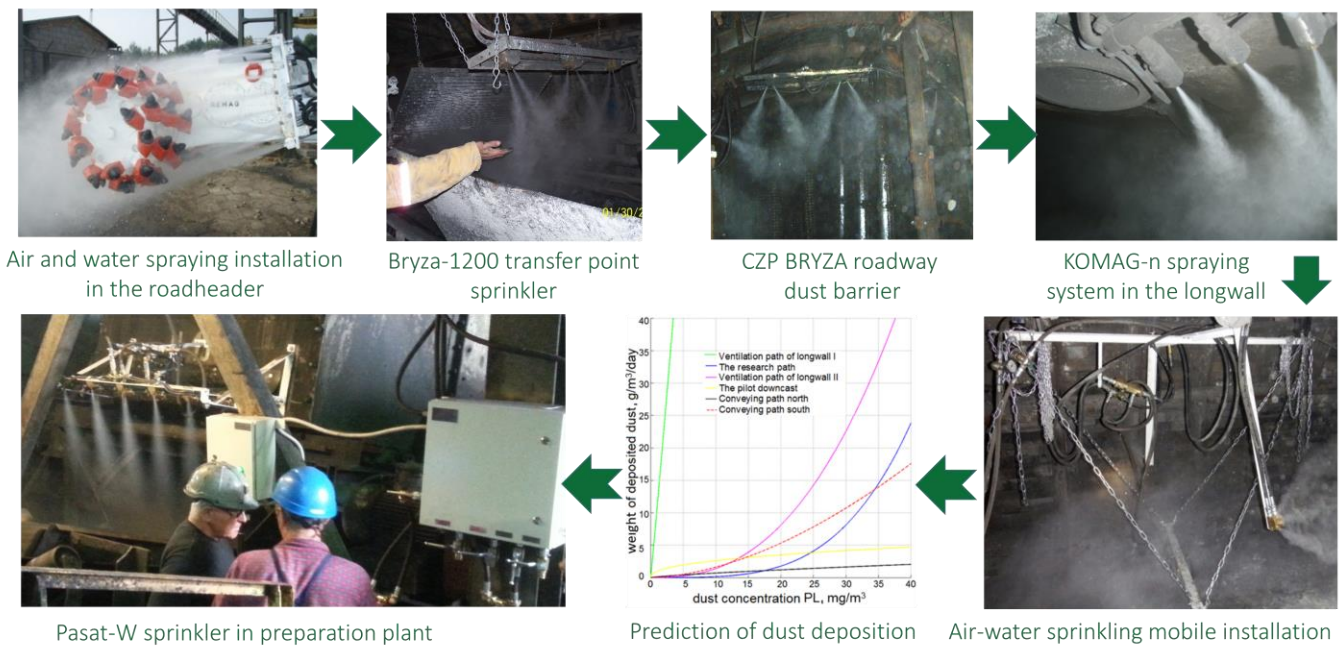
INNOWACYJNE TECHNIKI I TECHNOLOGIE PRZEMYSŁOWE PRZYJAZNE DLA ŚRODOWISKA  
BEZPIECZEŃSTWO – JAKOŚĆ – EFEKTYWNOŚĆ

Development of research work in the air-water spraying area for reduction of methane and coal dust explosion hazard as well as for dust control in the Polish mining industry

Dariusz Prostański, dprostanski@komag.eu



## The use of design methods for a spraying system in other places in the mine

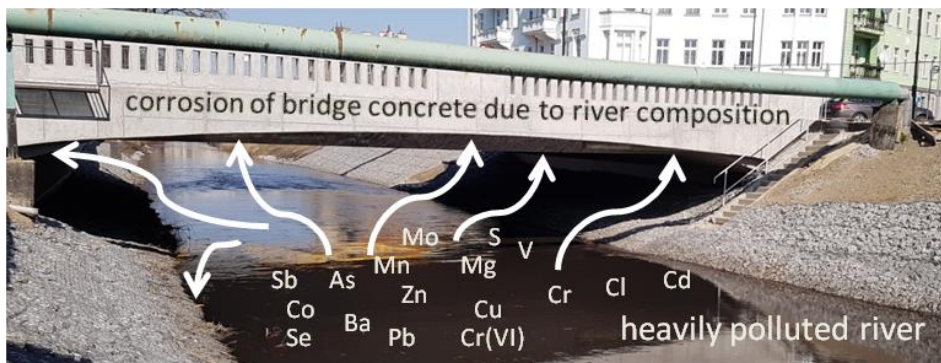




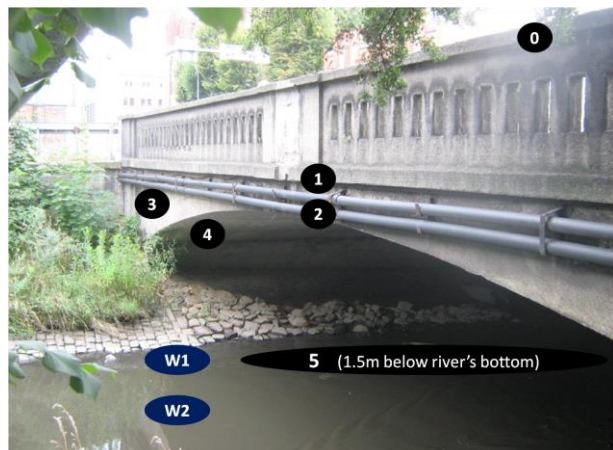
## Wpływ środowiska na obiekty budowlane

Badanie zawartości metali w rzece, osadzie dennym i betonie mostu

BEATA GRYNKIEWICZ-BYLINA (ITG KOMAG), BARBARA SŁOMKA-SŁUPIK (Politechnika Śląska)



Interakcja środowiska i obiektów budowlanych jest nieodłączna. Sorbowane w betonie metale świadczą o zanieczyszczeniach, które są i były w rzece wiele lat wstecz. W betonie mostu wniknęły wskutek procesów transportowych podciągania kapilarnego, ale też i powodzi. W pracy przedstawiono badania składu wyciągów wodnych betonu z różnych części 100 letniego mostu nad Kłodnicą w Gliwicach oraz badania wody i osadu dennego z tejże rzeki.



Całkowita zawartość metali w odciawkach z próbek betonu pobranych z mostu nad rzeką Kłodnicą w Gliwicach, w mg/kg.

Metal contents	Specimen 0	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$
Mg	0.133 ± 0.011	0.367 ± 0.009	<b>1.114 ± 0.042</b>	0.035 ± 0.042	0.015 ± 0.007	0.030 ± 0.013
Co	< 0.001	< 0.001	<b>0.008 ± 0.001</b>	< 0.001	< 0.001	0.003 ± 0.001
Se	0.004 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.003 ± 0.001	0.004 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.003 ± 0.001
Sn	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.002
V	< 0.001	0.017 ± 0.009	<b>0.061 ± 0.002</b>	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Ni	< 0.001	< 0.001	0.007 ± 0.001	0.005 ± 0.001	< 0.001	<b>0.097 ± 0.001</b>
Mo	<b>0.144 ± 0.003</b>	0.007 ± 0.001	0.007 ± 0.001	0.003 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.003 ± 0.001
Sb	<b>0.005 ± 0.002</b>	<b>0.005 ± 0.002</b>	<b>0.005 ± 0.001</b>	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001
Cr	<b>0.191 ± 0.001</b>	<b>0.116 ± 0.001</b>	<b>0.210 ± 0.005</b>	0.035 ± 0.004	0.075 ± 0.002	0.048 ± 0.002
Cu	<b>0.474 ± 0.031</b>	0.240 ± 0.014	0.086 ± 0.004	0.125 ± 0.008	0.022 ± 0.011	<b>0.591 ± 0.003</b>
Ba	0.032 ± 0.002	0.045 ± 0.001	0.060 ± 0.002	<b>0.187 ± 0.010</b>	0.036 ± 0.019	0.060 ± 0.002
Hg	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Mn	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Zn	< 0.001	< 0.001	< 0.001	<b>0.003 ± 0.001</b>	< 0.001	0.007
Pb	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Cr (VI)	<b>0.176 ± 0.004</b>	<b>0.097 ± 0.001</b>	<b>0.207 ± 0.008</b>	0.024 ± 0.001	0.013 ± 0.009	<b>0.060 ± 0.001</b>
Fe	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
As	0.004 ± 0.001	0.021 ± 0.003	<b>0.039 ± 0.001</b>	0.004 ± 0.001	< 0.001	0.004 ± 0.001
Cd	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Metal	Woda z rzeki - W1		Osad denny - W2	
	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$	$x_{ij} \pm s_{x_i}$
Mg	151973 ± 4209	150631 ± 6780		
Co	1.088 ± 0.040	1.159 ± 0.037		
Se	2.185 ± 0.829	2.125 ± 1.045		
Sn	0.013 ± 0.020	0.003 ± 0.001		
V	± 0.072	<b>0.607 ± 0.067</b>		
Ni	< 1	< 1		
Mo	2.313 ± 0.153	2.237 ± 0.173		
Sb	1.784 ± 0.104	2.221 ± 0.084		
Cr	< 1	< 1		
Cu	1.003 ± 0.392	<b>3.217 ± 0.274</b>		
Ba	61.256 ± 7.287	61.579 ± 8.677		
Hg	< 0.0075	< 0.001		
Mn	293.3 ± 26.7	<b>411.9 ± 11.9</b>		
Zn	4.785 ± 0.134	<b>7.799 ± 1.713</b>		
Pb	<b>0.022 ± 0.001</b>	< 0.001		
Cr (VI)	< 0.075	< <b>0.091</b>		
Fe	< 1	< 1		
As	<b>1.161 ± 0.147</b>	1.057 ± 0.255		
Cd	0.009 ± 0.010	<b>0.029 ± 0.006</b>		

Całkowita zawartość metali (µg/l) w wodzie W1 oraz w przefiltrowanej zawieszynie W2 z rzeki Kłodnicy.



### Wyniki badań wykazały, że:

- większość pierwiastków ma porównywalne stężenie w wodzie płynącej oraz w wodzie z dynamicznego ługowania osadu dennego. Oznacza to, że niektóre pierwiastki zostały wchłonięte w zawieszinie mineralnej, a inne pozostają w wolnej postaci w wodzie płynącej. Wanał, miedź, mangan, cynk, chrom (VI) i kadm niewątpliwie należą do pierwiastków, które łatwiej wchłaniały się w zawieszinę. Ołów jednak wydawał się trudniejszy do wchłonięcia do osadu dennego, dlatego jego stężenie było wyższe w wodzie płynącej niż w osadzie dennym po wymywanianiu dynamicznym.
- większość metali została wchłonięta przez beton tuż nad głównym nurtem rzeki (próbka 2), co wskazuje na przenoszenie się pierwiastków w wyniku parowania i kondensacji wody rzecznej. Istnieje przypuszczenie, że metale znajdujące się w poręczy mostu mogą pochodzić również ze spalin samochodowych
- najwyższą zawartość magnezu, kobaltu, wanału, arsenu i chromu stwierdzono w próbce 2. Najwyższą zawartość niklu stwierdzono w próbce 5. Najwyższą zawartość molibdenu występowała w próbce 0. Zawartość antymonu i chromu była najwyższa w próbkach 0, 1 i 2. W próbkach 0 i 5 zawartość miedzi była większa niż w pozostałych próbkach. Najwięcej baru i cynku stwierdzono w próbce 3. Najmniej chromu (VI) występowało w próbkach 3 i 4, a najwięcej w próbkach 0 i 2
- stężenie magnezu w rzece na przestrzeni lat i obecnie jest nadal wysokie i było również wysokie w betonie, w szczególności widać to w próbkach 2, 1 i 0
- testy betonu, zwłaszcza próbek 0 i 5, wykazały podwyższoną zawartość miedzi pochodzącą sprzed wielu lat w wodach rzeki Kłodnicy, obecnie jej zawartość w wodzie znacznie spadła
- żelazo nie zostało wchłonięte przez beton, nie wchłaniał łatwo rtęci, manganu, cynku i ołowiu

Szerszy opis badań zawartości metali w wodzie W1 oraz w przefiltrowanej zawieszynie W2 z rzeki Kłodnicy. Słomka-Słupik B, Gryniewicz-Bylina B, Salamak M, Bartoszek B, Drzyzga W, Maksara M. Concrete Examination of 100-Year-Old Bridge Structure above the Kłodnica River Flowing through the Agglomeration of Upper Silesia in Gliwice: A Case Study. Materials. 2021; 14(4):981. <https://doi.org/10.3390/ma14040981>



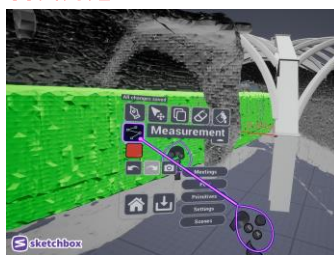
## Możliwości zastosowania technologii wirtualnej rzeczywistości (VR) w projektowaniu maszyn oraz w szkoleniach

**Dariusz Michalak, Magdalena Rozmus, Kamil Szeverda, Andrzej Turewicz – Instytut Techniki Górniczej KOMAG**

Technologia wirtualnej rzeczywistości (VR), dzięki swemu dynamicznemu rozwojowi i coraz większej dostępności, daje nowe, nie spotykane do tej pory możliwości wspomagania pracy konstruktorów i ich współpracy z klientami. Zastosowanie VR pozwala także na opracowanie niezwykle realistycznych, szczegółowych, ciekawych i skutecznych kursów przeznaczonych dla operatorów i serwisantów maszyn. Zastosowanie technologii VR jest możliwe na każdym etapie życia maszyny, począwszy od jej konstruowania, poprzez działania marketingowe, szkolenia operatorów, aż po prezentację procedur związanych z jej recyklingiem. *Nowoczesność, efektywność, skuteczność, ciekawa forma i wysoka jakość* to określenia cechujące zastosowanie nowych technologii VR w projektowaniu maszyn i szkoleniach.

### PROJEKTOWANIE

Zastosowanie technologii VR w projektowaniu, ułatwia efektywną współpracę pomiędzy konstruktorami, a także komunikację pomiędzy konstruktorami a zleceniodawcą, czy użytkownikami końcowymi. Prezentacja wirtualnego modelu projektowanej maszyny umożliwia przekazanie informacji o budowie i działaniu projektowanej maszyny, także osobom nie posiadającym umiejętności czytania rysunku technicznego. Istotnym udogodnieniem jest także to, że na modelu w środowisku VR można zaznaczać wybrane elementy, dokonywać pomiarów oraz postawić swoje uwagi i spostrzeżenia w formie notatek przypisanych do konkretnych elementów, jak również poprzez dodawanie obiektów graficznych.



### SZKOLENIA OPERATÓW

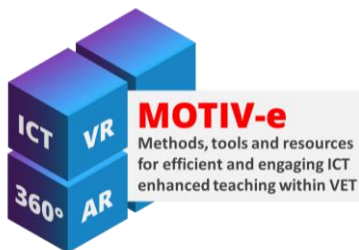


Technologia VR umożliwia przygotowanie specjalistycznych szkoleń dedykowanych np. operatorom maszyn. Korzystając ze stanowiska szkoleniowego VR, operator może przećwiczyć większość procedur związanych z obsługą, konserwacją lub prostymi naprawami konkretnego typu maszyny. Realizacja procedur może być powtarzana wielokrotnie, nie generując kosztów związanych np. z przestojem maszyny. Ponadto, błędy popełnione na etapie nauki nie skutkują ryzykiem uszkodzenia maszyny lub powstaniem innych strat materialnych, oraz nie stanowią zagrożenia dla pracownika.

### SPRZĘT VR



Przeniesienie się do środowiska wirtualnej rzeczywistości możliwe jest poprzez zastosowanie dedykowanego sprzętu, takiego jak gogle VR oraz kontrolery VR, wraz z odpowiednim oprogramowaniem. Sprzęt taki pozwala na bardzo realistyczne odczucia i odbiór wyświetlanej w okularach sceny oraz interakcję z obiektami, jakie się w tej scenie znajdują.



Celem projektu MOTIV-e jest upowszechnienie zastosowania nowoczesnych technologii TIK, takich jak m.in. wirtualna rzeczywistość (VR), w procesie kształcenia zawodowego (kadr). W ramach projektu powstaną rozwiązania, które kompleksowo przygotowują do wdrożenia VR w procesie podnoszenia kwalifikacji pracowników oraz działaniach, jakie realizują oni w swojej aktywności zawodowej. Więcej informacji na: <http://motiv-e.eu/>

### CENTRUM VR



Centrum VR to oddzielne pomieszczenie przystosowane do efektywnego wykorzystania możliwości, jakie daje technologia VR. Wyposażenie, takie jak odpowiedniej wielkości telewizor, rzutnik multimedialny, kilka kompletów gogli VR oraz kontrolerów VR, pozwalają jednocześnie wykorzystanie zasobów VR przez większą liczbę osób, np. zespół projektowy pracujący nad nowym rozwiązaniem konstrukcyjnym.

### PROMOCJA ROZWIĄZAŃ

Prezentacje nowych rozwiązań konstrukcyjnych jest idealnym przykładem zastosowania technologii VR. Klient ma możliwość zapoznania się z budową maszyny oraz jej działaniem już na etapie tworzenia prototypu. Dużo łatwiejsze jest prezentowanie maszyn na targach i konferencjach branżowych. Rozwiązany zostaje problem transportu dużych i ciężkich maszyn.



### SZKOLENIA BHP



W szkoleniach BHP możliwości przygotowania pracownika do postępowania w sytuacjach niebezpiecznych są ograniczone. Zastosowanie technologii VR pozwala zainscenizować sytuację niebezpieczną z udziałem szkolonego, bez realnego narażania go na niebezpieczeństwo. W takich warunkach może on realizować poprawne, a także błędne działania, obserwować ich skutki, i w ten sposób uczyć się prawidłowego postępowania. Przykładem jest ewakuacja z miejsca zagrożenia. Dzięki VR jakość i skuteczność szkoleń BHP może zostać znacznie podniesiona.



Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union



## Wdrożenia urządzeń typu KOMAG do odzysku surowców z odpadów pogórniczych

dr inż. Piotr Matusiak, dr inż. Daniel Kowol  
Instytut Techniki Górniczej Komag, Gliwice  
pmatusiak@komag.eu



### STRESZCZENIE

Składowiska odpadowe kopalniane mogą stanowić źródło materiałów użytecznych, lecz znajdująca się w nich substancja organiczna może w znaczący sposób ograniczać możliwość ich pozyskania i powtórnego wykorzystania. W procesie rekultywacji stosowane są zatem metody wzbogacania, które umożliwiają otrzymanie kruszywa alternatywnego oraz energetycznego koncentratu węglowego o wysokich parametrach jakościowych.

W artykule przedstawiono również proces wdrażania klasyfikatorów pulsacyjnych K-102 typu KOMAG na składowisku odpadów pogórniczych w Przechlebiu.



Doświadczenia Instytutu Techniki Górniczej KOMAG w konstruowaniu osadzarek pulsacyjnych do wzbogacania węgla kamiennego umożliwiły opracowanie i udoskonalenie maszyny do rozdziału i oczyszczania kruszywa, klasyfikatora pulsacyjnego.



Odbieralnik odpadów



Sterowanie



Zagęszczacz promieniowy DORR  
Ø12 m

Klasyfikator pulsacyjny K-102  
do rekultywacji składowiska  
pokopalnianego

W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG opracowano i wdrożono nowe rozwiązanie urządzenia do grawitacyjnego wzbogacania w pulsującym ośrodku wodnym - klasyfikator pulsacyjny K-102. Urządzenie dostosowano do wzbogacania opadów pogórniczych i odzysku węgla kamiennego. Wdrożenie pierwszego klasyfikatora na terenie centralnego składowiska odpadów w Przechlebiu i uzyskane doświadczenia pozwoliły na rozbudowę instalacji do rekultywacji hałd do 3 systemów.

Badania przemysłowego wzbogacania odpadów powęglowych wykazały wysoką skuteczność działania urządzenia, która pozwoliła na uzyskanie produktów wzbogacania o pożądanym parametrach jakościowych i korzystnych wskaźnikach dokładności rozdziału.

Warunkiem wysokiej skuteczności procesu jest utrzymanie niezmiennej i niskiej zawartości części stałych w wodzie procesowej. Nieprawidłowa praca obiegu wodnomułowego wpływa na straty ekonomiczne, które związane są z pogorszeniem skuteczności rozdziału wzbogacanego materiału. Rozwiązaniem problemu jest zastosowanie zagęszczacza promieniowego typu DORR.

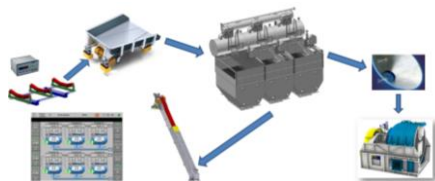


# Wpływ wybranych parametrów na skuteczność procesu wzbogacania w osadzarkach wodnych pulsacyjnych

dr inż. Daniel Kowol, dr inż. Piotr Matusiak  
Instytut Techniki Górniczej Komag, Gliwice, dkowol@komag.eu

Urządzeniami stosowanymi do wzbogacania węgla w polskich zakładach przerobczych, zwłaszcza nadaw miałowych, są osadzarki wodne pulsacyjne. Skuteczność procesu wzbogacania nadaw węglowych w osadzarkach jest zależna od szeregu czynników mających wpływ zarówno na charakterystykę wzbogacanego materiału, jak i na przebieg procesu technologicznego. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć odpowiednie przygotowanie nadawy, parametry materiału poddawanego wzbogacaniu oraz charakterystykę cyklu pulsacji.

#### Osadzkowy węzeł wzbogacania



Stanowisko osadzarki laboratoryjnej

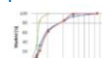
#### Wybrane parametry procesu wzbogacania

Przygotowanie nadawy (uśrednienie, odpowiednie wprowadzenie)

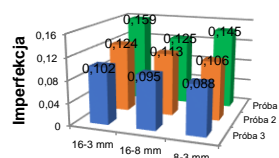
Skład ziarnowy

Skład gęstościowy

Charakterystyka pulsacji



#### Wpływ ilościowego i jakościowego zróżnicowania nadawy na skuteczność rozdzielania



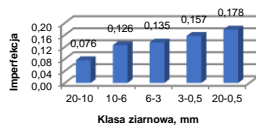
Próba 1 – nierównomierność ilościowa na szerokości wlotu do osadzarki

Próba 2 – zróżnicowanie jakościowe nadawy na szerokości wlotu

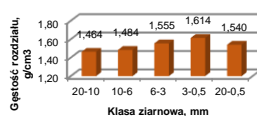
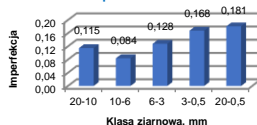
Próba 3 – stabilizacja ilościowo-jakościowa nadawy

#### Wpływ składu granulometrycznego na skuteczność rozdzielania

##### I stopień rozdzielania



##### II stopień rozdzielania



Skuteczność osadzkowego wzbogacania nadaw w szerokiej klasie ziarnowej jest zależna w istotny sposób od udziału klas ziarnowych w materiale.

Skuteczność gęstościowego rozdzielania obniża się wraz ze zmniejszaniem rozmiaru ziaren.

Uzyskiwanie korzystnych parametrów rozdzielania w poszczególnych klasach ziarnowych nie zapewnia tego dla całości materiału.

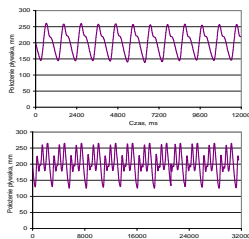
Przyczyną jest tendencja jednoczesnego, znacznego wzrostu gęstości rozdzielania, wraz ze zmniejszaniem się rozmiaru ziaren.

#### Wpływ charakterystyki pulsacji na skuteczność rozdzielania

W badaniach wykorzystano nadawę węglową w klasie ziarnowej 60-0,5 mm

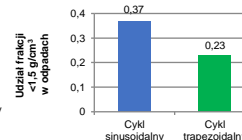
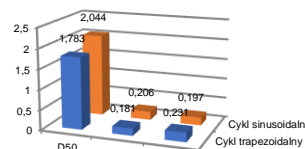
Cykl sinusoidalny: częstotliwość  $f=60 \text{ min}^{-1}$ ,  $t=1000 \text{ ms}$

Cykl trapezoidalny zmodyfikowany: częstotliwość  $f=23 \text{ min}^{-1}$ ,  $t=2600 \text{ ms}$



Cykl sinusoidalny

Cykl trapezoidalny zmodyfikowany



Parametry procesu rozdzielania

#### PODSUMOWANIE

W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG prowadzone są prace badawcze, z wykorzystaniem osadzarki laboratoryjnej, które pozwalają na określenie wpływu czynników procesowych na skuteczność wzbogacania w przemysłowych osadzarkach pulsacyjnych. Uzyskane wyniki badań są niezwykle istotne zarówno z punktu widzenia projektowania osadzarek jak i kompletnych węzłów osadzkowego wzbogacania. Wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań w osadzarkach pulsacyjnych typu KOMAG w zakresie technologii, konstrukcji oraz sterowania procesem pozwala na uzyskiwanie zakładanych parametrów jakościowych produktów, ułatwia obsługę oraz zwiększa poziom niezawodności urządzeń.