



Konferencja naukowo-techniczna
Przemysł Przyjazny dla Środowiska

KOMEKO
2026



ISBN 978-83-65593-53-5



Monografia zbiorowa

KOMEKO
Konferencja Naukowo-Techniczna
Przemysł Przyjazny dla Środowiska

Gliwice 2026

Redakcja naukowa:

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

Recenzenci:

doc. Ing. Peter Frankovský, PhD. TUKE, Słowacja
doc. Ing. Erika Sujová, PhD. TU, Zvolen, Słowacja

Redaktorzy techniczni:

Adrianna Kalita
mgr inż. Bogna Kolasińska

Wydawca:

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

Copyright by Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2026

LAUREAT KONKURSU



TERAZ POLSKA

*Monografia opublikowana na licencji [Creative Commons Uznanie autorstwa -
- Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)*

WPROWADZENIE

Współczesny przemysł funkcjonuje w warunkach głębokiej transformacji technologicznej, środowiskowej i organizacyjnej. Z jednej strony rosną wymagania dotyczące efektywności procesów produkcyjnych, bezpieczeństwa eksploatacji maszyn i urządzeń oraz niezawodności infrastruktury technicznej. Z drugiej strony coraz większego znaczenia nabierają kwestie ograniczania oddziaływań środowiskowych, racjonalnego wykorzystania zasobów, gospodarki o obiegu zamkniętym, magazynowania energii oraz społecznej odpowiedzialności działalności przemysłowej. Szczególne miejsce w tych przemianach zajmują sektory związane z górnictwem, przeróbką surowców, energetyką, recyklingiem, transportem technologicznym oraz rekultywacją terenów zdegradowanych.

Niniejsza monografia pokonferencyjna stanowi zbiór opracowań poświęconych wybranym problemom naukowo-technicznym i organizacyjnym, które wpisują się w aktualne kierunki rozwoju przemysłu, inżynierii środowiska oraz gospodarki zasobami.

Zakres tematyczny monografii jest interdyscyplinarny. Obejmuje problematykę recyklingu i przetwarzania wielkogabarytowego złomu stalowego, oddziaływań środowiskowych zakładów przeróbki węgla kamiennego, prewencji pożarowej na składowiskach węgla i odpadów pogórnich, a także rekultywacji hałd oraz oceny uciążliwości zapachowych. Istotną część tomu stanowią również rozdziały dotyczące energetyki i elektromobilności, w tym regeneracji baterii litowo-jonowych, szybkiego uzupełniania energii w pojazdach elektrycznych oraz możliwości wykorzystania kopalń podziemnych jako magazynów energii. Monografia obejmuje ponadto zagadnienia związane z ograniczaniem zapylenia w transporcie taśmowym, cyfrowo zintegrowaną diagnostyką przenośników rewersyjnych oraz internacjonalizacją przedsiębiorstw na rynkach wysokiego kontekstu kulturowego.

Prezentowane opracowania pokazują, że rozwój nowoczesnych technologii przemysłowych nie może być rozpatrywany wyłącznie przez pryzmat parametrów technicznych. Coraz częściej wymaga on podejścia systemowego, łączącego projektowanie konstrukcyjne, analizę ryzyka, monitoring środowiskowy, cyfryzację, automatyzację, ocenę oddziaływań społecznych oraz zdolność do współpracy między nauką a gospodarką. Szczęólnego znaczenia nabiera także umiejętność adaptacji istniejącej infrastruktury przemysłowej do nowych funkcji, czego przykładem są koncepcje wykorzystania terenów i obiektów pogórnich w procesach rekultywacji, magazynowania energii lub ponownego zagospodarowania surowców.

Monografia ma charakter zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny. Zawarte w niej rozdziały mogą stanowić źródło wiedzy dla przedstawicieli środowiska naukowego, kadry inżynieryjno-technicznej, przedsiębiorstw przemysłowych, instytucji otoczenia biznesu oraz podmiotów odpowiedzialnych za planowanie i wdrażanie rozwiązań służących transformacji przemysłu.

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

dr inż. Bartosz Polnik

Redaktorzy naukowii monografii



SPIS TREŚCI

1. Innowacyjne urządzenie do wstępnego rozdrabniania wielkogabarytowego złomu stalowego –
Z. Szkuclarek, M. Kalita, K. Nieśpiałowski, A. Miemietz, T. Kasperek **1**
2. Oddziaływania środowiskowe zakładów przeróbki węgla kamiennego oraz metody ich
ograniczania – *D. Kowol, P. Matusiak, O. Ziółkowska*.....**14**
3. Techniczne możliwości prewencji pożarów na składowiskach węgla i odpadów
pogórnich z kopalń węgla – *J. Korski*.....**25**
4. Regeneracja akumulatorów i pakietów bateryjnych opartych na technologii litowej zgodnie
z zasadami obiegu zamkniętego produktów bateryjnych – wyzwanie współczesnego świata
– *T. Trawiński, P. Deja*.....**33**
5. Zintegrowane podejście do rekultywacji hałd pogórnich: stabilizacja, gospodarka wodna
i system monitoringu środowiskowego – *J. Biela, J. Berantt, J. Jagoda, D. Markusik***44**
6. Od długu kompetencyjnego do gotowości relacyjnej – propozycja ramy analitycznej dla
internacjonalizacji polskich firm na rynkach wysokiego kontekstu – *M. Jabłoński*..... **50**
7. Magazynowanie i szybkie uzupełnianie energii w samochodach zasilanych z baterii
akumulatorów – *Z. Budzyński, B. Polnik*.....**64**
8. Uciążliwości zapachowe jako istotny czynnik oddziaływania składowisk pogórnich na
mieszkańców terenów sąsiednich – *B. Grynkiewicz-Bylina, B. Rakwic, M. Gawlik-Jędrzyak*...**70**
9. Koncepcja i kryteria oceny segmentowej mobilnej osłony przeciwpylowej przenośnika
taśmowego – *M. Szelka, K. Turczyński*.....**81**
10. Elektrownia szczytowo – pompowa jako magazyn energii w kopalni podziemnej – *J. Korski*.....**94**
11. Rozwój i wdrożenie metod cyfrowo zintegrowanej diagnostyki przenośników taśmowych
rewersyjnych – *D. Markusik, J. Świder, S. Jendrysik, J. Bernatt, J. Jagoda* **100**
12. Indeks autorów **111**



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.1>

Innowacyjne urządzenie do wstępnego rozdrabniania wielkogabarytowego złomu stalowego

Zbigniew Szkudlarek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Marek Kalita – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Nieśpiałowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Arkadiusz Miemietz – VACAT Sp. z o.o.

Tomasz Kasperek – VACAT Sp. z o.o.

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono innowacyjny dwuwalowy rozdrabniacz, który został opracowany w środowisku wirtualnym z zastosowaniem oprogramowania Autodesk Inventor. W oparciu o opracowane modele geometryczne komponentów składowych przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe, rozszerzone o symulacje numeryczne obciążeń: przekładni mechanicznej oraz bębna rozdrabniającego. W efekcie końcowym powstały między innymi modele 3D zespołu rozdrabniającego, przekładni czy też hydraulicznego układu napędowego. Modele posłużyły do opracowania dokumentacji wykonawczej, w oparciu, o którą firma Vacat Sp. z o.o. wykonała model badawczy rozdrabniacza w skali rzeczywistej.

Słowa kluczowe: zasoby naturalne, recykling metali, niejednorodny złom stalowy, przetwórstwo odpadów stalowych, rozdrabniacz dwuwalowy

Innovative device for the preliminary size reduction of oversized steel scrap

Abstract: The chapter presents an innovative twin-shaft shredder developed in a virtual environment using Autodesk Inventor software. Based on the developed geometric models of the individual components, strength calculations were carried out and extended with numerical simulations of loads acting on the mechanical transmission and the shredding drum. As a final result, 3D models of the shredding assembly, gearbox, and hydraulic drive system, among others, were created. These models were used to prepare manufacturing documentation, on the basis of which Vacat Sp. z o.o. built a full-scale research prototype of the shredder.

Keywords: natural resources, metal recycling, heterogeneous steel scrap, steel waste processing, twin-shaft shredder

1. Wprowadzenie

Głównym celem technologii rozdrabniania złomu stalowego jest odzysk odpadów do dalszego przerobu i recyklingu, w drugiej kolejności - odzysk odpadów dla przerobu na energię, a w przypadku materiału całkowicie nieprzydatnego - jego składowanie [1].

Rozdrabnianie złomu stalowego to kluczowy proces w nowoczesnym recyklingu metali, którego celem jest przygotowanie wsadu do pieców hutniczych (elektrycznych lub konwertorów) poprzez zwiększenie gęstości nasypowej, poprawę jednorodności oraz ułatwienie separacji zanieczyszczeń. Proces ten przekształca duże elementy metalowe w mniejsze fragmenty (tzw. shredded scrap), co poprawia efektywność transportu i procesu topienia.

Recykling złomu metalowego odgrywa kluczową rolę w ochronie środowiska i zrównoważonym wykorzystaniu zasobów, a produkcja stali poprzez recykling wymaga do 10 razy mniej energii niż produkcja stali z pierwotnej rudy żelaza (stali pierwotnej) oraz zmniejsza emisję dwutlenku węgla. Jedna



tona złomu stalowego, poddana recyklingowi, pozwala zaoszczędzić 7 kg węgla, 1200 kg rudy żelaza i 51 kg wapienia [2, 3, 4].

Proces rozdrabniania złomu stalowego np. pochodzącego z demontażu samochodów (po odzysku części możliwych do ponownego zastosowania), złomu budowlanego (np. skłębione pręty zbrojeniowe) czy też złomu pochodzącego z procesów technologicznych (np. po wykrojnikach lub wypalarkach z arkuszy blach) wymaga specjalistycznych urządzeń potocznie zwanych rozdrabniaczami (tzw. shredderami) [5, 6, 7].

Z uwagi na znaczne parametry wytrzymałościowe materiału wsadowego maszyny te powinny posiadać odpowiednią moc oraz gabaryty powiązane z dużą masą elementów roboczych (wałów rozdrabniających), które są zdolne pokonać opory, jakie stawia materiał wsadowy w procesie rozdrabniania [8, 9].

Rozdrabniacze są maszynami do recyklingu mechanicznego, łatwymi w użyciu i jednocześnie zapewniającymi wysoką wydajność nawet w przypadku najtwardszych materiałów. Służą do osiągnięcia maksymalnej redukcji objętości rozdrabnianego wsadu. Złom w procesie rozdrabniania nie zostaje sprasowany i zgniatany, co umożliwia efektywniejsze sortowanie, tym samym zwiększając wartość materiału. Główna cecha różniąca rozdrabniacze od często stosowanych np. prasownic to doskonała jakość końcowego materiału [10].

Analiza mechanizmów awarii w rozdrabniaczach, które powodowane są głównie przez nadmierne zużycie elementów współpracujących z wsadem oraz zmęczenie materiału, sprowadza się do optymalizacji procesów rozdrabniania z wykorzystaniem np. metod elementów skończonych [11].

Rozdrabniacze są produkowane pod potrzeby klienta i uwzględniają przewidywany rodzaj wsadu, oczekiwaną frakcję końcową oraz ilość przerabianego materiału [12, 13].

Poznanie zjawisk zachodzących w procesie rozdrabniania i prowadzenie symulacji komputerowych pozwala opracować założenia techniczne i konstrukcyjne rozdrabniacza przystosowanego do oczekiwanego wsadu złomu stalowego.

Takiego przedsięwzięcia podjęło się konsorcjum w składzie: Vacat Sp. z o.o. (Lider) oraz ITG KOMAG (Partner), które realizuje projekt pt.: „Dywersyfikacja działalności poprzez opracowanie prototypu dwuwałowego rozdrabniacza do odpadów ze stali” (nr wniosku FESL.10.02-IP.01-0B37/24-003) współfinansowany przez Śląskie Centrum Przedsiębiorczości.

Projekt wpisuje się w cele, jakie wyznaczają Fundusze Europejskie dla województwa śląskiego na lata 2021-2027 w zakresie prowadzenia badań oraz opracowywania innowacyjnych rozwiązań w przedsiębiorstwach, przyczyniając się do ich sprawiedliwej transformacji. Charakter B+R projektu zakłada opracowanie prototypu rozdrabniacza dwuwałowego do przetwórstwa odpadów metalowych, który zostanie przetestowany w warunkach rzeczywistych, a następnie wdrożony na rynek. Opracowane w ramach projektu urządzenie przyczyni się do dywersyfikacji działalności Lidera Projektu, tj. firmy Vacat Sp. z o.o. poprzez wejście na nowe rynki (produkcja urządzeń dla branży przetwórstwa metali) co w następstwie przyczyni się do zmniejszenia zależności działalności VACAT od branży górniczej. Projekt realizowany będzie na obszarze FST (region rybnicki), przez co jego rezultaty przyczynią się do przekierowania gospodarki podregionów górniczych na ścieżkę zielonego, inteligentnego i cyfrowego wzrostu.

W wyniku realizacji projektu Vacat zdywersyfikuje działalność poprzez wejście na nowe rynki i rozpoczęcie produkcji oraz sprzedaży maszyn dla branży przetwórstwa metali. Odbiorcami rezultatu będą zakłady przetwarzające złom stalowy. Dotychczas VACAT nie posiadał takich urządzeń w swojej

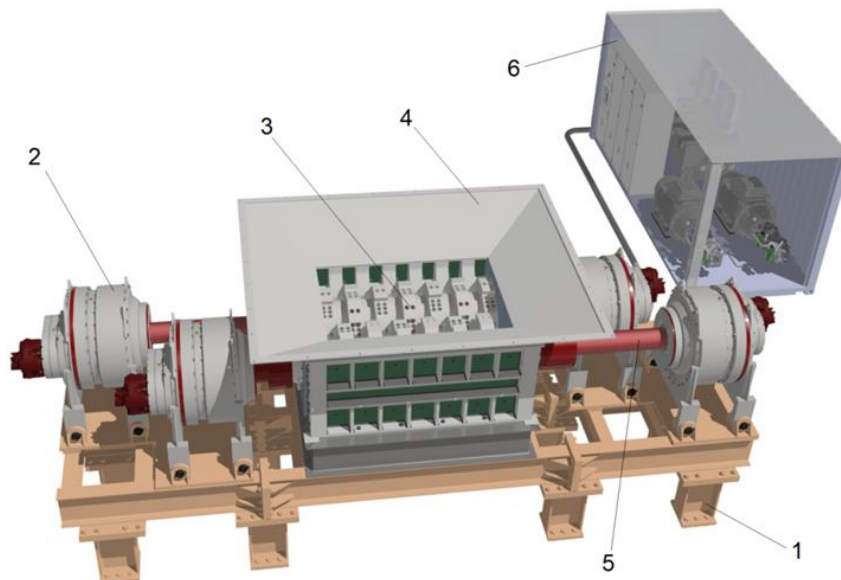
ofercie. Opracowanie pierwszego urządzenia pozwoli na rozszerzenie portfolio produktów na nowe branże niepowiązane z górnictwem i wejście na nowe rynki.

2. Model 3D rozdrabniacza

Rozdrabniacz (rys. 1) składa się z następujących głównych elementów:

- ramy nośnej - poz. 1,
- przekładni mechanicznej - poz. 2,
- modułu rozdrabniającego - poz. 3,
- zasypu - poz. 4,
- sprzęgieł zespołu napędowego - poz. 5,
- układu zasilania hydraulicznego - poz. 6.

Na ramie nośnej centralnie zabudowany został moduł rozdrabniający, którego wały rozdrabniające napędzane są dwustronnie przekładniami mechanicznymi za pomocą sprzęgieł kształtowych. Moduł rozdrabniający ma zabudowany na wlocie zasyp, który kieruje nadawę na bębny rozdrabniające.

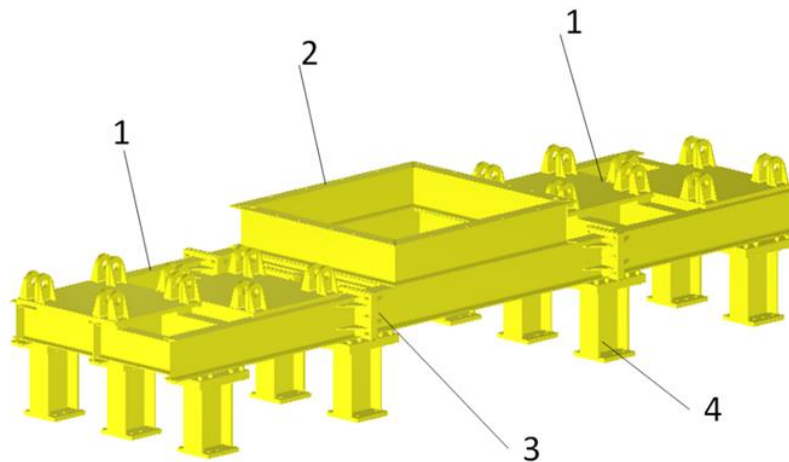


Rys. 1. Model 3D rozdrabniacza (1 – rama nośna; 2 – przekładnia mechaniczna; 3 – moduł rozdrabniający; 4 – zasyp; 5 – sprzęgła zespołu napędowego; 6 – zespół zasilania elektrycznego i hydraulicznego)

Parametry techniczne zespołu rozdrabniającego są następujące:

- | | |
|---|--------------|
| - moc zainstalowana | 2×355 kW |
| - sumaryczny moment obrotowy wałów rozdrabniających | 4000 kNm |
| - wydajność procesowa | 50 Mg/h |
| - średnica tarcz nożowych | 990 mm |
| - maksymalna grubość wsadu | 15 mm |
| - rodzaj napędu | hydrauliczny |

Rama nośna (rys. 2) ma konstrukcję trójdzielną. Do ramy środkowej mocowane są ramy skrajne osadzone na czopach i łączone z nimi połączeniami śrubowymi. Całość osadzona jest na nogach, które łączone są za pomocą połączeń śrubowych.



Rys. 2. Rama nośna – model 3D (1 – rama skrajna; 2 – rama środkowa; 3 – elementy łączne śrubowo-czopowe; 4 – noga)

Przekładnia mechaniczna (rys. 3) odpowiada za nadanie bębnom rozdrabniającym odpowiedniej prędkości obrotowej oraz decyduje pośrednio o wartości sił, jakie wystąpią na nożach rozdrabniających. Z kolei o sile na pojedynczym nożu decyduje średnica, uzbrojonego w noże, bębna rozdrabniającego.

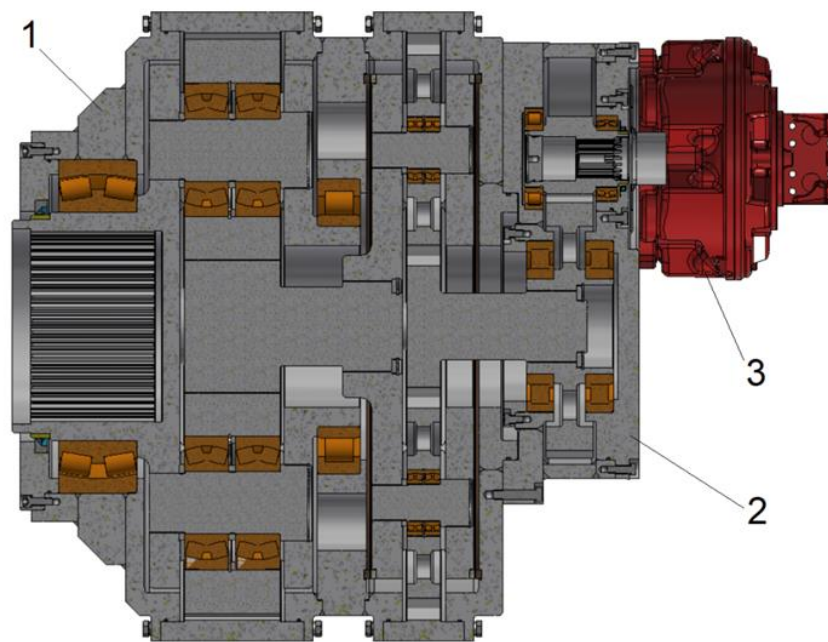
W rozdrabniaczu przewidziano niekonwencjonalne rozwiązanie konstrukcyjne przekładni mechanicznej. Zastosowano konstrukcję opartą na połączeniu ze sobą przekładni klasycznej (walcowej) z przekładnią obiegową [14] (planetarną).

Przekładnia walcowa jest przekładnią jednostopniową. Współpracuje z silnikiem hydraulicznym, z którym połączona jest zazębieniem ewolwentowym.

Po stronie zdawczej przekładni walcowej znajduje się otwór o zazębieniu ewolwentowym, który współpracuje z kołem słonecznym przekładni planetarnej.

Parametry techniczne przekładni walcowej są następujące:

- | | |
|---------------------------------|--------------|
| - moment obrotowy znamionowy | 11,5 kNm |
| - prędkość obrotowa na wejściu | 130 obr/min |
| - przełożenie całkowite | 3,47 |
| - wymiary (długość × szerokość) | 920 × 640 mm |
| - masa | ~655 kg. |



Rys. 3. Przekrój 3D przekładni mechanicznej (1 – przekładnia obiegowa; 2 – przekładnia walcowa; 3 – silnik hydrauliczny)

Przekładnia planetarna ma dwa stopnie obiegowe. Każdy stopień posiada nieruchomy wieniec zębaty, po którym poruszają się zabudowane w jarzmie 4 satelity.

Stopień wejściowy służy do podłączenia przekładni walcowej natomiast stopień wyjściowy, połączony poprzez sprzęgło, współpracuje z wałem rozdrabniającym.

Parametry techniczne przekładni obiegowej są następujące:

- moment obrotowy znamionowy 1000 kNm
- prędkość obrotowa na wejściu 37,5 obr/min
- przełożenie całkowite 25
- wymiary (średnica × szerokość) 1300 × 1190 mm
- masa ~8500 kg.

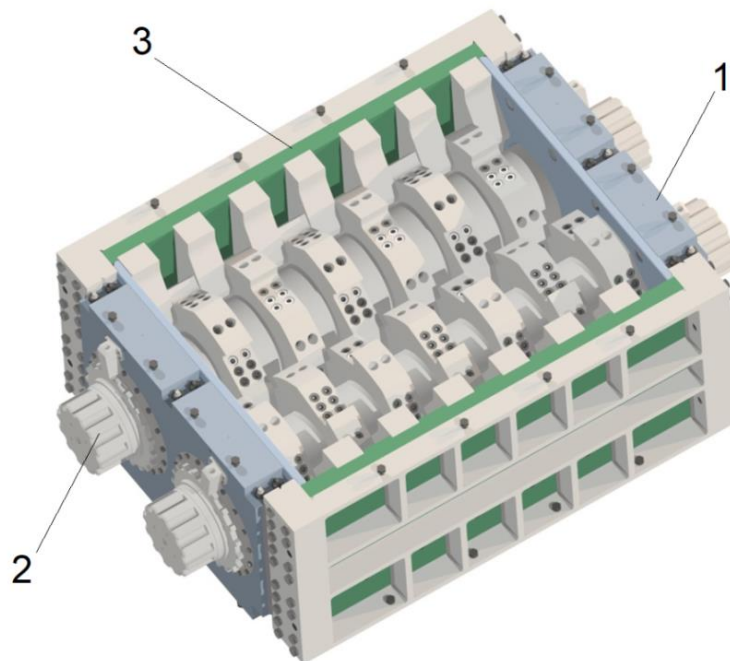
Moduł rozdrabniający (rys. 4) jest monolityczną dzieloną ramą. Jej podział w płaszczyźnie osi wałów bębnowych pozwala na łatwe osadzenie zespołu bębnowych rozdrabniających. Segmenty są osadzone na sworzniach i zespalane za pomocą połączeń śrubowych.

Po obu stronach, wzdłuż osi bębnowych montowane są za pomocą sworzni płyty wyrzutników, a ich zadaniem jest czyszczenie przestrzeni między tarczami nożowymi przy ruchu rewersyjnym bębnowych rozdrabniających.

Monolityczne wały z tarczami są głównymi elementami przenoszącymi wymagany moment obrotowy. Tarcze mają kształt pięciokątów i na nich mocowane są noże rozdrabniające.

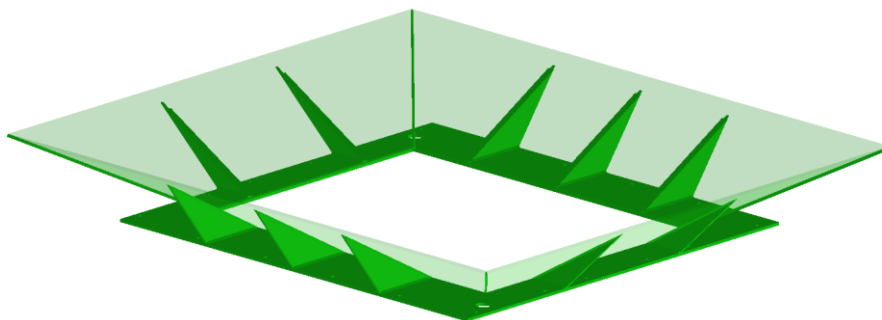
Noże są stabilizowane na czopach i wpustach i przykręcane śrubami bezpośrednio do podstaw tarcz. Obrót każdego z wałów jest realizowany za pomocą łożyskowanych i nieruchomych tulei łożyskowych. Tuleje są ustalane w gniazdach ramy za pomocą czopów, co zapobiega ich niekontrolowanemu obrotowi oraz zapewnia właściwe spasowanie przelotu dla kanałów smarnych

łożysk. Oba końce łożysk są zabezpieczone uszczelnieniem obrotowym. Pokrywy zamykające pozwalają na prawidłowe ustalenie poosiowe łożysk.



Rys. 4. Widok 3D modułu rozdrabniającego (1 – rama; 2 – zespół wałów rozdrabniających; 3 – płyta wyrzutnika)

Zasyp (rys. 5) to stalowa konstrukcja monolityczna. Posiada kształt odwróconego stożka ściętego, u którego podstawy znajduje się kołnierz pozwalający na połączenie go z ramą modułu rozdrabniającego.



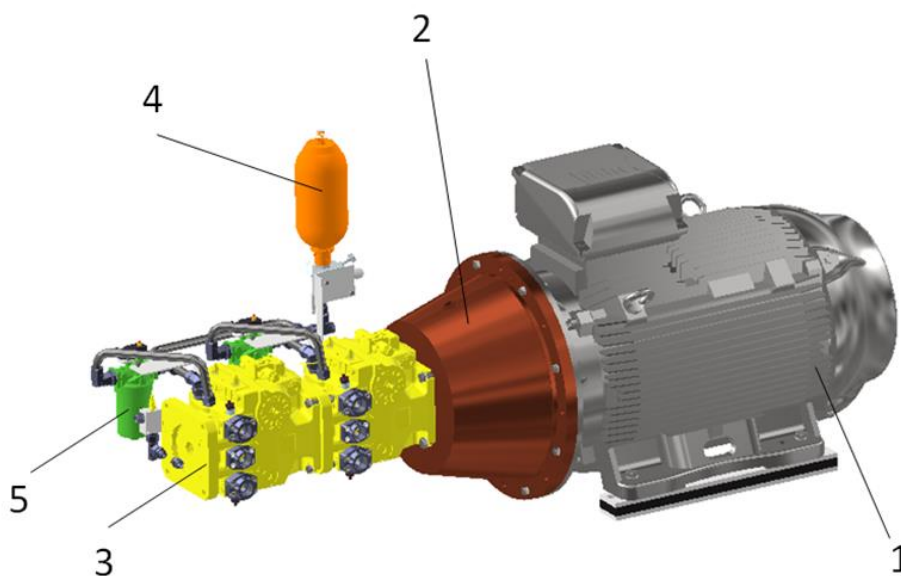
Rys. 5. Model 3D zasypu

W rozwiązaniu konstrukcyjnym rozdrabniacza zastosowano hydrauliczny układ napędowy. Głównym zadaniem układu hydraulicznego jest napęd wałów rozdrabniających o założonych parametrach. Zastosowano dwa zespoły pompowe (po dwie pompy w każdym zespole) oraz cztery silniki hydrauliczne (po dwa na każdy wał). Przyjęto zasadę, że jedna pompa zasila jeden silnik

hydrauliczny. Realizacja założeń projektowych wymaga zastosowania pomp o wydajności rzędu 400 dm³/min.

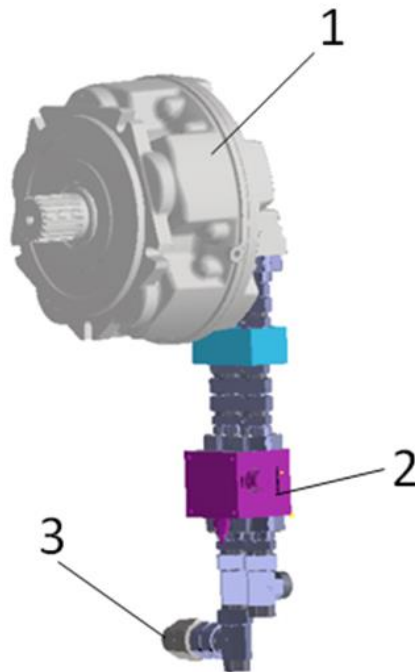
Istotnym zagadnieniem było zapewnienie łagodnego rozruchu hydraulicznego. Przyjęto, że układ zostanie wyposażony w osiowe pompy tłokowe o zmiennym kierunku tłoczenia, z elektrycznym sterowaniem wydajnością. Każda pompa wyposażona jest w dwie proporcjonalnie sterowane cewki elektryczne. Cewki te, zasilane prądem o regulowanej wartości, stanowią element trójpołożeniowego, czterodrogowego rozdzielacza hydraulicznie sterującego tarczą wychylną pompy. Zasilenie cewki powoduje wychylenie tarczy, a tym samym zmianę wydajności pompy w zakresie od zera do wartości maksymalnej. Brak sygnału sterującego powoduje powrót tarczy do położenia neutralnego i wyzerowanie wydajności pompy. Zastosowane rozwiązanie zapewnia łagodny i kontrolowany rozruch oraz zatrzymanie urządzenia.

Zespół pompowy (rys. 6) składa się z dwóch pomp głównych, pomp dopełniających oraz pompy przepływającej. Pompy zostały połączone sprzęgłem z wałem łopowo-kołnierzowego silnika elektrycznego o mocy 355 kW. Sprzęgło osłonięto obudową, która jednocześnie pełni funkcję elementu montażowego, integrującego pompy z silnikiem elektrycznym. Podczas projektowania zespołu przewidziano zabudowę akumulatora hydraulicznego wraz z zabezpieczającym blokiem zaworowym, a także połączenia rurowe oraz dedykowane przyłącza i złącza hydrauliczne.



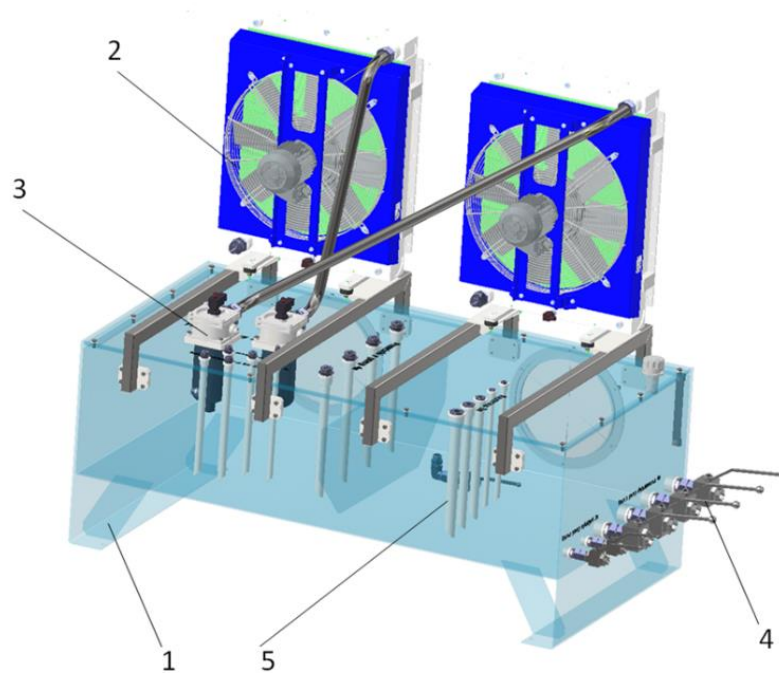
Rys. 6. Model 3D zespołu pompowego (1 – silnik elektryczny; 2 – łącznik sprzęgający; 3 – zespół pompowy; 4 – zespół akumulatora hydraulicznego; 5 – filtr ciśnieniowy)

Zespół silnika hydraulicznego (rys. 7) wyposażono w blok zaworowy oraz dedykowane przyłącza. Dodatkowo zaprojektowano płytę pośrednią umożliwiającą połączenie silnika z blokiem zaworu płuczącego i przelewowego.



Rys. 7. Model 3D zespołu silnika hydraulicznego (1 – silnik hydrauliczny; 2 – blok zaworowy; 3 – przyłącza)

W zespole zbiornika (rys. 8) przewidziano zastosowanie standardowego zbiornika handlowego o pojemności 1000 dm³, fabrycznie wyposażonego w króciec spustowy z korkiem, który na etapie modelowania zastąpiono kolaniem oraz zaworem kulowym. Zbiornik wyposażono w zestaw przyłączy ssawnych z zaworami odcinającymi, umieszczonymi w jednej ze ścian bocznych. W pokrywie zbiornika przewidziano króciec przyłączy zlewnych wraz z rurami wprowadzającymi olej poniżej lustra cieczy, z wyjątkiem przewodów odprowadzających przecieki z pomp i silników hydraulicznych. Zaprojektowano również pięć króćców rezerwowych o różnych średnicach, zabezpieczonych korkami. Ze względu na planowaną zabudowę chłodnic oleju na zbiorniku, zaprojektowano odpowiednie wsporniki montażowe oraz połączenia rurowe odprowadzające, przez filtry sphywowe, schłodzony olej do zbiornika [15].



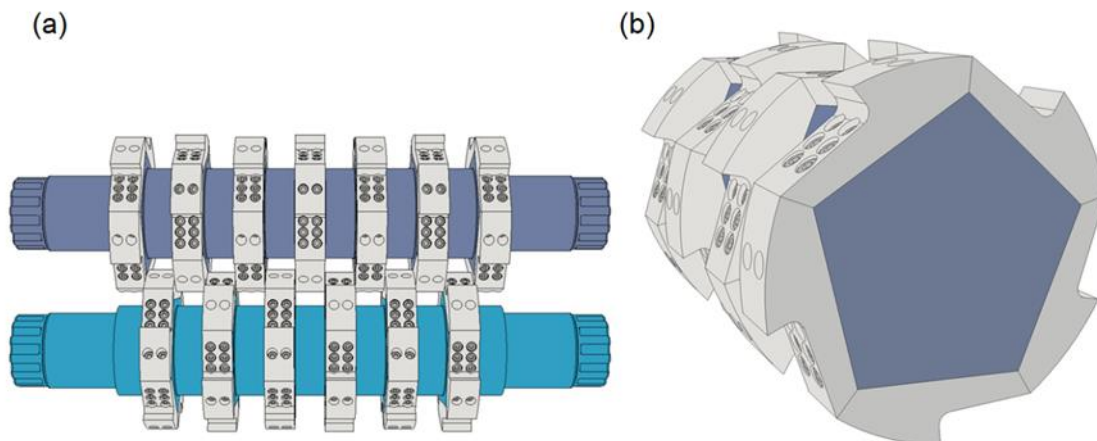
Rys. 8. Model 3D zespołu zbiornika (1 – zbiornik; 2 – zespół chłodzący; 3 – zespół filtra spływowego; 4 – zawory odcinające; 5 – króćce połączeniowe)

3. Obliczenia wytrzymałościowe

Na etapie modelowania rozdrabniacza przeprowadzono wstępne obliczenia wytrzymałościowe bębnow rozdrabniających.

Bębny rozdrabniające (rys. 9), które obracają się przeciwsobnie, mają bezpośredni kontakt z rozdrabnianym wsadem. Z tego względu powinny odznaczać się odpowiednią wytrzymałością wynikającą ze spodziewanego obciążenia pojedynczej tarczy uzbrojonej w noże oraz żywotnością, na którą wpływa zużycie ściernie noży rozdrabniających.

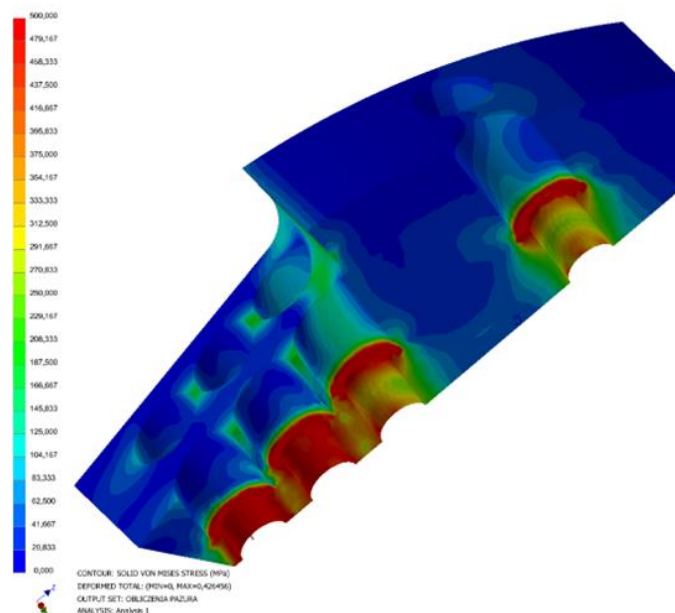
Bębny decydują o skuteczności działania urządzenia i są jego najbardziej kosztownym komponentem.



Rys. 9. Przestrzenny model geometryczny bębnow rozdrabniających (a) oraz pierścienie na wale składające się z pięciu noży rozdrabniających (b) [16]

Numeryczne obliczenia wytrzymałościowe sprowadzono do wystąpienia najbardziej niekorzystnego przypadku, jaki może wystąpić w procesie rozdrabniania. Założono, że cała siła nacisku wynikająca z momentu obrotowego na wale, wynosząca około 485 ton, jest wywierana na krawędź pojedynczego noża.

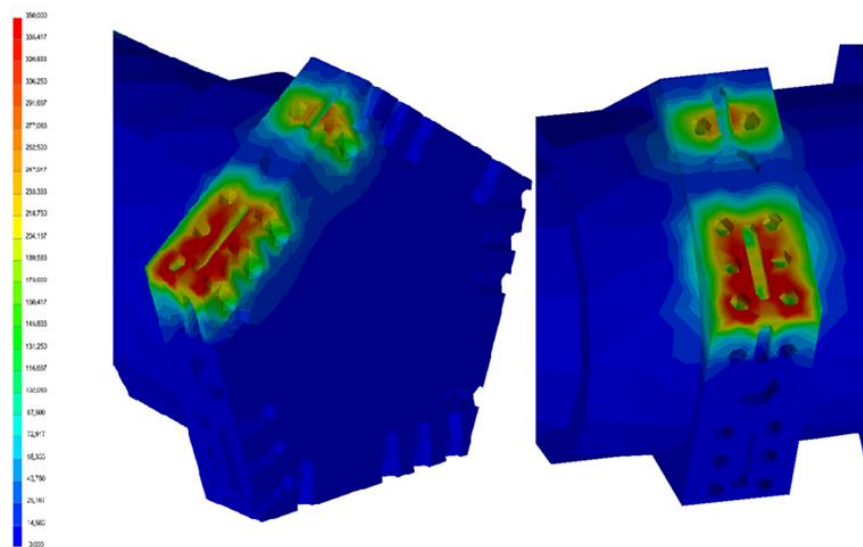
Na rysunku 10 przedstawiono mapę naprężeń zredukowanych w nożu ze szczególnym uwzględnieniem gniazd pod śruby. Każdy z noży osadzony jest kształtowo do powierzchni tarczy i przykręcony jest do niej ośmioma śrubami.



Rys. 10. Mapa naprężeń zredukowanych von Misessa noża

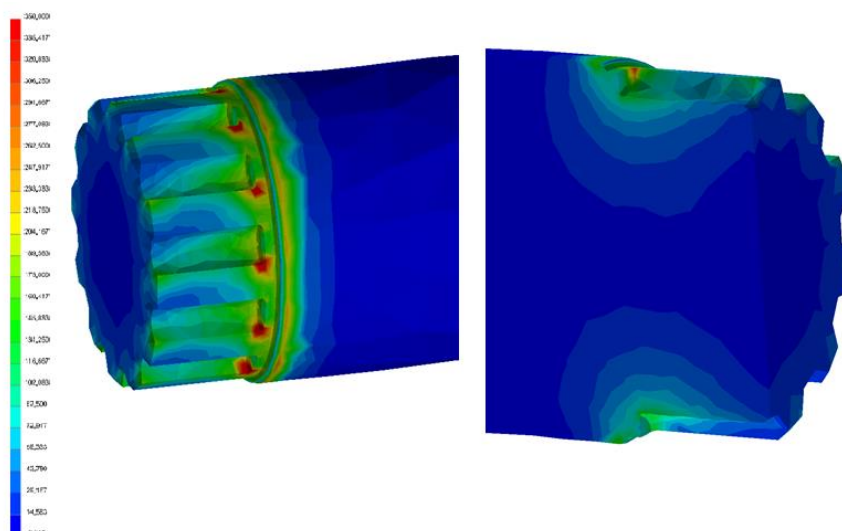
Wartości osiąganych maksymalnych naprężeń wskazują, że nóż rozdrabniający powinien być wykonany z materiału, dla którego granica plastyczności jest nie mniejsza niż 500 MPa natomiast śruby powinny być wykonane w klasie 12.9.

Na rysunku 11 przedstawiono mapę naprężeń zredukowanych dla dwóch połączeń kształtowych i ośmiu śrubowych służących do unieruchamiania noża względem tarczy. Wartości osiąganych maksymalnych naprężeń w tych połączeniach nie wskazują na wystąpienie maksymalnych naprężeń większych niż 350 MPa.



Rys. 11. Mapa naprężeń zredukowanych von Misessa dla połączeń kształtowych i śrubowych tarczy

Na rysunku 12 przedstawiono mapę naprężeń zredukowanych jednego z końców wału, który jest połączony z przekładnią za pomocą sprzęgła kształtowego.



Rys. 12. Mapa naprężeń zredukowanych von Misessa gniazd połączenia kształtowego wału ze sprzęgłem



Wartości osiąganych maksymalnych naprężeń w połączeniu kształtowym wskazują na wystąpienie maksymalnych naprężeń wynoszących około 350 MPa.

4. Podsumowanie

Urządzenie do wstępnego rozdrabniania wielkogabarytowego złomu stalowego (rozdrabniacz) realizowane jest w ramach projektu DROZD nr FESL.10.02-IP.01-OB37/24-00, w którym liderem jest firma VACAT Sp. z o.o. w partnerstwie z ITG KOMAG.

O aspekcie konkurencyjności technicznej rozdrabniacza decydują przede wszystkim: prędkość obrotowa wałów rozdrabniających, moc zainstalowana, rodzaj napędu, wydajność oraz charakterystyka przerabianego złomu (jego pochodzenie i grubość). Użytkownicy oczekują urządzenia o zwiększonej wytrzymałości i mocy, które sprostałoby trudnym warunkom pracy zależnym od rodzaju wsadu złomowego, często nie będącego klasyfikowanym pod względem gabarytów czy grubości elementów.

Opracowywane urządzenie sprostano zapotrzebowaniu technologicznemu rynku przerobu niejednorodnego złomu, a założone parametry techniczne powinny zapewniać bezproblemowy proces rozdrabniania złomu. Zainstalowana moc pozwoli na uzyskanie niespotykanego w obecnie eksploatowanych rozdrabniaczach sumarycznego momentu obrotowego wałów rozdrabniających wynoszącego 4000 kNm.

Przewiduje się, że moduł rozdrabniający będzie w stanie, w sposób ciągły, niszczyć strukturę stalową o maksymalnej grubości wynoszącej 15 mm.

Rezultat projektu pozwoli w zagospodarowaniu 15% generowanego złomu, który nie zostaje przeznaczony do recyklingu. W szczególności dotyczy to obszaru województwa śląskiego, gdzie występuje największe w kraju skupisko podmiotów i aglomeracji generujących odpady metalowe. Obecnie w Polsce funkcjonuje ok. 2200 dużych zakładów hutniczych i metalurgicznych oraz firm zajmujących się produkcją metali (głównie stali, żelaza oraz metali nieżelaznych), ok. 2000 złomowisk i 400 zakładów profesjonalnego przetwórstwa metalu. W samym woj. śląskim działa obecnie ok. 30 – 35 hut i zakładów metalurgicznych i ok. 250 złomowisk.

Warto zaznaczyć, że w Polsce nie funkcjonuje żaden lokalny producent maszyn do przetwórstwa odpadów metalowych, a maszyny są sprowadzane od producentów zagranicznych. Biorąc pod uwagę powyższe, zakup infrastruktury do przetwórstwa złomu stalowego od polskiego producenta wydaje się atrakcyjnym i pożądanym wyborem.

Literatura

1. Joonheon Lee, Kihong Kim, Heechan Cho, Jeonghoon Ok, Sookyung Kim: Shredding and liberation characteristics of refrigerators and small appliances. *Waste Management*, Volume 59, January 2017, Pages 409-421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.030>
2. Nidheesh P.V., Suresh Kumar M.: An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *Journal of Cleaner Production*, Volume 231, 10 September 2019, Pages 856-871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251>
3. Woodhead Publishing Limited: 24 - Disposal and recycling of aerospace materials. *Introduction to Aerospace Materials*, 2012, Pages 558-568. Available online 27 March 2014. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095152.558>



4. Danny Harvey L.D.: Iron and steel recycling: Review, conceptual model, irreducible mining requirements, and energy implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138 (2021) 110553, pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110553>
5. Levy S. M.: Calculating the Size/Weight of Structural Steel and Miscellaneous Metals. In book: *Construction Calculations Manual* (pp.265-349), December 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382243-7.00006-1>
6. Tam Vivian W.Y., Tam C.M.: A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 47, Issue 3, June 2006, Pages 209-221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.002>
7. Friebe P.: Development of a prototype shredder for WEEE equipped with NdFeB magnets. *Min. Mach.* 2023, nr 2, s. 143-157, DOI:10.32056/KOMAG2023.2.6.
8. Walentyn B.: Analiza modeli rozdrabniania. *Developments in Mechanical Engineering*, 17(9)2021, pp. 87-101. DOI: <https://doi.org/10.37660/dme.2021.17.9.7>
9. Aboussouan L., Russo Ph., Pons M.N., Thomas D., Birat J.P., Leclerc D.: Steel scrap fragmentation by shredders. *Powder Technology*, Volume 105, Issues 1–3, 1 November 1999, Pages 288-294. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00150-3)
10. Pietrasik M.: Przerób i recycling złomu na potrzeby hutnictwa stali. *Piece Przemysłowe & Kotły*, nr 2, 2016, pp. 14-33. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-29bdd4da-b3e7-4d69-bdd2-e9ad99a38033/c/pietrasik_przerob_i_recykling_zlomu.pdf.
11. Zhou. X., Hu Z., Tao Y., Qin X., Hua L.: Failure Mechanisms and Structural Optimization of Shredder Hammer for Metal Scraps. *Chines Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 29, No. 4, 2016. pp. 792-801. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0415.053>
12. Zuba M., Tomas A.: Modułowa konstrukcja rozdrabniacza MR300 do rozdrabniania placków filtracyjnych. *Maszyny Górnicze* nr 2/2016, pp. 43-48. ISSN 2450-9442. <https://www.komag.eu/images/maszynygornicze1/2016/2016-2/mg2-2016.pdf>
13. Bochat A., Wesołowski L.: Analiza rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy bijakowych w aspekcie efektywności ich funkcjonowania. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 5/2010, 49, pp. 22-23. <https://bibliotekanauki.pl>
14. Vasko M., Jakubovicova L., Galecki G., Romanyshyn L., Biały W.: Application of gearboxes in mining machines/equipment. *Min. Mach.* 2025, Vol. 43, s. 197-209, DOI: 10.32056/KOMAG2025.17.
15. Nieśpiałowski K., Chelyady L., Romanyshyn T.: Cooling system for high-power drives in belt conveyors. *Min. Mach.* 2022, nr 1, s. 54-63, DOI:10.32056/KOMAG2022.1.6.
16. Zespół rozdrabniający z układem zasilania i sterowania – Raport z projektu DROZD nr FESL.10.02-IP.01-OB37/24-00. Zadanie nr 1: Projekt modelu badawczego zespołu rozdrabniającego wraz z układem zasilania i sterowania. Gliwice, listopad 2025. Praca niepublikowana.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.2>

Oddziaływania środowiskowe zakładów przeróbki węgla kamiennego oraz metody ich ograniczania

Daniel Kowol – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Piotr Matusiak – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Olga Ziółkowska – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Zakłady mechanicznej przeróbki węgla kamiennego odgrywają kluczową rolę w przygotowaniu surowca do wykorzystania przemysłowego, jednak ich funkcjonowanie wiąże się z licznymi oddziaływaniami środowiskowymi. W rozdziale przedstawiono analizę głównych oddziaływań, takich jak zapylenie, hałas, emisje odorowe oraz problematyka odpadów przerobczych. Scharakteryzowano źródła emisji, czynniki wpływające na ich intensywność oraz znaczenie dla środowiska pracy i otoczenia zakładu, a także rolę operacji technologicznych w kształtowaniu skali oddziaływań. Zaprezentowano również założenia projektu badawczo-rozwojowego ukierunkowanego na ograniczenie emisji i efektywne zagospodarowanie odpadów. Podkreślono, że skuteczne ograniczanie oddziaływań wymaga zintegrowanego podejścia, łączącego rozwiązania technologiczne, organizacyjne oraz monitoring środowiskowy.

Słowa kluczowe: przeróbka mechaniczna węgla, oddziaływania środowiskowe, zapylenie i hałas przemysłowy, emisje odorowe, odpady pogórnice, monitoring środowiskowy, technologie ograniczania emisji

Environmental Impacts of Hard Coal Preparation Plants and Methods for Their Mitigation

Abstract: Coal preparation plants play a key role in preparing raw material for industrial use; however, their operation is associated with various environmental impacts. This paper presents an analysis of the main impacts, including dust emissions, noise, odour emissions, and issues related to processing waste. The sources of emissions, factors influencing their intensity, and their impact on the working environment and surrounding areas are discussed, along with the role of technological operations in shaping the scale of these impacts. The assumptions of a research and development project aimed at reducing emissions and improving waste management are also presented. It is emphasized that effective mitigation of environmental impacts requires an integrated approach combining technological and organizational solutions as well as environmental monitoring.

Keywords: hard coal preparation, environmental impacts, dust and industrial noise, odour emissions, mining waste, environmental monitoring, emission reduction technologies

1. Wprowadzenie

Zakłady mechanicznej przeróbki węgla kamiennego stanowią istotny element systemu przygotowania surowca do jego dalszego wykorzystania przemysłowego. W ich obrębie realizowane są operacje umożliwiające uzyskanie produktów o wymaganych parametrach jakościowych oraz wydzielenie strumieni materiałowych kierowanych do dalszego zagospodarowania lub składowania. Funkcjonowanie tych obiektów ma bezpośredni wpływ zarówno na efektywność wykorzystania zasobów, jak i jakość produktów końcowych.



Jednocześnie działalność zakładów przeróbczych wiąże się z występowaniem szeregu oddziaływań środowiskowych, wynikających z charakteru prowadzonych procesów. Oddziaływania te obejmują zarówno środowisko pracy, jak i otoczenie zakładu, wpływając na warunki eksploatacji instalacji, bezpieczeństwo pracowników oraz jakość życia w sąsiedztwie obiektów przemysłowych. W związku z rosnącymi wymaganiami środowiskowymi i społecznymi szczególnego znaczenia nabiera ograniczanie emisji czynników szkodliwych oraz rozwój rozwiązań minimalizujących ich wpływ.

Współczesne podejście do funkcjonowania zakładów przeróbczych zakłada integrację efektywności technologicznej z wymaganiami ochrony środowiska. Obejmuje to zarówno rozwój rozwiązań technicznych ograniczających emisje, jak i wdrażanie systemów monitoringu oraz działań organizacyjnych wspierających bezpieczne i zrównoważone prowadzenie procesów.

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie głównych oddziaływań środowiskowych występujących w zakładach mechanicznej przeróbki węgla kamiennego oraz omówienie wybranych metod ich ograniczania. Zaprezentowano znaczenie zakładów przeróbczych w łańcuchu technologicznym przygotowania węgla, scharakteryzowano kluczowe obszary oddziaływań środowiskowych, a także przedstawiono założenia projektu badawczo-rozwojowego ukierunkowanego na ograniczenie ich negatywnego wpływu.

2. Znaczenie i rola zakładów mechanicznej przeróbki węgla

Zakłady mechanicznej przeróbki węgla kamiennego stanowią kluczowe ogniwo łańcucha technologicznego pomiędzy procesem wydobywania a końcowym wykorzystaniem surowca. Wynika to z faktu, że większość kopaliny stałej, w tym węgiel kamienny, występuje w postaci mieszaniny ziaren składnika użytecznego, skały płonnej oraz ziaren przerostowych o zróżnicowanych właściwościach fizycznych i chemicznych, przez co urobek nie spełnia wymagań jakościowych odbiorców [1].

Celem przeróbki jest przekształcenie tej niejednorodnej mieszaniny w produkty handlowe o określonych parametrach jakościowych i ilościowych, dostosowanych do potrzeb energetyki, koksownictwa oraz innych gałęzi przemysłu. Odpowiedni dobór operacji technologicznych pozwala na optymalizację jakości surowca przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności wykorzystania zasobów i ograniczeniu strat materiałowych. Istotne jest nie tylko uzyskanie wymaganych parametrów, takich jak wartość opałowa, zawartość popiołu czy wilgotność, lecz także zapewnienie ich stabilności w czasie, co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia odbiorców przemysłowych.

Podstawę funkcjonowania zakładów przeróbczych stanowią procesy klasyfikacji, rozdrabniania, wzbogacania oraz odwadniania, których celem jest poprawa jakości surowca oraz uzyskanie wymaganych parametrów jakościowych i ilościowych produktów końcowych [1, 2]. Umożliwiają one rozdział ziaren użytecznych od skały płonnej, uzyskanie wymaganej struktury ziarnowej oraz parametrów jakościowych produktu końcowego. Procesy te są ze sobą ściśle powiązane i realizowane w układach technologicznych dostosowanych do charakterystyki nadawy oraz wymagań jakościowych produktów. Dzięki tym operacjom możliwe jest nie tylko podniesienie wartości użytkowej węgla, ale także racjonalne zagospodarowanie strumieni materiałowych powstających w trakcie przeróbki.

Znaczenie zakładów przeróbczych wykracza poza poprawę jakości surowca – determinują one efektywność całego systemu produkcji węgla, wpływając na parametry handlowe produktów, poziom wykorzystania zasobów oraz możliwości zagospodarowania materiałów ubocznych.



3. Oddziaływania środowiskowe zakładów przeróbki węgla kamiennego

Funkcjonowanie zakładów mechanicznej przeróbki węgla kamiennego wiąże się z występowaniem oddziaływań środowiskowych związanych z procesami takimi jak rozdrabnianie, klasyfikacja, wzbogacanie, transport i magazynowanie materiału. Do najważniejszych należą emisja pyłów, hałasu i substancji zapachowych oraz oddziaływania wynikające z powstawania i zagospodarowania odpadów górniczych i przeróbczych.

Ich intensywność zależy od właściwości przerabianego materiału, zastosowanych technologii oraz warunków eksploatacji instalacji. Ze względu na zróżnicowany charakter źródeł emisji ich analiza wymaga podejścia kompleksowego, uwzględniającego aspekty technologiczne, organizacyjne oraz warunki pracy. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono najważniejsze zagrożenia i oddziaływania występujące w zakładach przeróbki węgla kamiennego.

3.1. Zagrożenie zapyleniem w zakładach przeróbki węgla kamiennego

W zakładach mechanicznej przeróbki węgla kamiennego zapylenie stanowi jedno z najistotniejszych zagrożeń i towarzyszy większości operacji technologicznych. Powstawanie pyłu jest efektem procesów mechanicznego oddziaływania na materiał, takich jak rozdrabnianie, klasyfikacja, transport, przeladunek oraz wzbogacanie w warunkach suchych. Szacuje się, że od 1 do 3% urobku przekształca się w drobnoziarnisty pył, przy czym znaczna jego część powstaje w zakładach przeróbczych [3].

Intensywność zapylenia zależy od właściwości węgla i skał towarzyszących, zastosowanej technologii oraz urządzeń, a także sposobu transportu i charakteru operacji. Głównymi źródłami emisji są urządzenia przeróbcze realizujące te operacje, w szczególności kruszarki, przesiewacze, przenośniki taśmowe oraz punkty przesyłowe [3].

Zapylenie stanowi zagrożenie zdrowotne i wybuchowe. Szkodliwość pyłów zależy od ich składu, wielkości cząstek, stężenia i czasu ekspozycji. Frakcje respirabilne docierają do pęcherzyków płucnych, a długotrwałe narażenie prowadzi do chorób zawodowych, głównie pylicy płuc, ale także zapalenia oskrzeli, rozedmy i zaburzeń układu krążenia [3, 4]. Dodatkowym czynnikiem ryzyka jest obecność wolnej krzemionki. W celu ograniczenia ryzyka stosuje się normy NDS [5].

Pył węglowy może tworzyć z powietrzem mieszaninę wybuchową – stężenia 50–1000 g/m³ mogą prowadzić do jej powstania przy obecności źródła zapłonu [4]. Istotnym problemem jest także osiadanie pyłu i jego wtórne unoszenie, zwiększające ryzyko wybuchu. Do oceny zagrożenia stosuje się klasyfikację stref 20, 21 i 22 [6].

Zapylenie ma charakter zróżnicowany przestrzennie i towarzyszy wszystkim etapom procesu technologicznego, przy czym jego największe natężenie występuje w strefach intensywnej pracy urządzeń przeróbczych i transportowych. Istotne są także operacje składowania, gdzie dochodzi do wtórnego unoszenia pyłu i jego rozprzestrzeniania poza obszar zakładu.

Ograniczanie zapylenia obejmuje działania organizacyjne, administracyjne i techniczne, wśród których istotną rolę odgrywają procesy odpylania i zraszania. Stosowane urządzenia, zarówno suche, jak i mokre, pozwalają na ograniczenie emisji pyłu. W praktyce wykorzystuje się różne rozwiązania techniczne, w tym systemy opracowane w ITG KOMAG, często uzupełniane o zabezpieczenia przeciwybuchowe [7, 8].

Ocena zapylenia opiera się na systematycznych pomiarach stężenia pyłu, coraz częściej prowadzonych w sposób ciągły. Wyniki wskazują, że mimo stosowanych metod nadal występują

przekroczenia dopuszczalnych wartości, co potwierdza konieczność dalszego doskonalenia monitoringu i redukcji emisji. W efekcie zapylenie pozostaje jednym z kluczowych wyzwań technologicznych i środowiskowych w funkcjonowaniu zakładów przeróbki węgla kamiennego.

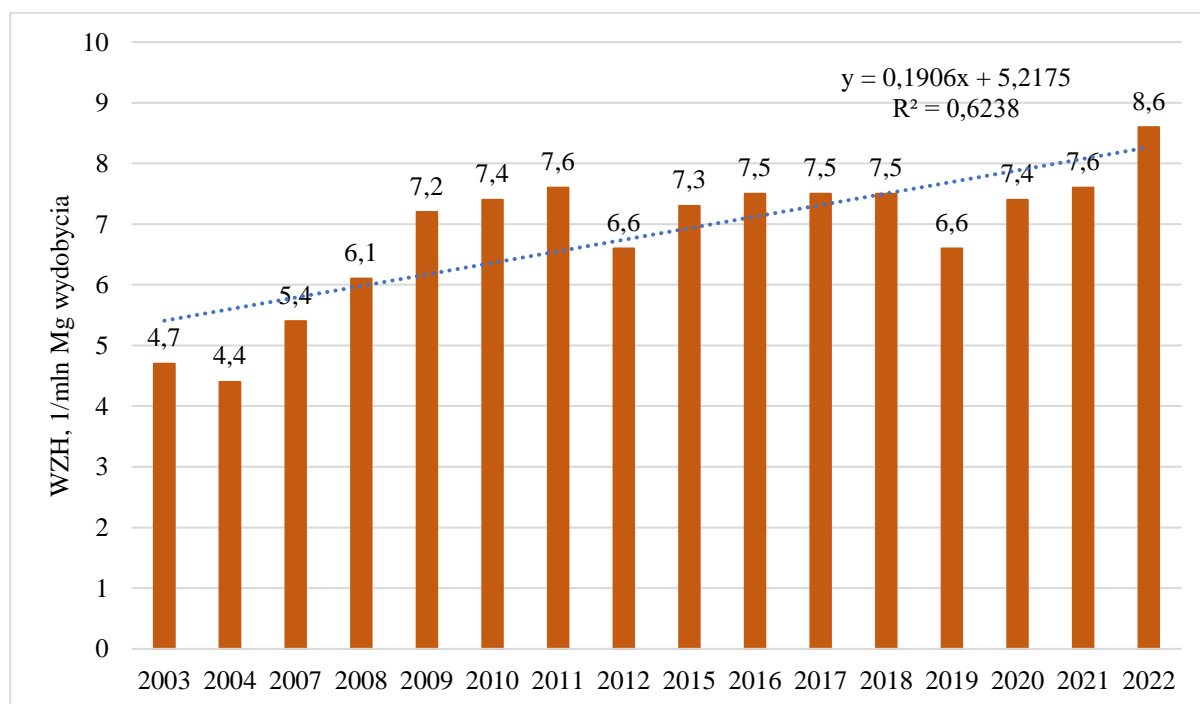
3.2. Zagrożenie hałasem w zakładach przeróbki węgla kamiennego

Hałas stanowi jedno z podstawowych zagrożeń środowiskowych i zawodowych w zakładach mechanicznej przeróbki węgla kamiennego. Jego źródłem są liczne maszyny i urządzenia pracujące w ciągach technologicznych, a poziom oraz charakter oddziaływania są bezpośrednio związane ze specyfiką realizowanych procesów.

Z punktu widzenia oddziaływania na człowieka hałas definiowany jest jako dźwięk niepożądany lub szkodliwy, który przy odpowiednim natężeniu może prowadzić do negatywnych skutków zdrowotnych, w tym trwałego, symetrycznego ubytku słuchu w zakresie wysokich częstotliwości przy długotrwałej ekspozycji na poziomy przekraczające 85 dB [9]. W warunkach przemysłowych szczególne znaczenie ma długotrwała ekspozycja (LEX,8h) oraz wartości maksymalne i szczytowe poziomu dźwięku.

Głównym źródłem hałasu są urządzenia mechaniczne, takie jak kruszarki, przesiewacze i przenośniki, pracujące w sposób ciągły i często pod dużym obciążeniem. Badania wskazują, że poziomy hałasu często przekraczają dopuszczalne wartości, osiągając nawet 95–100 dB [10].

Zagrożenie ma charakter powszechny i systemowy – w górnictwie odsetek pracowników narażonych może przekraczać 16%, a choroby zawodowe występują częściej niż w innych obszarach sektora [11, 12]. Mimo ich spadku problem nie został wyeliminowany, a wskaźniki odnoszone do produkcji wykazują tendencję wzrostową. W analizach stosuje się m.in. wskaźnik WZH, określający liczbę stanowisk zagrożonych hałasem w odniesieniu do ilości wzbogacanego węgla [11].



Rys. 1. Wskaźnik WZH zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w zakładach przeróbki mechanicznej kopalń węgla kamiennego w latach 2003-2022 [opracowanie własne za 11]



Najważniejszym skutkiem długotrwałej ekspozycji na hałas jest trwałe uszkodzenie narządu słuchu. Hałas oddziałuje również na układ nerwowy i układ krążenia, powodując zmęczenie, stres oraz obniżenie koncentracji, co wpływa na bezpieczeństwo pracy.

Ocena zagrożenia opiera się na systematycznych pomiarach natężenia dźwięku prowadzonych zgodnie z obowiązującymi normami. W praktyce stosuje się pomiary parametrów akustycznych, takich jak równoważny poziom dźwięku (LAeq), maksymalny (LAm_{ax}), szczytowy (LCs) oraz poziom ekspozycji (LEX,8h), stanowiący kluczowy wskaźnik narażenia. Dopuszczalne wartości wynoszą m.in. 85 dB dla ekspozycji 8-godzinnej, 115 dB dla poziomu maksymalnego oraz 135 dB dla poziomu szczytowego, jednak w wielu przypadkach są one przekraczane, co wymusza stosowanie działań ograniczających i środków ochrony indywidualnej [13].

Ograniczanie hałasu obejmuje zarówno środki techniczne, jak i organizacyjne, w tym redukcję u źródła, izolację akustyczną, stosowanie obudów i kabin oraz odpowiednią organizację pracy. Uzupełnieniem są indywidualne środki ochrony słuchu. Doświadczenia wskazują jednak, że nawet zaawansowane rozwiązania nie zawsze zapewniają osiągnięcie wymaganych poziomów hałasu. W efekcie pozostaje on zjawiskiem powszechnym i trudnym do eliminacji, a jego ograniczanie wymaga podejścia kompleksowego, łączącego działania techniczne, organizacyjne oraz systematyczny monitoring środowiska pracy.

3.3. Uciążliwość odorowa w zakładach przeróbki węgla kamiennego

Oddziaływanie zapachowe (odorowe) w zakładach przemysłowych, w tym związanych z górnictwem i przeróbką węgla, stanowi istotny, choć trudny do jednoznacznej oceny problem środowiskowy. Odory są efektem emisji mieszaniny związków o niskich progach wyczuwalności, głównie lotnych związków organicznych (VOCs) oraz związków siarki, takich jak dimetylosiarczek (DMS), które odpowiadają za uciążliwość zapachową i wpływają na jakość powietrza, przy czym obecność pyłu zawieszonoego może dodatkowo intensyfikować emisję związków lotnych, pełniąc funkcję ich nośnika.

W środowiskach związanych z eksploatacją i przetwarzaniem węgla emisja odorów wynika zarówno z właściwości surowca, jak i przebiegu procesów technologicznych. Podczas wydobywania, transportu i magazynowania uwalniane są gazy zawarte w węglu, które mogą rozprzestrzeniać się w obrębie zakładu. Dodatkowo pył węglowy, ze względu na rozwiniętą powierzchnię właściwą, może adsorbować lotne związki organiczne (LZO), które następnie – m.in. pod wpływem wzrostu temperatury w procesach technologicznych – ulegają wtórnej emisji do fazy gazowej [14-17]. Ze względu na niski próg wyczuwalności niektórych substancji ich obecność jest odczuwalna nawet przy niewielkich stężeniach.

Dodatkowe źródła tych oddziaływań stanowią procesy technologiczne, zwłaszcza transport, przesyp i magazynowanie, gdzie materiał intensywnie kontaktuje się z powietrzem. W obiektach o ograniczonej wentylacji może dochodzić do kumulacji związków lotnych i wzrostu ich stężenia. Istotną rolę odgrywają także odczynniki flotacyjne, które w warunkach mieszania i napowietrzania mogą emitować VOCs i powodować lokalne oddziaływania zapachowe [18].

Specyfika oddziaływania odorów wynika z ich subiektywnego charakteru oraz zmienności w czasie i przestrzeni. Intensywność zapachu zależy nie tylko od stężenia, lecz także od warunków środowiskowych, takich jak temperatura, wilgotność czy przepływ powietrza. Wiele związków, zwłaszcza siarkowych i niektóre VOCs, cechuje się bardzo niskimi progami percepcji.



Związki lotne, w tym zaadsorbowane na cząstkach pyłu zawieszzonego i wtórnie uwalniane do fazy gazowej, mogą oddziaływać na zdrowie człowieka, zwiększając ryzyko narażenia inhalacyjnego. Powodują podrażnienia układu oddechowego, bóle głowy oraz inne dolegliwości, a w dłuższej perspektywie mogą prowadzić do rozwoju chorób przewlekłych, szczególnie przy długotrwałej ekspozycji [19].

Ograniczanie emisji wymaga przede wszystkim działań u źródła, takich jak poprawa wentylacji, ograniczenie emisji w procesach transportu i magazynowania oraz właściwa organizacja procesów technologicznych. W zależności od charakteru związków stosuje się także metody oczyszczania powietrza, m.in. absorpcję, adsorpcję czy utlenianie, których skuteczność zależy od właściwości substancji. [20]

Uciążliwość odorowa w zakładach przeróbki węgla ma charakter złożony i wymaga podejścia kompleksowego, obejmującego monitoring, analizę źródeł emisji oraz wdrażanie odpowiednich rozwiązań technicznych i organizacyjnych, dostosowanych do specyfiki danego obiektu.

3.4. Odpady górnicze – oddziaływania środowiskowe

Odpady powstające w górnictwie węgla kamiennego obejmują zarówno odpady wydobywcze, jak i – o znacznie większym znaczeniu ilościowym – odpady przeróbcze. Tworzą one podstawowy strumień materiałów odpadowych w tym sektorze i powstają zarówno na etapie eksploatacji złoża, jak i w procesach przeróbki mechanicznej urobku. Ich właściwości fizyczne i chemiczne zależą od warunków geologicznych, jakości kopaliny oraz stosowanych technologii wzbogacania, co przekłada się na zróżnicowanie składu granulometrycznego, mineralnego oraz zawartości substancji palnej. Materiał ten stanowi mieszaninę skał towarzyszących, takich jak ilowce, mułowce, łupki czy piaskowce, pochodzących z różnych pokładów i etapów eksploatacji oraz przeróbki [21, 22].

Odpady wydobywcze (skała płonna) powstają głównie podczas robót przygotowawczych i eksploatacyjnych. Charakteryzują się niską zawartością substancji palnej oraz stosunkowo wysoką wytrzymałością mechaniczną, co umożliwia ich częściowe wykorzystanie gospodarcze, choć w praktyce znaczna ich część trafia na zwałowiska.

Kluczowe znaczenie mają jednak odpady przeróbcze, powstające w zakładach mechanicznej przeróbki węgla w wyniku procesów wzbogacania, takich jak kruszenie, klasyfikacja, płukanie czy flotacja. Obejmują one zarówno frakcje gruboziarniste, jak i drobnoziarniste muły, często zawierające istotne ilości substancji węglowej, i wykazują znaczną reaktywność środowiskową wynikającą z drobnego uziarnienia oraz obecności składników ilastych i organicznych [22].

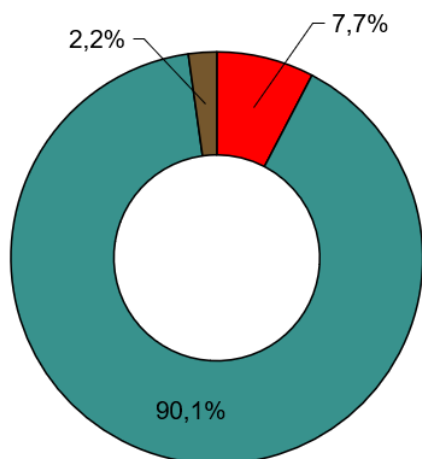
Z tego względu odpady te stanowią istotne źródło presji na wszystkie komponenty środowiska. Ich składowanie na hałdach i w osadnikach prowadzi do przekształceń krajobrazu oraz zajmowania dużych powierzchni. W obrębie zwałowisk zachodzą procesy fizykochemiczne, takie jak utlenianie siarczków czy rozkład substancji organicznej, prowadzące do powstawania odcieków zawierających siarczany, metale ciężkie i inne związki rozpuszczalne. Ich migracja stanowi jedno z głównych zagrożeń dla środowiska gruntowo-wodnego [1].

Istotnym problemem jest również emisja pyłów, szczególnie z materiałów drobnoziarnistych. W warunkach suchych i przy oddziaływaniu wiatru dochodzi do wtórnego unoszenia cząstek, co wpływa na jakość powietrza i powoduje uciążliwości w otoczeniu zakładów. Dodatkowo w zwałowiskach mogą zachodzić procesy samoogrzewania i samozapłonu, prowadzące do emisji gazów i powstawania lokalnych pożarów [1].

Na tym tle szczególnie istotne są zmiany w sposobach gospodarowania odpadami. Analiza wskazuje na niekorzystny trend wzrostu udziału odpadów składowanych przy jednoczesnym spadku ich gospodarczego wykorzystania (rys. 2), co prowadzi do zwiększenia presji na środowisko i świadczy o niewystarczającym wykorzystaniu ich potencjału surowcowego [23].

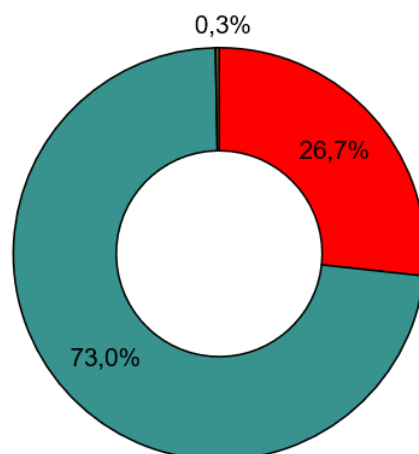
Gospodarka odpadami - 2009 r.

- Składowanie na pow.
- Gospodarcze wykorzystanie na pow.
- Zagospod. na dole



Gospodarka odpadami - 2023 r.

- Składowanie na pow.
- Gospodarcze wykorzystanie na pow.
- Zagospod. na dole



Rys. 2. Różnica sposobu gospodarowania odpadami w okresie 2009-2023 [23]

Pomimo tych zagrożeń odpady górnicze stanowią istotny potencjał surowcowy. Mogą być wykorzystywane m.in. w budownictwie, robotach drogowych, rekultywacji terenów zdegradowanych oraz jako materiał podsadzkowy. Coraz większe znaczenie mają także technologie umożliwiające odzysk składników użytecznych, takich jak węgiel, minerały czy pierwiastki towarzyszące [1].

Współczesne podejście do gospodarki odpadami powęglowymi wpisuje się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym, zakładającą maksymalne wykorzystanie materiałowe odpadów i ograniczenie ich składowania. W tym ujęciu odpady przestają być wyłącznie ubocznym efektem działalności górniczej, a stają się wtórnym źródłem surowców, którego racjonalne wykorzystanie może ograniczać presję na środowisko i zwiększać efektywność gospodarowania zasobami.

4. Projekt NUTRIA – koncepcja i zakres działań ograniczających oddziaływanie środowiskowe

W odpowiedzi na zidentyfikowane wyzwania podjęto realizację projektu „Neutralizacja negatywnego oddziaływania zakładów przeróbczych”, dofinansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w ramach programu „Racjonalne gospodarowanie odpadami i ochrona powierzchni ziemi”. Jego głównym celem jest opracowanie kompleksowych metod, technik i technologii umożliwiających ograniczenie emisji czynników szkodliwych powstających w procesach przeróbki węgla oraz racjonalne zagospodarowanie wytwarzanych odpadów.

Zakres projektu obejmuje kluczowe obszary oddziaływania środowiskowego zakładów przeróbczych, takie jak emisja pyłów, hałasu i związków odorowych, a także obecność substancji chemicznych w pyłe oraz problematyka odpadów przeróbczych. Podejście badawcze ma charakter



kompleksowy i łączy identyfikację źródeł emisji z opracowaniem metod monitoringu oraz technologii ograniczających ich wpływ na środowisko.

Realizacja projektu została podzielona na cztery główne etapy, obejmujące: identyfikację obszarów oddziaływania środowiskowego, opracowanie procedur badawczych, przygotowanie koncepcji rozwiązań ograniczających emisje oraz opracowanie dokumentacji technologicznej umożliwiającej ich wdrożenie. Taka struktura umożliwia przejście od diagnozy problemu do praktycznych rozwiązań możliwych do zastosowania w warunkach przemysłowych.

Istotnym elementem projektu są badania terenowe prowadzone w rzeczywistych warunkach pracy zakładów przerobczych. Obejmują one m.in. pomiary zapylenia powietrza z wykorzystaniem mobilnych stacji pomiarowych, pomiary hałasu oraz analizę rozkładu przestrzennego stężeń pyłów w obrębie instalacji technologicznych. W ramach badań zidentyfikowano obszary o największej emisji pyłu, takie jak strefy kruszenia i przesiewania materiału, gdzie odnotowano najwyższe wartości stężeń oraz znaczący udział frakcji drobnych o istotnym znaczeniu zdrowotnym.

Równolegle prowadzone są badania składu chemicznego pyłów, obejmujące identyfikację obecności wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) oraz metali ciężkich, co pozwala na ocenę ich potencjalnego oddziaływania toksycznego. W obszarze oddziaływań odorowych rozwijane są koncepcje systemów monitoringu, w tym wykorzystujących tzw. „elektroniczny nos”, umożliwiające identyfikację i analizę emisji zapachowych w czasie rzeczywistym.

Badania obejmują również ocenę oddziaływania zakładów na otoczenie, w tym pomiary hałasu oraz analizy percepcji uciążliwości środowiskowych przez mieszkańców terenów sąsiadujących z zakładami. Wyniki badań ankietowych wskazują, że hałas stanowi najczęściej wskazywane źródło dyskomfortu, co podkreśla znaczenie percepcji społecznej w ocenie oddziaływań środowiskowych.

Istotnym kierunkiem prac projektowych jest również opracowanie metod zagospodarowania odpadów przerobczych, zarówno w ujęciu konwencjonalnym, jak i innowacyjnym. Analizowane są możliwości ich wykorzystania w budownictwie, rekultywacji terenów oraz w zaawansowanych procesach materiałowych, takich jak produkcja geopolimerów czy materiałów o specjalnych właściwościach.

Rezultatem projektu będzie zestaw rozwiązań o wysokim potencjale wdrożeniowym, obejmujących technologie redukcji emisji pyłów, hałasu i odorów, systemy monitoringu środowiskowego oraz wytyczne w zakresie identyfikacji i oceny zagrożeń. Opracowane zostaną również dokumentacje technologiczne i przedwdrożeńowe, stanowiące podstawę do ich implementacji w zakładach przemysłowych.

Projekt realizowany jest we współpracy z przedsiębiorstwami górniczymi, w tym m.in. Jastrzębską Spółką Węglową S.A., co umożliwia prowadzenie badań w warunkach rzeczywistych oraz zapewnia dostęp do danych eksploatacyjnych. Dzięki temu opracowywane rozwiązania mają charakter praktyczny i odpowiadają rzeczywistym potrzebom przemysłu.

W dłuższej perspektywie realizacja projektu przyczyni się do ograniczenia oddziaływania zakładów przerobczych na środowisko, poprawy warunków pracy oraz jakości życia w ich otoczeniu, a także do rozwoju nowoczesnych i zrównoważonych technologii w sektorze górniczym.



5. Podsumowanie

Zakłady mechanicznej przeróbki węgla kamiennego odgrywają kluczową rolę w przygotowaniu surowca do wykorzystania przemysłowego, jednak ich funkcjonowanie wiąże się z występowaniem istotnych oddziaływań środowiskowych. Do najważniejszych należą zapylenie, hałas, emisja substancji odorowych (w tym lotnych związków organicznych związanych z cząstkami pyłu) oraz oddziaływanie odpadów górniczych i przerobczych.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że zagrożenia te wpływają zarówno na środowisko pracy, jak i na otoczenie zakładu, oddziałując na bezpieczeństwo pracowników, warunki eksploatacji instalacji oraz jakość środowiska. Szczególne znaczenie mają zapylenie i hałas, które należą do najczęściej występujących czynników szkodliwych, jednak rosnące znaczenie mają również emisje odorowe oraz problematyka zagospodarowania odpadów.

Skuteczne ograniczanie oddziaływań środowiskowych wymaga zintegrowanego podejścia, obejmującego rozwiązania techniczne, organizacyjne oraz systemy monitoringu. Istotną rolę odgrywa rozwój technologii ograniczających emisje oraz racjonalne zagospodarowanie materiałów odpadowych zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

W tym kontekście znaczące miejsce zajmują działania badawczo-rozwojowe, w tym projekt NUTRIA, ukierunkowany na opracowanie kompleksowych metod ograniczania negatywnego oddziaływania zakładów przerobczych. Ich wdrożenie może przyczynić się do poprawy warunków pracy, ograniczenia presji na środowisko oraz rozwoju bardziej zrównoważonych rozwiązań w sektorze górniczym.

Projekt NUTRIA jest współfinansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej na podstawie umowy nr 35/2025/Wn12/KO-nt-bd/D, w ramach programu priorytetowego nr 2.6 „Racjonalne gospodarowanie odpadami i ochrona powierzchni ziemi – zmniejszenie uciążliwości wynikających z wydobywania kopalin”.



Literatura

1. Kowol D., Matusiak P., Baron R., Friebe P., Jendrysik S., Bigda J., Czardybon A., Ignasiak K.: Application of Jigging Beneficiation for Processing of Waste from Post-Mining Heaps for Circular Economy Purposes. *Minerals* 15(11)/2025, 1108, <https://doi.org/10.3390/min15111108>
2. Kowol D., Matusiak P., Palou M.T., Kielar J.: Design and application development of KOMAG-type pulsating concentrators. *Min. Mach.* vol. 44/2026, pp. 1-11, <https://doi.org/10.32056/KOMAG2026.1>
3. Lutyński A.: Zagrożenia pyłem i ich zwalczanie w zakładach przeróbki mechanicznej kopalń węgla kamiennego. *Inż. Miner.* nr 1/2021, s. 13-18. DOI: 29227/IM-2021-01-02.
4. Lutyński A., Lutyński M.: Coal Dust and Methane as a Hazard in Coal Preparation Plants. *Appl. Sci.*, 14/2024, 11433. DOI:10.3390/app142311433.



5. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy; Dz. U. 2018, poz. 1286.
6. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia atmosfery wybuchowej (Dz.U. nr 138 poz. 913).
7. Bałaga D. i inni: 2 Metody i środki zwalczania zagrożeń pyłowych i metanowych w górnictwie węglowym. *Maszyny Górnicze* nr 3/2015.
8. Bałaga D., Kalita M., Siegmund M., Klimek Z., Urbanek A., Wałoszczyk A.: (2018) Projekt instalacji zraszającej NEPTUN do zmniejszania zapylenia w zakładzie przeróbczym KWK "Bolesław Śmiały". *Maszyny Górnicze* nr 3/2018, s. 35-46, ISSN 2450-9442.
9. Mocek P.: Ubytek słuchu wśród górników kopalń węgla kamiennego. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, nr 1/2019, s. 263-279.
10. Lutyński A.: Zagrożenie hałasem w zakładach przeróbki mechanicznej węgla kamiennego. *Masz. Gór.* nr 4/2017 s. 15-22, ISSN 2450-9442.
11. Lutyński A.: Analiza zagrożenia hałasem w zakładach mechanicznej przeróbki węgla kamiennego. *Inż. Miner. T2* nr 2(52) /2023, s. 135-140, DOI:10.29227/IM-2023-02-67.
12. Warunki pracy w 2022 r. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa, Gdańsk 2023.
13. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy Dz.U. 2018 poz. 1286 z późn. zm.
14. Zhu L., Shen D., Luo K.H.: A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods. *Journal of hazardous materials*. 389/2020 122102. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00161-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00161-5)
15. Li, Lq., Song, Jf., Yao, Xl., Huang G., Liu Z., Tang L.: Adsorption of volatile organic compounds on three activated carbon samples: Effect of pore structure. *J. Cent. South Univ.* 19/2012, s. 3530–3539. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1439-x>
16. Lu W., Zhu M., Ding C., Li X., Ma J., Qi Y., Guo M.: Volatile fingerprint and multivariate odor evaluation of gasification slag and natural coal resources using gas chromatography–ion mobility spectrometry and gas chromatography–mass spectrometry characterization. *Microchemical Journal*. Vol. 208/2025 112601.
17. Gryniewicz-Bylina B., Gawlik- Jędrysiak M., Rakwicz B.: Tests of volatile organic compounds in dust from hard coal preparation. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 20(8)/2026 <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112601>
18. Kadagala M. R., Nikkam S., Tripathy S.K. A review on flotation of coal using mixed reagent systems. *Minerals Engineering*. Vol. 173/2021 107217. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107217>
19. Zhou X., Zhou X., Wang C., Zhou H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*. 2023: Vol. 313: 137489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137489>



20. European Commission, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Treatment in the Chemical Sector (WGC BREF), 2016.
21. Sokół W., Tabor A.: Problemy zagospodarowania odpadów powęglowych z górnictwa węgla kamiennego w Polsce Przegląd Geologiczny, vol. 44, nr 7/1996.
22. Kurus K., Białecka B., Foitova Dernerova P.: Model systemu zagospodarowania odpadów z górnictwa węgla kamiennego w górnośląskim zagłębiu węglowym. Systemy wspomaganie w inżynierii produkcji. Jakość i Bezpieczeństwo. 2014. ISBN 978-83-940150-1-5.
23. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Raport 2020, Górnictwo węgla kamiennego w Polsce, online: https://min-pan.krakow.pl/projekty/wp-content/uploads/sites/8/2018/07/Raport-2023_Gornictwo-wegla-kamiennego-w-Polsce.pdf, (dostęp: 28.04.2026).

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.3>

Techniczne możliwości prewencji pożarowej na składowiskach węgla i odpadów pogórnich z kopalń węgla

Jacek Korski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Pożary odpadów pogórnich z kopalń węgla kamiennego lokowane na składowiskach odpadów pogórnich ulegają często samozapaleniu. Powoduje to szkodliwe emisje gazów i par, uciążliwości zapachowe oraz zagrożenie dla przyległych terenów. Zwalczanie takich pożarów jest niezwykle trudne, kosztowne i często nieskuteczne. Dlatego konieczne jest podejmowanie działań prewencyjnych dla ograniczenia możliwości wystąpienia ognisk pożarowych w całym cyklu życia składowiska. Przedstawiono genezę pożarów endogenicznych i celowe działania profilaktyczne w czasie budowy, utrzymania składowiska i ewentualnego wykorzystania jako surowiec antropogeniczny. Wskazano także na czynniki naturalne wpływające na możliwości rozwoju pożaru endogenicznego w różnych fazach istnienia składowiska.

Słowa kluczowe: odpady powęglowe, składowiska odpadów górniczych, hałdy, pożary składowisk odpadów, prewencja pożarowa

Technical possibilities of fire prevention in coal and mining waste dumps from coal mines

Abstract: Coal mine waste fires located in mining waste dumps often spontaneously ignite. This causes harmful gas and vapor emissions, odor nuisance, and a threat to adjacent areas. Fighting such fires is extremely difficult, expensive, and often ineffective. Therefore, preventative measures are necessary to limit the possibility of fire outbreaks throughout the entire life cycle of the dump. The origins of endogenous fires and targeted preventative measures during the construction and maintenance of the dump, and its potential use as an anthropogenic resource, are presented. Natural factors influencing the potential for endogenous fire development in various phases of the dump's existence are also highlighted.

Keywords: coal waste, mining waste dumps, spoil heaps, landfill fires, fire prevention

1. Wprowadzenie

W zagłębiach górniczych, gdzie wydobywa się węgle kopalne pożary składowisk odpadów z procesów wydobywania i wzbogacania (oczyszczania) surowego urobku i składowisk nadkładu zawierającego substancję węglową są stosunkowo częstym zjawiskiem. Z chwilą rozwoju uprzemysłowionych form wydobywania tych węgli, wzrostu wydobywania i wielkości składowisk odpadów pojawiły się pożary składowisk takich odpadów i zauważalne stały się objawy pożarów. Pożary traktowano jako rzecz naturalnie związaną z procesem wydobywania węgla i początkowo nie podejmowano działań gaśniczych lub prewencyjnych, jednak rozwinięte pożary stwarzały bezpośrednie zagrożenie pożarowe dla zakładów górniczych czy siedzib ludzkich. Nie było jednak wiedzy o przyczynach takich pożarów i sposobom ich zapobiegania oraz gaszenia. Stosowane metody składowania poprzez luźne wysypywanie z wozów kopalnianych czy kolejek linowych także sprzyjało powstawaniu ognisk pożarowych. Występował jednak czynnik, który zmniejszał zagrożenie pożarowe dla hałdy w postaci postronnych osób wybierających bryły węgla z masy odpadów. Stwierdzenie takiego faktu spowodowało, że akceptowano obecność osób postronnych w trakcie składowania. Pozytywnym elementem związanym z prewencją pożarową był rozwój technologii oczyszczania

(wzbogacania) węgla surowego, bo zmniejszało to ilość (udział) substancji węglowej w całkowitej masie składowanych odpadów. Postępujący rozwój wiedzy o przyczynach, a zwłaszcza wpływie pożarów składowisk odpadów pogórnich na środowisko sprawił, że zagadnieniem zaczęto się zajmować, ale dopiero wzrost świadomości społeczeństwa o skutkach oddziaływania pożarów sprawił, że zaczęto podejmować badania i działania na rzecz prewencji pożarowej i zwalczania ognisk pożarowych. Jednak fakt, że współcześnie tylko na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego aktywność termiczną wykazuje ponad 20 składowisk wskazuje, że problem nie stracił na znaczeniu [1.2].

2. Przyczyny pożarów składowisk odpadów górniczych z kopalń węgla

Požary składowisk odpadów pogórnich z kopalń węgla kamiennego w odniesieniu do ich przyczyn mają dość bogatą literaturę w Polsce [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], jednak nie przekłada się to na opracowanie spójnych zasad i budowy i utrzymania z uwzględnieniem prewencji pożarowej.

Warunkiem wystąpienia pożaru składowiska odpadów powęglowych jest wystąpienie w dowolnej fazie cyklu jego życia jednocześnie trzech czynników:

- Występowanie w masie składowanego materiału węgla skłonnego do samoutleniania.
- Dostęp tlenu zawartego w powietrzu atmosferycznym do węgla zawartego w odpadach.
- Zdolność akumulacji ciepła w bryle składowiska powodująca po spełnieniu dwóch powyższych warunków przejście samoutlenienia materiału do fazy endotermicznego samozagrzewania i następnie zapłonu.

Na rysunku 1 pokazano warunki powstania pożaru w postaci graficznej.



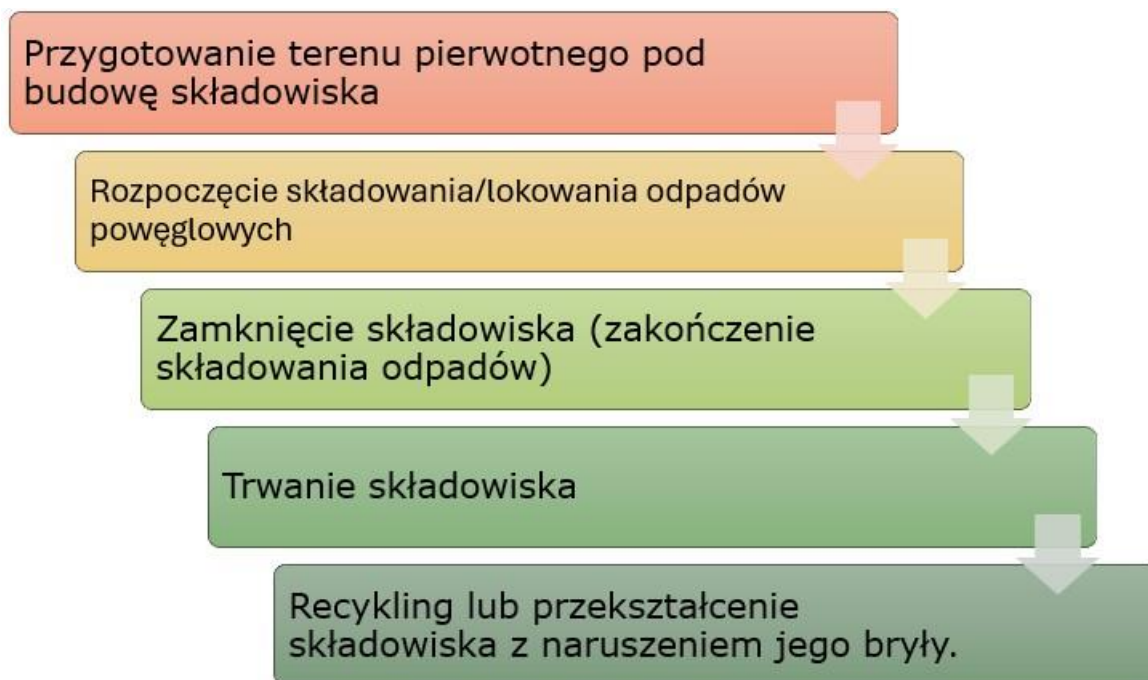
Rys. 1. Czynniki (warunki) rozwoju pożaru w składowisku odpadów powęglowych [opracowanie własne]

Brak jednego z wymienionych czynników istotnie ogranicza ryzyko wystąpienia zjawisk pożarowych. Należy zwrócić uwagę, że na ryzyko wystąpienia pożarów składowiska odpadów wpływ

wywiera tzw. genetyczny wiek węgla wynikający z jego metamorfizmu [5]. Węgłe genetycznie młodsze (np. subbitumiczne czy płomienne węgle energetyczne) cechują się większą skłonnością do zapalenia.

3. Obszary działań prewencji pożarowej w cyklu życia składowiska odpadów powęglowych

Cykl życia składowiska odpadów powęglowych pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Cykl życia składowiska odpadów powęglowych [opracowanie własne]

W fazie projektowania składowiska odpadów pogórnich z kopalni węgla należy, dla ograniczenia aeracji (napowietrzania) składowiska zoptymalizować jego kształt dla ograniczenia wpływu aeracji wiatrowej (np. napowietrzania powierzchniowych wartsów bryły składowiska przez wiatr).

Przygotowanie terenu pod budowę składowiska odpadów powęglowych, oprócz przygotowania odbioru wód odciekowych powinno obejmować uszczelnienie podłoża dla ograniczenia od tej strony ewentualnej migracji powietrza do bryły składowiska. Celowe jest także przygotowanie procesu wzbogacania (oczyszczania) odpadów dla ograniczenia obecności substancji węglowej w masie składowanych odpadów. Na rysunku 3 przedstawiono możliwości ograniczania skłonności materiału odpadowego do samoutleniania.

W fazie budowy składowiska kluczowe jest wykonanie co najmniej zewnętrznej obrysowej warstwy składowiska jako wału wykonanego z materiału niskiej zawartości substancji węglowej zagęszczanej za pomocą walców wibracyjnych (rys. 4). Grubość warstwy zagęszczanej musi być tak dobrana, aby nie występowały warstwy niezagęszczone. W przypadku występowania w składowanym materiale (odpadach powęglowych) znacznych ilości substancji węglowej bardzo celowe jest stosowanie w wymienionej warstwie obrysowej przekładek z niepalnego materiału o dużej szczelności w pionowej odległości 2-3 metry. Uniemożliwi to rozwój ognisk pożarów lub ich przemieszczanie się.



Rys. 3. Ograniczanie skłonności odpadów do samozagrzewania [opracowanie własne]

Postulat zagęszczania składowanego materiału, oprócz argumentu prewencji pożarowej pozwala na zwiększenie masy składowanej materiału w zadanej objętości. Na podstawie obserwacji napowietrzanie powierzchni dużego składowiska wskutek zmian ciśnienia atmosferycznego lub dynamicznego oddziaływania wiatru sięga na głębokość około 2,5-3,0 m od powierzchni bryły [8].

Proces składowania odpadów, w przypadku składowiska nadpoziomowego lub skarpowego powinien być prowadzony z jednoczesną rekultywacją biologiczną za pomocą niskiej roślinności. Powoduje to bowiem wiązanie powierzchni skarp i ochronę tych skarp przed erozją wywołaną spływaniem wody deszczowej. Z punktu widzenia prewencji pożarowej nie należy stosować do zazieleniania składowisk drzewami lub krzewami, których rozbudowane systemy korzeniowe powodują rozszczelnianie bryły składowiska i dostęp do niej powietrza atmosferycznego. W przypadku powstania ogniska pożarowego palące się korzenie powodują migracje ognia podsyconego ich palnym materiałem.

Zbocza skarp nie powinny mieć jednostajnego nachylenia. Należy je przecinać tarasami, które muszą mieć niewielkie nachylenie do zbocza hałdy. Ograniczy to intensywność erozji wodnej wskutek nawalnych deszczów i rozszczelnianie tą drogą bryły składowiska. Swobodna migracja wody w bryle składowiska sprzyja wypłukiwaniu kanałów (kominów) wentylacyjnych i swobodny dostęp powietrza do wnętrza bryły składowiska.

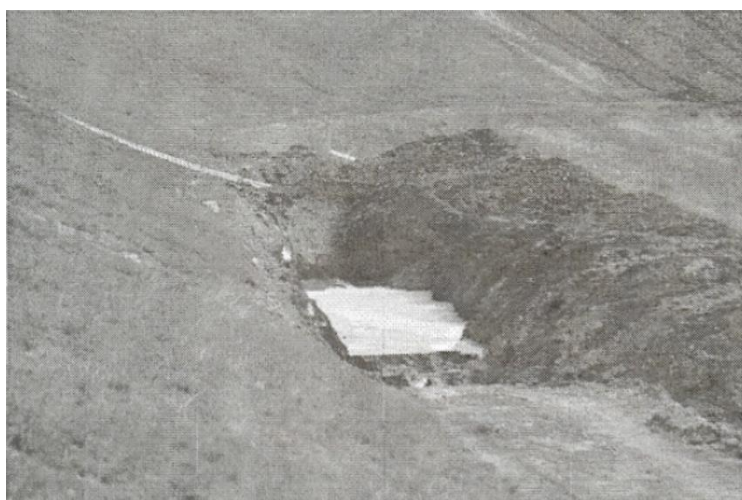


Rys. 4. Przykład walca wibracyjnego do zagęszczania warstwa odpadów [opracowanie własne]

Dostęp tlenu z powietrza atmosferycznego (aeracja) można ograniczyć przez:

- zagęszczanie składowanego materiału celem wyeliminowania pustych przestrzeni („por”),
- mieszanie składowanego materiału z innymi, niepalnymi materiałami wypełniającymi,
- stosowanie ekranów i przekładek izolacyjnych z materiałów niepalnych,
- odpowiednie kształtowanie pochylenia skarp składowiska nadpoziomowego lub skarpowego celem ograniczenia wpływu aeracji dynamicznej pod wpływem wiatru,
- unikanie obsadzania składowiska drzewami lub krzewami,
- przed rozpoczęciem składowania lub w trakcie składowania podawanie do bryły składowiska gazu obojętnego w stanie gazowym.

Z punktu widzenia prewencji pożarowej celowe jest wykonanie niepalnych przegród (ekranów) dzielących bryłę składowiska za pomocą grodziec stalowych (np. ścianki Larsena) lub przez wykonywanie głębokich rówów wypełnionych szczelnie, zagęszczonym materiałem niepalnym (rys. 5).



Rys. 5. Głęboki rów wypełniony substancją niepalną dzielący bryłę składowiska na bloki [opracowanie własne]

W ramach dofinansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej projekt REZACH na jednym z czynnych składowisk odpadów pogórnich z czynnymi ogniskami pożarowymi celem powstrzymania nagrzewania się materiału w sąsiedztwie ekranu. Celem jest przetestowanie skuteczności metody niedopuszczania do akumulacji ciepła i nagrzewania się materiału w rejonie ekranu.



Rys. 6. Eksperymentalny ekran i=termiczny na istniejącym składowisku odpadów powęglowych PGG S.A. KWK ROW Ruch Marcel. Głęboki rów wypełniony substancją niepalną dzielący bryłę składowiska na bloki [opracowanie własne]

Obecnie trwają obserwacje terenowe połączone z pomiarami temperatur. Po zakończeniu budowy składowiska i jego zamknięciu możliwe jest w zasadzie prowadzenie obserwacji i pomiarów, a w razie konieczności podejmowanie działań interwencyjnych. Podkreśla to znaczenie prac prowadzonych w ramach budowy składowiska dla zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego.

4. Podsumowanie

Możliwość wystąpienia ognisk pożarowych na składowisku odpadów górniczych z kopalń węgla kamiennego nakazuje stosowanie technologii składowania/budowy składowiska eliminującej lub co najmniej ograniczającej możliwość wystąpienia pożaru.

Zapobieganie pożarom składowisk odpadów powęglowych musi być zespołem spójnych działań w całym cyklu życia takich składowisk, a błędy popełnione w trakcie jego budowy mogą skutkować wystąpieniem ognisk pożarowych nawet po zakończeniu składowania. Podobnie naruszenie bryły już zamkniętego składowiska może doprowadzić do wystąpienia jego pożaru. Nawet jeżeli na zamkniętym już składowisku odpadów powęglowych nie występowały zjawiska pożarowe to, przy obecności substancji węglowej w ograniczonym zakresie przebiegają procesy samoutleniania i kumulacji ciepła. Przy naruszeniu bryły zjawiska i zwiększeniu dostępu tlenu z powietrza

atmosferycznego zjawiska pożarowe mogą gwałtownie przyspieszyć. Własności skał kierowanych jako odpady na składowisko odpadów pogórnich powodują łatwość akumulowania ciepła z procesu samoutleniania.

Na nieczynnych częściach składowisk użytkowanych lub zamkniętych składowiskach możliwe jest odbieranie ciepła z bryły składowiska i korzystnie, jego wykorzystywanie. W niewielkich składowiskach możliwe jest przesypanie materiału (wietrzenie z oddawaniem ciepła).

Uwzględniając znaczną objętość współczesnych składowisk węgla kamiennego, także w celu prewencji pożarowej należy ciepło takie odbierać w miarę możliwości także wykorzystywać gospodarczo [11, 12]. Choć każde składowisko dopadów, także powęglowych, jest pochodzenia antropogenicznego to podlega typowym zjawiskom i procesom dynamicznym znanym z geologii. Budując takie składowisko należy uwzględnić fakt występowania takich procesów.

Z chwilą pojawienia się ognisk pożarowych należy dążyć do ich izolacji i zawężania palącego się obszaru – w praktyce zlokalizowanie ogniska pożaru jest bardzo trudne.

Literatura

1. Korski J.: Rekuperacja ciepła z istniejących i budowanych składowisk odpadów pogórnich w aspekcie profilaktycznym i odzysku energii. W: Monografia zbiorowa: KOMEKO Konferencja Naukowo-Techniczna Przemysł Przyjazny dla Środowiska. ITG KOMAG, Gliwice 2023.
2. Drenda J., Różański Z., Słota K., Wrona P.: Zagrożenie pożarowe na zwałowiskach odpadów powęglowych. *Górnictwo i Geoinżynieria*. Rok 31, Zeszyt 3/1 2007.
3. Korski J., Fajfer J., Rolka M., Henslok P., Bodynek P., Świąder J., Kubisiak M.: Przekształcenia środowiska geologicznego spowodowane działalnością przemysłową w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym - problematyka składowania odpadów. W: *Geologia i zagadnienia ochrony środowiska w regionie Górnośląskim*. LXXVI Zjazd Naukowy Polskiego Towarzystwa Geologicznego, Rudy k/Rybnika, 14-16 września 2005. Materiały konferencyjne. Pod red. J. Jureczki, Z. Buły, J. Żaby. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2005, s. 223-232.
4. Korski J.: Zarządzanie kryzysowe w sytuacji zagrożenia ekologicznego – pożaru składowiska odpadów górniczych. *Materiały Konferencyjne KOMEKO 2007*. KOMAG, Gliwice 2007. s.67-76. ISBN 978-83-60708 -03-3 3.
5. Cebulak S., Śmieja-Król B., Tabor A., Misz M., Jelonek I., Jelonek Z.: Oksyreaktywna analiza termiczna (OTA) - dobra i tania metoda oceny samozapalności węgla na składowiskach - wstępne wyniki badań. W: *Jureczko J., Buła Z., Żaba J. [red.]: Geologia i zagadnienia ochrony środowiska w regionie górnośląskim*. Państwowy Instytut Geologiczny i Polskie Towarzystwo Geologiczne, Warszawa, 2005.
6. Maciejasz Z., Kruk F.: *Pożary podziemne w kopalniach*. Cz. 1. Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1977

7. Korski J., Friede R., Henslok P.: Likwidacja egzogenicznych ognisk pożarowych składowiska odpadów pogórnich „Waleska” w Łaziskach Górnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1715: Górnictwo z. 271, Gliwice, 2006.
8. Korski J., Henslok P., Bodynek P.: Doświadczenia z likwidacji zapożarowania składowiska odpadów powęglowych "Skalny" w Łaziskach Górnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1650 Górnictwo Z. 261, s. 461-474. Gliwice 2004.
9. Wasilewski S., Korski J.: Wczesne wykrywanie pożarów jako element monitoringu składowisk odpadów powęglowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 8(474) Sierpień 2010.
10. Książkiewicz M.: Geologia dynamiczna, Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne, 1972.
11. Różański Z.: Pozyskiwanie ciepła ze składowisk odpadów powęglowych podlegających naturalnym procesom utleniania. Praca doktorska, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w Gliwicach, grudzień 2002 [materiały niepublikowane].
12. Różański Z.: Badania doświadczalne i modelowe nad pozyskiwaniem energii cieplnej z aktywnego termicznie zwałowiska odpadów powęglowych. W red.: 10-ta Sesja Międzynarodowego Biura Termofizyki Górniczej, Gliwice, Polska 14-18 luty 2005: Referaty. Instytut Geotechnologii, Geofizyki Górniczej i Ekologii Terenów przemysłowych Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Ss. 585-596



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.4>

Regeneracja akumulatorów i pakietów bateryjnych opartych na technologii litowej zgodnie z zasadami obiegu zamkniętego produktów bateryjnych – wyzwanie współczesnego świata

Tomasz Trawiński – Politechnika Śląska

Przemysław Deja – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale zarysowano problematykę zagospodarowania zużytych baterii litowo-jonowych z uwzględnieniem podejścia gospodarki o obiegu zamkniętym. Przedstawiono strukturę rynku oraz wskazano dominującą rolę elektromobilności w generowaniu przyszłych strumieni zużytych baterii. Scharakteryzowano wymagania wynikające z Rozporządzenia (UE) 2023/1542, obejmujące m.in. aspekty bezpieczeństwa, wydajności oraz obowiązki informacyjne. Szczególny nacisk położono na możliwość wydłużenia cyklu życia baterii poprzez ich ponowne wykorzystanie w zastosowaniach stacjonarnych. Zidentyfikowano także kluczowe wyzwania, w tym brak jednoznacznych kryteriów kwalifikacji oraz potrzebę opracowania skalowalnych metod diagnostycznych wspierających proces decyzyjny.

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym, rynek baterii, baterie litowe, regeneracja baterii, drugie życie baterii, diagnostyka baterii

Regeneration of lithium-based batteries and battery packs within the framework of the circular economy for battery products – a challenge of the modern world

Abstract: In the chapter, the issue of managing spent lithium-ion batteries is discussed within the framework of the circular economy approach. The structure of the market is presented, and the dominant role of electromobility in generating future streams of spent batteries is indicated. The requirements arising from Regulation (EU) 2023/1542 are characterized, including, among others, aspects related to safety, performance, and information obligations. Particular emphasis is placed on the possibility of extending the battery life cycle through their reuse in stationary applications. Key challenges were also identified, including the lack of clear qualification criteria and the need to develop scalable diagnostic methods supporting the decision-making process.

Keywords: circular economy, battery market, lithium batteries, battery regeneration, second-life batteries, battery diagnostics

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii magazynowania energii, w szczególności akumulatorów opartych na technologii litowej. Ich powszechne zastosowanie w sektorze elektromobilności, elektroniki użytkowej oraz systemach magazynowania energii sprawia, że stanowią one jeden z kluczowych elementów transformacji energetycznej i dekarbonizacji światowej gospodarki. Jednocześnie rosnąca skala produkcji i eksploatacji tych akumulatorów prowadzi do systematycznego wzrostu ilości zużytych ogniw i pakietów bateryjnych, co generuje istotne wyzwania środowiskowe, technologiczne oraz logistyczne. Tradycyjny model gospodarczy, oparty na liniowym podejściu „weź–wyprodukuj–zużyj–wyrzuć”, okazuje się niewystarczający w kontekście ograniczonych zasobów naturalnych oraz rosnących wymagań w zakresie ochrony środowiska. W szczególności dotyczy to surowców krytycznych wykorzystywanych w produkcji baterii litowych, takich jak lit, kobalt

czy nikiel, których wydobycie wiąże się zarówno z wysokimi kosztami środowiskowymi, jak i ryzykiem geopolitycznym. W odpowiedzi na te wyzwania rozwijana jest koncepcja Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (rys. 1). Gospodarka o Obiegu Zamkniętym lub inaczej gospodarka cyrkularna (Circular Economy) to model biznesowy, który minimalizuje zużycie surowców oraz powstawanie odpadów. Jej celem jest zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych i poziomu wykorzystania energii. Tworzy ona zamknięte pętle procesów, w których powstające odpady traktowane są jako surowce w kolejnych fazach produkcji [1].



Rys.1. Koncepcja Gospodarki o Obiegu Zamkniętym

Gospodarka o obiegu zamkniętym zakłada możliwie długie utrzymywanie produktów, materiałów i surowców w obiegu gospodarczym. W praktyce oznacza to ograniczanie ilości odpadów oraz zwiększenie udziału procesów ponownego użycia, naprawy, regeneracji i recyklingu [1].

W sektorze baterijnym implementacja zasad GOZ nabiera szczególnego znaczenia. Z jednej strony konieczne jest zapewnienie wysokiej efektywności odzysku cennych materiałów, z drugiej zaś – coraz większą uwagę zwraca się na strategię wydłużania życia baterii poprzez ich regenerację oraz ponowne wykorzystanie w aplikacjach o niższych wymaganiach energetycznych (tzw. „second life”).

Istotnym czynnikiem przyspieszającym rozwój GOZ w obszarze baterii są regulacje prawne, w szczególności nowe ramy legislacyjne Unii Europejskiej, które wprowadzają obowiązki dotyczące m. in. śladu węglowego, poziomów odzysku materiałów oraz tzw. paszportu baterijnego. Wymagania te wymuszają nie tylko zwiększenie efektywności procesów recyklingu, ale również rozwój zaawansowanych metod diagnostyki, monitorowania i zarządzania cyklem życia baterii.



Pomimo rosnącego zainteresowania regeneracją baterii litowych, proces ten wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych, takich jak niejednorodność zużycia ogniw, brak standaryzacji konstrukcyjnej pakietów bateryjnych, czy konieczność zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji. Kluczową rolę odgrywa tu diagnostyka stanu technicznego, umożliwiająca ocenę parametrów takich jak pojemność, rezystancja wewnętrzna czy stan zdrowia (State of Health, SoH), co stanowi podstawę podejmowania decyzji o dalszym kierunku zagospodarowania baterii.

2. Rynek baterii litowych

Rynek baterii litowych stanowi jeden z kluczowych filarów współczesnej transformacji energetycznej oraz cyfrowej. Dynamiczny rozwój technologii litowych wynika przede wszystkim z rosnącego zapotrzebowania na magazynowanie energii oraz postępującej elektryfikacji transportu [2]. W ostatnich latach sektor ten uległ intensywnej ekspansji, stając się strategicznym obszarem gospodarki globalnej. W tabeli 1 przedstawiono ewolucję globalnego popytu na baterie litowo-jonowe w latach 2020–2030 wraz ze zmianą jego struktury sektorowej, na podstawie danych [2].

Globalny popyt na baterie litowe wg segmentów (2020–2030)

Tabela 1.

Rok	Całkowity popyt [GWh]	Pojazdy elektryczne [GWh]	Magazyny energii [GWh]	Elektronika użytkowa [GWh]	Pojazdy elektryczne [%]	Magazyny energii [%]	Elektronika użytkowa [%]
2020	300	165	30	105	55	10	35
2021	460	276	55	129	60	12	28
2022	700	455	91	154	65	13	22
2023	950	665	143	143	70	15	15
2024	1200	888	192	120	74	16	10
2025	1500	1125	255	120	75	17	8
2026	1900	1444	342	114	76	18	6
2027	2400	1848	432	120	77	18	5
2028	3000	2340	570	90	78	19	3
2029	3600	2844	684	72	79	19	2
2030	4300	3440	774	86	80	18	2

W analizowanym okresie całkowity popyt rośnie z 300 GWh w 2020 roku do poziomu przekraczającego 4300 GWh w 2030 roku, co oznacza ponad czternastokrotny wzrost rynku. Dominującym segmentem pozostają baterie stosowane w pojazdach elektrycznych (EV), których udział wzrasta z 55% w 2020 roku do 80% w 2030 roku. W ujęciu wolumenowym oznacza to wzrost zapotrzebowania z poziomu 165 GWh do ponad 3400 GWh. Wskazuje to jednoznacznie, że rozwój elektromobilności jest głównym czynnikiem napędzającym globalny rynek baterii.

Segment magazynów energii również wykazuje bardzo dynamiczny wzrost. Jego udział zwiększa się z 10% do 18% w 2030 roku, natomiast wolumen rośnie z około 30 GWh do niemal 800 GWh. Jest to najszybciej rozwijający się segment rynku, silnie powiązany z transformacją energetyczną oraz integracją odnawialnych źródeł energii.

W przeciwieństwie do powyższych sektorów, segment elektroniki użytkowej traci znaczenie strukturalne. Jego udział spada z 35% w 2020 roku do 2% w 2030 roku, mimo że wolumen pozostaje względnie stabilny. Oznacza to, że sektor ten nie rośnie w tempie porównywalnym z elektromobilnością i magazynowaniem energii.



Tabela 1 ilustruje fundamentalną transformację rynku baterii – od dominacji zastosowań w elektronice użytkowej do systemu zorientowanego na transport elektryczny i energetykę. Z punktu widzenia badań nad regeneracją i recyklingiem akumulatorów oznacza to konieczność koncentracji na bateriach trakcyjnych oraz systemach magazynowania energii jako głównych przyszłych strumieniach materiałowych.

3. Regeneracja w kontekście Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542

3.1. Przedmiot Rozporządzenia

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii [3] obejmuje wszystkie typy baterii wprowadzanych do obrotu lub oddawanych do użytku na obszarze Unii Europejskiej, niezależnie od miejsca ich produkcji. Przepisy te mają zastosowanie zarówno do baterii sprzedawanych jako odrębne produkty, jak i do tych stanowiących element urządzeń, lekkich środków transportu, pojazdów lub innych wyrobów, niezależnie od sposobu ich integracji z produktem końcowym. Regulacje obowiązują bez względu na to, czy dana bateria została zaprojektowana do konkretnego zastosowania, czy ma charakter uniwersalny, a także niezależnie od tego, czy jest dostarczana razem z produktem, w którym ma być używana, czy jako komponent oddzielny. Za moment wprowadzenia do obrotu uznaje się pierwsze udostępnienie baterii na rynku unijnym przez producenta lub importera w celu jej dystrybucji, wykorzystania lub konsumpcji, niezależnie od tego, czy odbywa się to odpłatnie, czy nieodpłatnie. Zakres regulacji obejmuje również zestawy bateryjne, rozumiane jako układy ogniw połączonych ze sobą lub zamkniętych we wspólnej obudowie, tworzące funkcjonalną całość. W szczególności przepisy odnoszą się do szerokiego spektrum produktów, w tym:

- baterii pierwotnych i wtórnych,
- baterii zewnętrznych,
- baterii przenośnych oraz ogólnego zastosowania,
- baterii stosowanych w lekkich środkach transportu,
- baterii rozruchowych,
- baterii przemysłowych,
- baterii trakcyjnych wykorzystywanych w pojazdach elektrycznych,
- stacjonarnych systemów magazynowania energii.

Postanowienia rozporządzenia obejmują także baterie wycofane z eksploatacji oraz poddane procesom regeneracji, co podkreśla jego kompleksowy charakter w kontekście całego cyklu życia produktów bateryjnych.

Nowe ramy prawne Unii Europejskiej obejmują cały cykl życia baterii – od wprowadzenia do obrotu, przez użytkowanie, aż po ponowne użycie, regenerację i recykling. Rozporządzenie 2023/1542 wzmacnia znaczenie bezpieczeństwa, trwałości, śladu węglowego oraz przejrzystości informacyjnej w sektorze bateryjnym [3].



3.2. Wymogi Rozporządzenia

Rozporządzenie [3] wprowadza wymogi mające na celu ochronę zdrowia ludzi i środowiska oraz zapewnienie bezpieczeństwa i wydajności baterii. Zawiera ograniczenia dotyczące stosowania niebezpiecznych substancji, w tym rtęci, kadmu i ołowiu, które nie mogą przekraczać określonych wartości wagowych, oraz przewiduje przygotowanie do 31 grudnia 2027 r. sprawozdania przez Komisję Europejską wspomaganą przez Europejską Agencję Chemikaliów, dotyczącego substancji szkodliwych dla zdrowia lub środowiska lub utrudniających recykling. Rozporządzenie wymaga również określenia śladu węglowego baterii w przeliczeniu na kilogram ekwiwalentu CO₂ na kilowatogodzinę dostarczonej energii, z uwzględnieniem poszczególnych etapów cyklu życia, a także wprowadza obowiązek ustalania zawartości materiałów z recyklingu w bateriach przemysłowych, bateriach do pojazdów elektrycznych, bateriach stosowanych w lekkich środkach transportu oraz w bateriach rozruchowych, oświetleniowych i zapłonowych. Rozporządzenie precyzuje minimalne parametry wydajności i trwałości baterii przenośnych, baterii nadających się do ponownego ładowania, baterii stosowanych w lekkich środkach transportu, baterii przemysłowych o pojemności powyżej 2 kWh oraz baterii do pojazdów elektrycznych, obejmujące pojemność znamionową, retencję i odzysk ładunku, liczbę cykli, rezystancję wewnętrzną, moc oraz całkowitą sprawność energetyczną. Ponadto określono wymagania bezpieczeństwa stacjonarnych systemów magazynowania energii, uwzględniające odporność na gwałtowne zmiany temperatury, zwarcia zewnętrzne i wewnętrzne, przeładowanie i nadmierne rozładowanie, przegrzanie, propagację termiczną, uszkodzenia mechaniczne, ryzyko pożaru oraz emisję gazów toksycznych. Rozporządzenie przewiduje również obowiązek oznakowania baterii etykietą zawierającą informacje o selektywnej zbiórce, kodem QR oraz, w przypadku zawartości kadmu lub ołowiu powyżej określonych progów, symbolem chemicznym metalu, a także wprowadzenie elektronicznego „paszportu baterii” i rejestrowanie danych o stanie życia i przewidywanej żywotności w systemach zarządzania baterią dla stacjonarnych systemów magazynowania energii, baterii stosowanych w lekkich środkach transportu i baterii do pojazdów elektrycznych. Wszystkie przedstawione wymagania podlegają ocenie zgodności przeprowadzanej przez jednostki notyfikowane.

Jednakże, na obecnym etapie nie opracowano wykazu norm zharmonizowanych z przedmiotowym rozporządzeniem.

3.3. Paszport baterii

Paszport baterii stanowi jedno z kluczowych narzędzi wspierających identyfikowalność produktu i dostęp do danych o jego historii eksploatacji. Ma to szczególne znaczenie w procesach ponownego użycia, regeneracji oraz kwalifikacji baterii do zastosowań drugiego życia [3]. Paszport baterii to cyfrowy rejestr informacji o baterii, mający umożliwić jej identyfikację, śledzenie i wymianę kluczowych danych w całym cyklu życia. W myśl Rozporządzenia [3], od 18.02.2027 r. wszystkie baterie LMT (lekkie środki transportu), baterie przemysłowe >2 kWh oraz baterie do pojazdów elektrycznych otrzymują elektroniczny wpis zwany paszportem baterii. Paszport zawiera dane o modelu i konkretnym egzemplarzu baterii (np. dane techniczne, wydajność, stan zdrowia, informacje o cyklu życia) – część z nich udostępniana jest publicznie, a część tylko uprawnionym podmiotom zgodnie z zał. XIII Rozporządzenia. Jego celem jest maksymalizacja wymiany informacji i poprawa przejrzystości łańcucha dostaw (w tym śladu węglowego i pochodzenia surowców), ułatwienie napraw, ponownego użycia i recyklingu oraz wsparcie nadzoru rynku. Paszport baterii ma być oparty na otwartych standardach interoperacyjnych i dostępny poprzez np. kod QR umieszczany na baterii lub jej opakowaniu. W przypadku baterii regenerowanych lub przygotowanych do ponownego użycia



obowiązek paszportu spoczywa na podmiocie wprowadzającym je do obrotu – taki egzemplarz otrzymuje nowy paszport powiązany z paszportami oryginałów.

4. Kryteria kwalifikacji baterii do zastosowań drugiego życia

Baterie litowe stosowane w pojazdach elektrycznych podlegają stopniowej degradacji w trakcie eksploatacji, co prowadzi do obniżenia ich parametrów użytkowych, takich jak pojemność, energia zmagazynowana czy sprawność energetyczna. Przyjmuje się, że moment wycofania baterii z zastosowań trakcyjnych następuje zazwyczaj w chwili spadku jej stanu życia (SoH) do poziomu poniżej 80% wartości początkowej [4]. Na tym etapie bateria często nie spełnia już wymagań stawianych przez sektor elektromobilności, jednak nadal zachowuje istotny potencjał użytkowy, umożliwiając jej wykorzystanie w mniej wymagających aplikacjach.

Koncepcja drugiego życia baterii jest od kilku lat wskazywana jako jeden z najbardziej obiecujących kierunków wydłużania cyklu życia systemów litowych. Jej zasadność wynika z faktu, że baterie wycofane z zastosowań trakcyjnych często nadal zachowują parametry wystarczające do pracy w mniej wymagających aplikacjach stacjonarnych [5]. Kluczowym zagadnieniem jest właściwa kwalifikacja baterii do dalszego wykorzystania poza pierwotnym zastosowaniem, określanego jako tzw. „drugie życie”. Proces ten wymaga przeprowadzenia szczegółowej diagnostyki obejmującej ocenę pojemności, rezystancji wewnętrznej, stabilności cyklicznej oraz bezpieczeństwa użytkowania. Szczególnie istotne jest wykrycie nieodwracalnych uszkodzeń, takich jak degradacja struktury materiałów elektrodowych, obecność zwarców wewnętrznych czy uszkodzenia mechaniczne, które mogą dyskwalifikować baterię z dalszego użytkowania.

W literaturze podkreśla się, że najważniejszym ograniczeniem zastosowań drugiego życia nie jest sama dostępność zużytych baterii, lecz trudność ich wiarygodnej kwalifikacji. Problemy dotyczą przede wszystkim niejednorodności degradacji, różnic konstrukcyjnych między pakietami oraz konieczności zachowania wysokiego poziomu bezpieczeństwa użytkowania [6]. Baterie wycofane z pojazdów elektrycznych, które nie spełniają już wymagań aplikacji trakcyjnych, mogą być z powodzeniem wykorzystywane w systemach stacjonarnych, gdzie wymagania dotyczące gęstości mocy i dynamiki pracy są znacznie niższe. Do najczęstszych zastosowań drugiego życia należą stacjonarne systemy magazynowania energii, wspierające integrację odnawialnych źródeł energii, stabilizację sieci elektroenergetycznych oraz zarządzanie szczytowym zapotrzebowaniem na energię. W takich aplikacjach kluczowa jest zdolność do magazynowania energii oraz długotrwałej pracy przy stosunkowo niewielkich obciążeniach. Do najczęściej rozważanych zastosowań drugiego życia należą stacjonarne magazyny energii współpracujące z odnawialnymi źródłami energii oraz systemy zarządzania profilem obciążenia. Tego typu aplikacje charakteryzują się niższymi wymaganiami mocy i dynamiki pracy niż sektor trakcyjny, dzięki czemu mogą efektywnie wykorzystywać baterie częściowo zdegradowane [7].

Istotnym kryterium kwalifikacyjnym jest również jednorodność parametrów ogniw wchodzących w skład pakietu. W praktyce często obserwuje się znaczną nierównomierność degradacji poszczególnych ogniw, co wymaga ich selekcji, grupowania oraz ponownej konfiguracji pakietów. Proces ten może obejmować demontaż oryginalnych modułów, testowanie pojedynczych ogniw oraz ich ponowne zestawianie w nowe struktury o zbliżonych parametrach elektrycznych.

Oprócz aspektów technicznych istotne znaczenie mają również kwestie bezpieczeństwa. Baterie przeznaczone do drugiego życia muszą spełniać określone wymagania dotyczące stabilności termicznej oraz odporności na uszkodzenia, a ich dalsza eksploatacja powinna być wspierana przez odpowiednie systemy zarządzania baterią.



Należy również podkreślić znaczenie informacji o historii eksploatacji baterii. Dane dotyczące liczby cykli ładowania i rozładowania, warunków pracy czy występujących zdarzeń awaryjnych mogą w istotny sposób wspierać proces decyzyjny dotyczący dalszego wykorzystania baterii. W tym kontekście szczególną rolę odgrywa koncepcja paszportu bateryjnego, umożliwiającego dostęp do kluczowych informacji w całym cyklu życia produktu.

Baterie wycofane z pojazdów elektrycznych nie zawsze stanowią odpad wymagający recyklingu materiałowego. W wielu przypadkach możliwe jest ich efektywne wykorzystanie w ramach koncepcji drugiego życia, pod warunkiem spełnienia określonych kryteriów technicznych i bezpieczeństwa. Właściwa kwalifikacja oraz przygotowanie baterii do nowych zastosowań stanowią kluczowy element zwiększający efektywność wykorzystania zasobów oraz ograniczający negatywny wpływ na środowisko.

5. Wyzwania i ograniczenia w regeneracji

Regeneracja akumulatorów i pakietów bateryjnych opartych na technologii litowej stanowi ważny kierunek w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym, jednak jej wdrożenie na skalę przemysłową napotyka liczne bariery natury technicznej, ekonomicznej oraz organizacyjnej. Ich przezwyciężenie jest kluczowe dla efektywnego wykorzystania potencjału regeneracji jako alternatywy dla recyklingu materiałowego.

Jednym z głównych problemów jest nierównomierna degradacja ogniw wchodzących w skład pakietów bateryjnych. W wyniku różnic w temperaturze pracy, obciążeniu czy warunkach eksploatacji poszczególne ogniwa charakteryzują się odmiennym stanem życia (SoH), pojemnością oraz rezystancją wewnętrzną. Powoduje to trudności w ich ponownym grupowaniu, co jest niezbędne do zapewnienia stabilnej i bezpiecznej pracy zregenerowanego pakietu. Niewłaściwe dopasowanie ogniw może prowadzić do przyspieszonej degradacji lub nawet stanów niebezpiecznych.

Istotnym ograniczeniem jest brak jednolitych standardów projektowych baterii, szczególnie w sektorze pojazdów elektrycznych. Różnice w konstrukcji modułów, sposobie łączenia ogniw, systemach zarządzania baterią (BMS) czy metodach chłodzenia utrudniają proces demontażu, diagnostyki oraz regeneracji. W wielu przypadkach pakiety są projektowane w sposób utrudniający ich demontaż, co zwiększa koszty operacyjne, jak i czas procesu.

Kluczowym elementem procesu kwalifikacji jest ocena stanu zdrowia baterii (SoH), która może być realizowana różnymi metodami – od klasycznych testów pojemności i rezystancji wewnętrznej po bardziej zaawansowane techniki estymacyjne. W literaturze podkreśla się jednak, że szczególnym wyzwaniem pozostaje opracowanie metod jednocześnie wiarygodnych, szybkich i skalowalnych dla zastosowań przemysłowych [8]. Efektywna regeneracja wymaga precyzyjnej diagnostyki stanu technicznego ogniw. Jednym z perspektywicznych kierunków diagnostyki baterii przeznaczonych do drugiego życia są metody wykorzystujące spektroskopię impedancyjną oraz algorytmy uczenia maszynowego. Podejście to może przyspieszyć ocenę stanu technicznego baterii i poprawić trafność klasyfikacji przy dużych wolumenach ogniw lub modułów [9].

Zaawansowane metody pozwalają na dokładną ocenę parametrów baterii, jednak wiążą się z wysokimi kosztami aparatury oraz czasochłonnością. W warunkach przemysłowych kluczowe jest opracowanie szybkich, skalowalnych i stosunkowo tanich metod diagnostycznych, które umożliwią klasyfikację dużych wolumenów zużytych baterii. Baterie litowe, szczególnie w stanie zużycia (brak informacji o liczbie cykli ładowania) lub uszkodzenia, stanowią istotne zagrożenie związane z możliwością wystąpienia zjawiska niekontrolowanej, samonapędzającej się reakcji chemicznej



wewnątrz akumulatora (głównie Li-ion), w której wzrost temperatury prowadzi do dalszego, gwałtownego wydzielania ciepła. Procesy takie jak demontaż, testowanie czy ponowne ładowanie wymagają zachowania rygorystycznych procedur bezpieczeństwa oraz odpowiedniej infrastruktury technicznej. Ryzyko to zwiększa koszty operacyjne oraz stanowi barierę dla mniejszych podmiotów chcących wejść na rynek regeneracji.

Jednym z kluczowych czynników ograniczających rozwój regeneracji jest jej opłacalność ekonomiczna. Koszty związane z logistyką, diagnostyką, demontażem oraz ponownym montażem pakietów często konkurują z malejącymi kosztami produkcji nowych baterii. Dodatkowo, brak stabilnych modeli biznesowych oraz niepewność co do jakości i trwałości zregenerowanych systemów wpływają na ograniczone zainteresowanie inwestorów. Opłacalność regeneracji jest silnie uzależniona od: ceny surowców, skali operacji, stopnia automatyzacji procesów, zastosowania końcowego.

Efektywne funkcjonowanie systemu regeneracji wymaga dobrze rozwiniętej infrastruktury logistycznej obejmującej zbiórkę, transport, magazynowanie oraz identyfikację baterii. Problemem jest brak pełnej informacji o historii eksploatacji, co utrudnia ocenę ich rzeczywistego stanu. W tym kontekście kluczową rolę zaczyna odgrywać koncepcja paszportu bateryjnego, umożliwiającego śledzenie parametrów i zdarzeń w całym cyklu życia produktu.

6. Właściwa klasyfikacja

Szczególne znaczenia w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym nabiera właściwe rozróżnienie baterii kwalifikujących się do procesów drugiego życia od tych, które powinny zostać skierowane bezpośrednio do recyklingu materiałowego. Przedwczesne kierowanie baterii o zachowanym potencjale użytkowym do procesów odzysku surowców prowadzi do nieefektywnego wykorzystania zasobów. Procesy recyklingu, mimo że niezbędne w końcowej fazie cyklu życia baterii, wiążą się z zużyciem energii oraz stratami materiałowymi, które mogą zostać ograniczone poprzez wcześniejsze ponowne wykorzystanie baterii w mniej wymagających zastosowaniach. Właściwa kwalifikacja baterii umożliwi maksymalizację wartości użytkowej zgromadzonej w nich energii i materiałów poprzez wydłużenie ich cyklu życia. Z punktu widzenia systemowego oznacza to przesunięcie momentu wejścia baterii w etap recyklingu, co przekłada się na zmniejszenie zapotrzebowania na surowce pierwotne oraz ograniczenie emisji związanych z produkcją nowych ogniw. W praktyce wymaga to zastosowania wiarygodnych i skalowalnych metod diagnostycznych, które pozwolą na jednoznaczne określenie granicy opłacalności i bezpieczeństwa dalszego użytkowania baterii.

Należy podkreślić, że brak odpowiednich procedur klasyfikacyjnych lub ich niedostateczna dokładność może prowadzić zarówno do odrzucenia baterii o jeszcze znaczącym potencjale użytkowym, jak i do dopuszczenia do dalszego użytkowania baterii zdegradowanych w stopniu zagrażającym bezpieczeństwu. W związku z tym kluczowe jest opracowanie znormalizowanych kryteriów oceny oraz integracja danych eksploatacyjnych, co w przyszłości może być wspierane przez rozwój systemów cyfrowych, takich jak paszport baterii.

Z perspektywy środowiskowej i ekonomicznej optymalna strategia postępowania z zużytymi bateriami powinna opierać się na hierarchii działań, w której pierwszeństwo mają procesy ponownego użycia i regeneracji, a dopiero w dalszej kolejności recykling materiałowy. Takie podejście pozwala na pełniejsze wykorzystanie potencjału technologii litowo-jonowych oraz wpisuje się w założenia zrównoważonego rozwoju i efektywnego gospodarowania zasobami.



Wybór pomiędzy ponownym użyciem, zastosowaniem drugiego życia, regeneracją a recyklingiem nie powinien być oparty wyłącznie na jednym parametrze technicznym. Coraz częściej wskazuje się potrzebę łączenia kryteriów technicznych, ekonomicznych i środowiskowych w jednolitym modelu decyzyjnym, który pozwala wskazać najbardziej racjonalną ścieżkę dalszego zagospodarowania baterii [10].

Efektywne funkcjonowanie systemu zagospodarowania zużytych baterii wymaga nie tylko odpowiednich technologii, ale również rozwiniętego zaplecza logistycznego i regulacyjnego. Obejmuje to identyfikację baterii, organizację transportu, magazynowanie, dostęp do danych eksploatacyjnych oraz spójne otoczenie prawne wspierające procesy odzysku i ponownego wykorzystania [11]. Ponadto należy podkreślić, że pomimo rosnącego znaczenia koncepcji drugiego życia baterii, obecnie brakuje szczegółowych i jednocześnie skalowalnych wytycznych dotyczących ich kwalifikacji do dalszego użytkowania. Istniejące regulacje prawne, w tym Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542, koncentrują się głównie na wymaganiach związanych z bezpieczeństwem, trwałością, śladem węglowym oraz recyklingiem materiałowym, nie definiując jednoznacznych kryteriów decyzyjnych pozwalających na rozróżnienie baterii przeznaczonych do ponownego użycia od tych, które powinny zostać poddane odzyskowi surowców.

Brak ujednoczonych procedur klasyfikacyjnych stanowi istotną barierę dla rozwoju rynku regeneracji i zastosowań drugiego życia, ograniczając możliwość podejmowania decyzji w sposób powtarzalny, obiektywny i ekonomicznie uzasadniony. W praktyce prowadzi to do dużej zmienności podejść stosowanych przez poszczególne podmioty oraz zwiększa ryzyko zarówno przedwczesnego kierowania baterii do recyklingu, jak i dopuszczenia do dalszego użytkowania systemów o niewystarczającym poziomie bezpieczeństwa. W ujęciu gospodarki o obiegu zamkniętym recykling materiałowy nie powinien być jedyną odpowiedzią na problem zużytych baterii litowo-jonowych. Znacznie korzystniejsze jest podejście hierarchiczne, w którym pierwszeństwo mają działania prowadzące do wydłużenia życia produktu, a dopiero później odzysk materiałów [12]. W związku z tym opracowanie szczegółowych, standaryzowanych oraz możliwych do zastosowania na skalę przemysłową wytycznych kwalifikacyjnych stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnego sektora baterijnego. Wytyczne te powinny uwzględniać zarówno aspekty techniczne (takie jak stan zdrowia, rezystancja wewnętrzna, stabilność cykliczna), jak i dane eksploatacyjne oraz wymagania dotyczące bezpieczeństwa, umożliwiając jednoznaczne określenie optymalnej ścieżki dalszego postępowania z baterią w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym.

7. Model decyzyjny zagospodarowania baterii

W celu efektywnego zarządzania zużytymi bateriami litowymi w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym konieczne jest zastosowanie modelu decyzyjnego umożliwiającego przypisanie baterii do jednego z możliwych kierunków dalszego zagospodarowania. Model ten powinien opierać się na analizie zestawu parametrów diagnostycznych oraz eksploatacyjnych. Na podstawie uzyskanych danych bateria klasyfikowana jest do jednej z czterech ścieżek decyzyjnych:

- ponowne użycie (reuse) – bateria spełnia wymagania pierwotnej aplikacji (ponowne użycie w tym samym celu),
- zastosowanie drugiego życia (second-life/repurposing) – bateria wymaga redukcji wymagań operacyjnych (ponowne użycie w innym celu),
- regeneracja (remanufacturing) – możliwe jest przywrócenie parametrów użytkowych (obejmuje operacje techniczne przywracające baterię do określonych parametrów, w tym ocenę ogniw



- i modułów – przywrócenie pojemności do co najmniej 90% pierwotnej pojemności znamionowej, przy ograniczeniu różnicy SoH między ogniwami),
- recykling materiałowy – brak możliwości dalszego wykorzystania baterii.

Model decyzyjny ma charakter hierarchiczny, w którym nadrzędnym celem jest maksymalizacja wartości użytkowej baterii przed skierowaniem jej do procesów odzysku materiałowego. Procedura klasyfikacji zużytych baterii litowych stanowi kluczowy etap systemu zarządzania ich cyklem życia i obejmuje sekwencję działań diagnostycznych oraz decyzyjnych. Działania diagnostyczne umożliwiają powtórne użycie ogniw bezpośrednio w innych aplikacjach. Proces obejmuje zestaw działań technicznych ukierunkowanych na przywrócenie parametrów użytkowych baterii i ich przygotowanie do dalszego wykorzystania w nowych aplikacjach. Zastosowanie uporządkowanego modelu decyzyjnego oraz standaryzowanej procedury klasyfikacji umożliwia zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów materiałowych oraz ograniczenie liczby baterii kierowanych przedwcześnie do recyklingu. W konsekwencji system ten wspiera realizację założeń gospodarki o obiegu zamkniętym poprzez maksymalizację wartości użytkowej baterii oraz minimalizację strat materiałowych i energetycznych w całym cyklu życia produktu.

8. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój technologii litowych oraz ich rosnące znaczenie w sektorach takich jak elektromobilność, energetyka i elektronika użytkowa sprawiają, że zarządzanie cyklem życia baterii staje się jednym z kluczowych wyzwań współczesnej gospodarki. W szczególności dotyczy to konieczności odejścia od modelu liniowego na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym, w której istotną rolę odgrywają procesy regeneracji oraz ponownego wykorzystania baterii.

Analiza rynku wskazuje, że głównym obszarem zastosowań akumulatorów litowych pozostaje sektor pojazdów elektrycznych, który w przyszłości będzie generował największy wolumen zużytych systemów bateryjnych. W konsekwencji rośnie znaczenie efektywnych metod ich zagospodarowania po zakończeniu eksploatacji w zastosowaniach trakcyjnych. Jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków jest koncepcja „drugiego życia”, umożliwiająca ich wykorzystanie w aplikacjach o niższych wymaganiach energetycznych, takich jak stacjonarne systemy magazynowania energii.

Skuteczna implementacja tego podejścia wymaga jednak spełnienia szeregu warunków technicznych, organizacyjnych oraz regulacyjnych. Kluczowe znaczenie ma rozwój metod diagnostycznych umożliwiających wiarygodną ocenę stanu technicznego baterii, w tym parametrów takich jak pojemność, rezystancja wewnętrzna oraz stan życia (SoH). Największym ograniczeniem pozostaje brak standaryzacji konstrukcyjnej pakietów bateryjnych, co utrudnia ich demontaż, regenerację oraz ponowną konfigurację.

Istotną rolę w kształtowaniu rynku odgrywają również regulacje prawne, w szczególności Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542, które wprowadza kompleksowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa, wydajności, śladu węglowego oraz informacji o bateriach. Pomimo szerokiego zakresu regulacyjnego nadal występuje brak jednoznacznych i operacyjnych kryteriów kwalifikacji baterii do ponownego użycia lub recyklingu, co stanowi istotną lukę systemową.

W tym kontekście kluczowe znaczenie ma właściwa klasyfikacja baterii wycofywanych z eksploatacji. Opracowanie uporządkowanego modelu decyzyjnego umożliwi przypisanie ogniw do jednej z czterech ścieżek: ponownego użycia, zastosowania drugiego życia, regeneracji lub recyklingu materiałowego. Model ten opiera się na analizie parametrów diagnostycznych i eksploatacyjnych, a jego nadrzędnym celem jest maksymalizacja wartości użytkowej baterii przed skierowaniem ich do odzysku



materiałowego. Zastosowanie takiego podejścia pozwala ograniczyć przypadki przedwczesnego kierowania baterii do recyklingu oraz zwiększyć efektywność wykorzystania zasobów.

Rozwój technologii regeneracji oraz zastosowań drugiego życia baterii litowych stanowi istotny element transformacji w kierunku zrównoważonej gospodarki. Warunkiem pełnego wykorzystania tego potencjału jest integracja rozwiązań technologicznych i regulacyjnych oraz opracowanie spójnych i praktycznych wytycznych umożliwiających ich wdrożenie na skalę przemysłową. W rezultacie systemowe podejście do zarządzania cyklem życia baterii pozwala na maksymalizację ich wartości użytkowej oraz minimalizację strat materiałowych i energetycznych w całym cyklu życia produktu.

Literatura

1. <https://www.parp.gov.pl/goz> [dostęp: 04.2026].
2. IEA (2025), Global EV Outlook 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> [dostęp: 04.2026].
3. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniające dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylające dyrektywę 2006/66/WE.
4. Hu X., Deng X., Wang F., Zhongwei Z., Lin X., Teodorescu R., Pecht M. G.: A Review of Second-Life Lithium-Ion Batteries for Stationary Energy Storage Applications. Contributed Paper Vol. 110, No. 6, June 2022.
5. Martinez-Laserna E., Gandiagaa I., Sarasketa-Zabalaa E., Badedab J., Stroeve D. I., Swierczynski M., Goikoetxeaf A.: Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93, 2018.
6. Shahjalal M., Roy P. K., Shams T., Fly A., Chowdhury J. I., Ahmed R., Liu K.: A review on second-life of Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues, *Energy* 241, 2022, 122881.
7. Illa Font C. H., Siqueira H. V., Machado Neto J. E., Ferreira dos Santos J. L., Stevan, S. J. Jr., Converti A., Corrêa F. C.: Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: A Short Review and Perspectives, *Energies* 16, 2023.
8. Vignesh S., Che H. S., Selvaraj J., Tey K. S., Lee J. W., Shareef H., Errouissi R.: State of Health (SoH) estimation methods for second life lithium-ion battery-Review and challenges, *Applied Energy* 369, 2024, 123542.
9. Faraji-Niri M., Rashid M., Sansom J., Sheikh M., Widanage D., Marco J.: Accelerated state of health estimation of second life lithium-ion batteries via electrochemical impedance spectroscopy tests and machine learning techniques, *Journal of Energy Storage* 58, 2023, 106295.
10. Ma R., Tao S., Sun X., Ren Y., Sun C., Ji G., Xu J., Wang X., Zhang X., Wu Q., Zhou G.: Pathway decisions for reuse and recycling of retired lithium-ion batteries considering economic and environmental functions, *Nature Communications*, 2024.
11. Tembo P. M., Dyer C., Subramanian V.: Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure, *NPG Asia Materials*, 2024.
12. Islam M. T., Iyer-Raniga U.: Lithium-Ion Battery Recycling in the Circular Economy, *Recycling*, 2022, 7, 33.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.5>

Zintegrowane podejście do rekultywacji hałd pogórnich: stabilizacja, gospodarka wodna i system monitoringu środowiskowego

Jan Biela – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Jakub Bernatt – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Jerzy Jagoda – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Dorian Markusik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono zintegrowane podejście do rekultywacji hałd pogórnich, oparte na łącznym ujmowaniu stabilizacji geotechnicznej, gospodarki wodnej, poprawy właściwości warstwy przypowierzchniowej oraz monitoringu środowiskowego. Wskazano, że hałdy są obiektami o niejednorodnej budowie, podatnymi na erozję, pylenie, deformacje skarp oraz pogorszenie warunków siedliskowych, a skuteczna rekultywacja wymaga traktowania ich jako układu wzajemnie powiązanych procesów technicznych, hydraulicznych i biologicznych. Omówiono znaczenie rozpoznania właściwości podłoża, kształtowania geometrii obiektu, kontroli odpływu i retencji wód opadowych, a także utrzymania wilgotności warstwy przypowierzchniowej i warunków sprzyjających rozwojowi roślinności. Przedstawiono również rolę monitoringu parametrów atmosferycznych i glebowych oraz znaczenie zaplecza organizacyjnego i wdrożeniowego, w tym rozwiązań wspomagających automatyzację prac terenowych. Przyjęte ujęcie wskazuje, że trwała rekultywacja hałd powinna mieć charakter procesowy i integrować działania inżynierskie, ekologiczne oraz środowiskowe.

Słowa kluczowe: hałdy pogórnice, rekultywacja, stabilizacja skarp, gospodarka wodna, monitoring środowiskowy, bioróżnorodność

Integrated approach to post-mining waste dump reclamation: stabilization, water management and environmental monitoring system

Abstract: The chapter presents an integrated approach to the reclamation of post-mining waste dumps based on the combined consideration of geotechnical stabilization, water management, improvement of the surface layer properties and environmental monitoring. It is shown that waste dumps are heterogeneous objects exposed to erosion, dust emission, slope deformation and deterioration of habitat conditions, and that effective reclamation requires treating them as a system of interrelated technical, hydraulic and biological processes. The study discusses the importance of identifying substrate properties, shaping dump geometry, controlling runoff and stormwater retention, and maintaining adequate moisture conditions in the surface layer to support vegetation development. The role of monitoring atmospheric and soil parameters is also highlighted, together with the importance of organizational and implementation support, including solutions that facilitate partial automation of field operations. The adopted approach indicates that long-term reclamation of post-mining waste dumps should be process-based and should integrate engineering, ecological and environmental measures.

Keywords: post-mining waste dumps, reclamation, slope stabilization, water management, environmental monitoring, biodiversity

1. Wprowadzenie

Hałdy pogórnice pozostają jednym z najbardziej trwałych i przestrzennie rozległych śladów działalności górniczej. W Polsce funkcjonują 153 obiekty tego typu o łącznej powierzchni przekraczającej 11 tys. ha, a ich oddziaływanie nie ogranicza się wyłącznie do zajęcia terenu, lecz



obejmuje także degradację krajobrazu, zagrożenia dla wód, emisję pyłów, niestabilność skarp oraz ryzyko procesów termicznych [1]. Z punktu widzenia ochrony środowiska hałda nie jest więc wyłącznie zwałowiskiem materiału odpadowego, ale obiektem, który w długim czasie pozostaje aktywnym źródłem przekształceń geotechnicznych, hydrologicznych i biologicznych [2, 3].

Tradycyjna rekultywacja tego typu obiektów była najczęściej realizowana w sposób etapowy i nieskoordynowany, w ramach którego odrębnie rozwiązywano zagadnienia związane ze statecznością skarp, kształtowaniem pokrywy roślinnej oraz systemem odprowadzania wód. Takie podejście nie zawsze prowadziło do trwałego ograniczenia oddziaływania hałd na otoczenie, ponieważ zjawiska zachodzące w obrębie zwałowiska są ze sobą silnie powiązane. Utrata stateczności skarp, erozja powierzchniowa, przesychnienie warstwy wierzchniej, wymywanie drobnych frakcji oraz degradacja roślinności tworzą układ sprzężeń, którego nie można skutecznie kontrolować poprzez pojedyncze, odseparowane działania [3, 4].

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie zintegrowanego modelu rekultywacji hałd pogórnich, w którym stabilizacja powierzchni, poprawa właściwości warstwy przypowierzchniowej, gospodarka wodna oraz monitoring środowiskowy są traktowane jako elementy jednego systemu. Takie ujęcie odpowiada współczesnemu podejściu do rekultywacji terenów pogórnich, w którym działania inżynierskie, biologiczne i hydrologiczne są rozpatrywane łącznie [3, 8, 11].

2. Hałdy pogórnice w kontekście uwarunkowań środowiskowych i technicznych

Specyfika hałd wynika z ich niejednorodnej budowy i technogenicznego pochodzenia. Materiał zwałowany jest zwykle zróżnicowany pod względem granulometrycznym, a jego parametry filtracyjne i wytrzymałościowe zmieniają się zarówno przestrzennie, jak i w czasie. Zależnie od sposobu odkładania, stopnia zagęszczenia oraz udziału frakcji drobnych w obrębie jednej hałdy mogą występować strefy o skrajnie różnych właściwościach. To właśnie ta zmienność stanowi jedną z przyczyn trudności w projektowaniu trwałych zabezpieczeń powierzchni i układów odwodnienia [2, 3].

Na obiektach tego typu dochodzi do nakładania się kilku procesów degradacyjnych. W okresach intensywnych opadów rozwija się infiltracja i spływ powierzchniowy, które sprzyjają wzrostowi ciśnienia porowego, rozwojowi rynien erozyjnych oraz lokalnej utracie stateczności. W okresach suchych dominują z kolei pylenie, przesychnienie warstwy przypowierzchniowej i spękania skurczowe, co dodatkowo obniża odporność powierzchni na późniejsze oddziaływanie opadów. Na części obiektów istotne są także procesy termiczne oraz zagrożenia pożarowe związane z obecnością materiałów reaktywnych [1, 3, 4].

Analizy stateczności oraz obserwacje terenowe wykazały tam rozwój erozji wodnej po okresach intensywnych opadów, a także problem pylenia oraz trudnych warunków dla spontanicznego rozwoju trwałej pokrywy roślinnej [4, 5].

Oznacza to, że nawet obiekt o poprawnie ukształtowanej geometrii może w całym cyklu użytkowania wymagać dalszych działań wspomagających, jeżeli nie zostaną odpowiednio rozwiązane kwestie gospodarki wodnej i jakości warstwy powierzchniowej.

Dodatkową trudność stanowią właściwości samego materiału hałdowego. Literatura dotycząca podłoży rozwiniętych na zwałowiskach powęglowych wskazuje, że mogą one cechować się niską zdolnością retencji wodnej, ograniczoną aktywnością biologiczną oraz niekorzystnymi właściwościami chemicznymi, co utrudnia spontaniczny rozwój trwałej roślinności. Jednocześnie badania nad poprawą właściwości takich podłoży pokazują, że odpowiednio dobrane dodatki mineralne i organiczne mogą wspierać odtwarzanie funkcji biologicznych i rozwój roślinności [8, 9].

3. Rekultywacja jako układ zintegrowany

W przypadku hałd pogórnich rekultywacja powinna być traktowana jako proces równoczesnego kształtowania geometrii obiektu, warunków wodnych oraz właściwości warstwy przypowierzchniowej. Rekultywacja tego typu obiektów wymaga zintegrowanego podejścia projektowego, uwzględniającego współzależności pomiędzy poszczególnymi elementami systemu. Nachylenie skarp, długość spływu powierzchniowego, układ dróg technologicznych, rozmieszczenie rowów odwadniających, właściwości warstwy rekultywacyjnej oraz rozwój pokrywy roślinnej wzajemnie na siebie oddziałują, determinując skuteczność i trwałość prowadzonych działań rekultywacyjnych. Zmiana jednego z tych elementów pociąga za sobą zmianę warunków pracy całego obiektu. Zintegrowany model rekultywacji zakłada, że podstawą bezpieczeństwa hałdy jest prawidłowe ukształtowanie terenu. Obejmuje to takie nachylenie skarp i taki układ powierzchni górnej, aby ograniczyć koncentrację odpływu, zmniejszyć ryzyko erozji oraz stworzyć warunki do przejścia wody przez system odwodnienia. Zależności te dobrze ilustrują zobrazowania powierzchni obiektów pogórnich, przedstawiające przestrzenne zróżnicowanie nachylenia zboczy w formie odwzorowania barwnego.

Tego rodzaju zobrazowanie pozwala wskazać strefy o większym spadku, potencjalnie bardziej narażone na rozwój procesów erozyjnych oraz wymagające szczególnej uwagi przy planowaniu prac rekultywacyjnych i odwodnieniowych.

Równie ważne jest przerwanie długości niekontrolowanego spływu poprzez tarasowanie, drogi technologiczne i układy odprowadzające wodę w sposób uporządkowany. W tym ujęciu geometria hałdy nie jest wyłącznie konsekwencją ograniczeń przestrzennych, lecz jednym z podstawowych narzędzi sterowania bezpieczeństwem geotechnicznym i hydraulicznym [3, 4, 5].

Drugim filarem jest warstwa przypowierzchniowa, która pełni jednocześnie funkcję techniczną i biologiczną. Musi być odporna na rozmywanie, ograniczać pylenie, umożliwiać utrzymanie wilgotności i tworzyć warunki dla rozwoju roślinności. Oznacza to potrzebę odpowiedniego profilowania, kontrolowanego zagęszczenia oraz takiego doboru dodatków mineralnych i organicznych, aby wytworzyć warstwę o właściwościach zbliżonych do gleby technicznej. Dopiero taki ośrodek może stać się podstawą trwałej stabilizacji biologicznej powierzchni [6, 7].

Trzeci filar stanowi roślinność, ale nie jako samodzielny środek naprawczy, lecz jako etap przejmowania funkcji stabilizacyjnej od rozwiązań technicznych. Pokrywa roślinna ogranicza prędkość spływu, zmniejsza podatność powierzchni na erozję, poprawia bilans wodny i wzmacnia grunt poprzez system korzeniowy. Jednocześnie rozwój roślinności zależy od warunków wodnych, właściwości chemicznych podłoża i jakości przygotowania warstwy rekultywacyjnej. Dlatego też stabilizacja biologiczna nie może być traktowana jako odrębny, końcowy etap, ale jako część zintegrowanego modelu rekultywacji [9, 11].

4. Warunki glebowe i biologiczne jako podstawa trwałej rekultywacji

Ocena potencjału rekultywacyjnego hałdy powinna rozpoczynać się od rozpoznania właściwości materiału powierzchniowego. Wymaga to określenia co najmniej odczynu, zasolenia, zawartości węgla organicznego, makroelementów, wybranych mikroelementów oraz ewentualnych zanieczyszczeń. Dopiero na tej podstawie można określić, czy materiał wymaga przede wszystkim neutralizacji chemicznej, poprawy struktury, wzbogacenia w materię organiczną, czy też interwencji mieszanej. Uproszczone działania rekultywacyjne, podejmowane bez takiego rozpoznania, prowadzą często do nietrwałych efektów lub do szybkiego zaniku wprowadzonej roślinności [6, 7, 9].



Literatura dotycząca technogenicznych podłoży rozwiniętych na zwałowiskach wskazuje, że mogą one charakteryzować się niską żyznością, ograniczoną aktywnością biologiczną, niekorzystnym odczynem oraz słabą zdolnością zatrzymywania wody, co utrudnia spontaniczny rozwój trwałej roślinności. Jednocześnie badania pokazują, że właściwie dobrane zabiegi modyfikujące, obejmujące poprawę właściwości chemicznych i fizycznych warstwy przypowierzchniowej, mogą stopniowo odtwarzać funkcje biologiczne podłoża i zwiększać jego przydatność rekultywacyjną [7, 8, 9].

Warstwa rekultywacyjna powinna być kształtowana nie tylko jako osłona powierzchni, ale również jako strefa aktywna biologicznie. Jej zadaniem jest zatrzymanie części wody opadowej, zapewnienie wymiany gazowej, ograniczenie spływu i utworzenie środowiska sprzyjającego kiełkowaniu oraz ukorzenieniu roślin. W literaturze podkreśla się, że trwałość rekultywacji zależy nie od jednorazowego zazielenienia powierzchni, lecz od zdolności do utrzymania procesów biologicznych w długim okresie [6, 7, 11].

To właśnie w tym miejscu zintegrowane podejście okazuje się istotne. Poprawa właściwości warstwy przypowierzchniowej powinna być powiązana z gospodarką wodną oraz z doбором roślinności odpowiedniej dla trudnych siedlisk. Rekultywacja nie może więc polegać na mechanicznym rozproszaniu materiału i wysiewie roślin, ale na wytworzeniu warunków, w których powierzchnia hałdy będzie stopniowo przechodzić od stabilizacji technicznej do stabilizacji biologicznej [7, 9, 11].

5. Gospodarka wodna i monitoring środowiskowy

Jednym z najważniejszych komponentów zintegrowanej rekultywacji jest kontrola obiegu wody. Na hałdach pogórnich niekontrolowany odpływ powierzchniowy prowadzi do rozwoju erozji, transportu materiału, lokalnych przeciążeń hydraulicznych oraz zwiększonego ryzyka deformacji skarp.

Jednocześnie w okresach suchych to właśnie deficyt wilgoci staje się czynnikiem ograniczającym rozwój roślinności. Z tego względu system gospodarki wodnej powinien łączyć dwa cele: bezpieczne przejmowanie nadmiaru wód opadowych oraz utrzymanie dostępności wody w warstwie przypowierzchniowej [3, 4, 5].

W nowoczesnym ujęciu rekultywacyjnym gospodarka wodna nie powinna być rozumiana wyłącznie jako klasyczne odwodnienie, lecz jako układ obejmujący przechwytywanie, retencjonowanie i redystrybucję wody do stref objętych rekultywacją. Rozwiązanie takie może ograniczać spływ powierzchniowy, poprawiać bilans wodny oraz wspierać biologiczne utrwalenie powierzchni, szczególnie w początkowej fazie rekultywacji. Znaczenie tego podejścia wzrasta zwłaszcza na podłożach technogenicznych o niskiej zdolności retencji wodnej oraz w warunkach rosnącej presji klimatycznej związanej z okresami suszy i epizodami intensywnych opadów [8, 10].

Równie ważnym elementem jest monitoring środowiskowy. W warunkach hałdy rekultywacja nie powinna być prowadzona bez stałej kontroli parametrów atmosferycznych i glebowych, ponieważ skuteczność zabiegów zależy od zmiennych warunków terenowych. System monitorowania powinien obejmować temperaturę i wilgotność powietrza, opady, wiatr, nasłonecznienie, a także profilową wilgotność i temperaturę gleby. Uzupełnieniem powinny być okresowe pomiary odczynu, składu mineralnego i parametrów gazowych przy powierzchni gruntu, w tym stężeń CO₂ i CH₄. W takim układzie możliwa jest bieżąca ocena skuteczności działań rekultywacyjnych oraz szybka reakcja na pogorszenie warunków siedliskowych [3, 4, 10].

Znaczenie takiego systemu wykracza poza prostą rejestrację danych. Monitoring pozwala ocenić skuteczność zabiegów rekultywacyjnych, identyfikować strefy wymagające interwencji,



optymalizować nawadnianie i szybciej reagować na zagrożenia, takie jak przesuszenie, nadmierne uwilgotnienie, rozwój ognisk termicznych czy osłabienie pokrywy roślinnej. W rezultacie rekultywacja staje się procesem sterowanym na podstawie danych, a nie wyłącznie jednorazowym działaniem terenowym [4, 8, 10].

6. Wymiar wdrożeniowy i organizacyjny

Zintegrowana rekultywacja wymaga także odpowiedniego zaplecza organizacyjnego i wykonawczego. Dotyczy to zarówno przygotowania terenu, jak i sposobu aplikacji materiałów oraz prowadzenia prac na skarpach o trudnej dostępności. Z punktu widzenia wdrożeniowego istotne jest rezygnacja z koncepcji o pojedynczych, odrębnych maszynach dla każdego zadania na rzecz platformy bazowej, zdolnej do współpracy z różnymi modułami roboczymi. Pozwala to oddzielić funkcje mobilności, lokalizacji i bezpieczeństwa od funkcji właściwych dla konkretnej operacji technologicznej.

Taka platforma powinna być przystosowana do pracy na stokach o znacznym nachyleniu, zmiennej nośności i nieregularnej geometrii. Najistotniejsze znaczenie mają: stabilność ruchu, precyzja prowadzenia trajektorii, możliwość obserwacji otoczenia, wykrywanie przeszkód oraz integracja danych nawigacyjnych z systemem sterowania. Nie wszystkie procesy rekultywacyjne nadają się do pełnej automatyzacji, ale znaczna część pracy ręcznej może zostać ograniczona przez wprowadzenie układów wspomagających, modułów aplikacyjnych i półautonomicznego prowadzenia robót.

W tym ujęciu automatyzacja nie jest celem samym w sobie, lecz narzędziem zwiększającym powtarzalność, bezpieczeństwo i efektywność operacyjną. Znaczenie ma zwłaszcza możliwość utrzymania stałych parametrów aplikacji, dokumentowania przebiegu prac oraz elastycznego dostosowania modułów roboczych do zróżnicowanych warunków terenowych. Podejście to dobrze wpisuje się w ideę rekultywacji procesowej, prowadzonej etapami i wspieranej przez monitoring oraz analizę danych. Przedstawione wymagania wdrożeniowe mają charakter koncepcyjny i wynikają z analizy warunków terenowych oraz potrzeb procesu rekultywacji.

7. Podsumowanie

Hałdy pogórnice powinny być traktowane jako obiekty wymagające jednoczesnego podejścia geotechnicznego, hydrologicznego i biologicznego. Skuteczna rekultywacja nie może ograniczać się do samego zazielenienia powierzchni ani do lokalnego zabezpieczenia skarp, lecz musi obejmować kształtowanie terenu, poprawę właściwości warstwy przypowierzchniowej, kontrolę odpływu wód oraz stały monitoring warunków środowiskowych [3, 4, 8].

Zintegrowany model rekultywacji pozwala powiązać w jeden system działania techniczne i biologiczne. W takim ujęciu geometria hałdy wpływa na obieg wody, warunki wodne wpływają na stateczność i rozwój roślinności, a stan roślinności współdecyduje o odporności powierzchni na erozję. Dopiero taka logika działania daje szansę na trwałe ograniczenie negatywnego oddziaływania hałd na środowisko oraz na przywracanie im funkcji przyrodniczych i użytkowych [5, 6, 11].

Znaczenie integracji wzrasta dodatkowo w warunkach narastającej zmienności klimatycznej, która zwiększa częstość okresów suszy oraz epizodów intensywnych opadów. Z tego względu przyszłościowe rozwiązania rekultywacyjne powinny łączyć klasyczne działania inżynierskie z gospodarką wodną, monitorowaniem procesów środowiskowych oraz rozwiązaniami umożliwiającymi prowadzenie prac w sposób powtarzalny i skalowalny. Rekultywacja hałd pogórnich powinna być zatem rozumiana jako proces długofalowy, oparty na współdziałaniu inżynierii, ekologii i nowoczesnych systemów wspomagania decyzji [1, 8, 10, 11].



Literatura

1. <https://www.nik.gov.pl/aktualnosci/haldy-gornicze-ukryc-trudno-a-i-pozbyc-sienielatwo.html> (22-04-2026).
2. Gawor Ł.: Wybrane zagadnienia sozologii górnictwa w Zagłębiu Ruhry i Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) na przykładzie zwałowisk pogórnicznych - studium porównawcze, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo, 2004, nr 260, s. 97–108.
3. Hawley M., Cunning J. (red.): Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design, CSIRO Publishing, Clayton South, 2017.
4. Nguyen P.M.V., Wrana A., Rajwa S., Różański Z., Frączek R.: Slope Stability Numerical Analysis and Landslide Prevention of Coal Mine Waste Dump under the Impact of Rainfall - A Case Study of Janina Mine, Poland, *Energies*, 2022, t. 15, nr 21, art. 8311.
5. Wróblewska M., Kowalska M., Łupieżowiec M.: Slope Stability Analysis of Post-Mining Dumps with the Use of Photogrammetric Geometry Measurements - A Case Study, *Archives of Civil Engineering*, 2023, t. LXIX, nr 4, s. 171–185.
6. Pająk M., Krzaklewski W., Gawełek P.: Ocena rekultywacji leśnej zwałowiska odpadów po wydobywaniu węgla kamiennego na przykładzie KWK „Brzeszcze” w Brzeszczach, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego. Inżynieria Środowiska*, 2013, nr 29.
7. Bogacz A., Kasowska D., Telega P., Dradrach A.: Influence of Fly Ash on Soil Properties and Vegetation of Fresh Coniferous Forest during Long-Term Observation, *Forests*, 2024, t. 15, nr 4, art. 593.
8. Singh P.D., Hawryło P., Klamerus-Iwan A., Pietrzykowski M.: Spatial modeling for detection of water retention capacity in technosols developed on carboniferous spoil heap after hard coal mining, *Ecological Informatics*, 2024, t. 82, art. 102751.
9. Gołda T.: Rekultywacja, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2005.
10. Araźny A., Kępińska-Kasprzak M., Łaszycza E.Z., Chmista-Sikorska J., Bartczak A.: Reference evapotranspiration during the growing season in Poland (Central Europe) in response to ongoing climate changes (1966–2020), *International Journal of Climatology*, 2023, t. 43, nr 14, s. 6505–6522.
11. Gastauer M. i in.: Revegetation on Tropical Steep Slopes after Mining and Infrastructure Projects: Challenges and Solutions, *Sustainability*, 2022, t. 14, nr 24, art. 17003.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.6>

Od długu kompetencyjnego do gotowości relacyjnej – propozycja ramy analitycznej dla internacjonalizacji polskich firm na rynkach wysokiego kontekstu

Marcin Jabłoński – Politechnika Lubelska

Streszczenie: Niniejszy rozdział podejmuje problematykę barier internacjonalizacji polskich przedsiębiorstw na rynkach o wysokim kontekście kulturowym, ze szczególnym uwzględnieniem Azji Wschodniej, Bliskiego Wschodu oraz krajów basenu Morza Śródziemnego. Głównym celem opracowania jest wprowadzenie do literatury z zakresu zarządzania międzynarodowego oryginalnej koncepcji „długu kompetencyjnego” oraz sformułowanie czterofazowej ramy analitycznej – Modelu Transformacji Relacyjnej (MTR) – opisującej proces przekształcania tego deficytu w „gotowość relacyjną”. W rozdziale postawiono tezę, że dotychczasowe sukcesy eksportowe polskich przedsiębiorstw na rynkach niskiego kontekstu (głównie w obrębie jednolitego rynku europejskiego) doprowadziły do wykształcenia zjawiska zależności od ścieżki (path dependency) opartego na transakcyjno-cenowym modelu biznesowym. Model ten okazuje się dysfunkcyjny w zderzeniu z rynkami relacyjnymi, generując ukryty deficyt zdolności poznawczych, strukturalnych i operacyjnych. W warstwie teoretycznej praca wykorzystuje podejście zasobowe (RBV), teorię zdolności dynamicznych, paradygmat sieciowy oraz koncepcję kontekstowości kulturowej Edwarda T. Halla. Wkład rozdziału polega na konceptualizacji nowej kategorii analitycznej, integracji rozproszonych nurtów teoretycznych w spójną ramę interpretacyjną oraz sformułowaniu praktycznych rekomendacji dla menedżerów oraz instytucji wsparcia internacjonalizacji.

Słowa kluczowe: internacjonalizacja, dług kompetencyjny, gotowość relacyjna, rynki wysokiego kontekstu, kapitał relacyjny, zdolności dynamiczne, dystans kulturowy

Kody JEL: F23, M16, L25.

From competence debt to relational readiness: a proposed analytical framework for the internationalization of Polish companies in high-context markets

Abstract: This chapter addresses the issue of barriers to the internationalization of Polish companies in markets with a high cultural context, with a particular focus on East Asia, the Middle East, and the Mediterranean region. The main objective of this study is to introduce the original concept of “competence debt” into the literature on international management and to formulate a four-phase analytical framework - the Relational Transformation Model (RTM) - describing the process of transforming this deficit into “relational readiness.” The article posits that the export successes of Polish enterprises to date in low-context markets (primarily within the European Single Market) have led to the development of a path dependency based on a transactional-price business model. This model proves dysfunctional when confronted with relational markets, generating a hidden deficit in cognitive, structural, and operational capabilities. On a theoretical level, the study employs the Resource-Based View (RBV), the theory of dynamic capabilities, the network paradigm, and Edward T. Hall’s concept of cultural contextuality. The chapter’s contribution lies in the conceptualization of a new analytical category, the integration of disparate theoretical strands into a coherent interpretive framework, and the formulation of practical recommendations for managers and institutions supporting internationalization

Keywords: internationalization, competence deficit, readiness

JEL codes: F23, M16, L25.



1. Wstęp i uzasadnienie problemu badawczego

Procesy internacjonalizacji polskich przedsiębiorstw po transformacji ustrojowej z 1989 roku koncentrowały się w sposób naturalny na rynkach geograficznie i instytucjonalnie bliskich, ze szczególnym uwzględnieniem krajów członkowskich Unii Europejskiej [1, 2]. Akcesja Polski do struktur europejskich w 2004 roku stanowiła kulminację tego procesu, otwierając przedsiębiorstwom dostęp do jednolitego rynku liczącego niemal pół miliarda konsumentów, opartego na zharmonizowanych ramach regulacyjnych oraz przewidywalnych mechanizmach koordynacji gospodarczej. Sukces w zakresie internacjonalizacji polskich firm, mierzony stałym wzrostem wolumenu eksportu, dywersyfikacją produktową oraz silną pozycją w europejskich łańcuchach dostaw, opierał się w dużej mierze na przewagach cenowo-jakościowych, sprawności operacyjnej oraz elastyczności wytwórczej w warunkach niskiego kontekstu kulturowego [3, 4].

Rynki Europy Zachodniej i Środkowej, do których kierowana była główna fala polskiej ekspansji, charakteryzują się relatywnie wysoką transparentnością procedur administracyjnych, uniwersalizmem norm prawnych, sformalizowanymi mechanizmami zawierania kontraktów oraz dominacją komunikacji bezpośredniej, w której znaczna część przekazu zdeponowana jest w werbalnym kodzie językowym [5, 6]. W takim środowisku transakcyjnym sprawność operacyjna, konkurencyjność cenowa oraz dotrzymanie terminów stanowią najczęściej wystarczające czynniki sukcesu, zaś relacje międzyludzkie pełnią funkcję wtórną wobec sformalizowanej umowy. Polskie przedsiębiorstwa, zwłaszcza sektora MŚP, w sposób spontaniczny ukształtowały rutyny organizacyjne oraz model biznesowy dostosowane do tej specyfiki, uzyskując w jego ramach trwałe przewagi konkurencyjne [7, 8].

Współczesne uwarunkowania makroekonomiczne, w tym nasycenie rynków europejskich, narastająca konkurencja ze strony przedsiębiorstw azjatyckich, konieczność dywersyfikacji ryzyka geograficznego po doświadczeniach pandemii oraz wojny w Ukrainie, a także poszukiwanie nowych nisz wzrostu, zmuszają polskie firmy do reorientacji strategicznej i kierowania uwagi ku rynkom pozaeuropejskim [9, 10]. Regiony, takie jak Azja Wschodnia (Chińska Republika Ludowa, Japonia, Korea Południowa, kraje ASEAN), Bliski Wschód (kraje Rady Współpracy Zatoki – GCC), wybrane rynki Afryki Subsaharyjskiej oraz państwa basenu Morza Śródziemnego reprezentują jednak fundamentalnie odmienną architekturę instytucjonalno-kulturową. Są to rynki wysokiego kontekstu, na których transakcja gospodarcza stanowi pochodną i wtórny element trwałej relacji społecznej, sieci zaufania oraz wzajemnych zobowiązań [5, 11, 12].

W tym miejscu ujawnia się istotna luka badawcza, której wypełnieniu poświęcony jest niniejszy rozdział. Dotychczasowa literatura z zakresu polskiego zarządzania międzynarodowego szeroko opisywała bariery wejścia na rynki zagraniczne, takie jak ograniczenia zasobowe, deficyt wiedzy o rynkach docelowych czy bariery językowo-kulturowe [10, 13]. Stosunkowo rzadko jednak analizowano mechanizm, w którym uprzednio wykształcone i wewnętrznie spójne rutyny operacyjne, gwarantujące sukces w obrębie jednolitego rynku europejskiego, stają się bezpośrednią przyczyną porażek na rynkach odległych kulturowo. Innymi słowy, brakuje konceptualizacji zjawiska, w którym to nie deficyt zasobów, lecz właśnie kumulacja niewłaściwie dopasowanych zasobów staje się główną barierą strategiczną. Zjawisko to w niniejszym rozdziale określane jest „długiem kompetencyjnym”.

Cele opracowania są trojaki. Po pierwsze, konceptualizacja kategorii „długu kompetencyjnego” oraz jej zakotwiczenie w istniejących nurtach teoretycznych zarządzania międzynarodowego. Po drugie, sformułowanie oryginalnej, wielowymiarowej ramy analitycznej – Modelu Transformacji Relacyjnej (MTR) – opisującej proces przekształcania długu w gotowość relacyjną. Po trzecie, wyprowadzenie z tej ramy konkretnych implikacji aplikacyjnych dla menedżerów oraz projektantów polityki wsparcia internacjonalizacji. Rozdział ma charakter teoretyczno-koncepcyjny i opiera się na krytycznej analizie



literatury przedmiotu, integracji rozproszonych wątków badawczych oraz autorskiej syntezy pojęciowej.

2. Podstawy teoretyczne i tło badawcze

Argumentacja przedstawiona w dalszej części rozdziału zakotwiczona jest w czterech komplementarnych nurtach teoretycznych. Pierwszym z nich jest podejście zasobowe (Resource-Based View, RBV), zgodnie z którym źródłem trwałej przewagi konkurencyjnej są zasoby cenne, rzadkie, trudne do imitacji i niezastąpione [14]. Z punktu widzenia internacjonalizacji RBV pozwala wyjaśnić, dlaczego identyczne zasoby techniczne czy operacyjne mogą generować przewagę na jednym rynku, a stawać się obciążeniem na innym – decyduje o tym swoiste dopasowanie zasobu do kontekstu rynkowego [12].

Drugim nurtem jest teoria zdolności dynamicznych [15, 16], która rozwija podejście zasobowe poprzez wskazanie, że w warunkach turbulentnego otoczenia kluczowe znaczenie ma nie tyle dysponowanie określonymi zasobami, ile zdolność do ich rekonfiguracji, integracji i odnowy. Teece [15] wyróżnia trzy klasy zdolności dynamicznych: wyczuwania (sensing), wykorzystywania (seizing) oraz transformowania (transforming). W kontekście wchodzenia na rynki wysokiego kontekstu zdolności te przybierają specyficzną postać – wyczuwania subtelnych sygnałów relacyjnych, wykorzystywania okien zaufania oraz transformowania struktur organizacyjnych w odpowiedzi na wymagania sieci lokalnych.

Trzecim filarem teoretycznym jest paradygmat sieciowy w internacjonalizacji, rozwinięty zwłaszcza w nowszej wersji modelu uppsalskiego [17]. W przeciwieństwie do pierwotnej wersji modelu [18], kładącej nacisk na stopniową minimalizację dystansu psychicznego, jego nowsze ujęcie wskazuje, że kluczowym wyzwaniem internacjonalizacji jest dziś przezwyciężenie „obcości outsidera” (liability of outsidership) – stanu, w którym firma pozostaje poza siecią relacji niezbędnych do prowadzenia działalności na danym rynku. W tym ujęciu rynki nie są pustymi przestrzeniami, lecz gęstymi tkankami zaufania, które wymagają zakorzenienia [13, 19]. Pokrewną kategorią jest „obcość obcokrajowca” (liability of foreignness), opisana przez [20], wskazująca dodatkowe koszty operowania poza krajem macierzystym.

Czwartym nurtem teoretycznym jest klasyczna koncepcja kontekstowości kulturowej [5], zgodnie z którą kultury można uszeregować na kontinuum od niskokontekstowych (low-context), w których przekaz koncentruje się w werbalnym kodzie językowym, do wysokokontekstowych (high-context), w których znaczna część znaczenia jest osadzona w niewerbalnych, sytuacyjnych i relacyjnych elementach komunikacji. Koncepcja ta uzupełniana jest przez wymiary kulturowe [6], wśród których w omawianym kontekście szczególnego znaczenia nabierają wymiar kolektywizmu-indywidualizmu, długoterminowej orientacji oraz dystansu władzy. Nowsze badania [21] wprowadziły kategorię inteligencji kulturowej (Cultural Intelligence, CQ), opisującej zdolność jednostki i organizacji do skutecznego funkcjonowania w zróżnicowanym kulturowo otoczeniu.

Uzupełnieniem powyższych perspektyw pozostaje paradygmat eklektyczny [22], porządkujący decyzje internacjonalizacyjne wokół trzech grup przewag: własnościowych (ownership), lokalizacyjnych (location) i internalizacyjnych (internalization). Choć paradygmat OLI powstawał w odmiennej epoce – w warunkach dominacji wielkich korporacji transnarodowych – jego logika pozostaje użyteczna w wyjaśnianiu, dlaczego polskie firmy MŚP, posiadające ograniczone przewagi własnościowe, próbują kompensować je przewagami operacyjnymi (cenowymi, jakościowymi), pomijając tym samym konieczność rozwoju przewag relacyjno-lokalizacyjnych. Tę asymetrię można potraktować jako jeden z systemowych źródeł długu kompetencyjnego.



Integracja powyższych perspektyw umożliwia ujęcie internacjonalizacji również jako procesu rekonfiguracji zasobów, w którym kluczowym aktywem staje się kapitał relacyjny i instytucjonalny, a nie wyłącznie kapitał finansowy czy technologiczny [23, 24]. Taka rama umożliwia uchwycenie zjawiska, w którym wcześniejsze sukcesy operacyjne maskują ukryty deficyt kompetencji. W kolejnych sekcjach kategoria ta zostanie poddana systematycznej konceptualizacji oraz osadzona w empirycznym kontekście rynków wysokiego kontekstu.

3. Konceptualizacja długu kompetencyjnego w procesie internacjonalizacji

Metafora „długu” została zapożyczona z nauk technicznych, gdzie termin „dług techniczny” (technical debt) opisuje skumulowany koszt późniejszych modyfikacji systemu, wynikający z wcześniejszego stosowania rozwiązań szybkich, lecz suboptymalnych w długim okresie. Przeniesienie tej metafory na grunt zarządzania strategicznego pozwala uchwycić specyficzne zjawisko, w którym wczesne sukcesy adaptacyjne firmy generują utajone koszty przyszłej transformacji. W niniejszym rozdziale dług kompetencyjny w procesie internacjonalizacji definiujemy jako skumulowany deficyt specyficznych kulturowo i relacyjnie zdolności dynamicznych, wynikający z wcześniejszej koncentracji przedsiębiorstwa na rynkach transakcyjnych (niskiego kontekstu), który generuje rosnące koszty alternatywne i transformacyjne w momencie próby ekspansji na rynki relacyjne (wysokiego kontekstu).

Definicja ta wymaga trzech zastrzeżeń. Po pierwsze, dług kompetencyjny nie jest tożsamy z prostym brakiem zasobów – jest deficytem specyficznym, ujawniającym się dopiero w zderzeniu z określonym kontekstem instytucjonalno-kulturowym. Po drugie, dług ten ma charakter endogeniczny: nie jest narzucany z zewnątrz, lecz powstaje jako produkt uboczny racjonalnych decyzji menedżerskich podejmowanych w przeszłości. Po trzecie, dług kompetencyjny posiada własną „dynamikę narastania” – im dłużej firma operuje wyłącznie w środowisku transakcyjnym, tym głębsze stają się rutyny dysfunkcjonalne wobec wymagań rynków relacyjnych. Zjawisko to można interpretować jako szczególny przypadek negatywnej zależności od ścieżki (path dependency) opisywanej przez [25] w kontekście instytucjonalnym.

Powstawanie i kumulację długu kompetencyjnego można opisać za pomocą czterech powiązanych mechanizmów. Pierwszym z nich jest mechanizm iluzji uniwersalizmu menedżerskiego, polegający na bezpośrednim przenoszeniu praktyk sprawdzonych na rynkach niskiego kontekstu (np. rygorystyczne harmonogramy negocjacyjne, dominacja komunikacji pisemnej, koncentracja na specyfikacjach technicznych umowy) na grunt rynków relacyjnych. Menedżerowie polskich firm, ukształtowani w kulturze biznesu europejskiego, nierzadko zakładają, że techniki sprawdzone w kontaktach z partnerami niemieckimi czy holenderskimi pozostają skuteczne wszędzie. Założenie to jest jednak fałszywe i prowadzi do strukturalnego niedoinwestowania w kompetencje kulturowe i relacyjne [6, 21].

Drugim mechanizmem jest ignorowanie „kosztów tarcia kulturowego” rozumianych jako ukryte, początkowo niewidoczne koszty wynikające z „tarcia” między rutynami operacyjnymi firmy a specyfiką rynku wysokiego kontekstu. Tak jak w przypadku „długu kompetencyjnego” tak i w tym przypadku termin został zapożyczony z fizyki (tarcie spowalnia ruch i zużywa energię) i zaadaptowany jako metafora ekonomiczna. W literaturze ekonomicznej koszty te są często niewidoczne ex ante, ujawniając się dopiero w postaci zerwanych rozmów, niemożności dotarcia do faktycznych decydentów, opóźnień proceduralnych czy utraty wcześniej deklarowanego zainteresowania ze strony partnerów lokalnych [26]. Polskie przedsiębiorstwa, przyzwyczajone do niskich kosztów transakcyjnych w obrębie UE, systematycznie niedoszacowują wymaganego nakładu czasu i zasobów na rynkach wysokiego kontekstu. Skutkiem jest przedwczesne wycofanie się z rynku po pierwszej serii niepowodzeń, interpretowanych błędnie jako problem produktowy lub cenowy.



Trzecim mechanizmem jest erozja zaufania strukturalnego. Stosowanie narzędzi i procedur typowych dla rynków transakcyjnych – takich jak wysyłanie sformalizowanych ofert handlowych do nieznanych wcześniej kontrahentów, organizowanie krótkich „misji handlowych” oczekujących natychmiastowych decyzji zakupowych czy delegowanie negocjacji do pracowników niższego szczebla – jest na rynkach wysokiego kontekstu odczytywane jako sygnał braku profesjonalizmu, lekceważenia partnera lub niepoważnego podejścia do współpracy [11, 17]. W konsekwencji każda kolejna interakcja oparta na transakcyjnym repertuarze nie tylko nie buduje kapitału relacyjnego, lecz aktywnie go niszczy, generując „odsetki od długu” w postaci pogarszającej się reputacji.

Czwartym, najgłębszym mechanizmem jest petryfikacja organizacyjna struktur i wskaźników kontrolingowych. System mierników efektywności (KPI) zorientowany na krótkookresową rentowność każdej misji handlowej, struktura kosztowa nieprzewidująca długich okresów inwestycji w relacje bez natychmiastowej monetyzacji oraz hierarchiczne procedury decyzyjne uniemożliwiające elastyczne reagowanie na specyfikę lokalną tworzą wewnętrzne ograniczenia uniemożliwiające organizacyjne uczenie się [15, 27]. Im bardziej zinstytucjonalizowane stają się te struktury, tym trudniej je później zmodyfikować, co dodatkowo podnosi koszt obsługi długu kompetencyjnego.

Z perspektywy aplikacyjnej, dług kompetencyjny posiada cztery cechy charakterystyczne, które odróżniają go od zwykłego deficytu zasobów. Po pierwsze, jest niewidzialny dla aktorów wewnętrznych – kierownictwo firmy odbierające raport o porażkach na rynkach azjatyckich może długo nie identyfikować ich systemowej przyczyny, przypisując je sytuacyjnym pomyłkom konkretnych negocjatorów. Po drugie, jest niesymetryczny – jego koszt rośnie wykładniczo wraz z dystansem kulturowym do nowego rynku. Po trzecie, jest częściowo nieodwracalny – nie można skompensować braku długoletnich relacji intensyfikacją działań krótkoterminowych. Po czwarte, jego spłata wymaga specyficznych zasobów i czasu, których nie można po prostu zakupić na rynku usług doradczych.

Warto w tym miejscu rozróżnić dług kompetencyjny od pokrewnych, lecz odmiennych kategorii analitycznych. W przeciwieństwie do „obcości obcokrajowca” [20], która opisuje uniwersalny koszt operowania poza krajem macierzystym, dług kompetencyjny dotyczy specyficznego deficytu zdolności wynikającego z wewnętrznej trajektorii rozwojowej firmy. Inaczej niż w przypadku „obcości outsidera” [17], oznaczającej brak osadzenia w sieciach lokalnych, dług kompetencyjny koncentruje się na endogenicznej, organizacyjnej genezie problemu. Wreszcie, w odróżnieniu od klasycznego „dystansu psychicznego” [18], dług kompetencyjny nie jest właściwością relacji między krajami, lecz właściwością organizacji – dwie polskie firmy operujące na tym samym rynku mogą posiadać radykalnie odmienne poziomy długu w zależności od swojej wcześniejszej trajektorii internacjonalizacyjnej.

4. Charakterystyka rynków wysokiego kontekstu i specyficznych wyzwań dla polskich firm

Pojęcie kontekstu kulturowego, wprowadzone przez [5], pozostaje jednym z najbardziej trwałych narzędzi analitycznych w zarządzaniu międzynarodowym. Hall postulował, że kultury można uszeregować wzdłuż kontinuum od niskokontekstowych do wysokokontekstowych w zależności od proporcji znaczeń osadzonych w werbalnym przekazie wprost wobec znaczeń osadzonych w sytuacji, relacji oraz niewerbalnych sygnałach. W kulturach niskokontekstowych (np. niemieckiej, holenderskiej, szwajcarskiej, skandynawskiej, anglosaskiej) preferowana jest komunikacja jasna, eksplicytna, oparta na pisemnych umowach oraz uniwersalnych regułach proceduralnych. W kulturach wysokokontekstowych (japońskiej, koreańskiej, chińskiej, arabskiej, śródziemnomorskiej) znaczna część komunikatu pozostaje niewypowiedziana wprost, a jej dekodowanie wymaga znajomości lokalnych konwencji, hierarchii oraz historii relacji.



Nowsze badania komparatystyczne [6, 21] potwierdziły trwałość rozróżnienia Halla, doprecyzowując jednocześnie jego konsekwencje dla praktyk biznesowych. Na rynkach wysokiego kontekstu kluczowe znaczenie ma kategoria kapitału relacyjnego, definiowanego jako zdolność do tworzenia, utrzymywania i mobilizowania trwałych więzi międzyludzkich w interesie organizacji [11, 19]. Specyfika tych rynków manifestuje się w pięciu kluczowych obszarach: wagi pre-kontraktowej, charakteru komunikacji, percepcji czasu, statusu i hierarchii oraz wymagań co do obecności fizycznej.

Po pierwsze, na rynkach wysokiego kontekstu faza pre-kontraktowa stanowi istotę procesu sprzedażowego, a sama umowa jest tylko jego formalnym uwieńczeniem. Po drugie, komunikacja ma charakter pośredni i kontekstowy – odmowa jest rzadko wypowiedzana wprost, a opóźnienia w odpowiedzi mogą nieść znaczenia merytoryczne, których europejski menedżer często nie odczytuje. Po trzecie, percepcja czasu ma charakter policzasowy [5] – wiele wątków biznesowych prowadzonych jest równoległe, a sztywne harmonogramy postrzegane są jako przejaw braku elastyczności. Po czwarte, decyzje biznesowe zapadają w sposób hierarchiczny, lecz osoba pełniąca funkcję faktycznego decydenta nie zawsze odpowiada osobie obecnej na spotkaniu. Po piąte, regularna obecność fizyczna kluczowych przedstawicieli firmy na rynku stanowi warunek konieczny budowy zaufania – co rzadko jest doceniane przez polskie firmy operujące głównie w trybie zdalnym i okazjonalnych wizyt.

Z perspektywy polskiego eksportera rynki wysokiego kontekstu stawiają specyficzne wyzwania strukturalne. Tabela 1 zestawia trzy reprezentatywne obszary geograficzne wraz z odpowiadającymi im kluczowymi konstruktami relacyjnymi oraz głównymi punktami tarcia obserwowanymi w praktyce polskich firm.

Charakterystyka wybranych rynków wysokiego kontekstu w perspektywie polskiego eksportera

Tabela 1.

Region	Kluczowy konstrukt relacyjny	Specyfika kontekstu biznesowego	Główny punkt tarcia z polskimi firmami
Azja Wschodnia (Chiny, Japonia, Korea)	Guanxi, Wa, Kankei	Wzajemność zobowiązań, hierarchiczność, długie cykle decyzyjne, kolektywistyczna odpowiedzialność.	Brak cierpliwości, ignorowanie rytuałów, presja czasu, niedostosowanie się do struktur hierarchicznych.
Bliski Wschód (GCC, Lewant)	Wasta, Karam	Personalizacja biznesu, honor, status osobisty decydenta, oralność umów.	Próba czysto formalnego procedowania umów, niedoszacowanie znaczenia rangi przedstawiciela firmy.
Europa Południowa (Włochy, Hiszpania, Grecja)	Partykularyzm, Familismo	Elastyczność reguł, kanały nieformalne, sieci rodzinno-biznesowe, lokalne preferencje regionalne.	Sztywne trzymanie się harmonogramów, niedostrzeganie znaczenia więzi rodzinno-biznesowych.
Afryka Subsaharyjska (wybrane rynki)	Ubuntu, Kinship	Kolektywistyczna ocena partnera, znaczenie społeczności, wielowarstwowa legitymizacja kontraktu.	Podejście „projektowo-jednorazowe”, brak inwestycji w społeczność lokalną, niezrozumienie roli pośredników.

Źródło: opracowanie własne na podstawie literatury [5, 6, 11, 12, 23]

Zestawienie powyższe ilustruje, że pomimo zewnętrznej różnorodności, omawiane rynki wykazują wspólną cechę strukturalną: kontrakt traktowany jest jako materializacja relacji, a nie jej substytut.



Implikuje to, że strategie wejścia oparte wyłącznie na konkurencji cenowej oraz operacyjnej efektywności – stanowiące dotychczasową siłę polskich eksporterów – nie wystarczają do zdobycia trwałej pozycji rynkowej. Co więcej, każdy z wymienionych konstruktów relacyjnych (guanxi, wasta, partykularyzm, ubuntu) ma własną wewnętrzną gramatykę, której nie można w pełni opisać uniwersalnymi kategoriami akademickimi, a której opanowanie wymaga długotrwałej obecności na rynku oraz inwestycji w lokalne sieci. Warto podkreślić, że żadna z tych kategorii nie poddaje się szybkiej transferowalności w postaci podręcznikowego know-how – ich istota tkwi w doświadczeniu praktycznym wynoszonym z trwałego udziału w lokalnej tkance biznesowej.

Z punktu widzenia teorii zdolności dynamicznych [15] oznacza to konieczność rozwinięcia szczególnego typu zdolności – zdolności do uczenia się relacyjnego (relational learning capability), polegającej na rozpoznawaniu kontekstowych sygnałów, interpretacji subtelności komunikacyjnych oraz adaptowaniu praktyk organizacyjnych do specyfiki lokalnej sieci. Polskie firmy, przechodzące z bezpiecznego środowiska niskokontekstowego do tych nowych ekosystemów, znajdują się w sytuacji, w której muszą jednocześnie generować pierwsze przychody i budować od podstaw repertuar kompetencji, którym dotąd się nie posługiwały. Ta równoczesność wymagań stanowi jedno z najtrudniejszych wyzwań procesu transformacji.

5. Propozycja ramy analitycznej: Model Transformacji Relacyjnej (MTR)

Centralnym wkładem niniejszego rozdziału jest propozycja oryginalnej ramy analitycznej opisującej proces przekształcania długu kompetencyjnego w gotowość relacyjną – Modelu Transformacji Relacyjnej (MTR). Gotowość relacyjną definiujemy jako wielowymiarową zdolność organizacji do skutecznego funkcjonowania w gęstych sieciach relacyjnych rynków wysokiego kontekstu, obejmującą komponenty poznawcze, strukturalne i operacyjne, zintegrowane w spójny system zdolności dynamicznych. MTR opiera się na trzech wymiarach analitycznych oraz czterech sekwencyjnych fazach procesu, co tworzy macierz dwunastu pól diagnostycznych.

5.1. Wymiar pierwszy: poznawczo-kulturowy

Wymiar poznawczo-kulturowy obejmuje sferę reprezentacji mentalnych, postaw i kompetencji indywidualnych członków organizacji oraz dominujących w niej schematów interpretacyjnych. Punkt wyjścia stanowi tu etnocentryzm metodologiczny – nieświadomione założenie, że praktyki biznesowe znane z rodzimego rynku stanowią naturalny standard. Punktem docelowym jest wysoki poziom inteligencji kulturowej [21], rozumianej jako zdolność do skutecznego operowania w nowych kontekstach kulturowych, obejmująca cztery komponenty: motywacyjny, poznawczy, metapoznawczy oraz behawioralny.

Transformacja w tym wymiarze nie polega na jednorazowym szkoleniu, lecz na głębokiej restrukturyzacji procesów rekrutacji, rozwoju zawodowego oraz socjalizacji organizacyjnej. Z perspektywy zarządzania zasobami ludzkimi oznacza to konieczność tworzenia ścieżek karier dla menedżerów-łączników (boundary spanners), zdolnych do funkcjonowania w wielu kontekstach kulturowych równocześnie. W warunkach polskich szczególnym wyzwaniem jest niedobór specjalistów łączących znajomość języków azjatyckich z kompetencjami biznesowymi, co przemawia za rozwijaniem strategicznych partnerstw z uczelniami wyższymi [1, 2].

5.2. Wymiar drugi: strukturalno-sieciowy

Wymiar strukturalno-sieciowy odnosi się do organizacyjnej architektury kontaktów i pozycji firmy w sieciach relacyjnych rynku docelowego. Punkt wyjścia stanowią tu typowe dla polskich firm struktury



silosowe, w których odpowiedzialność za rynek zagraniczny przypisana jest pojedynczemu działowi handlu zagranicznego lub konkretnemu „opiekunowi rynku”. Taka konfiguracja skutkuje koncentracją kapitału relacyjnego w pojedynczych osobach i jego utratą wraz z odejściem pracownika.

Punktem docelowym jest osiągnięcie statusu stałego uczestnika sieci (insider status) – pozycji, w której firma jest rozpoznawana przez kluczowych aktorów rynku lokalnego jako wiarygodny partner, włączana w nieformalny obieg informacji oraz zapraszana do rozmów na temat nowych projektów [13, 17]. Osiągnięcie tej pozycji wymaga budowy „węzłów relacyjnych” – rozproszonych punktów kontaktowych obejmujących lokalnych przedstawicieli, partnerów dystrybucyjnych, doradców prawnych, byłych dyplomatów, członków lokalnych izb handlowych oraz reprezentantów diaspory polskiej. Ważnym elementem jest również intencjonalna integracja firmy w lokalnych klastrach gospodarczych oraz inicjatywach branżowych.

5.3. Wymiar trzeci: operacyjno-alokacyjny

Wymiar operacyjno-alokacyjny dotyczy konkretnych decyzji o przeznaczeniu zasobów czasowych, finansowych i ludzkich. Punkt wyjścia stanowi transakcyjne KPI – system mierników zorientowany na krótkookresową rentowność każdej misji handlowej, każdej wizyty zagranicznej, każdej kampanii promocyjnej. W takim systemie inwestycje w długoterminowe relacje, których efekt monetarny jest oddalony o lata, są systematycznie niedoinwestowane lub w ogóle nieuwzględniane.

Punkt docelowy stanowi alokacja długoterminowa, w której firma jest gotowa rezerwować budżety oraz czas kluczowych decydentów na inwestycje relacyjne pozbawione natychmiastowego ROI – wieloletnie obecności w lokalnych stowarzyszeniach branżowych, regularne wizyty kurtuazyjne, sponsoring wydarzeń kulturalnych w kraju docelowym, opłacanie obecności kluczowych pracowników w lokalnych programach MBA. Tak przeformułowane KPI obejmują wskaźniki takie jak liczba nowych „kontaktów wartościowych”, głębokość relacji z istniejącymi partnerami czy stopień osadzenia w lokalnej sieci, a nie wyłącznie wartość bezpośredniej sprzedaży.

5.4. Fazy procesu transformacji

Trzy wymiary analityczne realizują się w czterech sekwencyjnych fazach, których chronologia ma kluczowe znaczenie dla skuteczności całego procesu. Próba przeskakiwania faz – częsta w praktyce polskich firm dążących do szybkich efektów – stanowi główne źródło niepowodzeń internacjonalizacyjnych na rynkach wysokiego kontekstu.

Faza pierwsza, audytu i stanu świadomości, ma charakter diagnostyczny i polega na identyfikacji punktów krytycznych długu kompetencyjnego w danej organizacji. Audyt obejmuje analizę dotychczasowych prób ekspansji na rynki relacyjne (zarówno sukcesów, jak i porażek), mapowanie kompetencji kulturowych kadry, ocenę przygotowania struktur organizacyjnych do długoterminowej obecności oraz przegląd obecnego systemu KPI. Rezultatem fazy powinna być świadoma decyzja kierownictwa o podjęciu transformacji – decyzja wymagająca konsensusu na poziomie zarządu oraz akceptacji okresu obniżonej zwrotności inwestycji zagranicznych [27]. W praktyce moment podjęcia tej decyzji jest często odraczany, ponieważ wymaga otwartego przyznania, iż wcześniejsze, racjonalne lokalnie decyzje strategiczne wytworzyły dziś dysfunkcjonalne rutyny – co stanowi psychologicznie trudne wyzwanie dla kadry zarządczej [15].

Faza druga, amortyzacji długu, polega na świadomej inwestycji w budowanie kompetencji i relacji bez natychmiastowej monetyzacji. W tej fazie firma rozpoczyna systematyczne szkolenia kulturowe, rekrutuje pierwszych pracowników z kompetencjami specyficznymi dla rynku docelowego, podejmuje

regularne wizyty w kraju docelowym i nawiązuje pierwsze kontakty bez nacisku transakcyjnego. Kluczowym wyzwaniem fazy jest utrzymanie konsekwencji wbrew presji wewnętrznej oczekującej szybkich rezultatów. W literaturze podkreśla się, że właśnie ten etap jest najczęściej skrącany lub pomijany przez firmy MŚP, co generuje kosztowne falstarty [7, 8].

Faza trzecia, strukturalnego zakorzenienia, oznacza włączenie firmy w lokalne ekosystemy biznesowe. Faza ta obejmuje takie działania, jak utworzenie lokalnego przedstawicielstwa (zatrudniającego pracowników miejscowych), zawieranie strategicznych aliansów z lokalnymi partnerami, członkostwo w izbach handlowych i stowarzyszeniach branżowych, obecność na regionalnych targach oraz konferencjach, a także świadome angażowanie się w społeczność lokalną poprzez programy CSR lub współpracę z uczelniami. Kluczowym wskaźnikiem powodzenia tej fazy jest moment, w którym firma zaczyna otrzymywać zaproszenia do uczestnictwa w inicjatywach, których wcześniej musiała aktywnie szukać [13].

Faza czwarta, gotowości relacyjnej, stanowi cel procesu i charakteryzuje się zdolnością do dynamicznej rekonfiguracji zasobów w odpowiedzi na sygnały płynące z sieci. Firma na tym etapie nie tylko skutecznie funkcjonuje na rynku, lecz aktywnie współtworzy nowe okazje rynkowe poprzez swoje umocowanie w lokalnych strukturach. Ważne jest, że gotowość relacyjna nie jest stanem trwałym – jej utrzymanie wymaga ciągłej pielęgnacji relacji i adaptacji do zmieniających się warunków lokalnych. W przypadku rynków geograficznie rozproszonych, firma może znajdować się w różnych fazach MTR w odniesieniu do różnych obszarów docelowych (Tabela 2).

Macierz Modelu Transformacji Relacyjnej (MTR) – wskaźniki diagnostyczne

Tabela 2.

Wymiar analizy	Wskaźniki długu (stan wyjściowy)	Wskaźniki fazy przejściowej	Wskaźniki gotowości (stan docelowy)
Poznawczo-kulturowy	Etnocentryzm metodologiczny, brak szkoleń kulturowych, dominacja menedżerów monokontekstowych.	Świadomość różnic, pierwsze programy CQ, rekrutacja boundary spanners.	Wysoka inteligencja kulturowa, ścieżki karier wielokontekstowych, instytucjonalizacja uczenia się.
Strukturalno-sieciowy	Struktury silosowe, jedna osoba „opiekun rynku”, brak lokalnej obecności.	Lokalni przedstawiciele, członkostwo w izbach, pierwsze partnerstwa z lokalnymi aktorami.	Status insidera w sieci, gęsta siatka węzłów relacyjnych, zaproszenia do inicjatyw.
Operacyjno-alokacyjny	KPI transakcyjne, brak budżetu na relacje, rotacyjne wizyty bez ciągłości.	Wydzielony budżet relacyjny, KPI mieszane, regularna obecność wybranych pracowników.	Długofalowa orientacja (LTO), KPI relacyjne, instytucjonalna gotowość do inwestycji bez ROI.

Źródło: opracowanie własne

Powyższa macierz pełni funkcję narzędzia diagnostycznego, umożliwiając menedżerom samodzielną ocenę stanu organizacji w każdym z trzech wymiarów oraz identyfikację obszarów wymagających pierwszoplanowej interwencji. Co istotne, faza zaawansowania w poszczególnych wymiarach nie musi być równa – możliwa, a wręcz typowa jest sytuacja, w której firma osiągnęła zaawansowanie w wymiarze poznawczo-kulturowym, lecz pozostała w fazie wyjściowej w wymiarze operacyjno-alokacyjnym. Taka asymetria stanowi szczególnie kosztowną pułapkę, ponieważ wytworzona wiedza i kompetencje kulturowe nie znajdują wsparcia w odpowiednich strukturach decyzyjnych i finansowych.



6. Implikacje teoretyczne i praktyczne

Zaproponowana rama analityczna generuje implikacje istotne zarówno dla rozwoju teorii zarządzania międzynarodowego, jak i dla praktyki menedżerskiej oraz polityki publicznej. W warstwie teoretycznej kategoria długu kompetencyjnego wzbogaca dorobek podejścia zasobowego, uwypuklając, że zasoby firmy nie są kontekstowo neutralne – ten sam zasób (np. wystandaryzowany proces sprzedażowy) może w jednym środowisku stanowić źródło przewagi, a w innym aktywną barierę rozwoju. Stanowi to istotne uzupełnienie klasycznej koncepcji RBV [14], wskazując na konieczność uwzględnienia w analizie wymiaru dopasowania zasobu do kontekstu instytucjonalnego.

Po drugie, MTR rozszerza nowsze ujęcie modelu uppsalskiego [17] poprzez wskazanie, że „obcość outsidera” nie jest jednorodnym stanem początkowym, lecz wielowymiarowym deficytem, którego struktura wewnętrzna determinuje tempo i koszt późniejszej integracji w sieci lokalne. Wzbogaca to dyskusję o internacjonalizacji o perspektywę endogeniczną – źródłem trudności nie są wyłącznie cechy rynku docelowego, lecz również wewnętrzna konstrukcja firmy ukształtowana przez wcześniejszą trajektorię ekspansji [23, 24].

Po trzecie, koncepcja długu kompetencyjnego stanowi pomost między teorią zdolności dynamicznych [15] a literaturą instytucjonalną w zarządzaniu międzynarodowym [12, 25]. Pokazuje bowiem, że zdolności dynamiczne nie rozwijają się w próżni, lecz są kształtowane przez kumulatywny wpływ wcześniejszych decyzji strategicznych, a ich rekonfiguracja wymaga uświadomienia sobie istniejących ograniczeń – swoistego procesu „de-uczenia się” (unlearning) wcześniej skutecznych praktyk.

W warstwie praktyczno-menedżerskiej z MTR wynika kilka konkretnych rekomendacji. Po pierwsze, kierownictwo polskich firm rozważających ekspansję na rynki wysokiego kontekstu powinno przeprowadzić audyt długu kompetencyjnego, traktując go jako pełnoprawny element procesu strategicznej oceny ryzyka, równoległe do analizy finansowej i prawnej. Po drugie, ekspansja na te rynki wymaga horyzontu czasowego nie krótszego niż pięć–siedem lat, w którym pierwsze dwa-trzy lata powinny być świadomie traktowane jako faza inwestycji w relacje bez oczekiwań pełnej rentowności. Próby kompresji tego horyzontu poniżej dwóch lat są jedną z głównych przyczyn powtarzających się porażek polskich firm w Azji Wschodniej.

Po trzecie, kierownictwo powinno wprowadzić odrębne KPI dla rynków relacyjnych, zorientowane na wskaźniki głębokości relacji (liczba „kontaktów wartościowych”, udział spotkań osobistych w komunikacji, obecność w lokalnych wydarzeniach branżowych), a nie wyłącznie na bezpośrednie obroty handlowe. Po czwarte, warto rozważyć tworzenie struktur „rezydencjalnych” – delegowanie wybranych menedżerów na rynek docelowy na okres co najmniej dwóch lat – co stanowi nieporównywalnie skuteczniejsze narzędzie budowy obecności niż częste, krótkie wizyty kierownictwa centralnego.

W warstwie polityki publicznej koncepcja długu kompetencyjnego wskazuje, że dotychczasowe instrumenty wsparcia internacjonalizacji – w znacznej mierze oparte na finansowaniu udziału w targach, krótkich misjach handlowych oraz badaniach rynkowych – nieproporcjonalnie często odpowiadają na potrzeby firm wychodzących na rynki niskokontekstowe. Dla rynków relacyjnych potrzebne są instrumenty fundamentalnie odmienne: dofinansowanie rezydencjonalnej obecności na rynkach docelowych, programy długoterminowych staży menedżerskich, wsparcie w opłacaniu obecności pracowników w lokalnych programach MBA czy organizacja programów mentoringowych z udziałem byłych dyplomatów i menedżerów posiadających doświadczenie na konkretnych rynkach. Filozofia wsparcia powinna ewoluować od „szerokości” – maksymalnej liczby firm uczestniczących



w pojedynczych misjach – do „głębokości” – kompleksowej, wieloletniej asysty wybranych firm-liderów w budowaniu trwałych przyczółków.

Warto również wskazać, że proponowana rama analityczna ma istotne konsekwencje dla projektowania polskich grantów wspierających uczelnie wyższe w obszarze studiów regionalnych. Stałe niedoinwestowanie kierunków japonistyki, sinologii, arabistyki czy iberistyki w wymiarze biznesowym przekłada się bezpośrednio na deficyt kadrowy odczuwany przez polskie firmy. Polityka stypendialna powinna premiować zwłaszcza absolwentów łączących znajomość języków docelowych z kształceniem ekonomicznym oraz organizować systemowe staże w polskich przedsiębiorstwach działających na rynkach wysokiego kontekstu. W ujęciu długofalowym tylko taka systemowa inwestycja umożliwi krajowi wyjście poza model „taniego eksportera” w kierunku modelu pełnowartościowej obecności na rynkach globalnych [1, 3].

Istotną implikacją systemową jest również potrzeba reorientacji polskiej dyplomacji ekonomicznej, której rola jako budowniczego sieci długoterminowych powinna być wzmocniona kosztem funkcji czysto reaktywnej. Wymaga to przeglądu kompetencji wymaganych od attachés handlowych oraz dostosowania systemu rotacji zawodowej – krótkie kadencje wykluczają możliwość zbudowania głębokich relacji w kraju przyjmującym, podobnie jak w przypadku firm prywatnych.

7. Wnioski i kierunki dalszych badań

Niniejszy rozdział podjął problematykę przejścia polskich przedsiębiorstw od ekspansji na rynki niskiego kontekstu (głównie w obrębie UE) ku rynkom wysokiego kontekstu (Azja Wschodnia, Bliski Wschód, Afryka, Europa Południowa). Główną tezę pracy jest, że wcześniejsze sukcesy operacyjne, oparte na modelu transakcyjno-cenowym, maskują ukryty deficyt zdolności poznawczych, strukturalnych i operacyjnych ujawniający się w momencie próby wejścia na rynki relacyjne. Zjawisko to zostało skonceptualizowane jako dług kompetencyjny – kategoria analityczna integrująca dorobek podejścia zasobowego, teorii zdolności dynamicznych, paradygmatu sieciowego oraz koncepcji kontekstowości kulturowej.

Główny wkład rozdziału obejmuje trzy elementy. Po pierwsze, konceptualizację długu kompetencyjnego jako specyficznej, endogenicznej i niesymetrycznej kategorii deficytu zdolności, odróżnionej od zwykłego braku zasobów. Po drugie, identyfikację czterech mechanizmów generujących i kumulujących ten dług: iluzji uniwersalizmu menedżerskiego, ignorowania kosztów frykcyjnych, erozji zaufania strukturalnego oraz petryfikacji organizacyjnej. Po trzecie, sformułowanie oryginalnej ramy analitycznej – Modelu Transformacji Relacyjnej – obejmującej trzy wymiary (poznawczo-kulturowy, strukturalno-sieciowy, operacyjno-alokacyjny) oraz cztery fazy procesu transformacji (audyt świadomości, amortyzacja długu, strukturalne zakorzenienie, gotowość relacyjna).

Wartość praktyczna proponowanej ramy polega na dostarczeniu menedżerom konkretnych wskaźników diagnostycznych umożliwiających ocenę stanu organizacji oraz świadome planowanie procesu transformacji. Wartość teoretyczna wyraża się w integracji dotychczas rozproszonych nurtów badawczych w spójną perspektywę, dostosowaną do specyfiki polskich przedsiębiorstw operujących w warunkach pokomunistycznej trajektorii rozwojowej.

Niniejsze opracowanie posiada również ograniczenia, które wskazują kierunki dalszych badań. Po pierwsze, rozdział ma charakter teoretyczno-koncepcyjny i nie zawiera empirycznej weryfikacji zaproponowanej ramy. Pierwszorzędnym kierunkiem badań empirycznych powinna być więc operacjonalizacja wskaźników długu i gotowości oraz przeprowadzenie badań przekrojowych na próbie polskich firm aktywnych na rynkach wysokiego kontekstu. Szczególnie obiecującym podejściem



metodologicznym wydaje się tu strategia studiów wielokrotnego przypadku (multi-case study) obejmująca zarówno przedsiębiorstwa, które odniosły sukces, jak i te, które wycofały się z tych rynków.

Po drugie, model w obecnej formie traktuje rynki wysokiego kontekstu jako relatywnie homogeniczną kategorię, podczas gdy w rzeczywistości różnice pomiędzy np. rynkiem japońskim a saudyjskim mogą być równie istotne, jak różnice pomiędzy każdym z nich a rynkiem niemieckim. Pożądanym rozwinięciem byłaby więc kontekstualizacja MTR dla konkretnych obszarów geograficznych, prowadząca do powstania „wariantów regionalnych” ramy. Po trzecie, perspektywa zaproponowana w rozdziale koncentruje się na wymiarze firmowym, podczas gdy proces budowy gotowości relacyjnej ma istotny komponent indywidualny – wymaga rozwinięcia w stronę analizy karier i ścieżek rozwoju menedżerów-łączników. Po czwarte, interesującym kierunkiem badań pozostaje porównanie ścieżek transformacji polskich firm ze ścieżkami firm z innych krajów Europy Środkowo-Wschodniej, znajdujących się w podobnej sytuacji historyczno-instytucjonalnej.

Niezależnie od tych ograniczeń, zaproponowana w rozdziale rama analityczna stanowi, w przekonaniu autora, użyteczne narzędzie zarówno dla rozwoju refleksji teoretycznej nad internacjonalizacją polskich przedsiębiorstw, jak i dla podnoszenia jakości decyzji menedżerskich oraz publicznych w obszarze ekspansji na rynki wysokiego kontekstu. Skala wyzwań, przed jakimi stoi polska gospodarka w nadchodzącej dekadzie – konieczność dywersyfikacji geograficznej, narastająca konkurencja oraz potrzeba budowy marek o globalnym zasięgu – sprawia, że problematyka długu kompetencyjnego i gotowości relacyjnej z dziedziny analizy akademickiej staje się stopniowo zagadnieniem o znaczeniu strategicznym.

Podsumowując, kluczowy postulat rozdziału polega na zmianie perspektywy: bariery internacjonalizacji polskich firm na rynkach wysokiego kontekstu należy analizować nie wyłącznie w kategoriach deficytu (czego firmom brakuje), lecz również w kategoriach nadmiaru (jakie cechy organizacyjne, uprzednio funkcjonalne, stały się dziś balastem). Taka diagnoza otwiera drogę do bardziej realistycznych strategii transformacyjnych, które uwzględniają nie tylko inwestycję w nowe kompetencje, lecz również intencjonalne „odprogramowanie” dawnych rutyn. W kontekście rosnącej geopolitycznej fragmentacji gospodarki światowej oraz konieczności znaczącej dywersyfikacji polskiego eksportu, umiejętność świadomej spłaty długu kompetencyjnego może okazać się jednym z kluczowych czynników różnicujących polskie firmy odnoszące długoterminowe sukcesy na rynkach pozaeuropejskich od tych, które ograniczają się do epizodycznych transakcji bez budowy trwałej pozycji.

Literatura

1. Cieślik J. (2014).: Przedsiębiorczość międzynarodowa w Polsce: rozwój teoretyczny i empiryczny. Wydawnictwo Sedno Nidheesh P.V., Suresh Kumar M.: An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *Journal of Cleaner Production*, Volume 231, 10 September 2019, Pages 856-871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251>
2. Jarosiński M. (2013).: Procesy i modele internacjonalizacji polskich przedsiębiorstw. Oficyna Wydawnicza SGH.
3. Gorynia M. (2007).: Strategie zagranicznej ekspansji przedsiębiorstw. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
4. Wach K. (2012).: Europeizacja przedsiębiorstw: Podejście makro- i mikroekonomiczne. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
5. Hall E. T. (1976).: *Beyond culture*. Anchor Books.



6. Hofstede G. (2001).: *Culture's consequences: Comparing values, behaviors, institutions, and organizations across nations* (2nd ed.). Sage Publications.
7. Daszkiewicz N., & Wach K. (2014).: *Internationalization of SMEs: Contexts, models and implementation*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
8. Nowiński W., & Rialp A. (2013).: Drivers and strategies of international new ventures from a Central European transition economy. *Journal for East European Management Studies*, 18(2), 191–231. <https://doi.org/10.5771/0949-6181-2013-2-191>
9. Kraśnicka T. (Red.). (2017).: *Internacjonalizacja przedsiębiorstw. Uwarunkowania, procesy, wyniki badań*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach.
10. Witek-Hajduk M. K. (2010).: *Strategie internacjonalizacji polskich przedsiębiorstw w warunkach akcesji Polski do Unii Europejskiej*. Oficyna Wydawnicza SGH.
11. Luo Y. (2003).: Industrial dynamics and managerial networking in an emerging market: The case of China. *Strategic Management Journal*, 24(13), 1315–1327. <https://doi.org/10.1002/smj.363>
12. Peng M. W. (2003).: Institutional transitions and strategic choices. *Academy of Management Review*, 28(2), 275–296. <https://doi.org/10.5465/amr.2003.9416341>
13. Ratajczak-Mrozek M. (2017).: *Network embeddedness: Examining the effect on business performance and internationalization*. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56511-8>.
14. Barney J. B. (1991).: Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>.
15. Teece D. J. (2007).: Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>.
16. Eisenhardt K. M., & Martin J. A. (2000).: Dynamic capabilities: What are they? *Strategic Management Journal*, 21(10–11), 1105–1121. [https://doi.org/10.1002/1097-0266\(200010/11\)21:10/11<1105::AID-SMJ133>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0266(200010/11)21:10/11<1105::AID-SMJ133>3.0.CO;2-E)
17. Johanson J., & Vahlne J.-E. (2009).: The Uppsala internationalization process model revisited: From liability of foreignness to liability of outsidership. *Journal of International Business Studies*, 40(9), 1411–1431. <https://doi.org/10.1057/jibs.2009.24>
18. Johanson J., & Vahlne J.-E. (1977).: The internationalization process of the firm: A model of knowledge development and increasing foreign market commitments. *Journal of International Business Studies*, 8(1), 23–32. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8490676>
19. Granovetter M. (1985).: Economic action and social structure: The problem of embeddedness. *American Journal of Sociology*, 91(3), 481–510. <https://doi.org/10.1086/228311>
20. Zaheer S. (1995).: Overcoming the liability of foreignness. *Academy of Management Journal*, 38(2), 341–363. <https://doi.org/10.5465/256683>.
21. Earley P. C., & Ang S. (2003).: *Cultural intelligence: Individual interactions across cultures*. Stanford University Press.
22. Dunning J. H. (1988).: The eclectic paradigm of international production: A restatement and some possible extensions. *Journal of International Business Studies*, 19(1), 1–31. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8490372>



23. Hennart J.-F. (2014).: The accidental internationalists: A theory of born globals. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 38(1), 117–135. <https://doi.org/10.1111/etap.12076>
24. Kano L. (2018).: Global value chain governance: A relational perspective. *Journal of International Business Studies*, 49(6), 684–705. <https://doi.org/10.1057/s41267-017-0086-8>
25. North D. C. (1990).: *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808678>
26. Madhok A. (2006).: Revisiting multinational firms' tolerance for joint ventures: A trust-based approach. *Journal of International Business Studies*, 37(1), 30–43. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400182>
27. Cavusgil S. T., & Knight G. (2015).: The born global firm: An entrepreneurial and capabilities perspective on early and rapid internationalization. *Journal of International Business Studies*, 46(1), 3–16. <https://doi.org/10.1057/jibs.2014.62>



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.7>

Magazynowanie i szybkie uzupełnianie energii w samochodach zasilanych z baterii akumulatorów

Zdzisław Budzyński – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Bartosz Polnik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono techniczne i organizacyjne aspekty związane z magazynowaniem i szybkim uzupełnianiem energii w samochodach osobowych zasilanych z baterii akumulatorów nowej generacji, ich wady oraz zalety. Szczególną uwagę zwrócono na aspekt energetyczny związany z szybkim uzupełnianiem energii. Przedstawiono bezprzewodowe systemy ładowania baterii akumulatorów w samochodach elektrycznych.

Słowa kluczowe: samochód elektryczny, zużycie energii w samochodach elektrycznych, ogniwa litowe, baterie akumulatorów, ładowanie systemem „przewód-złącze”, bezprzewodowe ładowanie baterii akumulatorów

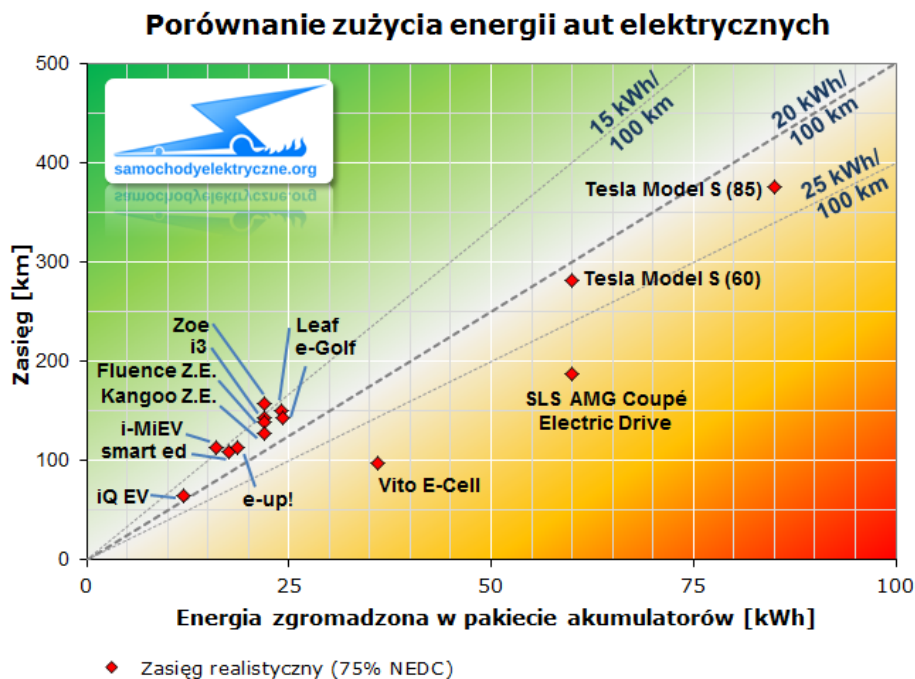
Storage and quick replenishment of energy in cars powered by batteries

Abstract: The chapter presents technical and organizational aspects related to the storage and quick replenishment of energy in passenger cars powered by new generation batteries, their advantages and disadvantages. Particular attention was paid to the energy aspect related quick replenishment of energy. Wireless battery charging systems in electric car are presented.

Keywords: electric car, consumption of electric energy in the selected cars, lithium cells, pack of batteries, charging the battery with the “cable-connector” system, wireless battery charging

1. Wprowadzenie

Pojazdy mobilne zasilane z własnego zasobnika energii, posiadają ograniczenia w zakresie magazynowania energii, przez co wymagają jej uzupełniania. W samochodach z napędem elektrycznym zasilanym z baterii akumulatorów ograniczenia energetyczne wynikają z konstrukcji samej baterii akumulatorów, jak gabaryt i masa. Ograniczeniem jest również cena baterii. Szacuje się, że średnie zużycie na przejechanie samochodem osobowym 100 km, wymagana jest energia 12-28 kWh i jest to wielkość niezależna od typu baterii akumulatorów.



Rys. 1. Zużycie energii elektrycznej w wybranych samochodach [2]

Porównanie zużycia energii na przejechanie 100 km w wybranych samochodach elektrycznych przedstawiono na rys. 1. Realne zatem odległości bez ładowania zapewniają osiągać niewiele większe odległości niż 300 km w samochodach obecnie dostępnych na rynku. Wraz z postępem technologicznym należy oczekiwać obniżenia ceny ogniwa oraz konstrukcję ogniwa o coraz większym wskaźniku gęstości energii, co pozwoli w zasadniczy sposób zwiększyć zasięg poruszania się samochodem bez konieczności uzupełniania energii. Przyszłościowe rozwiązania baterii akumulatorów zwiększą zasięg poruszania się samochodami elektrycznymi porównywalny z pojazdami spalinowymi, natomiast barierą pozostanie problem szybkiego uzupełnienia energii, który nie dorówna pojazdom spalinowym.

2. Ograniczenia energetyczne

Zakładając, że w niedalekiej przyszłości będzie można ogniwa ładować prądem zdecydowanie wyższym niż obecnie 1C, problemem będzie dostarczenie energii elektrycznej w krótkim czasie przez obecny system transmisji „przewód-złącze”. Przykładowo w samochodach Nissan Leaf typu Visia, Acenta, N-Connecta oraz Tekna [7], naładowanie baterii o napięciu 350 V DC do pojemności 40 kWh w czasie 1 godziny, będzie skutkowało przepływem prądu stałego o wartości:

$$I = \frac{N}{U \times t} = \frac{40000}{350 \times 1} = 114,3 \text{ A DC} \quad (1)$$

gdzie:

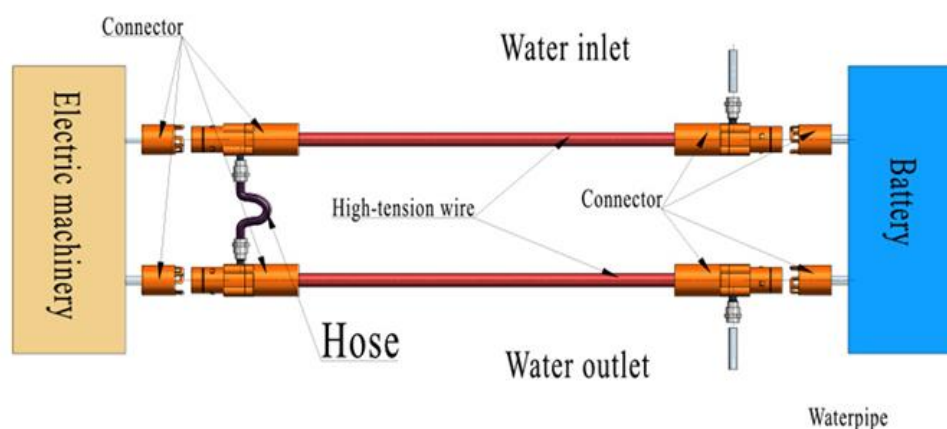
I – natężenie prądu w [A],

N – energia baterii w [Wh],

U – napięcie baterii w [V],

t – czas [godz.]

Dostarczenie takiej samej energii w czasie 0,1 godziny tj. 6 minut, czyli w czasie zbliżonym do tankowania samochodów spalinowych, skutkować będzie koniecznością ładowania baterii prądem o wartości 1143 A. Teoretycznie dostarczenie tak dużej energii w stosunkowo krótkim czasie, jest możliwe w konfiguracji wielu gałęzi równoległych w baterii. Przy obecnych przyjętych standardach napięć zasilających, problemem jest dostarczenie energii z zewnętrznej ładowarki do pojazdu systemem „przewód – złącze”. Rozwiązaniem prostym, lecz mało eleganckim może być zwiększenie ilości połączeń „przewód – złącze”, lecz barierą będzie cały układ energoelektroniczny w postaci falownika i sama sieć energetyczna ładowarki. Ładowarka z uwagi na bardzo duże obciążenie prądowe będzie wymagała specjalnego systemu chłodzenia.

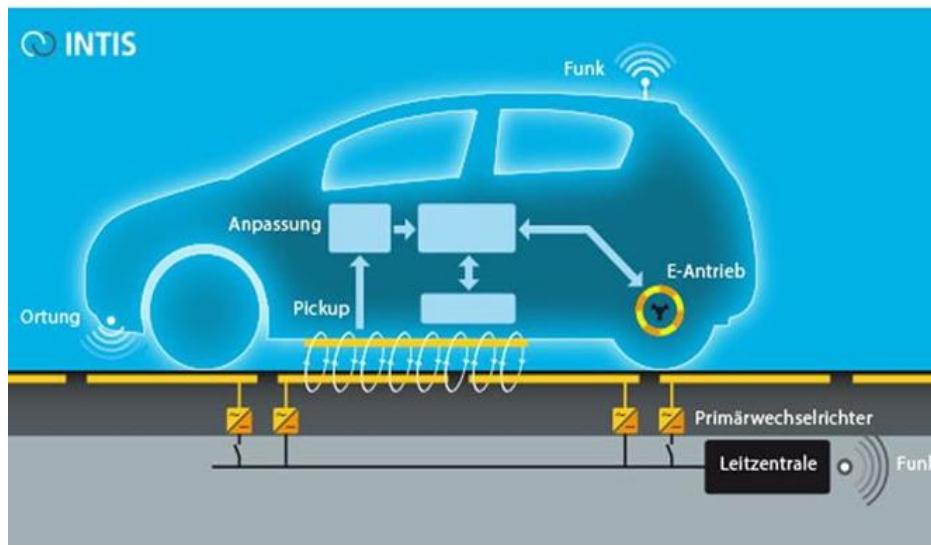


Rys. 2. System kabli chłodzonych wodą [13]

Zbudowanie stanowiska z możliwością tak szybkiego ładowania przykładowo dla 5-ciu samochodów osobowych wymagałoby doprowadzenia energii o mocy 2 MW.

3. Przyszłościowe systemy uzupełniania energii w samochodach elektrycznych

Rozwiązaniem dyskusyjnym, ale technicznie możliwym jest podniesienie napięcia zasilania zarówno baterii jak i ładowarki. W konsekwencji silnik będzie musiał być skonstruowany na podwyższone napięcie oraz pozostała aparatura łączeniowa i zabezpieczająca. Najmniejszym problemem będzie wykonanie baterii na wyższe napięcie. Obecna sieć energetyczna o symbolu (nN) oznacza napięcie do 1000 V i częstotliwości do 60 Hz, dla obwodów prądu stałego jest to napięcie 1500 V. Zastosowanie napięć wyższych powoduje wejście do przedziału napięć, dla których obowiązują inne przepisy i normy w zakresie materiałów i odstępów izolacyjnych. Bardziej rygorystyczne są przepisy związane z bezpieczeństwem zarówno w czasie eksploatacji, jak i obsługi oraz remontów. Największym zagrożeniem dla obsługi jest ciągła obecność napięcia na zaciskach baterii. Rozwiązaniem przyszłościowym z zachowaniem obecnych standardów napięciowych i całej infrastruktury związanej z ładowaniem, może być system ładowania bezprzewodowego, wykorzystujący zjawisko indukcji elektromagnetycznej.

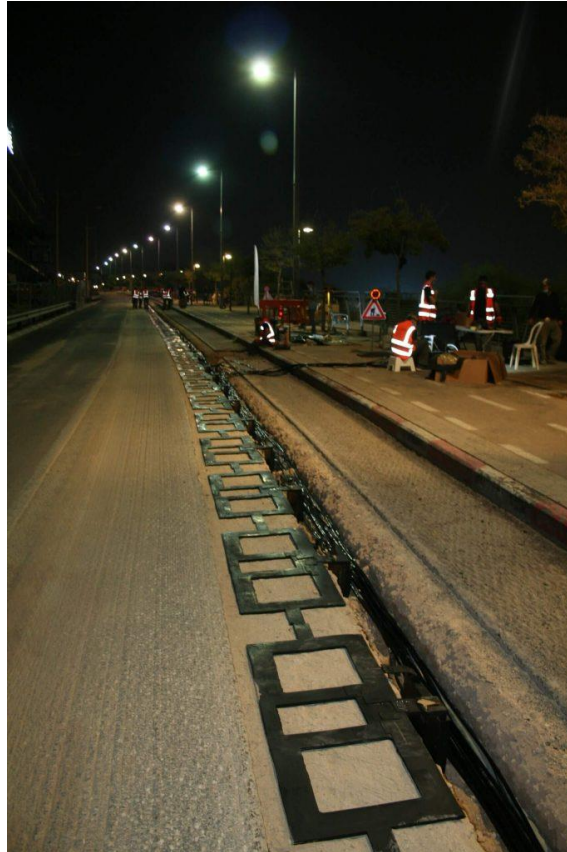


Rys. 3. Zasada ładowania indukcyjnego

Polski producent autobusów Solaris [12] opracował i wdrożył system indukcyjnego ładowania na przystankach, na których pod jezdnią zabudowane są ładowarki indukcyjne. W tym systemie pracują 4 autobusy w Berlinie i 5 w Brunzwiku. W Genewie stosowana jest metoda indukcyjnego ładowania akumulatorów pomiędzy dachem autobusu a wiatą przystankową [12]. Prace w kierunku indukcyjnego ładowania w czasie jazdy prowadzone są w wielu krajach. Drogi do indukcyjnego ładowania powstają na małą skalę w wykonaniu komercyjnym. Na koniec 2023 r. mają być gotowe pierwsze dwa odcinki drogi (rys. 4) w Detroit USA [8]. W Europie Izraelska firma Elektron wybudowała demonstracyjną drogę w Szwecji o długości 1,6 km pomiędzy lotniskiem a centrum Visby. Podobna droga została wykonana Niemczech w mieście Karlsruhe [9]. Rozwiązanie polega na umieszczeniu w jezdni drogi (rys. 5), cewek indukcyjnych zasilanych z sieci elektroenergetycznej, które indukują napięcie w cewce znajdującej się w jadącym pojeździe samochodowym, umożliwiając ładowanie baterii [3]. System cewek rozmieszcza się odcinkowo w jezdni, w odległościach umożliwiających przejechanie do następnego odcinka.



Rys. 4. Widok drogi z pasami zielonymi do ładowania indukcyjnego [8]



Rys. 5. Sposób rozmieszczenia cewek na jezdni [9]

Zastosowanie tego systemu na drogach ekspresowych i autostradach łączących duże aglomeracje, pozwalałoby na zmniejszenie pojemności baterii w samochodach elektrycznych, co wiąże się z obniżeniem kosztów i masy samochodu. Ładowanie na potrzeby poruszania się w mieście, odbywałoby się z tradycyjnych obecnie ładowarek oraz ładowarek przydomowych wykorzystujących porę nocną na uzupełnienie energii w swoich samochodach elektrycznych. Z uwagi, że czas uzupełnienia energii jest dłuższy od obecnego czasu tankowania paliwa, ilość punktów ładowania musi być przyszłościowo zdecydowanie większa od obecnej ilości dystrybutorów paliw. Alternatywą do indukcyjnego ładowania może być wykorzystanie zjawiska rezonansu magnetycznego.

Firma amerykańska WiTricity [11] opracowała system składający się z czterech cewek: pętli źródłowej, pętli obciążenia i dwóch rezonatorów, pracujących w paśmie megahercowym. System pracuje ze sprawnością 80% głównie z powodu indukowania się prądów wirowych w pojeździe. Dla przykładu klasyczne ładowanie przewodowe jest na poziomie 95%. Rozwiązaniem przyszłościowym mogą stać się akumulatory przepływowe [1], które można ładować energią elektryczną lub wymieniać w nim płynny elektrolit. Wadą obecnie jest niska gęstość energii rzędu 20-25 Wh/kg. Zaletą jest możliwość wykorzystania obecnej infrastruktury stacji benzynowych.



4. Podsumowanie

Zakładając, że w niedalekiej przyszłości będą produkowane tylko samochody elektryczne a w Europie wycofywane z ruchu sukcesywnie będą samochody spalinowe, należy zabezpieczyć na potrzeby uzupełniania energii elektrycznej w samochodach cały system energetyczny. W Polsce zarejestrowanych jest ponad 26 milionów samochodów osobowych [10], z tego porusza się po drogach ponad 20 milionów samochodów osobowych posiadających ubezpieczenie OC. Na potrzeby tylko połowy samochodów elektrycznych wyposażonych w akumulatory niezależnie od przyjętego systemu ładowania, zapotrzebowanie mocy określa się na poziomie co najmniej 2010 MW [1]. Tak duże zapotrzebowanie na energię wymagać będzie inwestycji w sektorze krajowej energetyki w zakresie produkcji i dystrybucji.

Literatura

1. Budzyński Z.: Techniczne aspekty związane z produkcją na wielką skalę samochodów elektrycznych. „Napędy i Sterowanie”. 4/2017.
2. SamochodyElektryczne.org.htm 4/2017
3. <http://kopalniawiedzy.pl/Witricity-energia-elektryczna-bezprzewodowe-przesylanie-energiie> [dostęp: 11.2022]
4. Budzyński Z., Kaczmarczyk K., Pieczora E.: Akumulatory nowej generacji w górniczych systemach transportowych na przykładzie ciągnika PCA-1. „Napędy i Sterowanie” 2/2012.
5. Budzyński Z., Drwięga A., Kaczmarczyk K., Pieczora E.: Innowacyjne rozwiązania górniczych urządzeń transportowych z napędem akumulatorowym. „Maszyny Górnicze” 1/2012.
6. Budzyński Z., Polnik B.: Badania laboratoryjne ogniów litowo-żelazowo-fosforanowych w aspekcie możliwości ich stosowania przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. „Maszyny Górnicze” 4/2016.
7. Nissan Leaf - Dane techniczne
8. <https://moto.rp.pl/na-prad/art37620821-droga-stanie-sie-indukcyjna> [dostęp: 12.2022]
9. <https://oiot.pl/indukcyjne-ladowanie-samochodow-na-autostradzie/> [dostęp: 12.2022]
10. vehis.pl/moto/arttykul/ile-jest-w-polsce-samochodow-bez-martwych-dusz [dostęp: 03.2024]
11. <https://www.komputerswiat.pl/artykuly/redakcyjne/bezprzewodowe-ladowanie-aut-coraz-popularniejsze-zaprkuj-i-uzupelnij-energie/35mv7y0> [dostęp: 10.2022]
12. <https://autokult.pl/za-3-lata-samochody-elektryczne-beda-ladowane-bezprzewodowo.6809117070399105a> [dostęp: 04.2017]
13. <https://www.omgevcable.com/ev-cables/391.html> [dostęp: 11.2024]

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.8>

Uciążliwości zapachowe jako istotny czynnik oddziaływania składowisk pogórnich na mieszkańców terenów sąsiednich

Beata Gryniewicz-Bylina – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Bożena Rakwic – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Monika Gawlik-Jędrzyak – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Hałdy pogórnice stanowią istotne źródło emisji niezorganizowanej substancji odorotwórczych, których uwalnianie zależy od właściwości materiału, procesów termicznych, geometrii obiektu oraz warunków meteorologicznych. Uciążliwość zapachowa jest szczególnie dotkliwa dla mieszkańców terenów sąsiadujących z hałdą, a jej ocena wymaga podejścia wieloaspektowego, z uwzględnieniem koncepcji FIDOL. W publikacji przedstawiono opis właściwości zapachu oraz założenia i procedurę oceny uciążliwości zapachowej hałd pogórnich. Szczególną uwagę zwrócono na konieczność stosowania zintegrowanego podejścia badawczego, łączącego metody olfaktometryczne, techniki instrumentalne, modelowanie dyspersji oraz badania terenowe i społeczne, co pozwala na pełniejsze uchwycenie złożoności zjawiska. Integracja wyników uzyskanych z wieloetapowego przebiegu badań daje rzetelną podstawę wyznaczenia stref uciążliwości oraz kompleksowej oceny wpływu hałd na środowisko i zdrowie ludzi.

Słowa kluczowe: hałdy pogórnice, substancje odorotwórcze, olfaktometria, GC-MS-ODP

Odor nuisance as a significant factor of the impact of mining spoil heaps on residents of neighboring areas

Abstract: Mining spoil heaps constitute a significant source of fugitive emissions of odor-causing substances, the release of which depends on material properties, thermal processes, the geometry of the facility, and meteorological conditions. Odor nuisance is particularly bothersome for residents of areas adjacent to the spoil heap, and its assessment requires a multifaceted approach, taking into account the FIDOL concept. This publication presents a description of odor properties and the assumptions and procedure for assessing the odor nuisance of mining spoil heaps. Particular attention is paid to the need for an integrated research approach, combining olfactometric methods, instrumental techniques, dispersion modeling, and field and social studies, which allows for a more comprehensive understanding of the complexity of the phenomenon. Integration of the results obtained from the multi-stage research process provides a reliable basis for designating nuisance zones and a comprehensive assessment of the spoil heaps' impact on the environment and human health.

Keywords: mining spoil heaps, odor-causing compounds, Olfactometr, GC-MS-ODP

1. Wprowadzenie

Składowiska pogórnice (hałdy) stanowią antropogeniczne formy terenu powstałe w wyniku deponowania odpadów towarzyszących eksploatacji złóż węgla kamiennego. Charakteryzują się znaczną heterogenicznością litologiczną oraz zmiennością właściwości fizykochemicznych oraz aktywnością termiczną [1]. Hałdy pogórnice stanowią potencjalne źródła oddziaływań środowiskowych, w tym emisji pyłów oraz gazów. Wśród emitowanych substancji gazowych identyfikowane są związki o właściwościach odorotwórczych, takie jak siarkowodór, dwusiarczek węgla, merkaptany i dwutlenek siarki i inne związki siarki. Zaliczane są one do substancji

toksycznych działających drażniąco na układ oddechowy. Z hałd uwalniane mogą być również lotne związki organiczne (LZO), w tym BTEX (benzen, toluen, etylobenzen, ksylen) z grupy węglowodorów aromatycznych, fenoli, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych - WWA (naftalen, benzo[a]piren), węglowodorów alifatycznych (alkany: metan, etan, propan) [2-3]. Emisje substancji odorotwórczych mogą wynikać zarówno z procesów termicznych, takich jak samozagrzewanie i samozapłon materiału hałd, jak i z mechanicznego przemieszczania składowanego materiału podczas prowadzonych prac rekultywacyjnych, eksploatacyjnych czy też działań związanych z likwidacją skutków zapożarowania. Mają one charakter rozproszony i zmienny, a ich intensywność zależy od właściwości fizykochemicznych odpadów pogórnich, dynamiki procesów zachodzących w hałdzie i jej aktywności termicznej oraz niejednorodnej struktury i zróżnicowanego ukształtowania powierzchni. Dodatkowo emisje te mogą okresowo nasilać się pod wpływem warunków atmosferycznych, takich jak nagłe spadki ciśnienia, wzrost temperatury powietrza czy zmiana kierunku i prędkości wiatru [4-6]. W kontekście oddziaływania substancji odorotwórczych na człowieka, kluczowe znaczenie ma czas trwania ekspozycji i jej powtarzalność.

W przypadku składowisk zlokalizowanych w sąsiedztwie terenów mieszkaniowych, uciążliwości zapachowe stają się coraz bardziej dotkliwe dla lokalnych społeczności. Mechanizm uwalniania substancji zapachowych z materiałów stałych, takich jak odpady pogórnice, oparty jest na procesach ewaporacji, związanej z przechodzeniem lotnych związków z fazy stałej do gazowej i dyfuzji, polegającej na przemieszczaniu się gazów z obszarów o wyższym stężeniu do obszarów o niższym [7]. Ich obecność w powietrzu rejestrowana jest przez ludzki układ węchowy, który odbiera je jako zapach. Oddziałują one na receptory w nabłonku węchowym, generując impulsy nerwowe, które analizowane są przez ośrodkowy układ nerwowy prowadząc do powstania wrażenia zapachowego [8]. Odbiór zapachu zależy od indywidualnej wrażliwości receptorów, predyspozycji genetycznych oraz wcześniejszych doświadczeń sensorycznych. Intensywne i nieprzyjemne zapachy mogą wywoływać stres, rozdrażnienie, trudności z koncentracją oraz zaburzenia snu. Jednocześnie dzieci, osoby starsze oraz osoby z chorobami układu oddechowego są bardziej podatne na negatywne skutki zdrowotne ekspozycji na substancje odorotwórcze. Długotrwałe narażenie na niektóre związki zapachowe może zwiększać prawdopodobieństwo rozwoju chorób przewlekłych, osłabienia odporności, a w skrajnych przypadkach również zmian nowotworowych [9-12].

W polskim systemie prawnym kwestie związane z emisją substancji do środowiska regulowane są poprzez system pozwoleń obejmujących instalacje przemysłowe emitujące substancje wymienione w załączniku do rozporządzenia Ministra Środowiska z 27 sierpnia 2014 r. [13]. Źródła emisji niezorganizowanej, takie jak hałdy pogórnice, nie są jednak objęte standardami emisyjnymi ani obowiązkiem uzyskania pozwolenia w zakresie emisji zanieczyszczeń zapachowych [14]. W efekcie ich oddziaływanie ocenia się wyłącznie na podstawie ogólnych przepisów dotyczących jakości powietrza. Obowiązujące w tym zakresie Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 sierpnia 2012 r. nie określa jednak dopuszczalnych poziomów substancji zapachowych [15]. Natomiast rozporządzenie z 26 stycznia 2010 r. wprowadza wartości odniesienia jedynie dla kilku związków o właściwościach odorowych, takich jak amoniak, dimetyloamina, tiole czy siarkowodór – przy czym wartości te ustalono na podstawie kryteriów toksykologicznych, a nie uciążliwości zapachowej [16]. Prawo ochrony środowiska (art. 222 ust. 1, 5 i 6) upoważnia ministra właściwego do spraw klimatu, działającego w porozumieniu z ministrem właściwym do spraw zdrowia, do określenia standardów zapachowych jakości powietrza, jednak dotychczas nie opracowano w Polsce regulacji w tym zakresie [17-18]. Podobnie w większości państw Unii Europejskiej brak jest jednolitego systemu prawnego dotyczącego uciążliwości zapachowej, a stosowane są głównie wytyczne oparte na normie EN 13725 [19-20]. W warunkach krajowych jednym z nielicznych dokumentów stanowiących punkt odniesienia

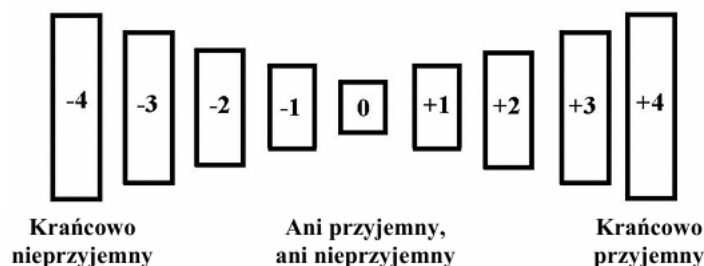
w analizach uciążliwości zapachowej hałd pogórnich jest ekspertyza „Lista substancji i związków chemicznych, które są przyczyną uciążliwości zapachowej”, opracowana na zlecenie Ministerstwa Klimatu i Środowiska [21]. Zawiera ona wykaz substancji istotnych z punktu widzenia oddziaływań odorowych oraz proponowane wartości odniesienia i jednostki zapachowe.

Obowiązujące regulacje nie zapewniają kompleksowych narzędzi do oceny i ograniczania emisji substancji odorotwórczych, zwłaszcza w przypadku źródeł niezorganizowanych, takich jak hałdy pogórnice. Brak standardów zapachowych jakości powietrza, niewystarczające wartości odniesienia oraz ograniczony zakres dokumentów pomocniczych powodują, że analiza uciążliwości zapachowej wymaga stosowania podejść eksperckich łączących metody pomiarowe, modelowanie dyspersji oraz ocenę percepcyjną.

W publikacji przedstawiono podstawowe założenia oceny uciążliwości zapachowej hałd pogórnich, obejmujące identyfikację źródeł emisji, analizę składu chemicznego oraz warunków rozprzestrzeniania substancji odorotwórczych, a także metody ich ilościowej i jakościowej oceny. Szczególną uwagę poświęcono zintegrowanemu podejściu badawczemu, łączącemu techniki pomiarowe i analityczne stosowane w Laboratorium Inżynierii Materiałowej i Środowiska Instytutu KOMAG z modelowaniem dyspersji oraz oceną oddziaływania środowiskowego i społecznego.

2. Właściwości zapachu

O stopniu uciążliwości zapachowej decydują właściwości zapachu, takie jak jego rodzaj, jakość hedoniczna, intensywność oraz częstotliwość pojawiania się [22]. Rodzaj zapachu stanowi określenie jego podobieństwa do znanych zapachów, np. zapach siarkowy, spalenizny, zgniły. Jakość hedoniczna zapachu, rozumiana jako emocjonalna reakcja człowieka na bodziec węchowy, oceniana jest za pomocą skal werbalnych, graficznych lub punktowych, umożliwiających ilościowy opis subiektywnych odczuć (Sówka, 2011). Wartości ujemne odpowiadają zapachom nieprzyjemnym, wartości dodatnie – przyjemnym, natomiast wartość zerowa oznacza zapach neutralny. Jednym z najczęściej wykorzystywanych narzędzi jest dziewięciostopniowa skala hedoniczna Peryama i Pilgrima – rys. 1.



Rys. 1. Hedoniczna skala jakości zapachu

(opracowano na podstawie [23])

Do oceny intensywności zapachu najczęściej wykorzystuje się głównie skale opisowe, w tym siedmiostopniową skalę rekomendowaną w wytycznych VDI 3940, klasyfikującą zapach od „braku zapachu” do „skrajnie mocnego” (VDI, 2010) – Tabela 1.

Skala intensywności zapachu (opracowano na podstawie [24])

Tabela 1.

Zapach	Stopień intensywności
Skrajnie mocny	6
Bardzo mocny	5
Mocny	4
Wyraźny	3
Słaby	2
Bardzo słaby	1
Brak zapachu	0

Kolejnym podejściem do oceny intensywności zapachu są skale odniesienia, w których intensywność badanego zapachu porównuje się z substancjami wzorcowymi o znanej sile zapachowej. Przykładem jest skala OIRS (Odour Intensity Referencing Scale), opisana w normie ASTM E544 i oparta na geometrycznych rozcieńczeniach n-butanolu [25-26]. W zależności od wariantu skala obejmuje 5, 8, 10 lub 12 poziomów intensywności, różniących się wartością pierwszego stopnia oraz współczynnikiem postępu geometrycznego.

Podstawowym parametrem ilościowym stosowanym w ocenie oddziaływania zapachowego jest stężenie zapachowe c_{od} , wyrażane zgodnie z wymaganiami normy EN 13725, w europejskich jednostkach zapachowych na metr sześcienny (ouE/m^3) [19]. Jedna jednostka zapachowa odpowiada stężeniu substancji odorotwórczej, które po rozcieńczeniu w $1 m^3$ neutralnego gazu osiąga próg wyczuwalności dla 50% zespołu oceniającego. Dla pojedynczych substancji stężenie zapachowe wyznacza się jako iloraz ich stężenia w powietrzu c oraz progu wyczuwalności c_{OT} [27]:

$$c_{od} = \frac{c}{c_{OT}} \quad (1)$$

gdzie:

c – stężenie substancji w powietrzu, mg/m^3 , $\mu g/m^3$ lub ppb,

c_{OT} – progu wyczuwalności, mg/m^3 , $\mu g/m^3$ lub ppb

W przypadku mieszanin zapachowych stężenie zapachowe określa się jako krotność rozcieńczenia próbki powietrzem bezwonnym, niezbędną do osiągnięcia progu wyczuwalności:

$$c_{od} = \frac{V_p + V_{pr}}{V_{pr}} \quad (2)$$

gdzie:

V_{pr} – objętość próbki, dm^3 ,

V_p – objętość powietrza rozcieńczającego, dm^3

Norma EN 13725 definiuje również europejską referencyjną masę zapachową (EROM – European Reference Odour Mass), odpowiadającą $123 \mu g$ n-butanolu odparowanego do $1 m^3$ neutralnego gazu, co stanowi odniesienie do kalibracji pomiarów olfaktometrycznych [19].

3. Założenia oceny uciążliwości zapachowej hałd pogórnich

Ocena uciążliwości zapachowej hałd pogórnich wymaga uwzględnienia ich specyfiki jako powierzchniowych źródeł emisji niezorganizowanej. W odróżnieniu od źródeł punktowych emisja substancji odorotwórczych zachodzi na rozległej powierzchni i charakteryzuje się istotną zmiennością przestrzenną oraz czasową. W związku z tym analiza oddziaływania zapachowego powinna obejmować zarówno procesy generowania i emisji odorów, jak i czynniki determinujące ich transport oraz percepcję przez człowieka. Hałdę pogórnich należy traktować jako dynamiczny układ geotechniczny i geochemiczny, w którym zachodzą równoległe procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne prowadzące do powstawania substancji odorotwórczych. Intensywność emisji zależy od właściwości zdeponowanego materiału, w tym jego składu mineralnego i chemicznego, zawartości substancji organicznej, wilgotności, porowatości oraz stopnia rozdrobnienia. Istotną rolę odgrywają także procesy utleniania związków siarki i azotu oraz zjawiska samozagrzewania, które mogą powodować okresowe zwiększenie emisji gazów odorowych.

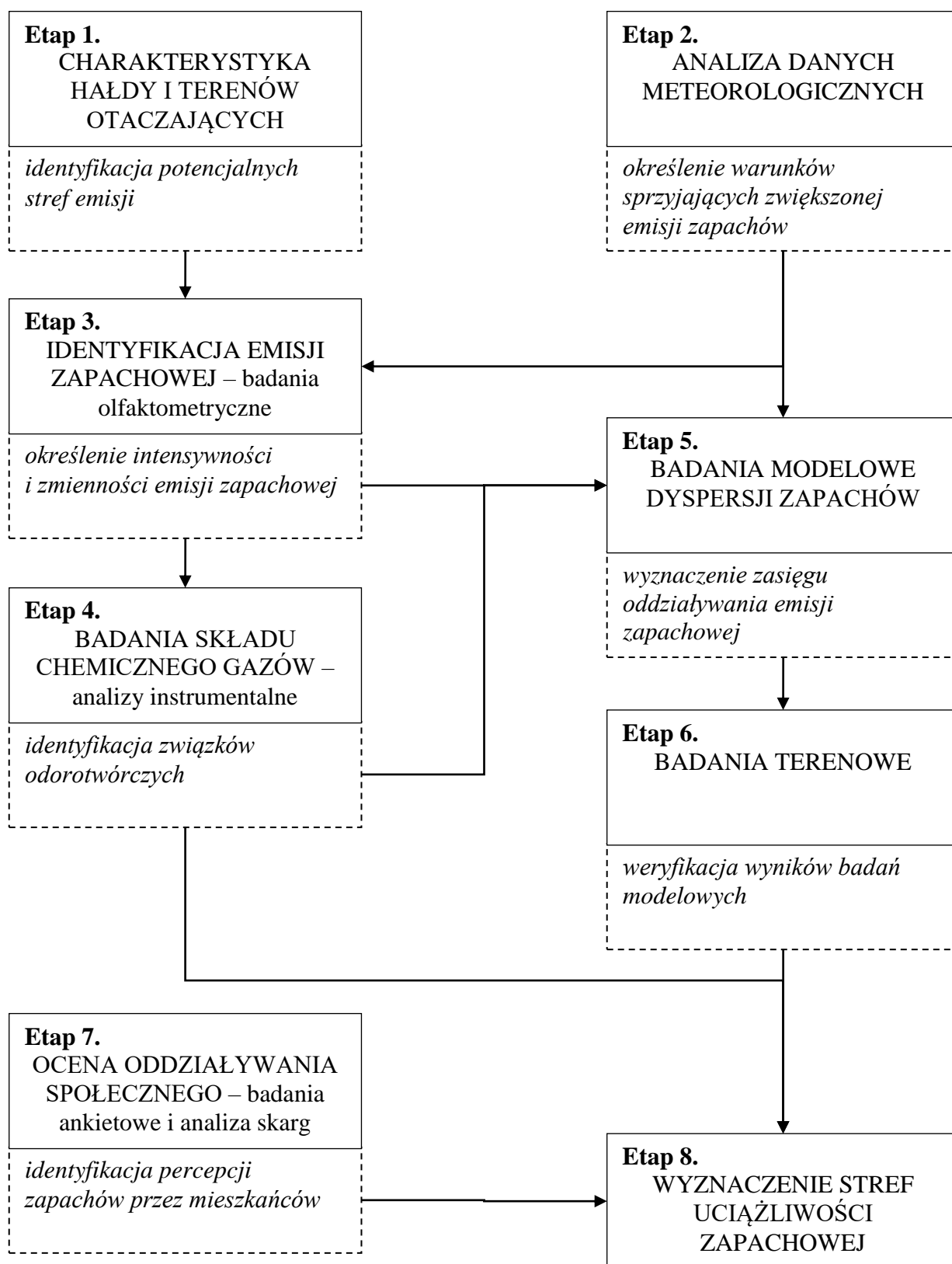
Na wielkość emisji wpływają również parametry geometryczne obiektu, takie jak powierzchnia, wysokość i objętość hałdy, a także stopień jej rekultywacji oraz sposób zagospodarowania terenu. Determinują one intensywność wymiany gazowej pomiędzy wnętrzem obiektu a atmosferą oraz warunkują przestrzenne rozmieszczenie stref aktywnej emisji. Istotnym czynnikiem kształtującym rozprzestrzenianie się substancji odorotwórczych są warunki meteorologiczne. Temperatura i wilgotność względna powietrza, ciśnienie atmosferyczne, prędkość i kierunek wiatru oraz występowanie inwersji termicznych wpływają zarówno na tempo uwalniania gazów z powierzchni hałdy, jak i na ich transport oraz rozcieńczanie w atmosferze. W konsekwencji ocena uciążliwości zapachowej powinna uwzględniać zmienność sezonową i dobową warunków meteorologicznych.

Stopień oddziaływania zapachowego determinowany jest przez lokalizację źródła emisji względem terenów wrażliwych. Kluczowe znaczenie ma odległość od zabudowy mieszkaniowej, obiektów użyteczności publicznej oraz terenów rekreacyjnych, a także ukształtowanie terenu i obecność naturalnych oraz antropogenicznych barier modyfikujących warunki przepływu mas powietrza. W ocenie uciążliwości odorowej hałd pogórnich należy uwzględnić wieloczynnikowy charakter percepcji zapachu. Zależy ona nie tylko od stężenia substancji odorotwórczych, istotne znaczenie mają częstotliwość występowania zapachu, czas jego trwania, intensywność, jakość hedoniczna oraz lokalizacja odbiorców względem źródła emisji. Czynniki te odpowiadają koncepcji FIDOL (Frequency, Intensity, Duration, Offensiveness, Location), stosowanej w ocenie uciążliwości zapachowej [28].

W konsekwencji ocena uciążliwości zapachowej hałd pogórnich powinna mieć charakter wielokryterialny i integrować informacje dotyczące źródła emisji, właściwości emitowanych substancji, warunków meteorologicznych, cech środowiska recepcyjnego oraz sposobu percepcji zapachów przez ludzi. Takie podejście stanowiło podstawę opracowania procedury badawczej umożliwiającej kompleksową ocenę oddziaływania zapachowego tego typu obiektów.

4. Procedura oceny uciążliwości zapachowej hałd pogórnich

Ocena uciążliwości zapachowej hałd pogórnich jest realizowana jako wieloetapowy, zintegrowany proces badawczy obejmujący identyfikację obiektu, charakterystykę emisji, analizę warunków jej rozprzestrzeniania, modelowanie dyspersji oraz ocenę oddziaływania na środowisko i społeczeństwo. Algorytm procedury przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Algorytm procedury oceny uciążliwości zapachowej hałd pogórnich

Pierwszy etap obejmuje szczegółową charakterystykę hałdy pogórnicy ukierunkowaną na opis struktury przestrzennej obiektu oraz identyfikację potencjalnych stref emisji powierzchniowej. W tym celu wykorzystywane są dane geoprzestrzenne (GIS), materiały kartograficzne, dokumentacja geologiczna i górnicza, opracowania dotyczące sposobu rekultywacji i zagospodarowania terenu. Uzupełniająco prowadzone są wizje lokalne i pomiary terenowe. W tym etapie przeanalizowany będzie również charakter terenów otaczających hałdę oraz sposób zagospodarowania przestrzennego i istniejące formy ich użytkowania. Analiza ta pozwoli zidentyfikować obszary szczególnie narażone na oddziaływanie hałdy.

Etap drugi obejmuje analizę warunków meteorologicznych występujących na terenie i w otoczeniu hałdy pogórnicy. Uwzględnia się dane pochodzące z automatycznych stacji meteorologicznych systemu monitoringu środowiska oraz wyniki pomiarów terenowych. Analizie poddaje się takie parametry, jak: prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza, wilgotność względna oraz ciśnienie atmosferyczne. Dane opracowywane są w ujęciu dobowym i sezonowym, co umożliwia identyfikację warunków sprzyjających zwiększonej emisji zapachów.

Kolejny etap dotyczy identyfikacji emisji zapachowej w zakresie jej intensywności oraz zmienności przestrzennej i czasowej. Obejmuje on pobór próbek gazowych z powierzchni hałdy oraz z obszarów o podwyższonej aktywności emisyjnej, a następnie oznaczenie stężenia zapachowego metodą, zgodnie z normą EN 13725. Metoda ta polega na kontrolowanym rozcieńczaniu próbki powietrza neutralnym gazem odniesienia do momentu osiągnięcia progu wyczuwalności zapachu przez panel oceniających. Badania realizowane są z wykorzystaniem olfaktometru dynamicznego, urządzenia zapewniającego precyzyjne i powtarzalne warunki rozcieńczeń oraz standaryzację prezentacji próbek dla zespołu sensorycznego. Badania olfaktometryczne mogą być uzupełniane pomiarami terenowymi intensywności zapachu w wybranych punktach obserwacyjnych, realizowanymi w warunkach rzeczywistych ekspozycji środowiskowej, co pozwala na przestrzenną weryfikację zmienności emisji.

W czwartym etapie określany jest skład chemiczny gazów emitowanych z hałdy oraz identyfikowane są grupy związków odpowiedzialnych za powstawanie odorów. Próbkę gazową pobierane są na hałdzie na rurki wypełnione materiałem sorpcyjnym. Analiza zawartości substancji zapachowych oraz lotnych związków organicznych prowadzona jest przy użyciu chromatografu gazowego sprzężonego z detektorem masowym oraz portem olfaktometrycznym (GC-MS-olfak). Strumień próbki desorbowanej z rurki sorpcyjnej kierowany jest do kolumny chromatograficznej, gdzie związki są rozdzielane ze względu na ich masę i właściwości chemiczne. Po wyjściu z kolumny strumień gazu nośnego z rozdzieloną próbką dzielony jest na dwie części: pierwsza trafia do detektora masowego, natomiast druga do portu olfaktometrycznego. W porcie olfaktometrycznym, oceniany charakter bodźca zapachowego odpowiadającego związkowi zidentyfikowanemu metodą spektrometrii mas, a także jego intensywność i uciążliwość. Przypisanie zidentyfikowanym związkom, odpowiednich cech zapachowych umożliwia wyodrębnienie substancje o największej uciążliwości.

Na podstawie danych emisyjnych i meteorologicznych, w etapie piątym prowadzone jest modelowanie rozprzestrzeniania substancji zapachowych w atmosferze. Proces ten opiera się na matematycznym opisie transportu zanieczyszczeń w warstwie przyziemnej, z uwzględnieniem turbulencji atmosferycznej, ukształtowania terenu oraz charakteru emisji powierzchniowej. Modelowanie umożliwia wyznaczenie przestrzennego rozkładu stężeń zapachowych, zasięgu oddziaływania odorowego oraz obszarów potencjalnych przekroczeń progów percepcji zapachu. Zastosowanie znajdują tutaj modele dyspersyjne, jak modeli AERMOD i CALPUFF, wykorzystywane

do prognozowania stężeń zapachowych oraz emisji odorów ze źródeł powierzchniowych, o złożonej topografii [29-30].

Wyniki modelowania podlegają, w etapie szóstym, weryfikacji w warunkach terenowych poprzez pomiary intensywności zapachu w punktach kontrolnych oraz obserwacje prowadzone metodą marszrutową. Polegają one na systematycznym przemieszczaniu się obserwatora wzdłuż wcześniej wyznaczonych tras pomiarowych, obejmujących obszary potencjalnego oddziaływania hałdy pogórnicy. Trasy dobierane są w sposób zapewniający reprezentatywne pokrycie przestrzenne, w szczególności w kierunku dominujących warunków wiatrowych oraz terenów zabudowy mieszkaniowej. W trakcie przejścia oceniana jest intensywność i charakter zapachu z wykorzystaniem standaryzowanych skal opisowych oraz rejestrowane są warunki meteorologiczne. Pomiary prowadzone są w powtarzalnych warunkach z uwzględnieniem pory roku i godziny prowadzenia pomiarów, co umożliwi analizę zmienności przestrzenno-czasowej oddziaływania odorowego.

W etapie siódmym realizowana jest ocena oddziaływania społecznego na podstawie badań ankietowych prowadzonych wśród mieszkańców obszarów potencjalnie narażonych na emisję odorów. Badania sondażowe umożliwiają identyfikację rzeczywistego wpływu oddziaływań środowiskowych na jakość życia mieszkańców, który nie zawsze koreluje bezpośrednio z wynikami pomiarów instrumentalnych [31]. Wyróżnia się podejście ilościowe, oparte na standaryzowanych kwestionariuszach ankietowych, które umożliwiają analizę statystyczną wyników oraz ich porównywalność pomiędzy różnymi obszarami badawczymi [32-34]. Zastosowanie tego typu narzędzi pozwala na określenie częstości występowania uciążliwości, ich intensywności oraz czasowego rozkładu w badanej populacji [35]. Uzupełnieniem podejścia ilościowego są metody jakościowe, obejmujące wywiady indywidualne (IDI) oraz zogniskowane wywiady grupowe (FGI), które umożliwiają pogłębioną analizę sposobu postrzegania uciążliwości oraz identyfikację czynników wpływających na jej odbiór w warunkach lokalnych [36]. Dodatkowym źródłem danych na temat uciążliwości zapachowych występujących hałdy pogórnicy są zgłoszenia i skargi mieszkańców kierowane do organów administracji i instytucji ochrony środowiska. Stanowią one cenne uzupełnienie informacji ankietowych, ale ze względu na ich niesystematyczny charakter oraz brak jednolitej standaryzacji wymagają ostrożnej interpretacji [7, 37].

Ostatni, ósmy etap obejmuje integrację wyników badań emisyjnych, chemicznych, meteorologicznych, modelowych, terenowych oraz społecznych. Na podstawie zintegrowanych danych wyznaczane są strefy uciążliwości zapachowej, definiowane jako obszary, w których prognozowane stężenia zapachowe oraz deklarowana uciążliwość społeczna wskazują na istotne oddziaływanie hałdy na środowisko receptorowe.

5. Podsumowanie

Uciążliwość zapachowa hałd pogórnicy stanowi złożony problem środowiskowy wynikający z jednoczesnego oddziaływania procesów geochemicznych zachodzących w masie zdeponowanych odpadów, warunków meteorologicznych oraz specyfiki środowiska recepcyjnego. Emisja substancji odorotwórczych ma charakter powierzchniowy, rozproszony i silnie zmienny w czasie, co istotnie ogranicza możliwość jej jednoznacznej oceny wyłącznie na podstawie pojedynczych pomiarów z wykorzystaniem jednej metody badawczej.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że wiarygodna ocena oddziaływania zapachowego wymaga podejścia zintegrowanego, łączącego metody olfaktometryczne, instrumentalne techniki analityczne, modelowanie dyspersji oraz badania terenowe i społeczne. Szczególne znaczenie przypisuje się

olfaktometrii dynamicznej jako metodzie znormalizowanej, umożliwiającej ilościową ocenę stężenia zapachowego. Technika ta dostarcza informacji o percepcyjnej sile oddziaływania odorów, jednak nie pozwala na określenie ich składu chemicznego. Z tego względu niezbędne jest uzupełnienie analiz sensorycznych o metody instrumentalne, wykorzystujące techniki chromatograficzne i spektroskopowe, które pozwalają na identyfikację kluczowych grup związków odpowiedzialnych za powstawanie odorów oraz ocenę ich udziału w całkowitym profilu zapachowym.

Istotnym elementem oceny jest również uwzględnienie zmienności warunków meteorologicznych oraz topografii terenu, które determinują zarówno intensywność emisji, jak i zasięg transportu substancji zapachowych w atmosferze. W tym kontekście modele dyspersyjne stanowią narzędzie umożliwiające przestrzenną ekstrapolację wyników pomiarowych, jednak ich interpretacja wymaga uwzględnienia niepewności wynikającej z heterogeniczności źródeł powierzchniowych oraz zmienności warunków atmosferycznych.

Uzupełnieniem podejścia środowiskowego są badania społeczne, które pozwalają na identyfikację subiektywnego wymiaru oddziaływania odorowego. Wyniki ankiet, wywiadów oraz analiza zgłoszeń mieszkańców wskazują, że percepcja uciążliwości zapachowej nie zawsze pozostaje w ścisłej korelacji z mierzalnymi parametrami emisji, co potwierdza wieloczynnikowy charakter tego zjawiska.

W konsekwencji, ocena uciążliwości zapachowej hałd pogórnich powinna być traktowana jako proces wieloźródłowej integracji danych środowiskowych, chemicznych, meteorologicznych oraz społecznych. Takie podejście umożliwia nie tylko ilościową charakterystykę emisji, lecz także identyfikację rzeczywistego wpływu obiektów na jakość życia mieszkańców terenów sąsiadujących oraz stanowi podstawę do opracowania skutecznych strategii ograniczania oddziaływań odorowych.

Literatura

1. Woźniak G., Bakar J., Dyczko A., Jarosz J., Ryś K., Radosz Ł., Kaul S., Adamik K., Besenyei L., Prostański D.: The diversity and plant species composition of the spontaneous vegetation on coal mine spoil heaps in relation to the area size. *Min. Mach.* 2023, nr 1, s. 68-84, DOI:10.32056/KOMAG2023.1.7.
2. Phenrat T.: Community Citizen Science for Risk Management of a Spontaneously Combusting Coal-Mine Waste Heap in Ban Chaung, Dawei District, Myanmar. *GeoHealth* 2020, 3, e2020GH000249. <https://doi.org/10.1029/2020GH000249>
3. Worsa-Kozak M., Górniak-Zimroz J., Szrek A., Chudy K.: Remote detection and monitoring of post-mining heat island. *Front. Environ. Sci.* 2024, 12:1305149. doi: 10.3389/fenvs.2024.1305149
4. Nádudvari Á., Abramowicz A., Fabiańska M., Misz-Kennan M., Ciesielczuk J.: Classification of fires in coal waste dumps based on Landsat, Aster thermal bands and thermal camera in Polish and Ukrainian mining regions. *Int J Coal Sci Technol* 2021, 8, 441-456. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00375-4>
5. Fabiańska M., Ciesielczuk J., Nádudvari Á., Misz-Kennan M., Kowalski A., Kruszewski Ł.: Environmental influence of gaseous emissions from self-heating coal waste dumps in Silesia, Poland. *Environ Geochem Health.* 2019, 41: 575-601. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0153-5>
6. Abramowicz, A., Rahmonov, O., Chybiorz, R.: Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin. *Land* 2021, 10, 23. <https://doi.org/10.3390/land10010023>
7. Sówka I., Sobczyński P., Miller U.: Wpływ sezonowej zmienności odorów emitowanych ze źródeł powierzchniowych pasywnych na zasięg oddziaływania zapachowego wybranej

- komunalnej oczyszczalni ścieków. Rocznik Ochrona Środowiska 2015, 17(2), 1339-1349. <https://bibliotekanauki.pl/articles/1818615>
8. Potargowicz E.: Węch – niedoceniany zmysł człowieka. Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej 2008, 62, 1-10. <https://phmd.hirszfeld.pl/wech-niedoceniany-zmysl-czlowieka/>
 9. Legator M. S., Singleton C. R., Morris D. L., Philips D. L.: Health effects from chronic low-level exposure to hydrogen sulfide. Archives of environmental health 2001, 56(2), 123–131. <https://doi.org/10.1080/00039890109604063>.
 10. Guarneros M., Drucker-Colin R., Esquivelzeta J., Hudso, R.: Adverse Effect of Air Pollution on Odor Perception. InTech. doi: 10.5772/20531. <https://www.intechopen.com/chapters/18594>
 11. Herz R.S.: Aromatherapy facts and fictions: a scientific analysis of olfactory effects on mood, physiology and behavior. Int J Neurosci. 2009, 119(2):263-90. <https://doi.org/10.1080/00207450802333953>.
 12. Kampa M., Castanas E.: Human health effects of air pollution. Environ Pollut. 2008, 151(2):362-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
 13. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 sierpnia 2014 r. w sprawie rodzajów instalacji mogących powodować znaczne zanieczyszczenie poszczególnych elementów przyrodniczych albo środowiska jako całości, Dz.U. 2014 poz. 1169
 14. Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 24 września 2020 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, Dz.U. 2020 poz. 1860
 15. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 12 kwietnia 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. 2021 poz. 845
 16. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. 2010 nr 16 poz. 87
 17. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 7 grudnia 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo ochrony środowiska, Dz.U. 2024 poz. 54 z późn. zm.
 18. Krystek J.J.: Uciążliwość zapachowa przedsiębiorstw. Studia Prawnicze KUL 2023, 2 (94). DOI: <https://doi.org/10.31743/sp.14192>
 19. EN 13725:2022 Stationary source emissions - Determination of odour concentration by dynamic olfactometry and odour emission rate
 20. Woźniak L.: Regulacje prawne dotyczące przeciwdziałania uciążliwościom zapachowym (odorum) w wybranych krajach Unii Europejskiej wraz z komentarzem na temat konsekwencji społecznych i ekonomicznych (gospodarczych) ich wprowadzenia”. Opinie i Ekspertyzy. Biuro Analiz Sejmowych: 2014, 3-21. https://www.senat.gov.pl/gfx/senat/pl/senatekspertyzy/2781/plik/oe_222_do_internetu.pdf [dostęp: 10.02.2026]
 21. Zwoździak J.: Ekspertyza przygotowana na zlecenie Ministerstwa Środowiska ze środków NFOŚiGW. Lista substancji i związków chemicznych, które są przyczyną uciążliwości zapachowej. 2016. <https://www.gov.pl/web/klimat/uciazliwosc-zapachowa> [dostęp 10.02.2026]
 22. Kodeks Przeciwdziałania Uciążliwości Zapachowej. Ministerstwo Środowiska. Departament Ochrony Powietrza i Klimatu 2016. https://www.gov.pl/web/klimat/uciazliwosc-za_pachowa. [dostęp 10.02.2025]
 23. Paryam D.R., Pilgrim F.J., Hedonic scale method of measuring food references, Food Technology, Symposium, September 1957, 9-14
 24. VDI 3940 Blatt 3 (2010-01) Measurement of odour impact by field inspection - Determination of odour intensity and hedonic odour tone

25. ASTM E544-10 *Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity*
26. Szakiel J.: Ocena uciążliwości zapachowej na przykładzie wybranych obiektów komunalnych, w *General Quality Problems*. Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy 2018
27. Sówka I.: Metody identyfikacji odorotwórczych gazów emitowanych z obiektów przemysłowych. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej*. Monografie 2011. <https://dbc.wroc.pl/Content/10136/PDF/Sowka.pdf>
28. Nicell J.A.: Assessment and regulation of odour impacts. *Atmospheric Environment* 2009. Volume 43, Issue 1, pp. 196-206, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.033>
29. Busini V., Capelli L., Sironi S., Nano G., Rossi A., Bonati S., 2012, Comparison of CALPUFF and AERMOD Models for Odour Dispersion Simulation, *Chemical Engineering Transactions* 2012 30, 205-210, ISBN 978-88-95608-21-1; ISSN 1974-9791. <https://doi.org/10.3303/CET1230035>
30. Jeong S.J. CALPUFF and AERMOD Dispersion Models for Estimating Odor Emissions from Industrial Complex Area Sources. *Asian J. Atmos. Environ* 2011, 5, 1-7. <https://doi.org/10.5572/ajae.2011.5.1.001>
31. Brancher M., Griffiths K. D., Franco D., & de Melo Lisboa H.: A review of odour impact criteria in selected countries around the world. *Chemosphere* 2017, 168, 1531–1570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.160>
32. Kaczmarczyk S.: Klasyfikacja metod zbierania danych ze źródeł pierwotnych w badaniach marketingowych, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach* 2014, 195, <https://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-05d37123-6d17-495e-bf78-2d0143c4dfaa>
33. Hardy W.: Długość kwestionariusza a precyzja odpowiedzi na pytania ilościowe w badaniach ankietowych: *Ekonomista* 2015, nr 5: 707-718. <https://ekonomista.pte.pl/Dlugosc-kwestionariusza-a-precyzja-odpowiedzi-na-pytania-ilosciowe-w-badaniach-ankietowych,155652,0,1.html>
34. Witaszek Z.: Miejsce i rola sondaży w badaniu opinii społecznej. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*. 2007, R. 48 nr 4 (171) <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BWM4-0021-0053>
35. Kaczmarczyk S.: Etap zbierania danych ze źródeł pierwotnych w procesie badań marketingowych. W: M. Sobocińska (red.), *Konsument i rynek – Badania marketingowe – Strategie i działania marketingowe*. Księga jubileuszowa z okazji 50-lecia pracy twórczej prof. zw. dr hab. Krystyny Mazurek-Łopacińskiej (s. 296–308). Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu 2023. DOI: 10.15611/2023.65.7.18
36. Jaciow M., Maciejewski G.: *Jakościowe badania marketingowe w Internecie*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego 2013
37. Capelli L., Sironi S., Del Rosso R.: Odor sampling: Techniques and strategies for the estimation of odor emission rates from different source types. *Sensors* 2013, 13(7), 938–955. <https://doi.org/10.3390/s130100938>

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.9>

Koncepcja i kryteria oceny segmentowej mobilnej osłony przeciwpylowej przenośnika taśmowego

Michał Szelka - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Turczyński - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono koncepcję segmentowej mobilnej osłony przeciwpylowej przeznaczonej do przenośników taśmowych w zakładach przeróbczych. Istotą problemu naukowo-technicznego jest poprawa kompromisu pomiędzy efektywnością ograniczania emisji pyłu a łatwością obsługi, kontroli i utrzymania ruchu przenośnika. Zaproponowano rozwiązanie składające się z segmentów spawanych oraz elastycznych segmentów harmonijkowych prowadzonych po szynie jezdnej. Osłona może być zsuwana, rozsuwana i przemieszczana wzdłuż przenośnika, co ułatwia dostęp do taśmy, rolek i przestrzeni pod urządzeniem. W rozdziale przedstawiono założenia konstrukcyjne, wskaźniki oceny oraz propozycję metodyki walidacji rozwiązania.

Słowa kluczowe: przenośnik taśmowy, zapylenie, osłona przeciwpylowa, segment elastyczny, walidacja

Concept and assessment criteria of a segmented mobile dust cover for a belt conveyor

Abstract: The chapter presents the concept of a segmented mobile dust cover intended for belt conveyors used in mineral processing plants. The scientific and technical problem concerns the improvement of the compromise between dust reduction and conveyor maintainability. The proposed solution consists of welded frame segments and flexible accordion-type segments moving along a guide rail. The cover can be folded, extended and moved along the conveyor, which facilitates access to the belt, rollers and the space under the machine. The chapter presents design assumptions, assessment indicators and a proposed validation methodology.

Keywords: belt conveyor, dust emission, dust cover, flexible segment, maintainability, validation

1. Wprowadzenie

Zapylenie jest jednym z istotnych problemów występujących w zakładach przeróbczych. Źródłem emisji pyłu mogą być niemal wszystkie operacje technologiczne związane z przygotowaniem, transportem i przetwarzaniem materiałów sypkich. Do procesów mających szczególnie wpływ na generowanie pyłu należą transport przenośnikami taśmowymi, przesypy, punkty załadunku, zsypy, zsuwnie, podajniki wibracyjne, przesiewanie, kruszenie oraz mielenie [1-5].



Rys. 1. Widoczne zapylenie przy przesypie oraz wzdłuż galerii przenośników stacjonarnych [6]



Pył występujący w środowisku pracy może być czynnikiem szkodliwym lub uciążliwym dla zdrowia pracowników. Wymagania dotyczące najwyższych dopuszczalnych stężeń czynników szkodliwych określono w przepisach krajowych [7]. Oprócz bezpośredniego narażenia inhalacyjnego istotnym problemem jest również osiadanie pyłu na posadzce, elementach konstrukcyjnych, maszynach i urządzeniach. Osiadły pył może zostać ponownie uniesiony w wyniku ruchu powietrza, pracy urządzeń, przemieszczania się obsługi lub prowadzenia prac porządkowych. W przypadku pyłu węglowego dodatkowym zagrożeniem jest możliwość utworzenia mieszaniny wybuchowej [8].

Ograniczanie emisji pyłu w rejonie przenośników taśmowych jest zatem zagadnieniem środowiskowym, eksploatacyjnym i organizacyjnym. Nadmierne zapylenie pogarsza warunki pracy, utrudnia obserwację procesu technologicznego, zwiększa nakład prac porządkowych oraz może wpływać na trwałość urządzeń. W praktyce przemysłowej stosuje się różne metody ograniczania zapylenia, takie jak obudowy przesypów, osłony przenośników, fartuchy boczne, zraszanie, instalacje odpylające oraz systemy mgłowe. Pomimo dostępności wielu rozwiązań technicznych nadal występuje potrzeba opracowania osłon, które poza ograniczeniem rozprzestrzeniania się pyłu zapewnią również łatwy dostęp do przenośnika podczas prac serwisowych, czyszczenia i bieżącej kontroli. Problem ten jest szczególnie widoczny na długich odcinkach przenośników, gdzie stała zabudowa może poprawiać ograniczenie emisji pyłu, ale jednocześnie pogarszać ergonomię obsługi [9-15].

2. Problem badawczy i cel pracy

Klasyczne osłony przenośników taśmowych ograniczają rozprzestrzenianie się pyłu, lecz często utrudniają dostęp do taśmy, rolek, elementów konstrukcyjnych oraz przestrzeni pod przenośnikiem. Powstaje więc konflikt między skutecznością ograniczania zapylenia a dostępnością serwisową i konserwacyjną urządzenia. Problem badawczy można zatem sformułować następująco: czy zastosowanie segmentowej mobilnej osłony przeciwpylowej z elastycznymi członami pozwala poprawić relację między skutecznością ograniczania zapylenia a dostępnością serwisową przenośnika taśmowego? Celem pracy jest przedstawienie koncepcji takiej osłony oraz zaproponowanie kryteriów jej oceny. Rozdział nie ogranicza się wyłącznie do opisu konstrukcji, lecz wskazuje również sposób przyszłej walidacji rozwiązania.

3. Metodyka opracowania koncepcji

Opracowanie koncepcji poprzedzono identyfikacją głównych źródeł zapylenia w rejonie przenośników taśmowych oraz analizą problemów eksploatacyjnych wynikających ze stosowania klasycznych osłon stałych. Uwzględniono przede wszystkim ograniczenia związane z dostępem serwisowym, czyszczeniem przestrzeni pod przenośnikiem oraz bieżącą kontrolą pracy urządzenia. Przeanalizowano również dostępne rozwiązania rynkowe oraz wybrane rozwiązania patentowe dotyczące osłon, fartuchów bocznych, pokryw przenośników i urządzeń ograniczających emisję pyłu, obejmujące zarówno rozwiązania krajowe, jak i zagraniczne. Na tej podstawie określono wymagania funkcjonalne dla nowej osłony, zwracając szczególną uwagę na możliwość zachowania dostępu do taśmy i rolek, oczyszczania posadzki pod przenośnikiem. Efektem przeprowadzonych analiz było opracowanie koncepcji modułowej osłony obejmującej segmenty spawane, segmenty elastyczne, system prowadzenia po szynie jezdnej, układ linek stalowych, mechanizm nożycowy oraz sposób łączenia segmentów za pomocą szybkozłączy. Dla zaproponowanego rozwiązania określono również kryteria przyszłej walidacji, obejmujące pomiary zapylenia, ocenę dostępności urządzenia, ergonomii, trwałości oraz możliwości integracji z dodatkowymi systemami technicznymi [14-15].

4. Przegląd i ocena istniejących rozwiązań

Obecnie stosowane osłony przenośników taśmowych można podzielić na kilka podstawowych grup. Są to przede wszystkim osłony: całkowite, częściowe, segmentowe, boczne oraz punktowe [9-13].



Rys. 2. Przykłady obecnie stosowanych rozwiązań [12, 13]

Analiza dostępnych rozwiązań wskazuje, że dominują konstrukcje sztywne, projektowane głównie w celu osłonięcia taśmy lub ograniczenia rozprzestrzeniania się transportowanego materiału. Ich zaletą jest trwałość, jednak zasadniczym ograniczeniem jest utrudniony dostęp do przenośnika podczas prac serwisowych i konserwacyjnych.

Charakterystyka wybranych grup osłon przenośników taśmowych

Tabela 1.

Grupa rozwiązań	Główne zalety	Główne ograniczenia
Oslony całkowite	Najlepiej chronią taśmę i materiał przed opadami, wiatrem i rozprzestrzenianiem pyłu; poprawiają bezpieczeństwo i estetykę instalacji	Wyższy koszt wykonania i montażu; utrudniony dostęp do przeglądów i czyszczenia; większe wymagania dotyczące wentylacji i odprowadzania pyłu
Oslony częściowe	Tańsze od pełnych, łatwiejsze w montażu i serwisie; pozwalają chronić tylko najbardziej narażone odcinki przenośnika	Mniejsza skuteczność w ograniczaniu pylenia i wpływu warunków atmosferycznych; pozostawiają część trasy odsłoniętą
Oslony segmentowe /modułowe	Ułatwiają dostęp do urządzenia, można je łatwo demontować lub otwierać; dobre rozwiązanie dla długich tras i miejsc wymagających częstych inspekcji	Więcej połączeń i elementów montażowych, co może zwiększać nieszczelności; zwykle wymagają starannego wykonania i utrzymania
Oslony boczne	Ograniczają rozsypywanie materiału, redukują wpływ wiatru bocznego i częściowo zmniejszają emisję pyłu	Nie zamykają strefy górnej, więc ich skuteczność przeciwpływowa jest ograniczona; często wymagają uzupełnienia innymi rozwiązaniami
Oslony punktowe	Bardzo skuteczne lokalnie w rejonach przesypów, załadunku i rozładunku, czyli tam, gdzie emisja pyłu jest największa	Działają tylko miejscowo; nie rozwiązują problemu pylenia na całej długości przenośnika



W rozwiązaniach patentowych można znaleźć przykłady osłon segmentowych, pokryw łukowych, osłon elastycznych, fartuchów bocznych oraz układów uszczelniających. Występują więc pojedyncze cechy zbliżone do proponowanej koncepcji, takie jak segmentowość, zastosowanie powłoki elastycznej lub możliwość otwierania osłony. Wśród przeanalizowanych rozwiązań nie zidentyfikowano konstrukcji łączącej w jednym układzie mobilność szynową, segmenty spawane, segmenty elastyczne typu harmonijkowego, system szybkozłączy oraz możliwość zsuwania i przemieszczania osłony wzdłuż przenośnika [16-19].

5. Założenia projektowe oraz koncepcja mobilnej osłony przeciwpyłowej

Na podstawie analizy problemu oraz ograniczeń istniejących rozwiązań określono podstawowe założenia projektowe dla mobilnej osłony przeciwpyłowej. Przyjęto, że rozwiązanie powinno:

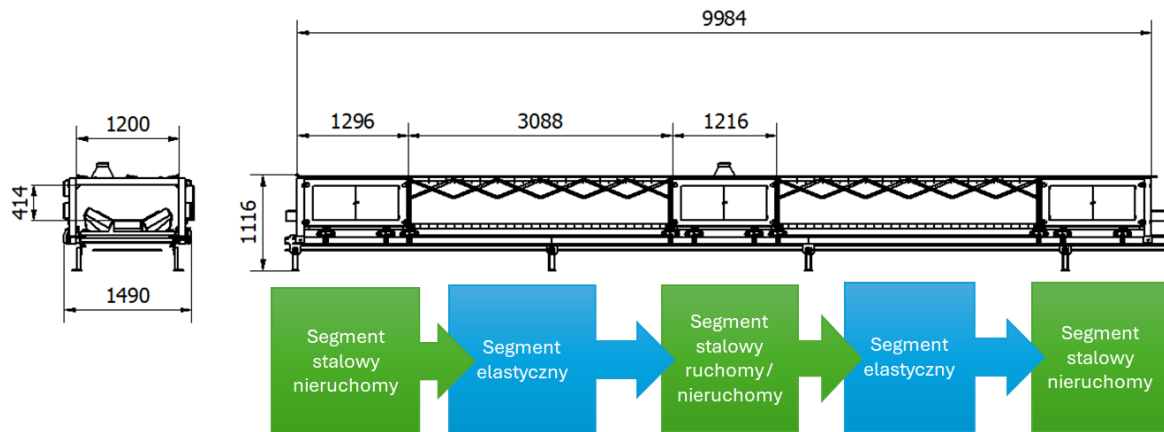
- ograniczać zapylenie wzdłuż przenośnika taśmowego;
- umożliwiać rozbudowę lub skrócenie osłony wraz ze zmianą długości zabezpieczanego odcinka;
- umożliwiać zsuwanie i rozsuwanie segmentów;
- zapewniać dostęp do taśmy, rolek i konstrukcji przenośnika;
- umożliwiać okresowe oczyszczanie posadzki pod przenośnikiem;
- ograniczać ryzyko przypadkowego kontaktu obsługi z ruchomymi elementami przenośnika;
- pozwalać na doraźną obserwację pracy taśmy;
- umożliwiać pracę przy nachyleniu wzdłużnym przenośnika;
- umożliwiać integrację z dodatkowymi układami technicznymi.

Podstawowe założenia konstrukcyjne segmentowej osłony mobilnej

Tabela 2.

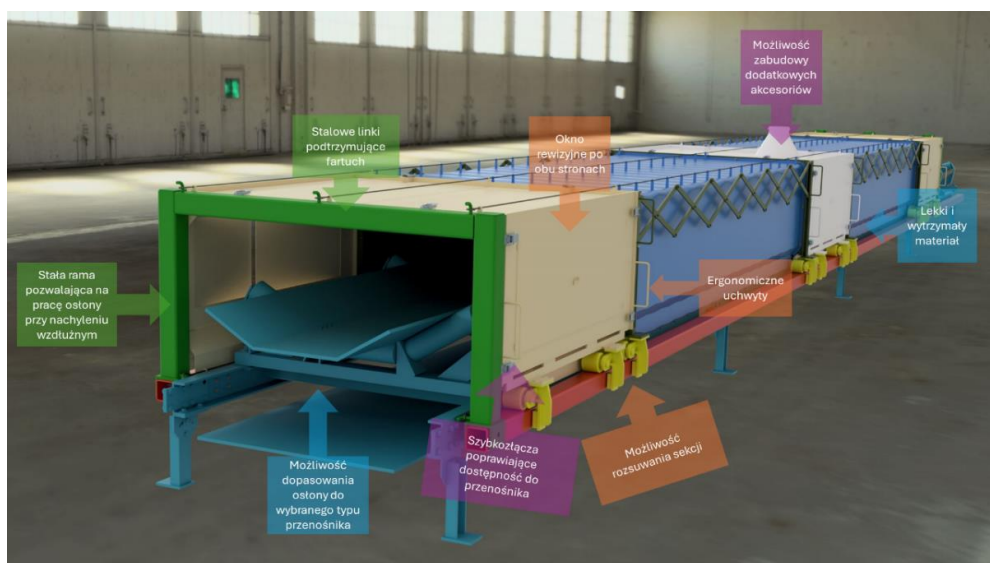
Cecha rozwiązania	Przyjęte założenie
Typ osłony	mobilna, segmentowa, przesuwna
Podstawowe zespoły	segment spawany i segment elastyczny
Prowadzenie	wózki jezdne poruszające się po szynie
Mocowanie szyny	rozłączne mocowanie do konstrukcji przenośnika lub posadzki
Łączenie segmentów	zamki i szybkozłącza
Stabilizacja	ramy stałe w segmentach krańcowych i opcjonalnie pośrednich
Długość segmentu elastycznego	około 3 m po rozwinięciu
Redukcja długości	do około 1/3 długości po zsunięciu
Materiał fartucha	tkanina PVC lub inna tkanina techniczna
Funkcje dodatkowe	kamery, czujniki, filtry pasywne, zraszanie, odpylanie

Proponowana osłona ma budowę modułową. Jej głównymi elementami są segmenty spawane oraz segmenty elastyczne. Segmenty poruszają się po szynie jezdnej za pomocą wózków. Szyna może być mocowana rozłącznie do konstrukcji przenośnika taśmowego lub w wybranych wariantach, do posadzki bądź niezależnej konstrukcji wsporczej.



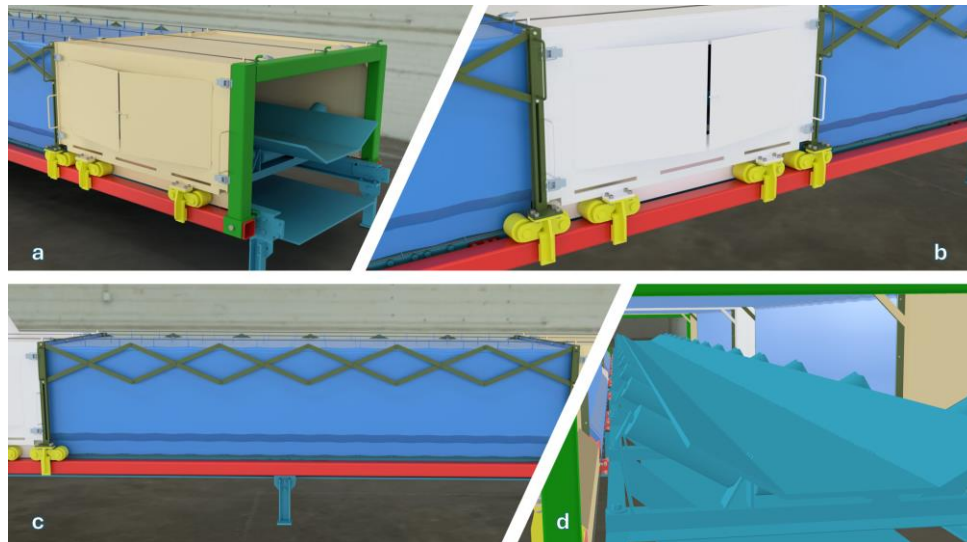
Rys. 3. Przykładowa propozycja zabudowy mobilnej osłony przeciwpylowej
[Źródło: opracowanie własne]

Segmenty są łączone za pomocą szybkozłączy, co umożliwia rozbudowę osłony, skracanie jej długości, odłączanie wybranych modułów oraz uzyskanie dostępu do przenośnika. Koncepcja zakłada zastosowanie nieruchomych segmentów stalowych na początku i końcu osłony, pomiędzy którymi umieszczone są segmenty elastyczne i pośrednie segmenty spawane. Takie rozwiązanie pozwala na dopasowanie długości osłony do konkretnego odcinka przenośnika. Może ono zabezpieczać zarówno krótką strefę lokalnego zapylenia, jak i dłuższy odcinek galerii przenośnikowej.



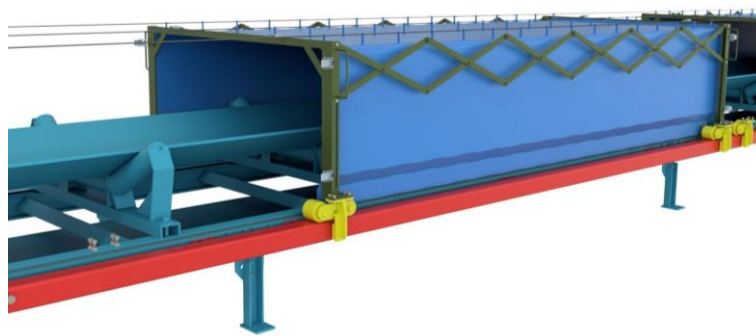
Rys. 4. Koncepcja mobilnej osłony przeciwpylowej przenośnika taśmowego
[Źródło: opracowanie własne]

Segment spawany pełni funkcję konstrukcyjną, prowadzącą i montażową. Jest podstawowym modułem sztywnym, do którego mogą być mocowane pozostałe elementy osłony. Może być wykonany z profili stalowych lub innych materiałów konstrukcyjnych dobranych do warunków eksploatacyjnych. Segment spawany może być wyposażony w okna rewizyjne, zamki i szybkozłącza, mocowania linek stalowych, napinacze linek, uchwyty transportowe, wózki jezdne, elementy blokujące względem szyny oraz punkty mocowania dodatkowego wyposażenia. Szczególną odmianą segmentu spawanego jest segment z ramą stałą. Rama stała służy do stabilizacji osłony, blokowania jej względem szyny oraz napinania linek stalowych prowadzących fartuch elastyczny. W koncepcji przyjęto, że ramy stałe powinny znajdować się w pierwszym i ostatnim segmencie osłony. W przypadku przenośników nachylonych można zastosować dodatkowe ramy stałe w segmentach pośrednich.



Rys. 5. Segment: a) segment spawany wyposażony w ramę stałą, b) segment spawany połączony obustronnie z segmentem elastycznym, c) segment elastyczny, d) przestrzeń wewnątrz mobilnej osłony przeciwpylowej
[Źródło: opracowanie własne]

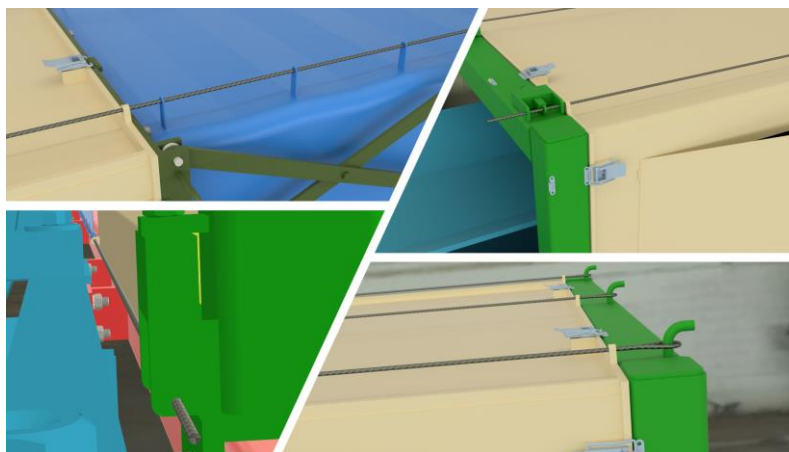
Segment elastyczny jest kluczowym elementem proponowanego rozwiązania. Jego zadaniem jest umożliwienie zmiany długości osłony oraz szybkiego odsłonięcia wybranego fragmentu przenośnika. Segment składa się z dwóch ramek, układu nożycowego, fartucha elastycznego, linek stalowych, wózków jezdnych, szybkozłączy i uchwytów transportowych. Po rozwinięciu segment tworzy osłonę ograniczającą rozprzestrzenianie się pyłu. Po zsunięciu jego długość może zostać zmniejszona do około jednej trzeciej długości początkowej. Wstępnie przyjęto, że długość jednego segmentu elastycznego po rozwinięciu wynosi około 3 m, przy czym wymiar ten może być dostosowany do warunków zabudowy. Mechanizm nożycowy odpowiada za kontrolowane składanie i rozkładanie segmentu. Utrzymuje geometrię osłony i ogranicza ryzyko niekontrolowanego zwisania fartucha nad taśmą. Dzięki temu obsługa może uzyskać dostęp do przenośnika bez konieczności demontażu ciężkich paneli lub osłon sztywnych.



Rys. 6. Wizualizacja segmentu elastycznego mobilnej osłony przeciwpylowej
[Źródło: opracowanie własne]

Fartuch elastyczny stanowi powierzchnię osłonową segmentu harmonijkowego. Może być wykonany z tkaniny PVC lub innej tkaniny technicznej o właściwościach dobranych do środowiska pracy. Istotne cechy materiału to wytrzymałość mechaniczna, odporność na zabrudzenie, podatność na zgrzewanie, trudnopalność oraz odpowiednie właściwości elektrostatyczne. W miejscach wymagających obserwacji pracy taśmy możliwe jest zastosowanie materiału przeziernego lub wykonanie dodatkowych okien rewizyjnych. Fartuch może być wyposażony w oczka, kieszenie oraz wzmocnienia wykonane technologią zgrzewania. Oczka umożliwiają podwieszenie fartucha do

stalowych linek prowadzonych wzdłuż osłony, natomiast wzmocnienia nadają mu wymagany kształt i ułatwiają połączenie z ramkami segmentu. Za prawidłowe prowadzenie fartucha odpowiada system linek stalowych. Linki są prowadzone wzdłuż całej osłony, zarówno po stronie zewnętrznej, jak i wewnętrznej. Ich zadaniem jest podtrzymywanie fartucha, kontrolowanie jego ułożenia oraz zapewnienie poprawnego składania i rozwijania segmentu elastycznego.



Rys. 7. System prowadzenia i napinania stalowych linek podtrzymujących fartuch sekcji elastycznej

[Źródło: opracowanie własne]

6. Wskaźniki oceny skuteczności i funkcjonalności

Ocenę proponowanej koncepcji należy prowadzić na podstawie mierzalnych wskaźników, które pozwolą określić zarówno skuteczność ograniczania zapylenia, jak i wpływ osłony na obsługę oraz utrzymanie przenośnika taśmowego. Takie podejście umożliwia porównanie rozwiązania z osłonami klasycznymi oraz wskazanie jego potencjalnych korzyści eksploatacyjnych [1-2].

Podstawowym wskaźnikiem, jaki należy przyjąć, jest skuteczność redukcji zapylenia (pył całkowity):

$$\eta_p = \frac{C_0 - C_1}{C_0} * 100\% \quad (1)$$

gdzie:

C_0 - stężenie pyłu przed zastosowaniem osłony, mg/m^3 ,

C_1 - stężenie pyłu po zastosowaniu osłony, mg/m^3 ,

η_p - skuteczność ograniczenia zapylenia, %.

Wskaźnik ten może być wyznaczany dla różnych punktów pomiarowych: przy taśmie, przy posadzce, przy stanowisku obsługi, przy przesypie oraz poza strefą bezpośredniego oddziaływania przenośnika.

6.1. Wskaźnik poprawy dostępu serwisowego

Drugim istotnym parametrem jest wskaźnik poprawy dostępu serwisowego:

$$K_s = \frac{t_s}{t_m} \quad (2)$$

gdzie:

t_s - czas uzyskania dostępu do taśmy lub rolek przy osłonie sztywnej s lub min,

t_m - czas uzyskania dostępu przy osłonie mobilnej, s lub min,

K_s - wskaźnik poprawy dostępności serwisowej.

Jeżeli $K_s > 1$, rozwiązanie mobilne jest korzystniejsze pod względem czasu dostępu.

6.2. Wskaźnik osiadania pyłu na posadzce

Oprócz stężenia pyłu w powietrzu można oceniać również ilość pyłu osiadającego na posadzce:

$$q_p = \frac{m_p}{A \cdot t} \quad (3)$$

gdzie:

m_p - masa pyłu zebranego z powierzchni kontrolnej, g,

A - powierzchnia kontrolna, m²,

t - czas ekspozycji, h,

q_p - jednostkowy przyrost masy pyłu osiadłego, g/(m²·h).

Wskaźnik ten pozwala ocenić wpływ osłony na wtórne źródła zapylenia oraz na nakład prac porządkowych [1, 2, 5].

7. Kryteria walidacji rozwiązania

Skuteczność proponowanego rozwiązania powinna zostać oceniona nie tylko na podstawie redukcji zapylenia, ale również przez parametry eksploatacyjne, ergonomiczne i konstrukcyjne. W praktyce osłona będzie przydatna tylko wtedy, gdy ograniczy emisję pyłu, a jednocześnie nie pogorszy dostępności przenośnika.

Proponowane kryteria walidacji segmentowej osłony mobilnej

Tabela 3.

Grupa kryteriów	Kryterium	Proponowany sposób weryfikacji
Środowiskowe	redukcja stężenia pyłu	pomiar stężenia pyłu przed i po zastosowaniu osłony
Środowiskowe	ograniczenie osiadania pyłu	pomiar masy pyłu osiadłego na powierzchni kontrolnej
Przepływowe	szczelność osłony	test dymowy lub wizualizacja przepływu
Przepływowe	wpływ filtrów pasywnych	pomiar ciśnienia lub prędkości przepływu powietrza
Eksploatacyjne	dostęp do taśmy i rolek	pomiar czasu odsłonięcia odcinka przenośnika
Eksploatacyjne	czyszczenie posadzki	ocena czasu i liczby czynności porządkowych
Konstrukcyjne	trwałość mechanizmu	liczba cykli zsunięcia i rozsunięcia segmentu
Konstrukcyjne	stabilność przy nachyleniu	próba pracy przy różnych kątach nachylenia przenośnika
Bezpieczeństwo	ograniczenie kontaktu z elementami ruchomymi	analiza ryzyka i obserwacja stanowiskowa
Integracyjne	montaż czujników, kamer i odpylania	ocena możliwości zabudowy wyposażenia dodatkowego

Tak zdefiniowane kryteria umożliwiają przejście od opisu koncepcji do jej obiektywnej oceny. Pozwalają również porównać proponowaną osłonę z przenośnikiem nieosłoniętym oraz z klasyczną osłoną sztywną.

8. Proponowana metodyka badań eksperymentalnych

Weryfikacja koncepcji powinna zostać przeprowadzona etapowo. Pierwszym etapem powinno być wykonanie modelu CAD i prototypu wybranego odcinka osłony. Następnie należy przeprowadzić badania stanowiskowe, a po ich zakończeniu badania w warunkach przemysłowych.

Pomiary zapylenia powinny być wykonywane w tych samych warunkach technologicznych: przy zbliżonej wydajności przenośnika, tym samym materiale, podobnej wilgotności i stałej prędkości taśmy. Pozwoli to ograniczyć wpływ zmiennych zakłócających. W badaniach można przyjąć trzy warianty porównawcze: przenośnik bez osłony, przenośnik z osłoną sztywną oraz przenośnik z osłoną mobilną segmentową.

Proponowany program badań eksperymentalnych

Tabela 4.

Etap	Zakres badań	Wynik
1	pomiar zapylenia przy przenośniku bez osłony	poziom odniesienia
2	pomiar zapylenia przy osłonie sztywnej	porównanie z typowym rozwiązaniem
3	pomiar zapylenia przy osłonie mobilnej	ocena skuteczności nowej koncepcji
4	pomiar czasu dostępu do taśmy i rolek	dostępność serwisowa
5	pomiar czasu czyszczenia posadzki	ocena ergonomii
6	próba wielokrotnego zsuwania i rozsuwania	ocena trwałości mechanizmu
7	test dymowy lub przepływowy	identyfikacja nieszczelności
8	próba integracji z czujnikami lub odpylaniem	ocena możliwości rozbudowy systemu

Istotnym uzupełnieniem badań eksperymentalnych może być modelowanie przepływowe CFD. Analizy numeryczne mogą zostać wykorzystane do oceny rozkładu prędkości powietrza wewnątrz osłony, identyfikacji stref lokalnego wzrostu ciśnienia oraz wskazania potencjalnych miejsc wydostawania się pyłu przez nieszczelności. Modelowanie CFD może objąć przepływ powietrza wewnątrz osłony, wpływ ruchu taśmy na strugi powietrza, strefy nadciśnienia w rejonie przesypu, wpływ geometrii fartucha na rozkład przepływu, skuteczność filtrów pasywnych i worków kompensacyjnych, rozmieszczenie króćców odpylających oraz wpływ dolnych szczelin osłony na emisję wtórną. W kolejnym etapie możliwe jest zastosowanie sprzężenia CFD-DEM, szczególnie wtedy, gdy analizowany będzie wpływ ruchu materiału sypkiego na powstawanie pyłu i wymuszenie przepływu powietrza. Modelowanie takie może pomóc w optymalizacji geometrii segmentów, rozmieszczenia filtrów pasywnych oraz sposobu uszczelnienia dolnej części osłony [20-22].

9. Analiza wielokryterialna koncepcji

Do oceny koncepcji można zastosować uproszczoną analizę wielokryterialną. Pozwala ona porównać proponowane rozwiązanie z przenośnikiem nieosłoniętym oraz z klasyczną osłoną sztywną.

Porównanie wybranych wariantów osłony przenośnika taśmowego

Tabela 5.

Kryterium	Brak osłony	Osłona sztywna	Osłona mobilna segmentowa
Ograniczenie zapylenia	niskie	wysokie	średnie/wysokie
Dostęp serwisowy	bardzo dobry	ograniczony	dobry
Czyszczenie posadzki	dobrze, ale przy dużym zapyleniu	utrudnione	ułatwione po zsunięciu segmentów
Możliwość obserwacji taśmy	bardzo dobra	zależna od okien rewizyjnych	dobra przy materiale przeziernym
Możliwość rozbudowy	brak	ograniczona	wysoka
Mobilność	brak	niska	wysoka
Integracja z czujnikami	możliwa	możliwa	przewidziana konstrukcyjnie
Praca przy zmianie długości przenośnika	bez znaczenia	ograniczona	możliwa przez modułowość
Ergonomia obsługi	dobra, ale bez ochrony przed pyłem	ograniczona przez stałą zabudowę	korzystna dzięki zsuwaniu segmentów

Analiza wskazuje, że proponowana osłona nie musi osiągać najwyższej oceny w każdym z kryteriów. Jej potencjalna przewaga polega jednak na korzystnym kompromisie między ograniczeniem zapylenia, dostępem serwisowym oraz elastycznością zabudowy [9-11].

10. Możliwe obszary zastosowania i ograniczenia koncepcji oraz kierunki dalszych prac

Rozwiązanie jest przeznaczone przede wszystkim do stacjonarnych przenośników taśmowych zabudowanych wewnątrz obiektów przemysłowych. Szczególnie uzasadnione jest jego zastosowanie na długich odcinkach transportowych, w galeriach przenośnikowych oraz w miejscach, gdzie występuje intensywne zapylenie, a zastosowanie zraszania jest niemożliwe lub niekorzystne technologicznie. Koncepcja może zostać zaadaptowana również do przenośników mobilnych z wysypem czołowym lub bocznym, przenośników zabudowanych w pomieszczeniach z niskim stropem, przenośników z istniejącymi burtami bocznymi oraz odcinków wymagających częstego czyszczenia lub bieżącej obserwacji pracy taśmy. Proponowane rozwiązanie nie powinno być traktowane jako uniwersalny zamiennik wszystkich dostępnych osłon przenośników taśmowych. Jest ono przeznaczone głównie do pracy wewnątrz obiektów przemysłowych, gdzie podstawowe znaczenie ma ograniczenie zapylenia oraz zachowanie dostępu serwisowego. W porównaniu z osłonami stalowymi osłona z segmentami elastycznymi może mieć mniejszą odporność na działanie czynników atmosferycznych, promieniowanie UV, silny wiatr lub uderzenia dużych brył materiału. Zastosowania zewnętrzne wymagałyby dodatkowej analizy materiałowej i konstrukcyjnej. W przypadku stosowania osłony w strefach zagrożonych wybuchem konieczne będzie użycie tkanin technicznych o właściwościach trudnopalnych i antystatycznych oraz przeprowadzenie odrębnej oceny zgodności rozwiązania z wymaganiami właściwymi dla danej strefy pracy. Należy również przeanalizować możliwość gromadzenia się ładunków elektrostatycznych, ryzyko zapłonu oraz wpływ ruchomych elementów osłony na bezpieczeństwo eksploatacji [23-25].

Dalsze prace powinny obejmować rozwinięcie koncepcji do poziomu dokumentacji konstrukcyjnej oraz wykonanie prototypu wybranego modułu. W pierwszej kolejności należy opracować model CAD segmentu spawanego, segmentu elastycznego, szyny jezdnej, wózków, systemu linek oraz mechanizmu



nożycowego. Następnie wskazane jest przeprowadzenie analiz funkcjonalnych i wytrzymałościowych obejmujących ocenę sztywności segmentów spawanych, dobór przekrojów konstrukcyjnych, analizę pracy mechanizmu nożycowego, dobór średnic linek i zakresu ich naciągu, ocenę stabilności osłony przy nachyleniu przenośnika, dobór tkaniny technicznej, analizę mocowania szyny jezdnej oraz ocenę odporności elementów ruchomych na zapylenie. Kolejnym etapem powinny być badania prototypu. Powinny one obejmować ocenę łatwości zsuwania i rozsuwania osłony, trwałości mechanizmów ruchomych, ergonomii dostępu, szczelności oraz wpływu osłony na stężenie pyłu w otoczeniu przenośnika. W przypadku wariantu z filtrami pasywnymi, zraszaniem lub odpylaniem konieczne będzie również określenie wpływu tych układów na przepływ powietrza wewnątrz osłony. W dalszej perspektywie wskazane jest opracowanie uproszczonej metody projektowania osłon tego typu, obejmującej dobór długości segmentów, rozmieszczenie ram stałych, dobór tkaniny, sposób prowadzenia linek, rozmieszczenie filtrów pasywnych oraz kryteria doboru wariantu osłony do konkretnej geometrii przenośnika.

11. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono koncepcję segmentowej mobilnej osłony przeciwpylowej przeznaczonej do przenośników taśmowych pracujących w zakładach przerobczych. Rozwiązanie stanowi odpowiedź na ograniczenia klasycznych osłon sztywnych, które mimo dobrej trwałości i możliwości ograniczania emisji pyłu często utrudniają dostęp serwisowy, czyszczenie oraz bieżącą kontrolę pracy przenośnika. Zaproponowana osłona łączy segmenty spawane z elastycznymi segmentami harmonijkowymi, prowadzonymi po szynie jezdnej za pomocą wózków. Zastosowanie szybkozłączy, systemu linek stalowych oraz możliwości zsuwania i rozsuwania segmentów pozwala uzyskać konstrukcję modułową, dostosowaną do różnych warunków zabudowy. Najważniejszą cechą koncepcji jest próba pogodzenia skutecznego ograniczania zapylenia z zachowaniem dostępu serwisowego do przenośnika. Przedstawione wskaźniki oceny, obejmujące m.in. skuteczność redukcji zapylenia, poprawę dostępu serwisowego oraz osiadanie pyłu, mogą stanowić podstawę przyszłej walidacji rozwiązania. Konstrukcja może być również rozwijana przez integrację z kamerami, czujnikami, filtrami pasywnymi, zraszaniem lub instalacją odpylającą. Przed wdrożeniem konieczne będzie przeprowadzenie badań eksperymentalnych, obejmujących pomiary zapylenia, ocenę trwałości mechanizmów ruchomych, ergonomii obsługi oraz bezpieczeństwa pracy. Proponowana osłona wpisuje się w działania zmierzające do ograniczania emisji niezorganizowanej pyłu, poprawy warunków pracy i usprawnienia utrzymania czystości w rejonie ciągów transportowych.

Literatura

1. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Hazard prevention and control in the work environment: airborne dust. Geneva: World Health Organization, 1999. WHO/SDE/OEH/99.14.
2. Cecla A.B., O'Brien A.D., Schall J., Colinet J.F., Franta R.J., Schultz M.J., Haas E. J., Robinson J.E., Patts J.R., Holen B.M., Stein R.R., Weber J., Strebler M., Wilson L., Ellis M. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. 2nd ed. Pittsburgh: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2019. DHHS (NIOSH) Publication No. 2019-124, RI 9701.
3. Colinet J.F., Halldin C.N., Schall J. Best Practices for Dust Control in Coal Mining. 2nd ed. Pittsburgh: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2021. DHHS (NIOSH) Publication No. 2021-119, IC 9532. DOI: 10.26616/NIOSH PUB2021119.



4. Kissell F.N. Handbook for Dust Control in Mining. Pittsburgh: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2003. Information Circular 9465, DHHS (NIOSH) Publication No. 2003-147.
5. Goldbeck L.J., Marti A.D. Dust control at conveyor transfer points: containment, suppression and collection. *Bulk Solids Handling*. 1996, vol. 16, no. 3, s. 367–372.
6. E-STOP. Osłony mechaniczne <https://e-stop.pl/oslony-mechaniczne/> [online] [dostęp: 08.05.2026].
7. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *Dz.U.* 2018, poz. 1286.
8. Bałaga D., Pawlaczyk-Kurek A., Pasculescu V.M., Cioclea D., Ghicioi E., Laszlo R., Skotniczy P., Badyłak A., Walddoerfer C. Characterization of dust emissions from Shaft VI of the “Knurów–Szczygłowice” mine in the context of VAM utilization. *Mining Machines*. 2025, vol. 43, s. 242–253. DOI: 10.32056/KOMAG2025.21.
9. Martin Engineering. *Foundations: The Practical Resource for Cleaner, Safer, More Productive Dust & Material Control*. 4th ed. Neponset: Martin Engineering Company, 2009.
10. Martin Engineering. *Foundations for Conveyor Safety: The Global Best Practices Resource*. Neponset: Martin Engineering Company, 2016.
11. CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION. *Belt Conveyors for Bulk Materials*. 7th ed., 2nd printing. Naples: CEMA, 2020. ISBN 978-1-891171-44-4.
12. GERO TECHNIK SP. Z O.O. Pokrywy osłaniające taśmę gerotechnik.pl/project/oslony/ [online]. Materiały techniczne producenta. [dostęp: 08.05.2026].
13. ASGCO. Enclosed Skirting System asgco.com/products/enclosed-conveyor-skirting-system [online]. Materiały techniczne producenta. [dostęp: 08.05.2026].
14. PN-EN 620:2021-09. Urządzenia i systemy transportu ciągłego — Wymagania bezpieczeństwa dotyczące przenośników taśmowych stałych do materiałów sypkich. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2021.
15. PN-EN ISO 12100:2012. Bezpieczeństwo maszyn — Ogólne zasady projektowania — Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2012.
16. PL211001B1. Przenośnik taśmowy z osłonami bocznymi. Polska: Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, opis patentowy.
17. Choi K.E., Cho W.J., Choi J.S., Moon J.H., Do J.G., Song J.J., Heo J.H., Jung H.S., Hwang W.K. Side cover for belt conveyor and conveyor system having the same. Korea Południowa, patent KR20190138286A, opublikowano 12.12.2019.
18. KR20140066277A. Device cover for belt conveyor. Korea Południowa, opis zgłoszenia patentowego, opublikowano 02.06.2014.
19. Kim Y.W. Apparatus having urethane side skirt for preventing ore from dropping out of belt conveyor. Korea Południowa, patent KR101772597B1, opublikowano 30.08.2017.
20. Chen X.L., Wheeler C.A., Donohue T.J., Mclean R., Roberts A.W. Evaluation of dust emissions from conveyor transfer chutes using experimental and CFD simulation. *International Journal of Mineral Processing*. 2012, vol. 110–111, s. 101–108. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.04.008.



21. Chen X., Wheeler C. Computational Fluid Dynamics (CFD) modelling of transfer chutes: A study of the influence of model parameters. *Chemical Engineering Science*. 2013, vol. 95, s. 194–202. DOI: 10.1016/j.ces.2013.03.032.
22. Goniva C., Kloss C., Chen X., Donohue T.J., Katterfeld A. Transfer chutes: Predicting dust emissions by multiphase CFD and coupled DEM-CFD simulations. *Bulk Solids Handling*. 2014, vol. 34, s. 55–57.
23. Dyrektywa 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników potencjalnie narażonych na ryzyko związane z atmosferami wybuchowymi. *Dz.U. UE L 23 z 28.01.2000*, s. 57–64.
24. Dyrektywa 2014/34/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej. *Dz.U. UE L 96 z 29.03.2014*, s. 309–356.
25. PN-EN ISO 80079-36:2016-07. Atmosfery wybuchowe — Część 36: Urządzenia nielektryczne do atmosfer wybuchowych — Metodyka i wymagania. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2016.

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.10>

Elektrownia szczytowo-pompowa jako magazyn energii w kopalni podziemnej

Jacek Korski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Magazynowanie energii jest ściśle powiązane z rosnącym udziałem niesterowalnych, pogodozależnych źródeł wywarzania energii elektrycznej. Jednocześnie polskie górnictwo węgla kamiennego podlega procesom redukcji zdolności wydobywczych w związku z tym kolejne kopalnie są poddawane procesom likwidacyjnym. Jednym z pomysłów na kontynuację działalności kopalń w innym obszarze jest wykorzystanie ich jako magazyny energii o szeroko rozumianym charakterze grawitacyjnym. Oznacza to całkowitą zmianę funkcji obiektów takiej kopalni. Niezbędne staje się zdefiniowanie wymagań technicznych wobec takiego magazynu energii i wynikająca z tego ocena praktycznej wykonalności takiego projektu. Zdefiniowanie uwarunkowań i ograniczeń pozwoli ocenić czy zapewnione zostaną funkcjonalne i użytkowe cechy wykorzystania kopalni podziemnej, jako magazynu energii elektrycznej – elektrowni szczytowo-pompowej w podziemnej kopalni.

Słowa kluczowe: podziemne magazyny energii, kopalnia podziemna, wykorzystanie opuszczonych kopalń, funkcjonalność magazynów energii w kopalniach, elektrownia szczytowo-pompowa

Pumped-storage power plant as an energy storage in an underground mine

Abstract: Energy storage is closely linked to the growing share of uncontrollable, weather-dependent sources of electricity generation. At the same time, the Polish hard coal mining industry is undergoing a reduction in production capacity, resulting in subsequent mine closures. One idea for continuing mine operations elsewhere is to use them as energy storage facilities, broadly defined as gravity-based. This implies a complete redesign of the mine's facilities. Defining the technical requirements for such an energy storage facility and the resulting assessment of the practical feasibility of such a project is essential. Defining the conditions and constraints will allow for an assessment of whether the functional and operational characteristics of using an underground mine as an electricity storage facility - a pumped-storage power plant in an underground mine - will be met.

Keywords: underground energy storage, underground mine, use of abandoned mines, functionality of energy storage in mines, pumped-storage power plant

1. Wprowadzenie

Kończące wydobywanie kopalnie podziemne pozostawiają po sobie infrastrukturę techniczną, a w tym wyrobiska podziemne i szyby kopalniane łączące wyrobiska podziemne z powierzchnią terenu. Szyby te w warunkach polskich mają głębokości przekraczające czasami tysiąc metrów i dużą powierzchnię przekroju poprzecznego. Pojawiły się koncepcje wykorzystania szybów kopalnianych i całych kopalń, jako magazynów energii. Konieczność tworzenia magazynów energii znana od dawna w postaci tam spiętrzających wodę na koła wodne czy ciężarków zawieszonych na cięgnach napędzających mechanizmy zegarów wieżowych czy ściennych. Stawidła spiętrzające wodę do napędu koła wodnego gromadziły wodę (o chwilowym przepływie mniejszym niż zapotrzebowanie) w czasie, gdy nie była ona wykorzystywana i pozwalały na podawanie wody o oczekiwanej ilości w czasie wykorzystywania napędu (rys. 1). Jest to odpowiednik współczesnej idei magazynowania energii. Ciężarkowe napędy zegarów wieżowych i niektórych stojących pokojowych przez podniesienie ciężarka w najwyższe położenie powodowały zmagazynowanie energii, która była

stopniowo wykorzystywana do napędu mechanizmu zegara nie wymagając częstej obecności ludzi. Podobnie działają także sprężynowe mechanizmy zegarów.



Rys. 1. Historyczne magazyny energii: koło wodne ze stawidłem spiętrzającym wodę (a) i mechanizm zegara wieżowego z obciążnikami (9)

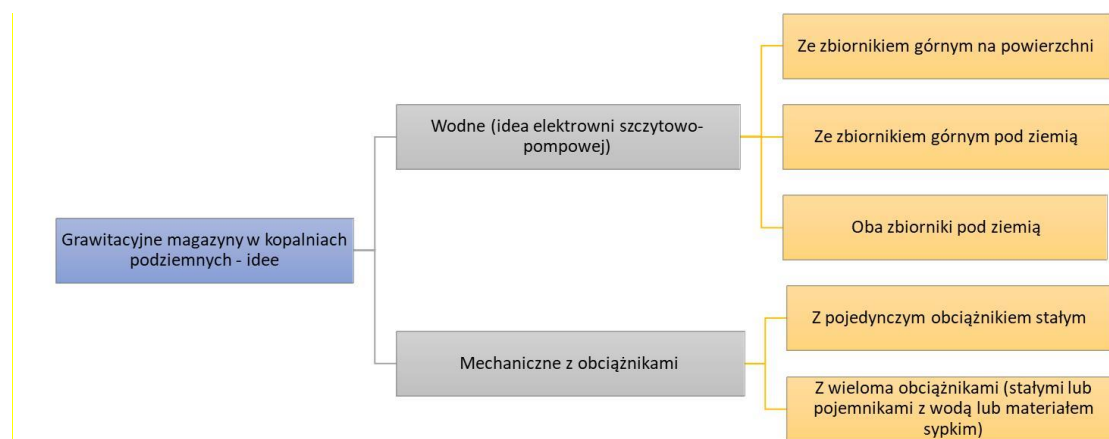
[opracowanie własne]

Intensywnie rozwijana energetyka ze źródeł odnawialnych wykazała istotne różnice pomiędzy cyklami zapotrzebowania na energię i wytwarzania energii elektrycznej z takich źródeł. Dostrzeżono konieczność magazynowania nadwyżek energii i oddawania jej w czasie zwiększonego zapotrzebowania. Od kilkudziesięciu lat pojawiają się idee wykorzystania kopalń, które kończą działalność wydobywczą w innych przeznaczeniach. Jedną z takich idei jest wykorzystanie kopalń jako różnego typu magazyny energii. Układy magazynowania energii jako układy do krótkotrwałego wyrównywania wahań w sieci elektroenergetycznej znane są od wielu lat, ale nowe magazyny energii muszą spełniać większe wymagania dotyczące ilości magazynowanej energii, mocy i żywotności.

Podstawowe grupy idei wykorzystania szybów kopalnianych lub kopalń, jako grawitacyjne magazyny energii to:

- w kopalni jako dolny zbiornik wody lub górny i dolny zbiornik wody roboczej (idea elektrowni szczytowo-pompowej),
- wykorzystanie dużej jednorodnej masy jako obciążnika,
- wykorzystanie wielu obciążników stałych zdejmowanych i zakładanych na ciągniki robocze,
- wykorzystanie materiału sypkiego opuszczanego w dół szybu i wyciąganego na powierzchnię w pojemnikach,
- wykorzystanie wielu pojemników do opuszczania i wyciągania wody.

Schematycznie pokazano to na rysunku 2.



Rys. 2. Teoretycznie wykonalne grawitacyjne magazyny energii w opuszczonej kopalni podziemnej
[opracowanie własne]

Najbardziej znanym i stosowanym od wielu lat rozwiązaniem grawitacyjnych magazynów energii o znacznej skali są wodne elektrownie szczytowo-pompowe. Stąd już w latach 70-tych XX wieku pojawiła się koncepcja wykorzystania kopalni jako grawitacyjnego magazynu energii w postaci wodnej elektrowni szczytowo-pompowej. Ocena z punktu widzenia trwałości magazynu i niezawodności przemysłowego procesu magazynowania energii rozumianego, jako powtarzalny proces o dużej skali i realizowany środkami technicznymi pozwala odnieść się do praktycznej wykonalności i użyteczności elektrowni szczytowo-pompowej z, co najmniej, zbiornikiem dolnym i maszynownią, zlokalizowanymi w kopalni podziemnej. Pomimo licznych publikacji [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] nie zrealizowano do chwili obecnej elektrowni szczytowo-pompowej, czyli hydraulicznego magazynu energii wykorzystującego wyrobiska kopalni podziemnej

2. Elektrownie szczytowo–pompowe jako grawitacyjne magazyny energii

Grawitacyjne magazynowanie energii wykorzystuje masę (w istocie ciężar materii) w stanie stałym lub płynnym i różnicę poziomów pomiędzy dwoma poziomami skrajnymi położenia tej materii zgodnie ze wzorem poniżej:

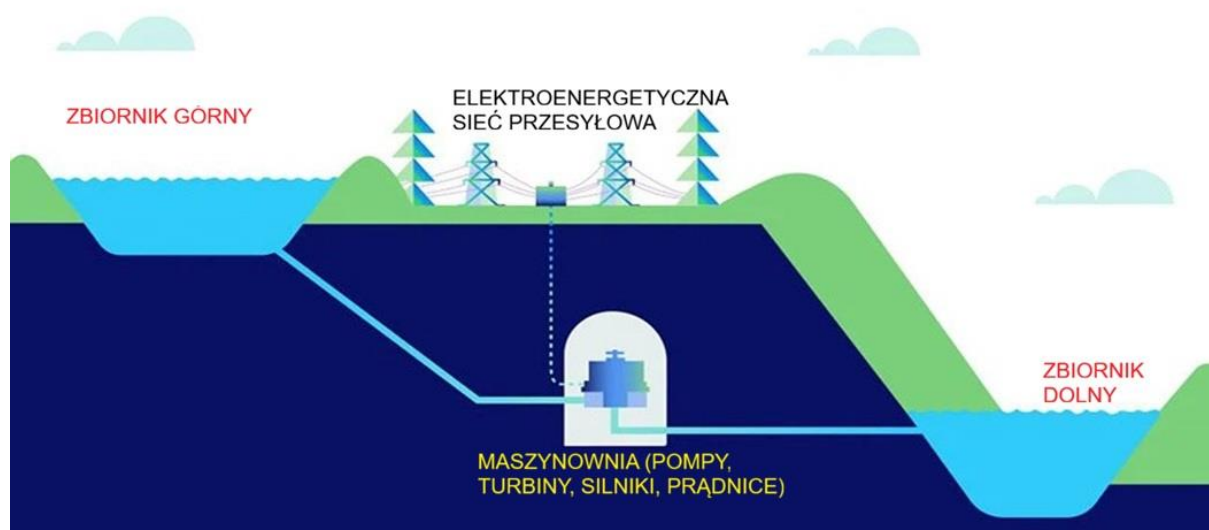
$$E_P = m \times g \times h \quad (1)$$

gdzie:

- E_P – energia potencjalna masy roboczej w grawitacyjnym magazynie energii, np. kWh,
- m – masa substancji roboczej, np. t. pole powierzchni stawiającej opór, m^2 ,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 (przyjmuje się wartość $-9,82 m/s^2$),
- h – różnica poziomów pomiędzy dwoma skrajnymi położeniami masy roboczej, m.

Powyższy wzór wskazuje na bazowe czynniki ograniczające użytkowe parametry magazynu grawitacyjnego, czyli masę i różnicę poziomów.

Elektrownia szczytowo-pompowa, jako magazyn energii wykorzystuje różnicę poziomów między dwoma zbiornikami (górnym i dolnym) i możliwość spuszczenia wody w trybie oddawania, energii z zasilaniem turbiny napędzającej generator elektryczny. W trybie napełniania magazynu woda jest pompowana ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego jak pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Idea elektrowni szczytowo-pompowej jako magazynu energii [opracowanie własne]

Na rysunku 3 przedstawiono schemat technologiczny z lokalizacją maszynowni pod ziemią, co niesie ze sobą ograniczenia związane z podatnością obsługową (maintainability), w tym diagnostyczną całego systemu [8, 9, 10]. Powoduje to także utrudnienia w zapewnieniu dogodnych warunków pracy ludzi [11]. Z tego powodu bardziej funkcjonalnym rozwiązaniem wydaje się system zapewniający możliwie dogodną kontrolę stanu technicznego urządzeń i instalacji technicznych. Takie rozwiązanie jest m.in. w elektrowni szczytowo-pompowej w Żarnowcu, której wszystkie instalacje zlokalizowane są na powierzchni terenu, co pokazano na rysunku 4.

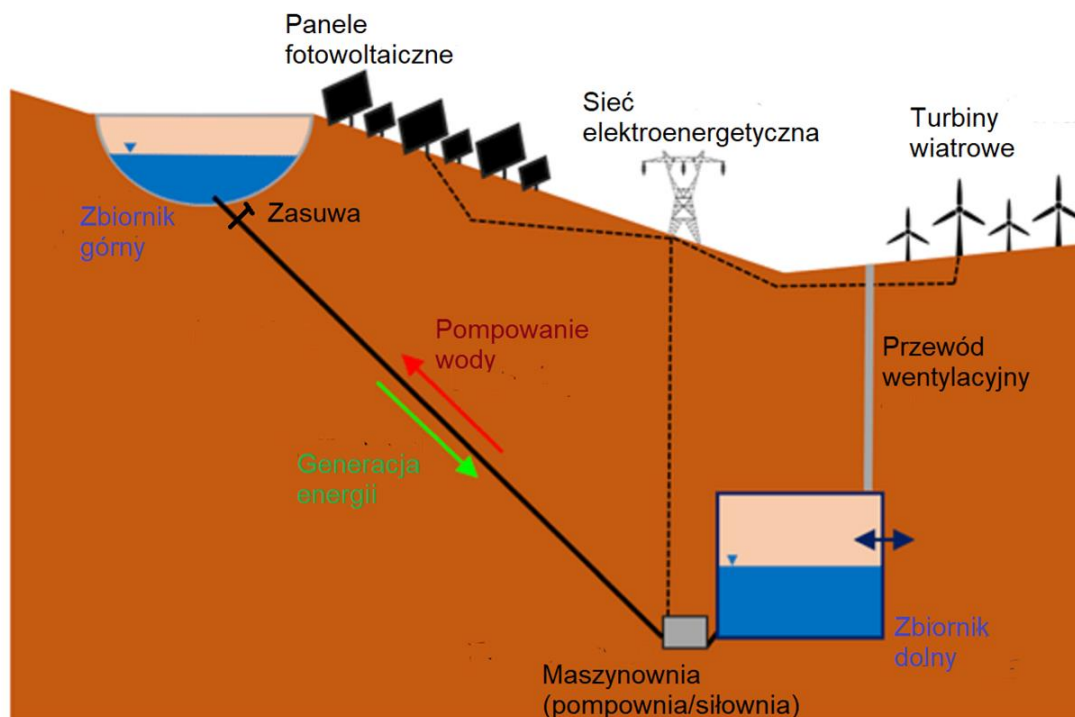


Rys. 4. Idea elektrowni szczytowo-pompowej jako magazynu energii [opracowanie własne]

Rozwiązanie takie zapewnia pełną kontrolę stanu technicznego takiego magazynu energii w całym cyklu jego życia i wysoki poziom jego naprawialności.

2.1. Elektrownia szczytowo-pompowa/grawitacyjny magazyn energii w kopalni podziemnej

Ogólną ideę elektrowni szczytowo-pompowej/magazynu energii w kopalni podziemnej, jako kompleksu wytwarzania i magazynowania energii odnawialnej pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Idea elektrowni szczytowo - pompowej jako magazynu energii opuszczonej kopalni podziemnej

[opracowanie własne]

Należy zwrócić uwagę, że dla prawidłowego i bezpiecznego działania taki system wymaga przewietrzania. Nie występuje możliwość pełnej i ciągłej kontroli i diagnostyki wszystkich obiektów takiego systemu technicznego. Ponadto maszynownie (turbina + generator i pompy) muszą być zlokalizowane pod ziemią, co wymaga dodatkowo utrzymywania w całym cyklu życia dostępności serwisowej dla transportu ekip naprawczych i części zamiennych.

3. Podsumowanie

Magazynowanie energii ma ścisły związek z rosnącym znaczeniem źródeł energii elektrycznej, które są niesterowalne i zależne od warunków atmosferycznych. W tym samym czasie polski sektor węgla kamiennego doświadcza redukcji zdolności wydobywczych, co prowadzi do zamykania kolejnych kopalń. Jednym z możliwych sposobów na dalsze wykorzystanie tych miejsc jest ich przekształcenie w magazyny energii o charakterze grawitacyjnym. Oznacza to całkowitą zmianę funkcji obiektów tych kopalń. Ważne staje się określenie technicznych wymogów dla takiego magazynu energii oraz ocena realności wdrożenia takiego projektu. Określenie warunków i ograniczeń umożliwi ocenę, czy kopalnie podziemne mogą spełniać funkcjonalne i użytkowe oczekiwania, jako magazyny energii elektrycznej, takie jak elektrownie szczytowo-pompowe w podziemnych kopalniach.

Literatura

1. Jinyang F., Xie Heping X., Chen Jie Ch., Jiang Deyi J., Li Cunbao L., William Ngaha Tiedeu W., Ambre J.: Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs. *Applied Energy* 258 (2020).
2. Pujades E., Orban Ph., Pierre Archambeau P., Erpicum S., Alain Dassargues A.: Numerical study of the Martelange mine to be used as underground reservoir for constructing an Underground Pumped Korski J Lewandowski M., Kaniecki M., Adamkowski A., Kamiński A., Lewandowski S., Trojanowska K.: Poprawa elastyczności pracy elektrowni szczytowo-pompowych przez wprowadzenie systemu pracy w zwarciu hydraulicznym. *Rynek Energii* Nr 3(172) 2024.
3. Barszcz T., d'Obyrn K., Korbiel T.: Eksperymentalna elektrownia szczytowo-pompowa UPSH. *Rynek Energii* Nr 1(158) – 2022.
4. Kitsikoudis V., Archambeau V., Dewals B., Pujades E., Orban Ph., Dassargues A., Piroton M., Erpicum S.: Underground Pumped-Storage Hydropower (UPSH) at the Martelange Mine (Belgium): Underground Reservoir Hydraulics. *Energies* 13/2020, www.mdpi.com/journal/energies.
5. Ordóñez A., Álvarez R., García-Fernández C., García-Cortés S.: Study of the Flooding of Coal Mines in Asturias – Possibilities for the Use of Mining Reservoirs. *IMWA 2025 – Time to Come*, pp 745-750.
6. Tobór-Osadnik K., Korski J., Gajdzik B., Wolniak R., Grebski W.: Gravity Energy Storage and Its Feasibility in the Context of Sustainable Energy Management with an Example of the Possibilities of Mine Shafts in Poland – *Energies* 2025, 18, 3374.
7. Korski J.: Solid gravity energy storage in mine shafts – feasibility and functionality. *Mining Machines*, 2024, Vol. 42 Issue 3, pp. 232-239.
8. Słowiński B.: *Inżynieria eksploatacji maszyn*. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2011.
9. Adamczyk W.: *Inżynieria procesów przemysłowych*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków 2002.
10. Kiliński A.: *Przemysłowe procesy realizacji – podstawy teorii*. Seria: Problemy i metody techniki. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
11. Szlązak N., Swolkień J.: *Wentylacja kopalń*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2023.
12. Biały W.: *Podstawy maszynoznawstwa*. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2017.
13. Majcherczyk T., Szaszenko A., Sdwiżkowa E.: *Podstawy Geomechaniki*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
14. Goldratt E.M., Cox J.: *Cel I – doskonałość w produkcji*. MINT Books, Warszawa 2014.
15. Puzyrewski R., Sawicki J.: *Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
16. Zarzycki R., Prywer J.: *INŻYNIERIA PROCESOWA. Mechanika płynów*. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2020.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2026.11>

Rozwój i wdrożenie metod cyfrowo zintegrowanej diagnostyki przenośników taśmowych rewersyjnych

Dorian Markusik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Jerzy Świder – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Sebastian Jendrysik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Jakub Bernatt – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Jerzy Jagoda – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Przenośniki taśmowe rewersyjne są elementami krytycznymi ciągów transportowych, a ich diagnostyka wymaga łączenia informacji o stanie taśmy, złączy, rolek, napędu oraz bieżących warunkach procesu. W rozdziale przedstawiono koncepcję cyfrowo zintegrowanej diagnostyki, ukierunkowaną na ograniczenie fałszywych alarmów i wcześniejsze wykrywanie stanów przedawaryjnych. Omówiono mechanizmy degradacji, klasy metod pomiarowych, lukę badawczą oraz propozycję metodyki doboru i oceny wariantów architektury. Zaproponowano zestaw kryteriów cyfryzacji i optymalizacji, a także plan walidacji laboratoryjnej, demonstracyjnej i przemysłowej. Wynikiem przeprowadzonych badań jest uporządkowany model wdrażania diagnostyki wieloźródłowej w warunkach zmiennego obciążenia i rewersyjnej pracy przenośnika.

Słowa kluczowe: przenośnik taśmowy rewersyjny, diagnostyka cyfrowa, fuzja danych, monitorowanie stanu, utrzymanie ruchu, system predykcyjny

Development and implementation of digitally integrated diagnostics methods for reversible belt conveyors

Abstract: Reversible belt conveyors are critical components of industrial transport systems, and their diagnostics requires combining information on belt, splice, idler, drive and process conditions. This chapter presents a concept of digitally integrated diagnostics aimed at reducing false alarms and improving early detection of pre-failure states. Degradation mechanisms, measurement classes, research gaps and a methodology for selecting and evaluating diagnostic architectures are discussed. A set of digitalisation and optimisation criteria is proposed, together with a validation plan covering laboratory test, a demonstrator and industrial verification. The result is a structured implementation model for multi-source diagnostics under variable load and reversible operation conditions.

Keywords: reversible belt conveyor, digital diagnostics, data fusion, condition monitoring, maintenance, predictive system

1. Wprowadzenie

Przenośniki taśmowe pozostają jednym z podstawowych środków ciągłego transportu materiałów sypkich w górnictwie, przeróbce surowców, energetyce oraz przemyśle materiałów masowych. Ich awaria zwykle nie jest zdarzeniem lokalnym, ponieważ zatrzymanie jednego odcinka może wymusić ograniczenie pracy całego ciągu technologicznego. Szczególnego znaczenia nabierają przenośniki rewersyjne, w których kierunek transportu może być zmieniany w zależności od scenariusza pracy zakładu. Taki tryb eksploatacji zwiększa wymagania wobec układów prowadzenia taśmy, interpretacji sygnałów diagnostycznych oraz automatycznego rozróżniania stanu normalnego od stanu przedawaryjnego. W praktyce przemysłowej stosowane są różne rozwiązania monitorujące: czujniki



temperatury i drgań rolek oraz łożysk, pomiary natężenia przepływu prądu i mocy napędów, systemy wizyjne, skanery laserowe, czujniki położenia krawędzi taśmy, układy nieniszczącej diagnostyki rdzenia i okładzin, a także systemy radarowe do oceny profilu urobku. Każda z tych metod wnosi istotną informację, ale pojedynczy tor pomiarowy rzadko pozwala na jednoznaczną ocenę przyczyny, dynamiki i priorytetu uszkodzenia. W sygnale drganiowym widoczna może być zmiana obciążenia, a nie tylko degradacja łożyska; z kolei przemieszczenie krawędzi taśmy może wynikać z chwilowej asymetrii materiału, zabrudzenia krążnika lub rzeczywistego problemu prowadzenia.

Celem pracy jest przedstawienie metodyki rozwoju i etapowego wdrażania cyfrowo zintegrowanej diagnostyki przenośników taśmowych rewersyjnych. Rozpatrywany problem nie sprowadza się do wyboru jednego najlepszego czujnika, lecz do zaprojektowania architektury, w której dane heterogeniczne są synchronizowane, kontrolowane jakościowo, interpretowane w kontekście kierunku pracy i obciążenia, a następnie przekształcane w użyteczne decyzje utrzymania ruchu. Takie ujęcie umożliwia porównywanie wariantów architektury diagnostycznej w sposób mierzalny i powtarzalny.

Zakres rozdziału obejmuje identyfikację zjawisk degradacyjnych, syntetyczne porównanie klas rozwiązań przemysłowych i badawczych, wskazanie luki badawczej, sformułowanie koncepcji integracji danych oraz propozycję kryteriów oceny wariantów systemu. W ostatniej części rozdziału opisano plan walidacji, którego wyniki powinny pozwolić na ilościową ocenę przyrostu skuteczności diagnostycznej po integracji danych względem metod izolowanych.

2. Specyfika diagnostyczna przenośników taśmowych rewersyjnych

Diagnostyka przenośnika rewersyjnego jest trudniejsza niż diagnostyka układu pracującego jednokierunkowo, ponieważ ten sam fragment taśmy, to samo złącze lub ten sam zestaw krążników może być obciążany w odmienny sposób zależnie od kierunku ruchu. Zmiana zwrotu wpływa na rozkład napięć, stan styku taśmy z krążnikami, przebieg stref załadunku i rozładunku, a także na interpretację sygnałów z czujników rozmieszczonych punktowo. W konsekwencji progi alarmowe ustalone w odniesieniu do jednego trybu mogą być zbyt czułe albo niewystarczająco czułe w przypadku trybu przeciwnego. Najważniejsze obszary obserwacji obejmują taśmę i złącza, rolki i łożyska, napęd, geometrię prowadzenia, profil transportowanego materiału oraz warunki środowiskowe. Uszkodzenia taśmy obejmują m.in. zużycie okładzin, rozdarcia podłużne, uszkodzenia krawędzi, degradację złączy oraz uszkodzenia wewnętrzne rdzenia. W przypadku rolek i łożysk charakterystyczne są wzrost temperatury, zmiana widma drgań, hałas oraz wzrost oporów ruchu. W przypadku procesu technologicznego istotne są przeciążenie, asymetria urobku, poślizg, zmiana prędkości oraz lokalne gromadzenie się materiału w otoczeniu przenośnika.

Wspólną cechą wymienionych symptomów uszkodzeń jest ich heterogeniczność (uszkodzenia przedstawiono na rys. 1). Część z nich ma charakter geometryczny, część termiczny, część dynamiczny, a część procesowy. W ujęciu klasycznym każdy kanał jest często analizowany osobno, przez co utrzymanie ruchu otrzymuje zbiór alarmów, a nie spójną diagnozę. Z tego powodu kluczowe staje się przypisanie każdemu symptomowi kontekstu: miejsca wzdłuż trasy, kierunku pracy, bieżącego obciążenia, historii zdarzeń oraz wiarygodności źródła danych.



Rys. 1. Przykłady obszarów obserwacji w diagnostyce przenośnika taśmowego

Na rysunku 1 przedstawiono przykłady obszarów obserwacji w diagnostyce przenośnika taśmowego. Wybrane zjawiska degradacyjne taśm przenośników, źródła danych i uzasadnienie integracji, zostały zestawione w tabeli 1.

Zjawiska degradacyjne, źródła danych i uzasadnienie integracji

Tabela 1.

Zjawisko	Widoczny objaw	Preferowane dane	Znaczenie integracji
zsuw lub odchylenie taśmy	offset krawędzi, asymetria materiału, kontakt z konstrukcją	vision, laser, czujniki pozycji, radar profilu	powiązanie geometrii z obciążeniem pozwala odróżnić realny problem prowadzenia od krótkotrwałego zaburzenia procesu
uszkodzenia okładziny i złączy	ubytki powierzchni, lokalna anomalia, zmiana ciągłości	laser 2D/3D, vision, NDT magnetyczne lub ultradźwiękowe	tor belt-specific dobrze wykrywa uszkodzenie, ale dane procesowe pomagają ocenić tempo narastania i priorytet działania
awarie rolek i łożysk	wzrost drgań, temperatury, hałasu lub oporów toczenia	drżania, akustyka, termowizja, czujniki punktowe	sygnały lokalne zależą od obciążenia, dlatego wymagają filtracji oraz interpretacji w kontekście stanu procesu
przeciążenie lub niestabilność procesu	profil urobku, pobór mocy, poślizg, drżania globalne	radar, tensometry, prąd, moc, prędkość	dane procesowe nadają kontekst innym torom, lecz same nie wskazują jednoznacznie miejsca degradacji

Zjawiska degradacyjne, opisane w tabeli 1, nie wyczerpują wszystkich możliwych zjawisk degradacyjnych występujących na przenośnikach taśmowych typu rewersyjnego. Są jednak zjawiskami najbardziej degradującymi infrastrukturę przenośnika taśmowego.

3. Stan wiedzy i przemysłowe klasy rozwiązań

W literaturze i praktyce przemysłowej można wyróżnić kilka nurtów rozwoju diagnostyki przenośników taśmowych. Pierwszy obejmuje systemy wieloczujnikowe i rozwiązania IoT, w których dane z czujników przemysłowych oraz z układów wizyjnych są gromadzone ciągle i przesyłane do warstwy nadrzędnej. Przykładem takiego podejścia jest praca Chamorro [1], w której połączono wizję maszynową, sygnały czujnikowe oraz przepływ danych w czasie rzeczywistym. Podobny kierunek reprezentuje system diagnozy oparty na platformie IoT i modelu LightGBM, opisany przez Wanga [2].

Drugi nurt dotyczy monitoringu rolek i łożysk, z wykorzystaniem sygnałów drganiowych oraz akustycznych. Przegląd Alharbiego [3] pokazuje, że metody uczenia maszynowego osiągają wysoką użyteczność w odniesieniu do rozpoznawania defektów krążników, jednak zwykle wymagają dobrej reprezentacji warunków pracy i etapu przygotowania cech. Z kolei Bzinkowski i inni [4] zaproponowali pomiar oparty na tensometrach umieszczonych na powierzchni bębna zwrotnego, co wskazuje na możliwość wykorzystania sygnałów procesowych do identyfikacji obciążenia i stanu transportu.

Trzeci nurt rozwoju diagnostyki przenośników taśmowych obejmuje metody ukierunkowane na samą taśmę: skanowanie laserowe, systemy wizyjne, pomiary magnetyczne, indukcyjne i ultradźwiękowe. Leite i inni [5] wykazali przydatność skanera laserowego 2D oraz metod statystycznych do monitorowania rozdarć podłużnych. Błażej i inni [6] opisali diagnostykę bazującą na czujnikach indukcyjnych i ultradźwiękowych, wspierającą decyzje predykcyjne, dotyczące odnowy taśm. Prace Ma [7] oraz przegląd Rzeszowskiej [8] potwierdzają rosnące znaczenie metod wizyjnych i nieniszczących w monitorowaniu taśm w warunkach przemysłowych.

Czwarty nurt to warstwa nadrzędna, czyli cyfrowe bliźniaki, systemy KPI, benchmarking i logika decyzyjna. Pulcini i Modoni [9] opisali cyfrowego bliźniaka przenośnika taśmowego, opartego na modelu uczenia maszynowego w przypadku predykcyjnego utrzymania ruchu. Osobną grupę stanowią rozproszone sensory światłowodowe, w tym DAS, pozwalające lokalizować zdarzenia na długich odcinkach trasy; koncepcję taką w odniesieniu do przenośnika węglowego przedstawili Kim H. [10]. Rozwiązania komercyjne, takie jak systemy Continental, Vayeron Smart-Idler czy Voith BeltGenius, pokazują natomiast, że rynek przesuwa się w stronę zintegrowanego monitoringu, predykcji i raportowania [11-13].

Analiza tych rozwiązań prowadzi do wniosku, że rozwój technologii pomiarowych jest szybki, ale wciąż pozostaje widoczna luka dotycząca wspólnych kryteriów porównywania architektur diagnostycznych. Wiele publikacji skupia się na jednym komponencie lub jednym typie sygnału. Rzadziej rozpatrywana jest pełna ścieżka od symptomów poprzez jakość danych, synchronizację, interpretację kontekstową, aż do decyzji utrzymania ruchu. Dodatkowo stosunkowo niewiele opracowań uwzględnia specyfikę pracy rewersyjnej i silnie zmiennego obciążenia.

W tabeli 2 zestawiono porównanie głównych klas rozwiązań diagnostycznych taśm przenośników taśmowych.

Porównanie głównych klas rozwiązań diagnostycznych

Tabela 2.

Klasa rozwiązania	Mocna strona	Ograniczenie	Wniosek dla architektury
geometria i alignment	szybka reakcja na zsuw, spillage i odchylenie toru	słabe pokrycie degradacji wewnętrznej taśmy	dobry tor bezpieczeństwa i procesu, ale niewystarczający jako jedyne źródło diagnozy
monitoring rolek i łożysk	wysoka czułość lokalna, dojrzałość wdrożeniowa	silna zależność od obciążenia i warunków otoczenia	wymaga danych procesowych oraz filtracji fałszywych alarmów
belt-specific NDT	wysoka trafność dla rdzenia, okładzin i złączy	ograniczona informacja o całym procesie transportowym	niezbędny tor stanu taśmy, który należy powiązać z resztą układu
vision i laser	duża informacyjność przestrzenna i lokalizacja uszkodzeń	wrażliwość na zabrudzenie, oświetlenie i zabudowę	użyteczne dla geometrii oraz powierzchni po sprzężeniu z innymi torami
DAS i sensory rozproszone	duży zasięg oraz lokalizacja zdarzeń na trasie	wyższy koszt i bardziej złożona interpretacja danych	warstwa zaawansowana dla obiektów o wysokiej krytyczności
platforma cyfrowa lub twin	łączy dane w logikę decyzji i optymalizacji	jakość efektu zależy od jakości danych wejściowych	warstwa nadrzędna potrzebna do wykazania efektu integracji

Zestawienie przedstawione w tabeli 2 wskazuje, że żadna z analizowanych klas rozwiązań diagnostycznych nie zapewnia samodzielnie pełnej informacji o stanie technicznym przonośnika taśmowego. Poszczególne metody dobrze opisują wybrane obszary pracy układu, takie jak geometria prowadzenia taśmy, stan rolek, degradacja samej taśmy, lokalizacja uszkodzeń lub analiza zdarzeń wzdłuż trasy. Ich ograniczenia wynikają jednak z punktowego charakteru pomiaru, zależności od warunków obciążenia, wrażliwości na zakłócenia środowiskowe lub konieczności właściwej interpretacji danych w kontekście procesu transportowego. Z tego względu najbardziej uzasadnionym kierunkiem rozwoju diagnostyki rewersyjnych przonośników taśmowych jest architektura hybrydowa, łącząca pomiary lokalne, dane procesowe oraz warstwę nadrzędnej analizy. Dopiero integracja tych źródeł umożliwia przejście od detekcji pojedynczych symptomów do kompleksowej oceny stanu technicznego, predykcji uszkodzeń oraz wspomaganie decyzji eksploatacyjnych i serwisowych.

4. Koncepcja cyfrowo zintegrowanej architektury diagnostycznej

Proponowana architektura systemu diagnostycznego opiera się na założeniu, że najwyższą wartość diagnostyczną uzyskuje się nie przez maksymalizację liczby czujników, lecz przez zapewnienie ich komplementarności. System powinien obejmować co najmniej cztery klasy informacji: dane o taśmie i złączach, dane lokalne o rolkach i napędzie, dane procesowe o obciążeniu i geometrii urobku oraz dane środowiskowe i eksploatacyjne, w tym kierunek pracy przonośnika. Dopiero połączenie tych warstw pozwala ocenić, czy zaobserwowany symptom jest skutkiem rzeczywistego uszkodzenia, zmianą procesu, błędem pomiaru czy kombinacją tych przyczyn.

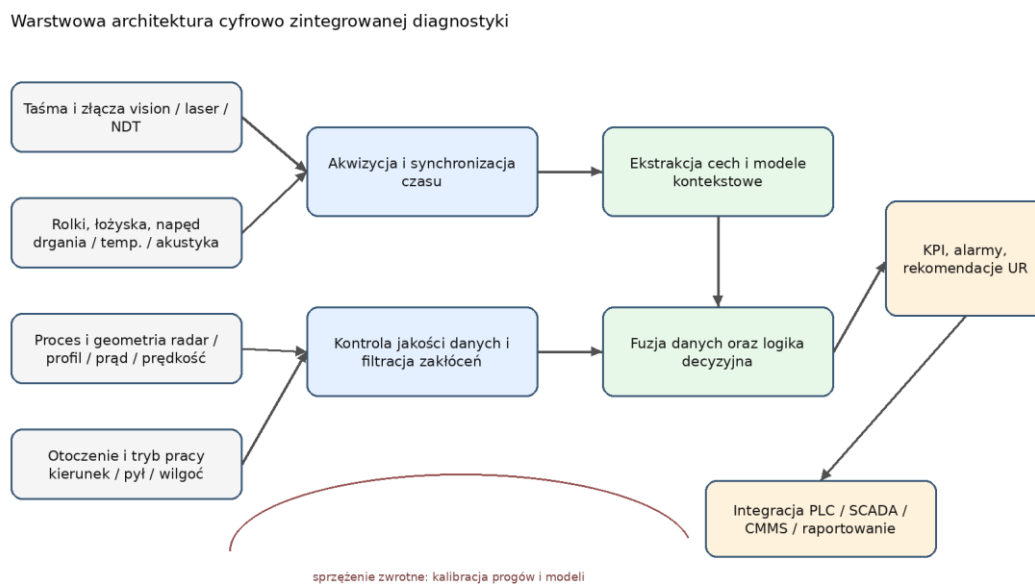
Pierwszą warstwą systemu diagnostycznego jest akwizycja, obejmująca standardowe czujniki przemysłowe, czujnik specjalistyczny, moduły lokalne oraz dane z istniejących systemów automatyki. Drugą warstwą jest synchronizacja czasu i kontrola jakości danych. W warunkach rewersyjnych jest to etap krytyczny, ponieważ błędne przypisanie kierunku ruchu, miejsca lub okna czasowego może

prowadzić do niewłaściwej interpretacji trendu. Trzecia warstwa obejmuje ekstrakcję cech, np. wartości charakterystycznych widma drgań, temperatury, offsetu krawędzi, profilu materiału, energii sygnału akustycznego albo zmiany ciągłości powierzchni taśmy.

Warstwa fuzji danych powinna działać hybrydowo. Część reguł może mieć charakter deterministyczny i wynikać z wiedzy eksploatacyjnej, np. wzrost temperatury krażnika przy jednoczesnym wzroście drgań i stabilnym obciążeniu wskazuje na większe prawdopodobieństwo degradacji łożyska. Inne relacje mogą być modelowane statystycznie lub za pomocą uczenia maszynowego, zwłaszcza wtedy, gdy sygnały są silnie zależne od obciążenia i prędkości ruchu taśmy. Warstwa decyzji powinna generować alarmy o zróżnicowanym priorytecie, wskaźniki KPI oraz rekomendacje odnoszące się do utrzymania ruchu.

Istotnym założeniem jest możliwość wdrożenia etapowego. Wariant minimalny może obejmować monitoring punktowy i dane procesowe z istniejących układów PLC/SCADA. Wariant rozszerzony może dodawać tor wizyjno-laserowy lub belt-specific NDT. Wariant zaawansowany może obejmować sensory rozproszone oraz cyfrowego bliźniaka. Takie podejście zmniejsza barierę inwestycyjną i umożliwia weryfikację wartości dodanej na kolejnych poziomach dojrzałości.

Na rysunku 2 została przedstawiona blokowo warstwowa architektura cyfrowo zintegrowanej diagnostyki przenośnika.



Rys. 2. Warstwowa architektura cyfrowo zintegrowanej diagnostyki przenośnika

W środowisku demonstratora warstwa programowa może być realizowana w oparciu o autorskie oprogramowanie Omega 3.1 [autorskie oprogramowanie], traktowane jako narzędzie do integracji, wizualizacji i analizy sygnałów. Jeżeli system zostanie wyposażony w czujnik specjalistyczny dedykowany ocenie wybranych symptomów pracy przenośnika, jego dane powinny być włączane do wspólnej osi czasu na równych prawach z danymi z automatyki i czujników standardowych. Wtedy

możliwe jest nie tylko wykrywanie zdarzeń, ale również badanie ich korelacji z kierunkiem pracy, obciążeniem i historią eksploatacyjną.

5. Metodyka oceny wariantów i doboru technologii

Aby wybór architektury diagnostycznej był porównywalny naukowo i użyteczny wdrożeniowo, konieczne jest zastosowanie wspólnej procedury oceny. Proponowana metodyka składa się z pięciu kroków. W pierwszym kroku mapuje się zjawiska degradacyjne, czyli relację: zjawisko - objaw - źródło danych - możliwa decyzja. W drugim kroku definiuje się warianty architektury, np. monitoring punktowy, wariant belt-specific, wariant procesowo-cyfrowy, wariant z sensorem rozproszonym oraz wariant hybrydowy. W trzecim kroku ustala się kryteria i wagi. W czwartym kroku przeprowadza się ocenę wielokryterialną, a w piątym waliduje wynik w laboratorium, demonstratorze i na obiekcie przemysłowym. Ocena wariantu może być zapisana jako suma ważona cząstkowych ocen jakościowych lub ilościowych. Taki zapis nie zastępuje szczegółowej walidacji, lecz pozwala wymusić jawność założeń i porównywać warianty na etapie koncepcji. W dalszych pracach suma ważona może zostać uzupełniona metodami TOPSIS, AHP albo analizą wrażliwości wag.

W zaproponowanym zestawie kryteriów połączono wymagania cyfryzacji i optymalizacji. Kryteria cyfryzacji dotyczą synchronizacji, interoperacyjności i skalowalności. Kryteria optymalizacji dotyczą obserwowalności, czasu detekcji, wiarygodności diagnostycznej, odporności przemysłowej oraz użyteczności decyzyjnej. Wagi przedstawione w tabeli 3 mają charakter roboczy i powinny zostać skorygowane po uzyskaniu danych z badań. Ich suma wynosi 1, co ułatwia porównywanie wariantów.

W tabeli 3 zestawiono wybrane kryteria oceny cyfryzacji i optymalizacji diagnostyki taśm przenośników taśmowych.

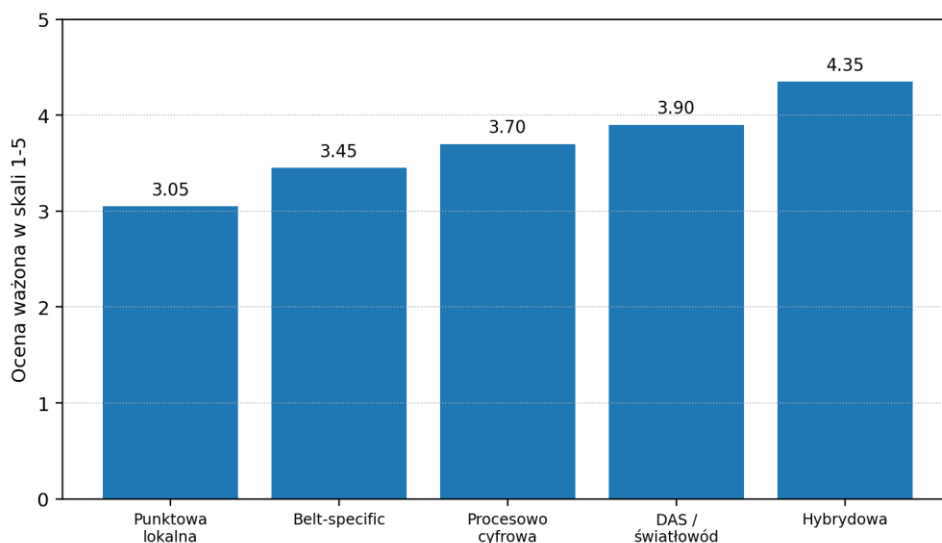
Roboczy zestaw kryteriów oceny cyfryzacji i optymalizacji diagnostyki

Tabela 3.

Kryterium	Opis interpretacyjny	Waga
Synchronizacja i jakość danych	czy różne tory tworzą jedną wiarygodną oś czasu	0,12
Interoperacyjność OT/IT	czy wariant można spiąć z PLC, SCADA, CMMS i raportowaniem	0,10
Modułowość i skalowalność	czy możliwe jest wdrażanie etapowe oraz rozszerzanie funkcji	0,11
Pokrycie obserwowalności	czy architektura obejmuje taśmę, elementy i kontekst procesu	0,12
Czas detekcji	jak wcześnie system ostrzega przed eskalacją uszkodzenia	0,15
Wiarygodność diagnostyczna	czułość, specyficzność i podatność na fałszywe alarmy	0,15
Odporność przemysłowa	pył, wilgoć, drgania, zabudowa oraz dostęp serwisowy	0,12
Użyteczność decyzyjna i koszt	czy wynik wspiera utrzymanie ruchu i uzasadnia CAPEX/OPEX	0,13

Wstępna ocena wariantów wskazuje, że rozwiązania punktowe są korzystne kosztowo i łatwe w retroficcie, ale mają ograniczone pokrycie obserwowalności. Wariant belt-specific poprawia ocenę stanu taśmy, jednak nie rozwiązuje pełnego problemu procesu. Wariant procesowo-cyfrowy jest mocny integracyjnie, ale wymaga uzupełnienia o dane komponentowe. DAS zwiększa zasięg i czas reakcji, lecz jest bardziej kosztowny i trudniejszy interpretacyjnie. Wariant hybrydowy uzyskuje najwyższy wynik, ponieważ łączy zalety kilku torów i warstw decyzyjnych cyfrowej.

Na rysunku 3 przedstawiono przykład wstępnej oceny wariantów architektury diagnostycznej taśm przenośnikowych. Wyniki zamieszczone na rysunku 3 należy traktować jako benchmark roboczy, a nie jako końcową walidację systemu diagnostycznego.



Rys. 3. Przykład wstępnej oceny wariantów architektury diagnostycznej

Architektura hybrydowa zapewnia najkorzystniejsze warunki do oceny stanu technicznego rewersyjnego przenośnika taśmowego, gdyż integruje dane pochodzące z wielu źródeł pomiarowych. Takie podejście umożliwia kompleksową ocenę kondycji maszyny, a także predykcję potencjalnych uszkodzeń oraz potrzeb serwisowych. Diagnostyka punktowa, pomimo najniższej oceny w analizowanym zestawieniu, pozostaje rozwiązaniem użytecznym i zazwyczaj relatywnie tanim. Jej ograniczeniem jest jednak brak możliwości pełnego przewidywania uszkodzeń i zapobiegania ich wystąpieniu; może ona natomiast wspierać szybkie wykrycie awarii oraz ograniczenie dalszych uszkodzeń wtórnych.

6. Plan walidacji i mierniki skuteczności

Walidacja powinna przebiegać etapowo, ponieważ bezpośrednie testowanie wszystkich scenariuszy na obiekcie przemysłowym jest kosztowne i obciążone ryzykiem organizacyjnym. Etap laboratoryjny pozwala wymusić wybrane symptomy: odchylenie taśmy, lokalne uszkodzenie powierzchni, kontrolowany wzrost temperatury łożyska, zmianę drgań, asymetrię obciążenia lub zaburzenie profilu materiału. Celem tego etapu jest zbudowanie bazy sygnałów referencyjnych, określenie minimalnych rozróżnialnych zmian oraz ocena powtarzalności pomiarów.

Etap demonstratora powinien sprawdzić integrację wieloźródłową. Najważniejsze jest tu potwierdzenie, że dane z różnych torów mogą być zsynchronizowane, a algorytmy filtracji odróżniają zakłócenia środowiskowe od rzeczywistych symptomów degradacji. W tym etapie należy badać scenariusze mieszane, np. jednoczesną zmianę obciążenia i wzrost drgań lub chwilowe zabrudzenie czujnika wizyjnego przy stabilnym stanie mechanicznym. Tylko takie testy pozwolą oszacować odporność systemu na fałszywe alarmy. Etap przemysłowy powinien zostać przeprowadzony na przenośniku pracującym w normalnym cyklu, najlepiej w warunkach zmiennego obciążenia i pracy rewersyjnej. Dane z systemu należy zestawzić z obserwacjami służb utrzymania ruchu, historią przeglądów oraz zdarzeniami eksploatacyjnymi. Weryfikacji wymagają przede wszystkim: czułość detekcji, specyficzność, wskaźnik fałszywych alarmów, czas wyprzedzenia ostrzeżenia, błąd lokalizacji



oraz użyteczność komunikatu dla użytkownika. W praktyce sama informacja „alarm” nie jest wystarczająca; system powinien wskazywać możliwą przyczynę, miejsce, priorytet i zalecane działanie. Czulość można zdefiniować jako udział poprawnie wykrytych zdarzeń w zbiorze zdarzeń rzeczywistych, a specyficzność jako udział poprawnie rozpoznanych stanów normalnych w zbiorze stanów bez uszkodzenia. Czas detekcji powinien być odnoszony do momentu potwierdzenia zdarzenia w procedurze referencyjnej. W diagnostyce predykcyjnej szczególnie istotny jest lead time, czyli czas pomiędzy pierwszym wiarygodnym ostrzeżeniem a momentem, w którym awaria lub przegląd stałyby się nieuniknione. Ten miernik bezpośrednio przekłada się na wartość systemu dla utrzymania ruchu. Porównanie metod izolowanych z architekturą zintegrowaną powinno pokazać, czy fuzja danych rzeczywiście zwiększa wykrywalność i ogranicza liczbę błędnych decyzji. Oczekiwany efekt nie musi polegać na tym, że każdy pojedynczy kanał będzie dokładniejszy. Wartość integracji może ujawniać się dopiero w redukcji niepewności: alarm drganiowy potwierdzony temperaturą, stabilnym obciążeniem i lokalizacją na trasie ma większą wartość decyzyjną niż alarm drganiowy analizowany samodzielnie.

Ważnym elementem walidacji jest macierz zdarzeń referencyjnych. Powinna ona zawierać zarówno przypadki jednoznaczne, jak i przypadki graniczne: krótkotrwałe przeciążenie bez uszkodzenia, zabrudzenie czujnika bez zmiany stanu mechanicznego, wzrost temperatury przy chwilowym postoju oraz odchylenie taśmy wynikające z asymetrycznego zasypu. Dopiero taki zestaw pozwala ocenić nie tylko czulość, ale także odporność na nadinterpretację danych. Dla użytkownika przemysłowego szczególnie ważne jest ograniczenie alarmów pozornych, ponieważ zbyt duża liczba fałszywych komunikatów prowadzi do utraty zaufania do systemu. Wdrożenie powinno być poprzedzone ustaleniem sposobu prezentacji wyników. Rekomendowane jest odejście od prostego podziału na stan normalny i alarmowy na rzecz skali priorytetu, w której system wskazuje poziom pewności diagnozy, trend narastania oraz wymagany horyzont reakcji. Taki komunikat jest czytelniejszy dla utrzymania ruchu i umożliwia planowanie działań w oknie remontowym, zamiast wymuszać nieuzasadnione zatrzymanie przenośnika. W ten sposób diagnostyka staje się narzędziem zarządzania ryzykiem, a nie wyłącznie rejestratorem przekroczeń progów.

7. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona analiza potwierdza, że diagnostyka przenośników taśmowych rewersyjnych wymaga ujęcia systemowego. Praca rewersyjna, pył, wilgoć, zmienne obciążenie, ograniczona dostępność pomiarowa oraz heterogeniczność symptomów powodują, że klasyczne progi alarmowe są niewystarczające. W takich warunkach kluczowe znaczenie ma integracja danych oraz powiązanie sygnałów z kontekstem eksploatacyjnym.

Najważniejszym kierunkiem rozwoju nie jest zastąpienie wszystkich metod jednym uniwersalnym sensorem, lecz budowa architektury hybrydowej. Powinna ona łączyć tor stanu taśmy, monitoring lokalny rolek i napędu, dane procesowe oraz warstwę cyfrowej decyzji. Dopiero taka struktura pozwala uzyskać informację użyteczną dla utrzymania ruchu: gdzie występuje symptom, jak szybko narasta, jakie ma prawdopodobne źródło i czy wymaga natychmiastowej reakcji. Zaproponowana metodyka oceny wielokryterialnej umożliwia porównywanie wariantów architektury jeszcze przed pełnym wdrożeniem. Kryteria takie jak czas detekcji, wiarygodność diagnostyczna, odporność przemysłowa, interoperacyjność i koszt powinny być traktowane łącznie, ponieważ rozwiązanie najlepsze laboratoryjnie nie zawsze jest najlepsze wdrożeniowo. Wstępne wyniki wskazują na przewagę wariantu hybrydowego, jednak ostateczne potwierdzenie wymaga walidacji na danych rzeczywistych.

Dalsze prace w tym obszarze będą obejmować doprecyzowanie scenariuszy testowych, budowę bazy sygnałów referencyjnych, implementację mechanizmów synchronizacji i kontroli jakości danych



oraz test demonstratora. Szczególnie ważne będzie ilościowe porównanie metod izolowanych z architekturą zintegrowaną, mierzone czułością, specyficznnością, liczbą fałszywych alarmów i czasem wyprzedzenia ostrzeżenia. Wyniki tych badań będą podstawą do sformułowania rekomendacji wdrożeniowych w odniesieniu do przenośników rewersyjnych, pracujących w warunkach przemysłowych.

Literatura

1. Chamorro J., Vallejo L., Maynard C., Guevara S., Solorio J.A., Soto N., Singh K.V., Bhate U., Ravi Kumar G.V.V., Garcia J. i in.: Health monitoring of a conveyor belt system using machine vision and real-time sensor data. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2022, vol. 38, s. 38-50. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.03.013.
2. Wang M., Shen K., Tai C., Zhang Q., Yang Z., Guo C.: Research on fault diagnosis system for belt conveyor based on internet of things and the LightGBM model. *PLoS ONE* 2023, 18(3), e0277352. DOI: 10.1371/journal.pone.0277352.
3. Alharbi F., Luo S., Zhang H., Shaukat K., Yang G., Wheeler C.A., Chen Z.: A Brief Review of Acoustic and Vibration Signal-Based Fault Detection for Belt Conveyor Idlers Using Machine Learning Models. *Sensors* 2023, 23(4), 1902. DOI: 10.3390/s23041902.
4. Bzinkowski D., Rucki M., Chalco L., Kilikevicius A., Matijosius J., Cepova L., Ryba T.: Application of Machine Learning Algorithms in Real-Time Monitoring of Conveyor Belt Damage. *Applied Sciences* 2024, 14(22), 10464. DOI: 10.3390/app142210464.
5. Leite J.R., Cavalieri D.C., Prado A.R.: Efficient monitoring of longitudinal tears in conveyor belts using 2D laser scanner and statistical methods. *Measurement* 2024, vol. 227, 114225. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114225.
6. Błażej R., Jurdziak L., Rzeszowska A.: Sensor-Based Diagnostics for Conveyor Belt Condition Monitoring and Predictive Refurbishment. *Sensors* 2025, 25(11), 3459. DOI: 10.3390/s25113459.
7. Ma L., Han J., Dong C., Fang T., Liu W., He X.: Conveyor Belt Deviation Detection for Mineral Mining Applications Based on Attention Mechanism and Boundary Constraints. *Sensors* 2025, 25(22), 6945. DOI: 10.3390/s25226945.
8. Rzeszowska A., Błażej R., Jurdziak L.: Non-Destructive Testing for Conveyor Belt Monitoring and Diagnostics: A Review. *Applied Sciences* 2025, 15(24), 13272. DOI: 10.3390/app152413272.
9. Pulcini V., Modoni G.: Machine learning-based digital twin of a conveyor belt for predictive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2024, vol. 133, s. 6095-6110. DOI: 10.1007/s00170-024-14097-3.
10. Kim H.: Distributed Acoustic Sensing and Data Analysis based on Learning Algorithm for Coal Conveyor Belt Monitoring: Development and Field Test. *Optical Fiber Sensors Conference, OFS 2023*, paper Tu3.100.
11. Continental: Belt Monitoring Systems. <https://www.continental-industry.com/global/en/products-solutions/digital/conveying-digital-solutions/belt-monitoring-systems> [dostęp 08.05.2026].
12. Vayeron: Smart-Idler® integrated intelligent conveyor monitoring. <https://smartidler.com/> [dostęp 08.05.2026].



13. Voith: BeltGenius - digital twin and condition monitoring for belt conveyors.
<https://www.voith.com/corp-en/products-services/automation-digital-solutions/beltgenius.html>
[dostęp 08.05.2026].

INDEKS AUTORÓW

Jakub Bernatt (rozdz. 5), (rozdz. 11)
Jan Biela (rozdz. 5)
Zdzisław Budzyński (rozdz. 7)
Przemysław Deja (rozdz. 4)
Monika Gawlik-Jędrzyk (rozdz. 8)
Beata Gryniewicz-Bylina (rozdz. 8)
Marcin Jabłoński (rozdz. 6)
Jerzy Jagoda (rozdz. 5), (rozdz. 11)
Sebastian Jendryk (rozdz. 11)
Marek Kalita (rozdz. 1)
Tomasz Kasperek (rozdz. 1)
Jacek Korski (rozdz. 3), (rozdz. 10)
Daniel Kowol (rozdz. 2)
Dorian Markusik (rozdz. 5), (rozdz. 11)
Piotr Matusiak (rozdz. 2)
Arkadiusz Miemietz (rozdz. 1)
Krzysztof Nieśpiałowski (rozdz. 1)
Bartosz Polnik (rozdz. 7)
Bożena Rakwic (rozdz. 8)
Michał Szelka (rozdz. 9)
Zbigniew Szkudlarek (rozdz. 1)



Jerzy Świder (rozd. 11)

Tomasz Trawiński (rozd. 4)

Krzysztof Turczyński (rozd. 9)

Olga Ziółkowska (rozd. 2)