



Konferencja naukowo-techniczna
Przemysł Przyjazny dla Środowiska

KOMEKO
2025



ISBN 978-83-65593-48-1

Monografia zbiorowa

KOMEKO
Konferencja naukowo-techniczna
Przemysł Przyjazny dla Środowiska

Gliwice 2025

Redakcja naukowa:

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

Recenzenci (w kolejności alfabetycznej):

dr hab. inż. Witold Biały, prof. ITG KOMAG
dr hab. inż. Jarosław Brodny, prof. PŚ
dr inż. Błażej Chmielnicki
dr inż. Andrzej Figiel
prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka
prof. dr hab. inż. Aleksander Lutyński
dr inż. Małgorzata Malec
dr inż. Bartosz Polnik
dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK
dr inż. Zbigniew Szkudlarek
dr hab. inż. Stanisław Szweda, prof. ITG KOMAG
dr hab. inż. Jarosław Tokarczyk, prof. ITG KOMAG

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 2025

*Monografia opublikowana na licencji [Creative Commons Uznanie autorstwa -
- Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe](#) (CC BY-NC 4.0)*

WPROWADZENIE

Drodzy Czytelnicy,

Jest nam niezmiernie miło przekazać w wasze ręce, tegoroczne wydanie monografii, poświęconej konferencji KOMEKO. Coraz mocniej w tematyce naszej konferencji oraz monografii pokonferencyjnej uwypukla się transformacja przemysłu górniczego. Tak jak jeszcze kilka lat temu głównym obszarem tematycznym był proces przeróbki kopalin, tak teraz prym wiodą zagadnienia związane z odnawialnymi źródłami energii czy gospodarką obiegu zamkniętego zaś „twarde” górnictwo stanowi powoli tylko tło dla zagadnień prośrodowiskowych.

W tym roku monografia zawiera osiem rozdziałów powiązanych w trzech blokach tematycznych: Gospodarka obiegu zamkniętego, odnawialne źródła energii oraz uregulowania prawne.

W bloku poświęconym GOZ znajdują się dwa rozdziały opisujące kolejno zagadnienie nowoczesnego recyklingu tzw. Recykling 4.0 oraz idee tzw. mikronizera.

Obecne systemy recyklingu często nie spełniają oczekiwań pod względem skuteczności, co wynika z problemów infrastrukturalnych, niedostatecznej segregacji oraz ograniczonego wykorzystania nowoczesnych technologii. Recykling 4.0, bazujący na rozwiązaniach Przemysłu 4.0, oferuje nowe możliwości usprawnienia gospodarki odpadami poprzez automatyzację, cyfryzację i wykorzystanie sztucznej inteligencji. Inteligentne systemy sortowania, monitoring odpadów w czasie rzeczywistym oraz analiza Big Data mogą znacząco poprawić efektywność recyklingu i przyczynić się do lepszego wykorzystania surowców wtórnych. Potencjalny wpływ na gospodarkę odpadami w Polsce, z uwzględnieniem wyzwań i możliwości jego zastosowania szczegółowo opisano w rozdziale nr 1.

W rozdziale nr 2 wskazano na możliwość zastosowania innych technik rozdrabniania wykluczającego bardziej energochłonne procesy mielenia, w których obecnie stosuje się młyny udarowe lub grawitacyjne z wykorzystaniem młynników. Opisano koncepcję urządzenia zwanego mikronizerem o wysokiej energii i odpowiedniej efektywności procesu, który posłuży do wytwarzania mikrozawiesin i mikroproszków. Takie podejście do procesu przetwarzania pozwala w większym stopniu wykorzystać materiał wsadowy, a co za tym idzie zminimalizować ilość odpadów oraz zmniejszyć energochłonność procesu.

W bloku tematycznym poświęconym OZE znalazły się trzy rozdziały skupiające tematycznie wokół wytwarzania, magazynowania i zarządzania energią.

Zagospodarowanie zasobu ciepłego wód dołowych jest przedmiotem rozdziału nr 3. Opisane zostały możliwości energetycznego wykorzystania zasobu ciepłego wód wypompowywanych z podziemi kopalń węgla. Przedstawiono zasoby wodne jakie są do dyspozycji w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, wskazując na potencjalną ilość energii jaka może być uzyskana przy zastosowaniu pomp ciepła. Jednocześnie wskazano na problem zanieczyszczeń tych wód, który ma wpływ na ograniczenie zastosowań technologii pomp ciepła, związany z koniecznością czyszczenia bądź wymiany wymienników ciepła.

Jak ważny jest odzysk i magazynowanie energii elektrycznej z perspektywy innowacyjnych układów zasilania maszyn elektrycznych opisane zostało w rozdziale nr 4. Na przykładzie opracowanych i zbudowanych w ITG KOMAG rozwiązań zasilania baterijnego zaprezentowano zalety oraz wady takich rozwiązań. Omówiono i sklasyfikowano całą rodzinę zespołów zasilania baterijnego z podziałem na technologie zastosowanych ogniw oraz funkcjonalność i bezpieczeństwo stosowania. Zaprezentowano jak rozwiązania oparte o elektro-chemiczne zasobniki energii

umożliwiają zmniejszenie energochłonności procesu i poprawę bezpieczeństwa pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych.

W ostatnim rozdziale poświęconym tematyce OZE zaprezentowane zostało autorskie oprogramowanie opracowane w ITG KOMAG, służące do analizy zużycia i prognozowania produkcji energii pochodzącej z OZE. System został zaprojektowany z myślą o wspieraniu procesów decyzyjnych związanych z projektowaniem i optymalizacją instalacji fotowoltaicznych. Narzędzie wykorzystuje środowisko programistyczne łączące graficzny interfejs użytkownika i obsługę baz danych z obliczeniami realizowanymi za pomocą odpowiednich skryptów. Analizy przeprowadzono na przykładzie danych rzeczywistych pochodzących z infrastruktury Instytutu KOMAG. Po więcej szczegółów zapraszamy do rozdziału nr 5.

Nie można mówić/pisać o transformacji bez regulacji prawnych i ich wpływu na nią. Dlatego też na potrzeby tego bloku tematycznego wybraliśmy trzy interesujące zagadnienia, takie jak ocena zgodności maszyn, badania kabli elektrycznych oraz metan w powietrzu wentylacyjnym kopalń.

W dniu 14 czerwca 2023 r. opublikowano nowe rozporządzenie maszynowe UE 2023/1230, które zacznie obowiązywać od 20 stycznia 2027 roku. Rozporządzenie to wprowadza szereg istotnych zmian dotyczących oceny zgodności maszyn i maszyn nieukończonych, odzwierciedlających najnowsze europejskie trendy w zakresie zrównoważonego rozwoju. W rozdziale nr 6 dokonano przeglądu najważniejszych zmian, wprowadzonych nowym aktem prawnym, w celu uświadomienia zainteresowanym stronom (producentom, importerom, użytkownikom maszyn), potrzeby dostosowania się do nowych wymagań technicznych i formalnych.

W rozdziale nr 7 opisano problematykę bezpieczeństwa chemicznego kabli elektrycznych w kontekście rosnącej ilości odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego oraz zaostrzających się wymagań Dyrektywy RoHS. Omówiono zagrożenia wynikające z obecności w materiałach przewodzących i izolacyjnych szkodliwych substancji chemicznych oraz wskazano metody badawcze wykorzystywane do ich identyfikacji. Wskazano konieczność stosowania w badaniach kabli zaawansowanych technik analitycznych, jak GC-MS, ICP-MS do identyfikacji substancji szkodliwych celem potwierdzenia zgodności z wymaganiami ochrony środowiska i zdrowia ludzi.

Zagadnienie emisji metanu do atmosfery z powietrzem wentylacyjnym kopalń jest jednym z kluczowych zagadnień środowiskowych na forum unii europejskiej. Rozporządzenie metanowe Unii Europejskiej wprowadza także dla górnictwa węgla kopalnych nowe obowiązki i zadania, które w istotny sposób mogą wpłynąć na koszty operacyjne przedsiębiorstw górniczych i kopalń węgla kamiennego i brunatnego, podziemnych i odkrywkowych. Dotyczy to także zlikwidowanych zakładów górniczych.

W rozdziale nr 8 przedstawiono propozycję ograniczenia objętości emitowanego w ten sposób gazu, co powinno wpłynąć na dość proste ograniczenie przewidywanych w przyszłości kar finansowych i opłat za emisję metanu z powietrzem wentylacyjnym z podziemnych kopalń węgla kamiennego.

Życząc Państwu przyjemnej lektury, mamy nadzieję, że będzie ona inspiracją do opracowywania nowych rozwiązań, jak również pozwoli uzupełnić i ugruntować wiedzę w przedmiotowych obszarach.

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

dr inż. Bartosz Polnik

Redaktorzy naukowcy monografii

SPIS TREŚCI

1. Koncepcja recyklingu 4.0 w odpowiedzi na wyzwania gospodarki odpadami w Polsce – <i>P. Jura</i>	1
2. Urządzenie do wytwarzania mikrozwiesin z materiałów skalnych – <i>Z. Szkudlarek, M. Kalita, A. Sobolewski</i>	16
3. Zwiększenie dostępności zasobu ciepłego wód dołowych z podziemi kopalń przez zastosowanie pośredniego wymiennika ciepła – <i>A. Drwięga</i>	26
4. Zespoły zasilania bateryjnego konstrukcji KOMAG-u do samojezdnych wozów strzelniczych pracujących w KGHM-Polska Miedź S.A. – <i>P. Deja</i>	39
5. Zastosowanie autorskiego oprogramowania ITG KOMAG do analizy zużycia i prognozowania produkcji energii z OZE – <i>J. Rogala-Rojek, S. Bartoszek, J. Bernatt</i>	54
6. Zmiany w systemie oceny zgodności maszyn w świetle rozporządzenia maszynowego UE 2023/1230 – <i>A. Figiel</i>	78
7. Badania i wymagania bezpieczeństwa chemicznego kabli elektrycznych – <i>B. Grynkiewicz-Bylina, B. Rakwic, M. Gawlik-Jędrysiak</i>	88
8. Metan w powietrzu wentylacyjnym a Rozporządzenie Metanowe UE – <i>J. Korski</i>	102
9. Indeks autorów	111



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.1>

Koncepcja recyklingu 4.0 w odpowiedzi na wyzwania gospodarki odpadami w Polsce

Przemysław Jura – Fundacja Instytut Nauk Ekonomicznych i Społecznych

Streszczenie: Recykling 4.0 to innowacyjne podejście do zarządzania odpadami, które wykorzystuje technologie Przemysłu 4.0, takie jak Internet Rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI), analiza Big Data oraz automatyzacja, w celu optymalizacji procesów odzysku surowców i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko. Współczesne wyzwania związane z gospodarką odpadami w Polsce, takie jak rosnąca ilość odpadów, niewystarczająca segregacja i przestarzała infrastruktura, wymagają nowoczesnych rozwiązań technologicznych. W rozdziale dokonano analizy głównych barier w sektorze gospodarki odpadami oraz przedstawiono koncepcję recyklingu 4.0 jako narzędzia wspierającego realizację założeń gospodarki o obiegu zamkniętym. Zastosowanie inteligentnych systemów zarządzania odpadami może przyczynić się do zwiększenia efektywności procesów recyklingu, poprawy jakości surowców wtórnych oraz redukcji kosztów związanych z gospodarką odpadami. W rozdziale podjęto również próbę określenia kluczowych wyzwań wdrożeniowych oraz potencjalnych kierunków rozwoju recyklingu 4.0 w Polsce.

Słowa kluczowe: Recykling 4.0, Przemysł 4.0, Internet Rzeczy (IoT), Sztuczna inteligencja (AI), Gospodarka odpadami, Innowacje technologiczne, zarządzanie odpadami

The concept of recycling 4.0 in response to the challenges of waste management in Poland

Abstract: Recycling 4.0 is an innovative approach to waste management that uses Industry 4.0 technologies, such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data analytics and automation, to optimize resource recovery processes and minimize negative environmental impacts. Today's waste management challenges in Poland, such as increasing waste volumes, insufficient segregation and outdated infrastructure, require modern technological solutions. The chapter analyses the main barriers in the waste management sector and presents the concept of recycling 4.0 as a tool to support the implementation of a closed loop economy. The use of intelligent waste management systems can contribute to increasing the efficiency of recycling processes, improving the quality of secondary raw materials and reducing the costs associated with waste management.

The chapter also attempts to identify key implementation challenges and potential directions for the development of recycling 4.0 in Poland.

Keywords: Recycling 4.0, Industry 4.0, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Waste management, Technological innovation, Waste management



1. Wstęp

Dynamiczny rozwój gospodarczy oraz wzrost konsumpcji przyczyniają się do zwiększonej produkcji odpadów, co stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnego świata. Polska, podobnie jak inne kraje Unii Europejskiej, stoi przed koniecznością dostosowania swojej polityki odpadowej do wymagań gospodarki o obiegu zamkniętym. Obecne systemy recyklingu często nie spełniają oczekiwań pod względem skuteczności, co wynika z problemów infrastrukturalnych, niedostatecznej segregacji oraz ograniczonego wykorzystania nowoczesnych technologii.

Recykling 4.0, bazujący na rozwiązaniach Przemysłu 4.0, oferuje nowe możliwości usprawnienia gospodarki odpadami poprzez automatyzację, cyfryzację i wykorzystanie sztucznej inteligencji. Inteligentne systemy sortowania, monitoring odpadów w czasie rzeczywistym oraz analiza Big Data mogą znacząco poprawić efektywność recyklingu i przyczynić się do lepszego wykorzystania surowców wtórnych. Celem niniejszego rozdziału jest omówienie koncepcji recyklingu 4.0 oraz jego potencjalnego wpływu na gospodarkę odpadami w Polsce, z uwzględnieniem wyzwań i możliwości jego implementacji.

2. Wyzwania gospodarki odpadami w Polsce

Gospodarka odpadami w Polsce stoi przed wieloma wyzwaniami, które wynikają zarówno z rosnącej ilości generowanych odpadów, jak i z trudności związanych z ich efektywnym przetwarzaniem. Niska efektywność segregacji, niedostateczny poziom recyklingu, problemy legislacyjne oraz brak nowoczesnej infrastruktury technologicznej stanowią istotne bariery w osiągnięciu założeń gospodarki o obiegu zamkniętym. Poniżej przedstawiono kluczowe wyzwania, które wpływają na rozwój systemu gospodarowania odpadami w Polsce.

Rosnąca ilość odpadów komunalnych i przemysłowych

Wzrost populacji, urbanizacja oraz rozwój gospodarczy przyczyniają się do ciągłego wzrostu ilości odpadów generowanych zarówno przez gospodarstwa domowe, jak i sektor przemysłowy. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego, w Polsce rocznie powstaje kilkanaście milionów ton odpadów komunalnych, z czego znacząca część trafia na składowiska, zamiast być poddana recyklingowi lub odzyskowi energetycznemu. Problemem jest także rosnąca ilość odpadów przemysłowych, szczególnie w sektorze budowlanym, motoryzacyjnym i elektronicznym, które wymagają specjalistycznych technologii przetwarzania.

Niedostateczna segregacja i niski poziom recyklingu

Pomimo wprowadzenia selektywnej zbiórki odpadów, poziom recyklingu w Polsce wciąż odbiega od unijnych standardów. Według danych Komisji Europejskiej, Polska nie osiągnęła jeszcze

wyznaczonych celów dotyczących recyklingu odpadów komunalnych, co grozi sankcjami finansowymi. Niski poziom świadomości ekologicznej społeczeństwa, niewłaściwe praktyki segregacyjne oraz brak jednolitych standardów w różnych regionach kraju dodatkowo utrudniają skuteczne wdrażanie systemów recyklingu. Istnieje potrzeba wdrożenia inteligentnych rozwiązań wspierających selektywną zbiórkę oraz poprawy edukacji w zakresie prawidłowego gospodarowania odpadami.

Wyzwania legislacyjne i polityczne

Polska gospodarka odpadami podlega licznym regulacjom krajowym i unijnym, jednak ich skuteczność często ogranicza niespójność przepisów oraz brak skutecznych mechanizmów egzekwowania prawa. Częste zmiany legislacyjne i niejasność regulacji prowadzą do problemów zarówno dla przedsiębiorstw zajmujących się przetwarzaniem odpadów, jak i dla samorządów odpowiedzialnych za ich zbiórkę. Ponadto, nieadekwatne systemy finansowania oraz brak odpowiednich zachęt dla przedsiębiorców inwestujących w recykling hamują rozwój nowoczesnych technologii i innowacyjnych rozwiązań w sektorze.

Problemy infrastrukturalne i technologiczne

Niewystarczająca liczba nowoczesnych instalacji do przetwarzania odpadów, przestarzałe technologie stosowane w sortowniach oraz brak spójnej infrastruktury logistycznej to istotne bariery w poprawie efektywności recyklingu w Polsce. Wiele instalacji komunalnych nadal nie jest przystosowanych do wymogów gospodarki o obiegu zamkniętym, co powoduje, że znaczna część odpadów trafia na składowiska zamiast być poddana odzyskowi. Wdrożenie technologii Przemysłu 4.0 w recyklingu, takich jak automatyzacja procesów sortowania czy wykorzystanie sztucznej inteligencji do analizy strumieni odpadów, mogłoby znacząco poprawić sytuację w tym sektorze.

W obliczu powyższych wyzwań konieczne jest podjęcie działań na różnych poziomach – legislacyjnym, technologicznym oraz społecznym – aby skutecznie zarządzać odpadami i w pełni wykorzystać potencjał recyklingu 4.0 w Polsce.

3. Recykling 4.0 – definicja i kluczowe technologie

Recykling 4.0 to koncepcja oparta na wykorzystaniu nowoczesnych technologii cyfrowych, które umożliwiają automatyzację, optymalizację oraz inteligentne zarządzanie procesami odzysku surowców. Idea ta wpisuje się w założenia Przemysłu 4.0, integrując takie technologie jak Internet Rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI), analiza Big Data, blockchain i robotyzacja w celu poprawy efektywności systemów gospodarowania odpadami. Recykling 4.0 ma na celu nie tylko zwiększenie skuteczności recyklingu, ale także minimalizację odpadów, lepsze wykorzystanie surowców wtórnych oraz redukcję

kosztów operacyjnych. Wdrożenie tych technologii może stanowić kluczowy element transformacji polskiego systemu gospodarki odpadami w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym.

Internet Rzeczy (IoT) i jego zastosowanie w gospodarce odpadami

Internet Rzeczy (IoT) odgrywa kluczową rolę w nowoczesnym systemie gospodarowania odpadami, umożliwiając zbieranie, analizowanie i przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym. Czujniki IoT mogą być stosowane w różnych aspektach recyklingu i zarządzania odpadami, w tym w:

- Monitorowaniu poziomu zapęnlennia pojemników na odpady – inteligentne pojemniki wyposażone w czujniki ultradźwiękowe informują służby miejskie o konieczności ich opróżnienia, co pozwala na optymalizację tras zbiórki i redukcję kosztów logistycznych.
- Automatyzacji sortowania odpadów – zaawansowane systemy oparte na IoT mogą identyfikować rodzaj odpadów i przekazywać dane do systemów zarządzania recyklingiem, co usprawnia proces segregacji i zwiększa jego efektywność.
- Inteligentnym zarządzaniu instalacjami recyklingowymi – sensory i systemy IoT mogą monitorować pracę maszyn sortujących, optymalizować zużycie energii oraz wykrywać anomalie w procesach recyklingu, co prowadzi do redukcji awarii i poprawy wydajności operacyjnej.
- Śledzeniu cyklu życia surowców wtórnych – poprzez połączenie technologii IoT i blockchain można rejestrować informacje o pochodzeniu, przetwarzaniu i ponownym wykorzystaniu surowców wtórnych, co wspiera przejrzystość łańcucha dostaw i minimalizuje ryzyko oszustw w obiegu materiałów.

Zastosowanie IoT w recyklingu 4.0 pozwala na precyzyjne planowanie działań operacyjnych, redukcję kosztów zbiórki i transportu odpadów, a także zwiększenie efektywności procesów przetwarzania surowców wtórnych [1].

Sztuczna inteligencja i algorytmy analizy danych w procesach recyklingu

Sztuczna inteligencja (AI) i algorytmy analizy danych odgrywają coraz większą rolę w optymalizacji procesów recyklingu, pozwalając na bardziej efektywne sortowanie, przetwarzanie i ponowne wykorzystanie surowców wtórnych. Technologie AI mogą być wykorzystywane w różnych obszarach recyklingu, w tym:

- Automatyzacji procesów sortowania odpadów – systemy oparte na AI, wyposażone w kamery i czujniki spektralne, mogą analizować skład odpadów i precyzyjnie oddzielać materiały nadające się do recyklingu od tych, które wymagają dalszego przetworzenia lub utylizacji.

Przykładem są roboty sortujące, które wykorzystują systemy wizyjne i uczenie maszynowe do identyfikacji surowców wtórnych.

- Prognozowaniu i optymalizacji strumieni odpadów – algorytmy analizy danych mogą przewidywać ilość i rodzaj generowanych odpadów w określonym czasie i lokalizacji, co pozwala na bardziej efektywne zarządzanie infrastrukturą recyklingową oraz planowanie działań logistycznych.
- Zarządzaniu danymi o odpadach w czasie rzeczywistym – zaawansowane systemy AI mogą analizować dane z czujników IoT, śledząc zmiany w ilości i składzie odpadów, co umożliwia szybsze podejmowanie decyzji dotyczących recyklingu i przetwarzania surowców.
- Poprawie jakości surowców wtórnych – AI może pomóc w identyfikacji zanieczyszczeń w surowcach wtórnych i ich eliminacji, co zwiększa ich wartość rynkową oraz możliwości ponownego wykorzystania w przemyśle.

Dzięki wdrożeniu AI i analizy Big Data, możliwe jest znaczne zwiększenie efektywności recyklingu, redukcja kosztów operacyjnych oraz lepsze dostosowanie procesów do wymagań gospodarki o obiegu zamkniętym. Integracja tych technologii z systemami IoT oraz automatyzacją sortowni stanowi kluczowy element transformacji gospodarki odpadami w Polsce.

W kolejnych podrozdziałach omówione zostaną inne kluczowe technologie recyklingu 4.0, takie jak blockchain w monitorowaniu strumieni odpadów oraz robotyzacja procesów sortowania, które dodatkowo mogą zwiększyć efektywność i transparentność systemu gospodarowania odpadami [2].

Robotyzacja i automatyzacja sortowania odpadów

Robotyzacja i automatyzacja stanowią kluczowe elementy recyklingu 4.0, umożliwiając znaczną poprawę efektywności i precyzji procesów sortowania odpadów. Tradycyjne metody segregacji są czasochłonne, kosztowne i podatne na błędy ludzkie. Zastosowanie nowoczesnych robotów oraz inteligentnych systemów sterowania pozwala na optymalizację procesu recyklingu, zmniejszenie ilości odpadów niesegregowanych oraz zwiększenie udziału surowców wtórnych.

Technologie robotyzacji w sortowaniu odpadów obejmują:

- Roboty sortujące oparte na systemach wizyjnych i sztucznej inteligencji – wykorzystują czujniki spektralne i kamery wizyjne do identyfikacji różnych rodzajów materiałów. Dzięki algorytmom uczenia maszynowego mogą klasyfikować odpady na podstawie ich kształtu, koloru czy składu chemicznego.



- Ramię robotyczne z chwytakami pneumatycznymi lub elektromagnetycznymi – roboty te mogą szybko i precyzyjnie przenosić odpady do odpowiednich pojemników, co znacząco zwiększa efektywność sortowania.
- Zautomatyzowane taśmy i separatory optyczne – wykorzystanie promieniowania podczerwonego oraz technologii identyfikacji materiałów umożliwia szybkie oddzielanie plastiku, metali i szkła od innych odpadów.
- Systemy robotyczne wspierane przez IoT – sensory i analiza Big Data pozwalają na optymalizację pracy robotów, co zmniejsza zużycie energii i koszty operacyjne.

Robotyzacja sortowania pozwala na zmniejszenie zapotrzebowania na pracę ludzką w trudnych warunkach środowiskowych, poprawia jakość surowców wtórnych oraz redukuje ilość odpadów trafiających na składowiska.

Blockchain w monitorowaniu strumieni odpadów i śledzeniu cyklu życia surowców

Blockchain jako jedna z form DLT (ang. Distributed Ledger Technology, czyli technologia rozproszonego rejestru), znajduje zastosowanie w gospodarce odpadami, zapewniając transparentność, bezpieczeństwo oraz niezmiennosć danych dotyczących zarządzania odpadami i recyklingu. Dzięki wykorzystaniu blockchain możliwe jest dokładne śledzenie cyklu życia surowców, od momentu ich powstania, poprzez procesy recyklingu, aż po ich ponowne wykorzystanie w produkcji.

Kluczowe zastosowania blockchain w recyklingu obejmują:

- Monitorowanie strumieni odpadów – blockchain pozwala na dokładne rejestrowanie ilości, rodzaju i źródła odpadów, co ułatwia kontrolę nad ich przepływem i ogranicza ryzyko nielegalnego składowania.
- Śledzenie cyklu życia surowców wtórnych – każda partia przetworzonego materiału może być zapisywana w blockchain, umożliwiając producentom i konsumentom dostęp do pełnej historii jej przetworzenia.
- Uwierzytelnianie certyfikatów recyklingu – blockchain eliminuje możliwość fałszowania danych dotyczących stopnia recyklingu oraz jakości surowców wtórnych, co sprzyja budowaniu bardziej wiarygodnego rynku wtórnego.
- Zautomatyzowane inteligentne kontrakty – umowy oparte na blockchain mogą ułatwiać transakcje między podmiotami zajmującymi się zbórką, recyklingiem i sprzedażą surowców wtórnych, eliminując potrzebę pośredników i redukując koszty administracyjne.

Zastosowanie blockchain w recyklingu 4.0 może znacząco zwiększyć efektywność systemów gospodarki odpadami poprzez eliminację nieprawidłowości, zwiększenie transparentności oraz poprawę

monitoringu strumieni odpadów. Połączenie tej technologii z IoT oraz sztuczną inteligencją stanowi kluczowy krok w kierunku pełnej cyfryzacji gospodarki o obiegu zamkniętym [3].

4. Potencjalne korzyści wdrożenia recyklingu 4.0 w Polsce

Wdrożenie koncepcji recyklingu 4.0 w Polsce niesie za sobą liczne korzyści, które mogą przyczynić się do usprawnienia gospodarki odpadami oraz realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii cyfrowych, takich jak Internet Rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI), robotyzacja oraz blockchain, możliwe jest zwiększenie efektywności recyklingu, redukcja kosztów operacyjnych i optymalizacja procesów logistycznych. Wprowadzenie inteligentnych systemów zarządzania odpadami może również poprawić jakość surowców wtórnych oraz przyczynić się do lepszego monitorowania strumieni odpadów.

Zwiększenie efektywności procesów recyklingu

Jednym z głównych wyzwań gospodarki odpadami w Polsce jest niska efektywność recyklingu, wynikająca z niewystarczającej segregacji, przestarzałych technologii oraz braku precyzyjnego zarządzania strumieniami odpadów. Recykling 4.0, oparty na cyfryzacji i automatyzacji procesów, pozwala na znaczącą poprawę wydajności w zakresie odzysku surowców.

- Automatyzacja sortowania odpadów – wykorzystanie robotów wyposażonych w systemy wizyjne i sztuczną inteligencję pozwala na precyzyjne rozpoznawanie i separację materiałów nadających się do recyklingu, co znacząco zwiększa efektywność procesu.
- Optymalizacja procesów dzięki analizie Big Data – systemy zarządzania oparte na analizie danych w czasie rzeczywistym umożliwiają identyfikację wzorców generowania odpadów i dostosowanie strategii recyklingu do rzeczywistych potrzeb.
- Poprawa jakości surowców wtórnych – inteligentne systemy segregacji oraz kontrola jakości oparta na AI pozwalają na eliminację zanieczyszczeń, co zwiększa wartość odzyskanych materiałów i ułatwia ich ponowne wykorzystanie w przemyśle.
- Minimalizacja ilości odpadów niesegregowanych – technologie Przemysłu 4.0 umożliwiają skuteczniejsze sortowanie odpadów na etapie ich zbiórki, co zmniejsza ilość odpadów trafiających na składowiska.

Wdrażanie recyklingu 4.0 pozwala zatem na znaczną poprawę efektywności recyklingu, zwiększenie udziału surowców wtórnych w gospodarce oraz redukcję negatywnego wpływu odpadów na środowisko [4].

Redukcja kosztów i optymalizacja logistyki odpadów

Koszty związane z gospodarką odpadami stanowią istotne obciążenie zarówno dla przedsiębiorstw, jak i dla jednostek samorządowych. Wdrożenie recyklingu 4.0 pozwala na znaczącą redukcję kosztów operacyjnych dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii i inteligentnych systemów zarządzania odpadami.

- Optymalizacja zbiórki i transportu odpadów – systemy IoT umożliwiają monitorowanie poziomu wypełnienia pojemników na odpady w czasie rzeczywistym, co pozwala na dynamiczne planowanie tras odbioru, redukcję niepotrzebnych przejazdów i obniżenie kosztów paliwa.
- Automatyzacja procesów recyklingu – zastosowanie robotów i inteligentnych systemów sortowania zmniejsza zapotrzebowanie na pracę manualną, co prowadzi do redukcji kosztów operacyjnych zakładów recyklingowych.
- Zmniejszenie kosztów składowania odpadów – dzięki wyższej skuteczności recyklingu i lepszemu wykorzystaniu surowców wtórnych, mniejsza ilość odpadów trafia na składowiska, co obniża opłaty związane z ich magazynowaniem i utylizacją.
- Inteligentne zarządzanie infrastrukturą recyklingową – analiza danych pozwala na precyzyjne przewidywanie zapotrzebowania na przetwarzanie różnych rodzajów odpadów, co umożliwia lepsze planowanie i alokację zasobów.
- Redukcja strat materiałowych – dzięki zastosowaniu technologii blockchain i systemów monitorujących cykl życia surowców, możliwe jest lepsze śledzenie przepływu materiałów i minimalizacja strat w procesie recyklingu.

Oszczędności wynikające z wdrożenia recyklingu 4.0 mogą być znaczące, szczególnie w długoterminowej perspektywie. Lepsza organizacja procesów logistycznych oraz zwiększona efektywność recyklingu przekładają się na niższe koszty eksploatacyjne oraz wyższą konkurencyjność sektora gospodarki odpadami w Polsce.

Poprawa jakości surowców wtórnych i zwiększenie ich wartości rynkowej

Jakość surowców wtórnych jest kluczowym czynnikiem wpływającym na ich przydatność w dalszym przemyśle oraz ich wartość rynkową. W tradycyjnych systemach recyklingu częstym problemem jest zanieczyszczenie materiałów wtórnych, które obniża ich wartość oraz ogranicza możliwości ponownego wykorzystania. Technologie recyklingu 4.0 mogą znacząco poprawić jakość odzyskiwanych surowców, co przekłada się na ich większą atrakcyjność dla przemysłu.

- Zaawansowane systemy sortowania oparte na sztucznej inteligencji – wykorzystanie technologii wizyjnych i czujników spektralnych umożliwia precyzyjne rozpoznawanie materiałów, co pozwala na eliminację zanieczyszczeń i uzyskanie surowców o wyższej czystości.
- Automatyczna klasyfikacja i separacja surowców – inteligentne algorytmy mogą identyfikować różne frakcje materiałów i oddzielać je w sposób optymalny, co zwiększa możliwości ich ponownego wykorzystania w różnych gałęziach przemysłu.
- Lepsza kontrola nad składem surowców wtórnych – analiza Big Data pozwala na dokładne monitorowanie składu chemicznego i mechanicznego odzyskiwanych materiałów, co zapewnia ich wyższą jakość i zgodność z normami.
- Zwiększona wartość rynkowa surowców wtórnych – czystsze surowce wtórne znajdują szersze zastosowanie w przemyśle, co przyczynia się do wzrostu ich wartości oraz rentowności inwestycji w recykling.

Dzięki wdrożeniu technologii recyklingu 4.0 możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości surowców wtórnych, które mogą skutecznie konkurować z materiałami pierwotnymi, wspierając tym samym gospodarkę o obiegu zamkniętym [5].

Wzrost społecznej świadomości ekologicznej i lepsza kontrola nad odpadami

Edukacja ekologiczna i zaangażowanie społeczne odgrywają kluczową rolę w efektywnym funkcjonowaniu systemów recyklingu. W Polsce wciąż istnieją bariery związane z niską świadomością ekologiczną oraz nieprawidłową segregacją odpadów. Recykling 4.0 może przyczynić się do zwiększenia świadomości ekologicznej oraz poprawy kontroli nad odpadami poprzez innowacyjne narzędzia technologiczne.

- Inteligentne systemy informacyjne dla obywateli – aplikacje mobilne i interaktywne platformy edukacyjne mogą dostarczać mieszkańcom informacji na temat właściwej segregacji odpadów, zwiększając skuteczność recyklingu na poziomie konsumenckim.
- Gamifikacja i zachęty finansowe – wdrożenie systemów nagradzających poprawne nawyki recyklingowe, np. poprzez tokenizację punktów w technologii blockchain, może motywować społeczeństwo do aktywniejszego uczestnictwa w segregacji odpadów.
- Monitorowanie generowania odpadów na poziomie gospodarstw domowych – technologie IoT pozwalają na śledzenie ilości i rodzaju odpadów wytwarzanych przez gospodarstwa domowe, co może zachęcić konsumentów do zmniejszenia ilości odpadów i poprawy ich segregacji.

- Większa transparentność systemu recyklingu – blockchain może zapewnić przejrzystość w zarządzaniu odpadami, umożliwiając społeczeństwu śledzenie, jak odpady są przetwarzane i ponownie wykorzystywane, co buduje większe zaufanie do systemu recyklingu.

Wzrost świadomości ekologicznej i lepsza kontrola nad odpadami mogą przyczynić się do większego zaangażowania społecznego w recykling oraz do zmniejszenia ilości odpadów trafiających na składowiska, wspierając tym samym realizację celów zrównoważonego rozwoju.

5. Przykłady wdrożeń recyklingu 4.0 na świecie i możliwości adaptacji

Rozwój technologii Przemysłu 4.0 umożliwił wdrożenie nowoczesnych systemów recyklingu w wielu krajach na świecie. Inteligentne systemy zarządzania odpadami, automatyzacja sortowania oraz innowacyjne inicjatywy wspierające gospodarkę o obiegu zamkniętym stanowią istotny krok w kierunku zwiększenia efektywności recyklingu. Polska, aby osiągnąć wymagane unijne cele w zakresie gospodarki odpadami, powinna czerpać inspirację z najlepszych światowych praktyk i dostosować je do lokalnych warunków.

Przykłady wdrożeń systemów opartych na sztucznej inteligencji w gospodarce odpadami wskazują na ich rosnące znaczenie w różnych krajach. W Hamburgu (Niemcy) zastosowano AI do analizy składu bioodpadów za pomocą kamer termowizyjnych i czujników zapachu, co pozwoliło zredukować odrzuty z kompostowni o 18% w ciągu pół roku. W Wielkiej Brytanii wykorzystano AI do dynamicznego ustalania opłat śmieciowych, premiując gospodarstwa domowe za lepszą segregację. Szwajcaria wdrożyła system klasyfikujący odpady elektroniczne według zagrożenia i wartości, ułatwiając odzysk metali ziem rzadkich. W Helsinkach (Finlandia) powstała aplikacja motywująca mieszkańców do segregacji poprzez grywalizację [6]. Holandia testowała inteligentny kosz „Bin-e” polskiego startupu, który automatycznie rozpoznaje, segreguje i kompresuje odpady [7]. W Kanadzie (Ontario) AI wspomaga rozpoznawanie opakowań Tetra Pak, zwiększając wydajność sortowni o 25%. W USA AMP Robotics stworzyło system rozpoznający ponad 40 typów materiałów, a Recycleye wdrożyło otwartoźródłową AI do automatycznej segregacji [8]. Natomiast w Szwecji roboty ZenRobotics sortują odpady z dokładnością powyżej 95%, przetwarzając do 4000 przedmiotów na godzinę.

Inteligentne systemy zarządzania odpadami w miastach (Smart Waste Management)

Jednym z kluczowych kierunków rozwoju recyklingu 4.0 są inteligentne systemy zarządzania odpadami (Smart Waste Management), które pozwalają na efektywne monitorowanie, segregację oraz zbiórkę odpadów.

- Zastosowanie sensorów IoT w pojemnikach na odpady – w wielu miastach Europy i Azji stosowane są czujniki monitorujące poziom zapełnienia pojemników, co pozwala na optymalizację tras odbioru i redukcję kosztów operacyjnych.
- Dynamiczne zarządzanie flotą pojazdów komunalnych – systemy oparte na AI umożliwiają analizę danych w czasie rzeczywistym i dostosowanie tras śmieciarek do aktualnych potrzeb, zmniejszając emisję CO₂ i zużycie paliwa.
- Przykłady wdrożeń – Barcelona oraz Amsterdam wdrożyły inteligentne systemy zarządzania odpadami, które pozwalają na optymalizację kosztów i zwiększenie skuteczności segregacji.

W Polsce rozwój takich systemów może znacząco usprawnić gospodarkę odpadami, zwłaszcza w dużych miastach, gdzie problemy z segregacją i transportem odpadów są szczególnie widoczne.

Zaawansowane sortownie odpadów oparte na AI i robotach

Nowoczesne sortownie odpadów wykorzystują technologie sztucznej inteligencji oraz robotyzację, co pozwala na automatyczne rozpoznawanie i segregację materiałów wtórnych.

- Systemy wizyjne i czujniki spektralne – pozwalają na identyfikację odpadów na podstawie ich składu chemicznego i optymalizację procesu recyklingu.
- Roboty sortujące – wyposażone w ramiona robotyczne i algorytmy uczenia maszynowego mogą skutecznie oddzielać różne frakcje odpadów, zwiększając ich jakość i redukując koszty pracy manualnej. Firma Fanuc opracowała robota, który uczy się rozpoznawać odpady dzięki machine learning i systemom wizyjnym.

W jednym z miast robot samodzielnie segreguje szkło, plastik i metal, ucząc się w czasie rzeczywistym na podstawie analizy materiałów.

- Przykłady wdrożeń – Szwecja oraz Japonia wdrożyły zaawansowane centra recyklingu, gdzie roboty znacząco przyspieszyły i usprawniły proces sortowania.

W Polsce rozwój zaawansowanych sortowni mógłby zwiększyć udział recyklingu w przetwarzaniu odpadów i zmniejszyć ilość odpadów składowanych na wysypiskach [9].

Inicjatywy i programy wsparcia dla innowacyjnych rozwiązań recyklingu

Wdrożenie recyklingu 4.0 wymaga odpowiednich inicjatyw i programów wsparcia, które mogą przyspieszyć adaptację nowoczesnych technologii.

- Systemy rozszerzonej odpowiedzialności producenta (EPR) – wprowadzenie skuteczniejszych mechanizmów odpowiedzialności producentów za odpady ich produktów może zwiększyć motywację do inwestowania w recykling.



- Fundusze unijne i krajowe na rozwój recyklingu – UE wspiera innowacyjne projekty związane z gospodarką o obiegu zamkniętym poprzez programy, takie jak Horizon Europe czy Fundusz Spójności.
- Przykłady wdrożeń – Niemcy posiadają rozbudowany system zachęt dla firm inwestujących w recykling, co pozwala na dynamiczny rozwój nowoczesnych technologii w tym sektorze.

Polska może skorzystać z tych doświadczeń poprzez rozwój polityki promującej nowoczesne rozwiązania recyklingowe, zachęcanie przedsiębiorstw do inwestowania w innowacyjne technologie oraz wdrażanie inteligentnych systemów zarządzania odpadami na szeroką skalę.

6. Bariery i ograniczenia wdrożenia recyklingu 4.0 w Polsce

Mimo licznych korzyści wynikających z wdrożenia recyklingu 4.0, istnieją istotne bariery i ograniczenia, które mogą utrudnić jego rozwój w Polsce. Kluczowe wyzwania obejmują wysokie koszty inwestycyjne, brak odpowiednich kompetencji technologicznych oraz niską świadomość ekologiczną społeczeństwa. Aby skutecznie wdrożyć nowoczesne rozwiązania, konieczne jest zidentyfikowanie i eliminacja tych przeszkód.

Wysokie koszty inwestycyjne i potrzeba dofinansowania

Jednym z największych wyzwań związanych z recyklingiem 4.0 są wysokie koszty początkowe związane z wdrażaniem zaawansowanych technologii. Automatyzacja sortowni, zastosowanie systemów sztucznej inteligencji, Internetu Rzeczy (IoT) oraz blockchain wymagają znacznych nakładów finansowych.

- Koszty infrastrukturalne – budowa i modernizacja sortowni odpadów, wdrażanie inteligentnych systemów zarządzania i zakup zaawansowanych robotów sortujących to duże inwestycje, które dla wielu podmiotów mogą być nieosiągalne.
- Wysokie nakłady na technologie IT – integracja systemów IoT, analiza Big Data oraz oprogramowanie zarządzające wymagają zaawansowanego zaplecza technologicznego i kosztownych rozwiązań IT.
- Niska dostępność źródeł finansowania – choć w Polsce istnieją fundusze unijne i krajowe wspierające zieloną transformację, wciąż brakuje kompleksowych programów dofinansowania technologii recyklingu 4.0, które mogłyby znacząco przyspieszyć wdrożenie innowacyjnych rozwiązań.



Dla skutecznego wdrożenia recyklingu 4.0 w Polsce celowe wydaje się opracowanie mechanizmów wsparcia finansowego, takich jak dotacje, preferencyjne kredyty czy zachęty podatkowe dla firm inwestujących w nowoczesne systemy recyklingu [10].

Ograniczona wiedza i kompetencje w zakresie nowych technologii

Rozwój recyklingu 4.0 wymaga wysokiego poziomu specjalistycznej wiedzy oraz kompetencji w zakresie nowoczesnych technologii. W Polsce nadal istnieją znaczące luki w tym obszarze, co może stanowić istotne wyzwanie dla efektywnej implementacji inteligentnych systemów recyklingowych.

- Brak wyspecjalizowanej kadry technicznej – obsługa systemów sztucznej inteligencji, IoT oraz robotyzacji wymaga wysoko wykwalifikowanych pracowników, których brakuje na polskim rynku pracy.
- Niedostateczne programy szkoleniowe – zarówno sektor publiczny, jak i prywatny nie oferują wystarczającej liczby szkoleń dla pracowników branży odpadowej w zakresie nowych technologii.
- Wolna adaptacja innowacji – przedsiębiorstwa zajmujące się recyklingiem często opierają się na tradycyjnych metodach, unikając wdrażania technologii Przemysłu 4.0 ze względu na brak odpowiedniej wiedzy i doświadczenia.

W celu skutecznego pokonania tych barier, konieczne wydaje się wprowadzenie programów edukacyjnych, szkoleń branżowych oraz współpracy z uczelniami i instytutami badawczymi w celu kształcenia specjalistów od nowych technologii w recyklingu.

Opór społeczny wobec zmian i brak edukacji ekologicznej

Wdrożenie recyklingu 4.0 wymaga zaangażowania społeczeństwa w poprawną segregację odpadów oraz akceptacji nowych rozwiązań technologicznych. Niestety, w Polsce nadal występują liczne bariery mentalne i społeczne, które mogą utrudniać efektywne wprowadzanie innowacyjnych metod recyklingu.

- Niski poziom świadomości ekologicznej – wielu obywateli nie zdaje sobie sprawy z korzyści wynikających z poprawnej segregacji odpadów i recyklingu.
- Brak przejrzystości systemu recyklingu – nieufność społeczeństwa wobec systemów gospodarki odpadami wynika często z braku jasnych informacji na temat tego, co dzieje się z segregowanymi odpadami.
- Opór wobec technologii – wprowadzenie systemów automatycznej segregacji, blockchain czy AI może budzić obawy o bezpieczeństwo danych oraz utratę miejsc pracy w sektorze odpadowym.

Dla przeciwdziałania tym barierom zasadne jest prowadzenie szeroko zakrojonych kampanii edukacyjnych, promowanie odpowiedzialnej konsumpcji oraz większa transparentność w zakresie zarządzania odpadami.

Bariery związane z wdrażaniem recyklingu 4.0 w Polsce są istotne, ale możliwe do przezwyciężenia poprzez odpowiednie strategie finansowania, edukacji oraz wsparcia dla innowacyjnych przedsiębiorstw. Konieczne jest zaangażowanie zarówno sektora publicznego, jak i prywatnego, aby skutecznie rozwijać technologie wspierające gospodarkę o obiegu zamkniętym i zwiększać efektywność systemu gospodarowania odpadami w Polsce.

7. Wnioski i rekomendacje

Recykling 4.0 stanowi nowoczesne podejście do gospodarki odpadami, które może przyczynić się do znaczącej poprawy efektywności recyklingu w Polsce. Wykorzystanie technologii Przemysłu 4.0, takich jak sztuczna inteligencja, Internet Rzeczy (IoT), blockchain i robotyzacja, pozwala na optymalizację procesów przetwarzania odpadów, redukcję kosztów oraz zwiększenie jakości surowców wtórnych. Pomimo licznych korzyści, wdrożenie tych rozwiązań wymaga przezwyciężenia szeregu barier, w tym wysokich kosztów inwestycyjnych, niedoboru specjalistycznej kadry oraz oporu społecznego wobec nowych technologii.

W celu skutecznego wdrażania recyklingu 4.0 w Polsce, konieczne wydaje się:

- Zwiększenie wsparcia finansowego – stworzenie kompleksowych mechanizmów dofinansowania dla przedsiębiorstw i samorządów inwestujących w nowoczesne technologie recyklingowe.
- Rozwój edukacji i kompetencji technologicznych – wprowadzenie szkoleń branżowych oraz współpracy między uczelniami a sektorem przemysłowym w celu kształcenia specjalistów w obszarze Przemysłu 4.0 i recyklingu.
- Promowanie świadomości ekologicznej i zaangażowania społecznego – wdrażanie kampanii edukacyjnych oraz systemów nagradzających odpowiedzialne podejście do segregacji odpadów.
- Usprawnienie regulacji i polityki odpadowej – harmonizacja przepisów dotyczących gospodarki odpadami oraz wdrożenie zachęt podatkowych dla firm stosujących zrównoważone praktyki recyklingowe.

W długoterminowej perspektywie recykling 4.0 może stać się kluczowym elementem transformacji polskiego systemu gospodarki odpadami, przyczyniając się do realizacji celów zrównoważonego



rozwoju i budowy gospodarki o obiegu zamkniętym. Wdrożenie inteligentnych rozwiązań technologicznych pozwoli nie tylko na zwiększenie efektywności recyklingu, ale również na redukcję negatywnego wpływu odpadów na środowisko i poprawę jakości życia społeczeństwa.

Literatura

1. Fang B., Yu J.: „Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review,” *Environmental Chemistry Letters*, p. 21(4), 2023.
2. Linde N., Balian A.: „Artificial Intelligence in Waste Management in the Context of Implementing Circular Economy,” *Grassroots Journal of Natural Resources*, pp. 7(3) s149-s172, 2024.
3. Ellen MacArthur Foundation, „ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THE CIRCULAR ECONOMY AI AS A TOOL TO ACCELERATE THE TRANSITION,” Ellen MacArthur Foundation, 2019.
4. Gurjar R., Vidyapith B.: „Smart Waste: AI's Impact on Solid Waste Management,” *Open Access Journal of Waste Management & Xenobiotics*, p. Volume 7 Issue 4, 2024.
5. Olawade D., Fapohunda O.: „Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligenc,” *Waste Management Bulletin*, pp. Volume 2, Issue 2, Pages 244-263, 2024.
6. binit, „binit,” [Online]. Available: <https://www.binitechnologies.com>.
7. bin-e, „bin-e,” [Online]. Available: <https://bine.world>.
8. Recycleye, „Recycleye,” [Online]. Available: <https://recycleye.com>.
9. El jaouharia A., Samadhiya A.: „Turning trash into treasure: Exploring the potential of AI in municipal waste management - An in-depth review and future prospects,” *Journal of Environmental Management*, 2025.
10. Lanzalonga F., Biancone P.: „The application of artificial intelligence in waste management: understanding the potential of data-driven approaches for the circular economy paradigm,” *MANAGEMENT DECISION*, pp. 1-19, 2024.

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.2>

Urządzenie do wytwarzania mikrozwiesin z materiałów skalnych

Zbigniew Szkudlarek - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Marek Kalita - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Arkadiusz Sobolewski - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale wskazano na możliwość zastosowania innych technik rozdrabniania wykluczającego bardziej energochłonne procesy mielenia, w których obecnie stosuje się młyny udarowe lub grawitacyjne z wykorzystaniem mielników. Dotyczy to zwłaszcza wysokoenergochłonnych młynów odśrodkowych i strumieniowych, w których jest możliwe uzyskiwanie ziaren o rozmiarach do 5 μm . Przedstawiono i opisano koncepcję urządzenia zwanego mikronizerem o wysokiej energii i odpowiedniej efektywności procesu, który posłuży do wytwarzania mikro zwiesin i mikroproszków. Rozwiązanie techniczne jest oparte na odśrodkowym przetłaczaniu cząstek stałych w cieczy procesowej przez sieć kanałów i węzłów napływowo-rozptywowych umiejscowionych w wysokoobrotowej tarczy.

Słowa kluczowe: mineralna inżynieria, surowce mineralne, mielenie rud metali, rozdrabniacz odśrodkowy, mikroproszek, odpady flotacyjne

Device for producing microsuspensions from rock materials

Abstract: The chapter indicates the possibility of using other grinding techniques that exclude more energy-intensive grinding processes, in which impact or gravity mills with the use of grinding media are currently used. This applies especially to high-energy centrifugal and jet mills, in which it is possible to obtain grains with sizes up to 5 μm . The concept of a device called a high-energy micronizer with appropriate process efficiency, which will be used to produce micro suspensions and micro powders, has been presented and described. The technical solution is based on centrifugal forcing of solid particles in the process liquid through a network of channels and inflow-flow nodes located in a high-speed disc.

Keywords: mineral engineering, mineral resources, grinding of metal ores, centrifugal grinder, micropowder, flotation tailings

1. Wprowadzenie

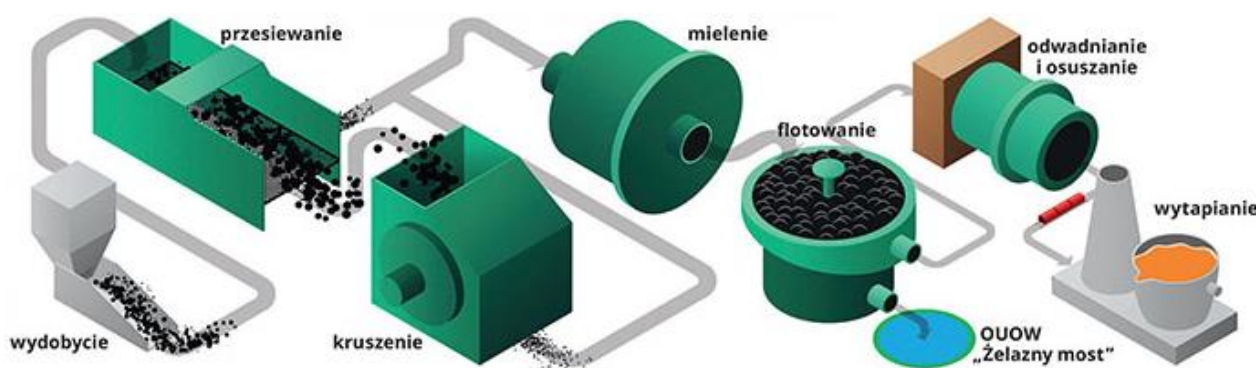
Rozdrabnianie maszynowe zbiorów ziaren oparte jest na procesach kruszenia i mielenia. Kryterium podziału procesu jest udział klas ziarnowych poniżej i powyżej 1 mm. Przyjmuje się, że jeśli produkt rozdrabniania zawiera poniżej 50% klasy 0÷1 mm, to pochodzi z procesu kruszenia, a jeśli powyżej 50% to z procesu mielenia.

Zazwyczaj do wytwarzania materiałów uziarnionych w tych procesach stosuje się maszyny rozdrabniające: kruszarki lub młyny, które projektowane są do eksploatacji na okres minimum 30 lat. Ich wydajność niejednokrotnie nie jest mniejsza niż 20 Mg/h.

Procesy kruszenia i mielenia są bardzo energochłonne, stąd przy bardzo dużych wydajnościach tych maszyn: ($500 \div 13\,000$ Mg/h – kruszarek oraz $100 \div 2\,000$ Mg/h – młynów) zainstalowane moce jednej maszyny mieszczą się w zakresie $1 \div 35$ MW [8].

Od początku XX wieku obserwuje się stały wzrost zapotrzebowania na materiały uziarnione w całym zakresie ich uziarnienia, od rozmiarów ziaren kilkudziesięciu mm (kruszyw, surowców mineralnych, paliw stałych i innych), poprzez ziarna o rozmiarach kilkudziesięciu μm – na materiały o takim uziarnieniu jest największe zapotrzebowanie. Są to: spoiwa mineralne, węgle, rudy i wiele innych.

Wprowadzenie nowych rozwiązań technologicznych w układach wzbogacania rud metali (rys. 1), a także wprowadzenie nowych technologii przetwarzania rud powinny w najbliższych latach stać się głównym kierunkiem działań umożliwiających obniżkę kosztów w polskim przemyśle wydobywczym, a zatem i utrzymanie konkurencyjnej produkcji metali w naszym kraju przy zachowaniu jej odpowiedniego poziomu. Racjonalna gospodarka złożem i zagospodarowanie nowych jego partii spowoduje wzrost udziału w nadawach do zakładów wzbogacania rud coraz trudniej wzbogacalnych i coraz uboższych.



Rys. 1. Ogólny schemat wzbogacania rudy miedzi [14]

Jedną z obiektywnych przyczyn problemów technologicznych przeróbki rud metali jest opłacalność pozyskiwania z procesów rozdrabniania ziaren o frakcjach przystosowanych do procesów wzbogacania i utrzymania wysokich wskaźników flotacji. Ten sam problem dotyczy również surowego węgla kamiennego, który jest przetwarzany mechanicznie w celu zwiększenia składnika użytecznego [2].

Przy bardzo wysokich kosztach poniesionych na wydobycie na powierzchnię każdej tony metalu w rudzie, trudno jest zaakceptować traktowanie jako odpad frakcji zawierającej użyteczne pierwiastki możliwe do odzyskania w procesie wzbogacania, a doskonalenie tego procesu jest jednym z ważniejszych problemów do rozwiązania. Dodatkowo generowanie dużej ilości odpadów powoduje, że branża wydobywcza jest postrzegana, jako jedno ze znaczących negatywnych oddziaływań na środowisko [12].

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1, w procesie rozdrobnienia rudy miedzi wyróżniamy etapy kruszenia ($20\div 40$ mm) i mielenia ($15\div 150$ μ m). Jednak w zależności od rodzaju rudy miedzi mielenie może być realizowane w jednym przejściu (mielenie I-go stopnia) wykonywane w młynach prętowych lub bębnowych kulowych oraz może być zrealizowane z domieleniem (mielenie II-go stopnia) wykonywane w bębnach kulowych lub cylpepsowych.

Opracowana koncepcja mikronizera jest odpowiedzią na możliwość rozdrabniania materiałów kruchych w zakresie wielkości ziaren wyjściowych do 5 μ m, przy ziarnach nadawy <2 mm.

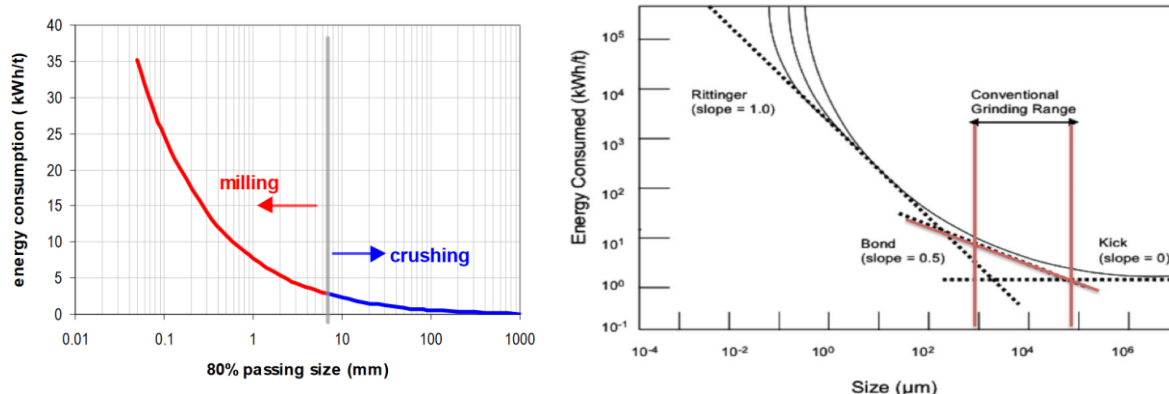
2. Obecnie stosowane techniki mikronizacji

Do bardzo drobnego mielenia ciał stałych, na skalę przemysłową, stosowane są młyny zwane mikronizerami. Wymienić tutaj należy głównie: młyny udarowe odśrodkowe oraz młyny strumieniowe.

Rozwiązania w zakresie mielenia materiału do wielkości ziaren do 5 μ m powinny odznaczać się małą energochłonnością w porównaniu do tradycyjnych procesów mielenia mechanicznego, głównie udarowego czy też grawitacyjnego kulowego [1, 6, 7].

Problem energochłonności jest istotny, gdyż zapotrzebowanie energii na proces rozdrabniania wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wymiarów ziaren produktu rozdrabniania (rys. 2). Z prowadzonych badań technik mielenia wynika, że najbardziej kosztowne jest dokładne mielenie do rozmiaru drobin rudy o wymiarach 50 μ m.

Szacuje się, że ostatnie domielanie w młynach kulowych, np. najtwardszych rud do (obecnie) 60 μ m to wydatek około 450 kWh/t.



Rys. 2. Zużycie energii w zależności od przyjętego procesu rozdrabniania [11, 13]

Jednocześnie rozwiązania te powinny odznaczać się wydajnością nie mniejszą niż są uzyskiwane metodami mechanicznymi. Z uwagi na przemysłowe wykorzystanie, zwłaszcza w przemyśle węglowym i rud metali, uzyskiwana wydajność powinna być nie mniejsza niż 30 Mg/h.

Proces mielenia strumieniowego oparty na sprężonym powietrzu lub innych gazach jest procesem energochłonnym. Firmy produkujące młyny strumieniowe zwykle nie podają jednostkowego poboru mocy przez młyn, a jeśli podają to uwzględniają tylko pobór mocy przez młyn, czyli iloczyn ciśnienia i prędkości medium gazowego. Jednak, ze względu na koszty eksploatacji młyna, przy jego doborze należy dokładnie uwzględnić: pobór energii, masę, wymiary gabarytowe kompletnego układu mielenia.

Zapotrzebowanie energii w procesie rozdrabniania wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wymiarów ziaren produktu rozdrabniania. Wzrost ten jest największy przy uziarnieniu poniżej 1 μm .

Dzięki postępowi inżynierii materiałowej w dziedzinie nowych, odpornych na ścierne zużycie materiałów, młyny odśrodkowe mogą zastąpić w wielu dziedzinach energochłonne oraz o dużych gabarytach młyny kulowe w procesach mielenia na sucho wielu materiałów [3].

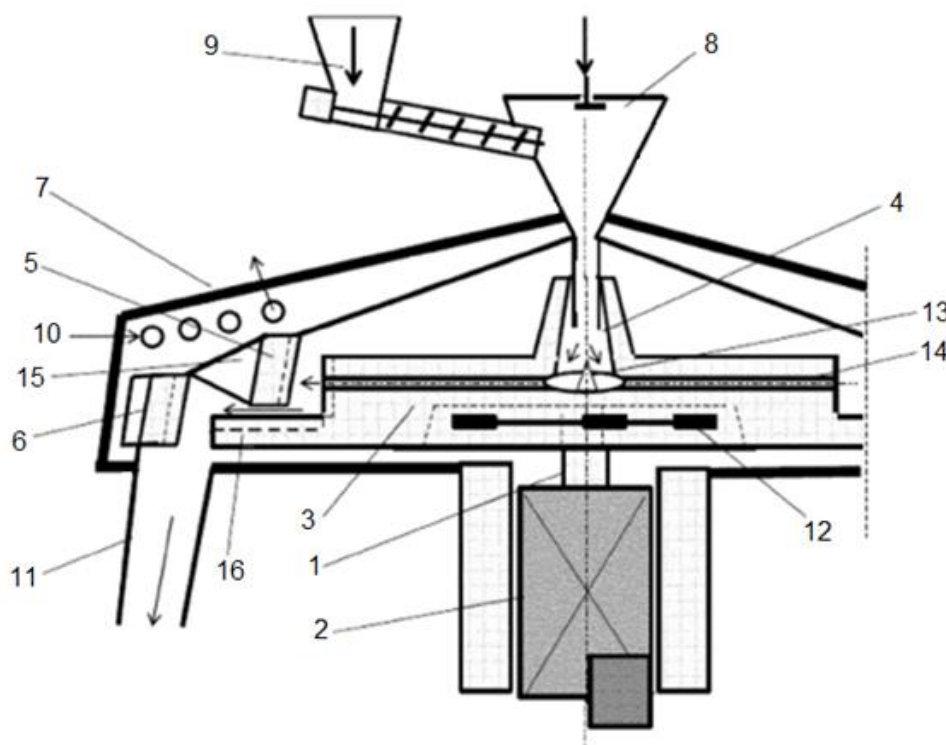
3. Opis koncepcji mikronizera

W koncepcji mikronizera przewiduje się rozwiązanie techniczne oparte na odśrodkowym przetwarzaniu cząstek stałych w fazie suchej lub zawiesinę cząstek stałych w cieczy procesowej przez sieć kanałów i węzłów napływowo-rozptywowych umiejscowionych w krążku, który jest napędzany wysokoobrotowym wrzecionem.

Zakłada się, że w wyniku mielenia, rozdrabniany piasek rudy o uziarnieniu nadawy <2 mm będzie miał regulowany produkt wyjściowy o wielkości ziaren do 5 μm (dla $D_{100}=20$ μm). Wydatek energetyczny powinien być niski (na poziomie 2,5 kWh/t). Przyjmując, że ciężar właściwy materiału

procesowego wyniesie 1600 kg/m^3 możemy określić wydajność mikronizera na poziomie $30 \div 60 \text{ Mg/h}$.

Proces mikronizacji w urządzeniu odbywa się poprzez wprowadzenie materiału do komory mikronizacji, gdzie jest on poddawany działaniu sił odśrodkowych wywołanych obracającym się wirnikiem. W wyniku tego procesu materiał jest rozdrabniany na bardzo małe cząstki.



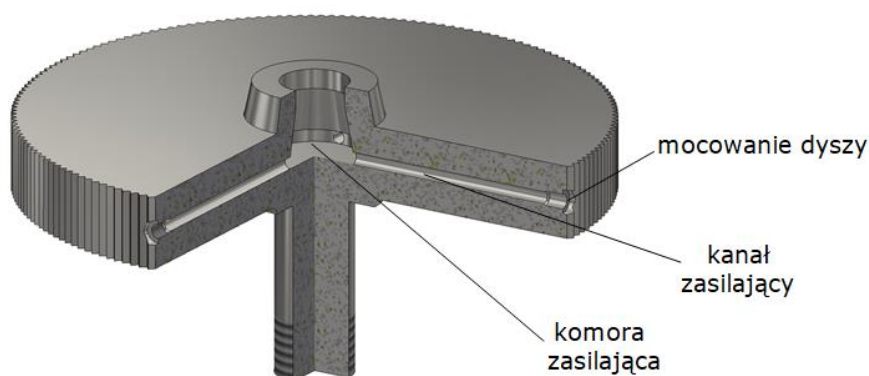
Rys. 3. Koncepcja mikronizera z układem podającym

(1 – wrzeciono; 2 – silnik elektryczny z falownikiem; 3 – tarcza; 4 – wlot do tarczy; 5 – górny pierścień kolizyjny; 6 – dolny pierścień kolizyjny; 7 – obudowa; 8 – lej nadawowy; 9 – dozator z regulacją wydatku; 10 – obieg chłodzenia; 11 – króciec wylotowy; 12 – układ wyrównowążący; 13 – odrzutnik stożkowy; 14 – kanał wyrzutowy tarczy; 15 – obsada pierścienia kolizyjnego; 16 – półka odrzutowa)

Mikronizer odśrodkowy (rys. 3) ma cylindryczną obudowę, która pełni funkcję ochrony oraz izolacji środowiska pracy od materiału poddawanego procesowi mikronizacji. Wewnątrz obudowy znajduje się tarcza, stanowiąca centralną część mikronizera, która obraca się z dużą prędkością. Tarcza jest wyposażona w rowki stożkowe, nacięte na powierzchni czołowej, które wspomagają rozdrabnianie materiału. Tarcza jest napędzana za pomocą silnika elektrycznego. Pomiędzy tarczą a obudową tworzy się przestrzeń (komora mikronizacji), w której odbywa się proces mikronizacji. Materiał jest wprowadzany do komory mikronizacji przez odpowiednie kanały doprowadzające, znajdujące się w tarczy. Na końcu każdego kanału znajduje się dysza wylotowa. W komorze

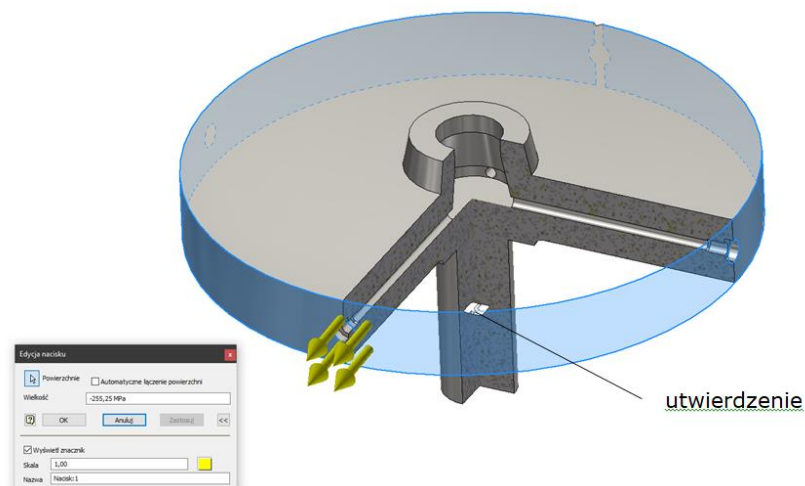
zainstalowano pierścienie kierujące, których zadaniem jest odpowiednie ukierunkowanie oraz przyspieszenie strugi cieczy procesowej wraz z mikronizowanym materiałem. Za zespołem pierścieni kierujących umieszczono pierścień kolizyjny. Mikronizer odśrodkowy jest wyposażony w króciec wylotowy, przez który mikronizowany materiał jest wyrzucany na zewnątrz. Rozmiar i kształt dyszy może być dostosowywany w celu kontroli rozmiaru końcowych cząstek. Ponadto urządzenie wyposażone jest w lej nadawowy pozwalający na regulację przepływu rozdrabnianego materiału.

Najważniejszym elementem mikronizera jest tarcza wysokoobrotowa (rys. 4). Element powinien być wykonany z bardzo wytrzymałego materiału, ponieważ przewidywana prędkość obrotowa wirnika może wynosić nawet 50 000 obr/min. Przy założeniu, że średnica tego elementu będzie wynosiła 120 mm, wówczas prędkość obwodowa będzie w przybliżeniu równa prędkości dźwięku (340 m/s). Dodatkowo jest to element, który zasila mikronizer w rozdrabniany materiał, w tym celu wyposażony jest w komorę zasilającą oraz połączone z nią cztery kanały zasilające przebiegające wzdłuż promienia tarczy wirnika. Kanały zasilające na końcach posiadają część gwintowaną o większej średnicy, która umożliwia zainstalowanie wymiennych dysz wyrzucających z dużą prędkością materiał poddawany rozdrabnianiu.



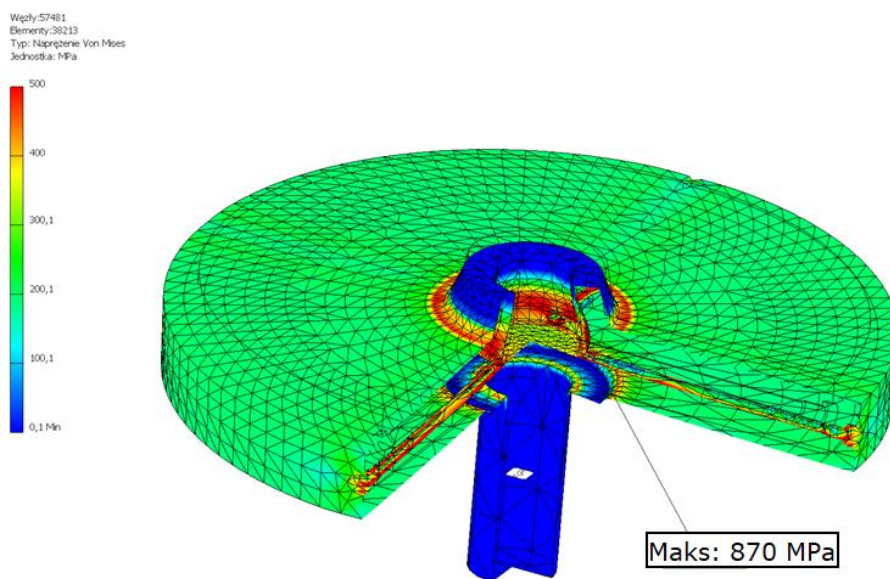
Rys. 4. Model 3D tarczy wysokoobrotowej

Przeprowadzono podstawowe obliczenia numeryczne wykorzystując uproszczony model tarczy wysokoobrotowej o średnicy 120 mm, wykonanej ze stopu tytanu, którego granica plastyczności wynosi około 1100 MPa. Na obwodzie tarczy przyłożono nacisk działający promieniowo o wartości około 255 MPa. Zasyмуляowano w ten uproszczony sposób działanie siły odśrodkowej, utwierdzono natomiast trzpień mocujący tarczę (rys. 5).

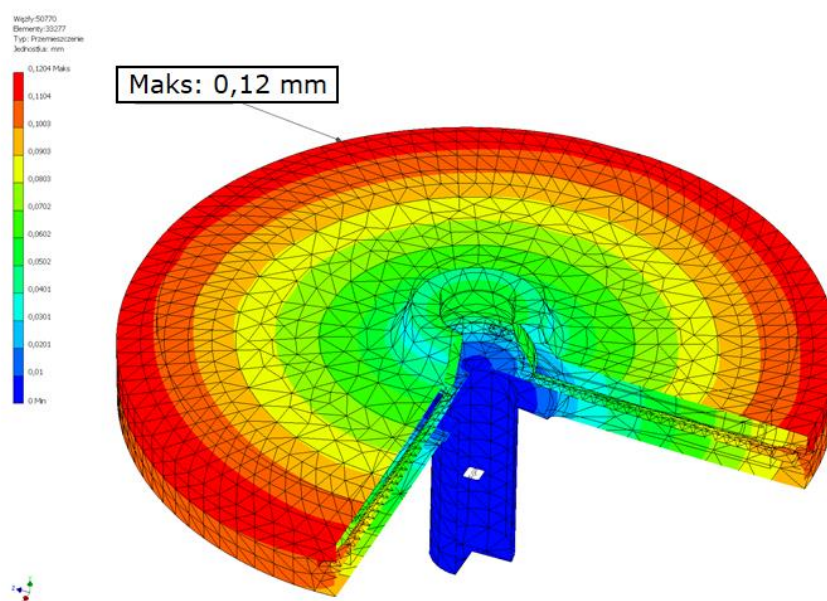


Rys. 5. Warunki brzegowe

Maksymalne naprężenia zredukowane wystąpiły w pobliżu osi obrotu tarczy (rys. 6) oraz wewnątrz kanałów zasilających, ich wartość sięga 870 MPa, co odpowiada współczynnikowi bezpieczeństwa równemu $k=1,26$. W pozostałej części tarczy naprężenia mieszczą się w przedziale $200 \div 300$ MPa.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w tarczy mikronizera



Rys. 7. Mapa przemieszczeń

Największe odczytane przemieszczenia (rys. 7), na mapie odkształceń wynoszą 0,12 mm, ich rozkład na tarczy jest równomierny i wartość przemieszczenia zwiększa się wraz ze wzrostem średnicy.

4. Podsumowanie

Symulacja numeryczna potwierdza poprawność doboru materiału, z którego wykonano tarczę mikronizera. Niewielki ciężar własny oraz duża wytrzymałość to, przy tak wysokich obrotach, bardzo pożądane własności.

Ta sama tarcza wykonana z wysokowytrzymałej stali stopowej ważyłaby 1,4 kg (173% większa masa) a siła odśrodkowa wynosiłaby 2,5 MN (również 173% większa wartość). W związku z powyższym należałoby się spodziewać odpowiednio większych naprężeń w tarczy.

Ponadto miejsca, w których pojawiają się spiętrzenia naprężeń to krawędzie otworów stanowiących wejścia kanałów zasilających, złagodzenie tych krawędzi przez zastosowanie np. zaokrągleń lub faz powinno wpłynąć na zmniejszenie naprężeń.

Odształcenia otrzymane z analizy numerycznej pozwalają określić średnicę obracającej się z dużą prędkością tarczy – będzie to miało duże znaczenie przy określaniu wielkości komory mikronizacyjnej oraz luzów tarczy.

Proces rozdrabniania w urządzeniu cechuje się niezwykłą dynamiką, gdzie ma miejsce zespół zjawisk fizycznych [4, 5, 9, 10], w których decydującą rolę odgrywają:

- superszybkie kolizje generujące zjawisko uderzenia hydraulicznego rzędu do kilkuset MPa,
- pulsacje ciśnień o bardzo wysokiej frekwencji rzędu 500 Hz,

- propagacja fal uderzeniowych z prędkością rzędu 2 000 m/s,
- samowzbudna lub spowodowana kavitacja generująca ciśnienia w momencie zaniku pęcherzyka rzędu 5 000 MPa,
- superszybkie i bardzo destrukcyjne rozpływy boczne około 10-krotnie szybsze od prędkości napływu strumienia,
- dyferencjalne pole naprężeń,
- niespotykana w żadnym mechanicznym urządzeniu turbulencja, superdestrukcyjna w procesach homogenizacji i mikronizacji.

Z uwagi na bardzo duże prędkości obrotowe pojawi się problem z nierównomierną pracą tarczy. Dlatego też mikronizer musi być wyposażony w układ wyważania dynamicznego układu wirującego.

W urządzeniu nastąpi uzyskanie lepszego przemiału, który spowoduje np. większy odzysk miedzi z rudy, ponieważ możliwa będzie eksploatacja złóż wymagających przemiału $<25\ \mu\text{m}$.

Literatura

1. Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M.: Mikronizacja materiałów kruchych metodą hydrostrumieniową. *Mechanik* nr 9/2014, s. 73-76.
2. Friebe P., Matusiak P., Kowol D.: Secondary separation of coking coal middlings in spiral separators. *Min. Mach.* 2024, vol. 42 issue 3, pp. 193-205. DOI: 10.32056/KOMAG2024.3.3
3. Kudasiuk M., Skoczylas N., Nurkowski J.: Oszacowanie wydatku energetycznego rozdrabniania metodą mielenia udarowego. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu*. Tom 18, nr 3. Wrzesień 2016, s. 75-82.
4. Mazurkiewicz M., Rhee K. C., Weglinski B.: High Pressure Liquid Jet Technology for Nano Particles Production. *Journal of Korean Powder Metallurgy Institut*. Vol. 15, No. 5, 2008.
5. Mazurkiewicz M.: Coal Disintegration by High-Pressure Waterjet. Final Report of Work No. DE-AC22-86PC91271. U.S. Department of Energy Pittsburgh Energy Technology Center.
6. Mateuszuk S.: Wybrane zagadnienia mielenia materiałów w pionowych młynach rolkowomisowych. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* nr 9, 2012.
7. Sarmak D., Naziemiec Z.: Efekty rozdrabniania w kruszarkach i prasach walcowych. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* nr 132. *Studia i Materiały* nr 39, 2011.
8. Sidor J., Klich A.: Współczesne maszyny do rozdrabniania – kruszarki i młyny. Monografia ITG KOMAG, Gliwice 2018.
9. Steller J.: International Cavitation Erosion Test. Preliminary report. IMP PAN Rep. 19/98. Gdańsk, September 1998.

10. Summers D. A.: The Volume Factor in Cavitation Erosion. Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact. 01 Jan 1983.
11. Wikedzi A.W.: Optimization and Performance of Grinding Circuits: The Case of Buzwagi Gold Mine (BGM). Faculty of Mechanical, Process and Energy Engineering of the Technische Universität Bergakademie Freiberg. 04-2018.
12. Witecki K., Jakubcewicz A., Kruszwicka I.: Sustainable development, i.e. environmental, technological and economic aspects in mineral engineering. Min. Mach. 2024, vol. 42 issue 3, pp. 183-192. DOI: 10.32056/KOMAG2024.3.2
13. Valety W., Jankovic A.: The future of comminution. 34 th IOC on Mining and Metallurgy, 30 Sept.-3 Oct.2002.
14. <http://www.kghm.com> [dostęp 23.02.2023]

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.3>

Zwiększenie dostępności zasobu cieplnego wód dołowych z podziemi kopalń przez zastosowanie pośredniego wymiennika ciepła

Andrzej Drwięga – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Rozdział dotyczy możliwości energetycznego wykorzystania zasobu cieplnego wód wypompowywanych z podziemi kopalń węgla. Omówiono zasoby wodne jakie są do dyspozycji w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, wskazując na potencjalną ilość energii jaka może być uzyskana przy zastosowaniu pomp ciepła. Jednocześnie wskazano na problem zanieczyszczeń tych wód, który ma wpływ na ograniczenie zastosowań technologii pomp ciepła, związany z koniecznością czyszczenia bądź wymiany wymienników ciepła. Przedstawiono techniki czyszczenia wymienników ciepła oraz zaprezentowano ideę swobodnie-przepływowego, pośredniego wymiennika ciepła, z układem czyszczenia rur wymiennikowych, przeznaczonego do pracy w silnie zanieczyszczonych zbiornikach wodnych. Wymiennik będzie umożliwiał poprawną pracę pompy ciepła z wykorzystaniem zasobów wód kopalnianych.

Słowa kluczowe: wody kopalniane, pompy ciepła, aspekt zanieczyszczeń, wymienniki ciepła, czyszczenie wymienników

Increasing the availability of underground mine waters thermal resources by using an intermediate heat exchanger

Abstract: The chapter deals with the possibility of energy use of thermal resources of water pumped from underground coal mines. The water resources available in the Upper Silesian Coal Basin are discussed, indicating the potential amount of energy that can be obtained using heat pumps. At the same time, the problem of contamination of these waters is indicated, which affects the limitation of the applications of heat pump technology, related to the need to clean or replace heat exchangers. The techniques for cleaning heat exchangers are discussed and the idea of a free-flowing, intermediate heat exchanger, with a system for cleaning exchanger tubes, designed for operation in heavily polluted water reservoirs, is presented. The exchanger will enable the correct operation of the heat pump using mine water resources.

Keywords: mine water, heat pumps, pollution problem, heat exchangers, exchanger cleaning

1. Wprowadzenie

Wody wypompowywane z podziemi kopalń węgla cechują się względnie wysokimi i stałymi temperaturami, z niewielkim zróżnicowaniem latem i zimą. Temperatura wód w zależności od kopalni waha się w granicach 13°C-25°C. Wyższe temperatury, nawet do ponad 30°C są możliwe do wykorzystania w kopalniach o głębokości eksploatacyjnej ponad 1000 m, gdzie są stosowane systemy klimatyzacji, jak przykładowo w kopalni Staszic. Taki przypadek ma miejsce, gdy kopalnia stosuje system klimatyzacji z obiegiem wody lodowej. Ilość wody wypompowywanej przez kopalnie jest zróżnicowana – od 0,5 do 65 m³/min. Pomimo stosunkowo dużej ilości energii geotermalnej zawartej w wodach, zasoby te nie są zwykle wykorzystywane, pomimo że mogłyby być bardzo korzystnym dolnym źródłem dla pomp ciepła umożliwiającym osiągnięcie wysokiego współczynnika COP, który jest podstawowym parametrem, decydującym o użyteczności pompy ciepła. W przypadku wód wypompowywanych z podziemi kopalń można liczyć na stałość temperatury zimą oraz latem i zastosowanie pomp ciepła w oparciu o takie źródło jest bardzo korzystne, przy czym podstawowym problemem jest duże zanieczyszczenie tych wód, które w wielu przypadkach uniemożliwia bezpośrednie ich kierowanie na wymiennik ciepła zintegrowany w konstrukcji pompy ciepła. Zasoby energetyczne wód wypompowywanych z podziemi kopalń mogą się stać istotnym zasobem energii cieplnej pod warunkiem rozwiązania problemu zanieczyszczeń w procesie pozyskiwania ciepła. Kopalnie węgla zlokalizowane w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym stanowią wysoce perspektywiczne miejsce do zainstalowania pomp ciepła ze względu na ilość wody kopalnianej, która obecnie jest pompowana na powierzchnię i w większości marnowana. Najbardziej reprezentatywnym przykładem wykorzystania wód z obszaru już zamkniętych kopalń jest instalacja w mieście Heerlen w Holandii [1], znana jako projekt pilotażowy Mijnwater. Instalacja zrealizowana w latach 2003-2008 jako projekt pilotażowy zapewniała zarówno ogrzewanie zimą oraz chłodzenie latem. Projekt obejmował dwa odwierty o głębokości 700 m w północnej części Heerlen, służące do czerpania ciepłej wody o temperaturze około 28°C oraz dwie studnie wody o głębokości 250 metrów do czerpania wody o temperaturze około 16°C. Piąty odwiert służył do wtłaczania powrotnego wykorzystanej wody. Począwszy od 2013 roku, proces wtłaczania realizowano za pomocą dwukierunkowych studni do rozdzielnego zatłaczania wody schłodzonej i wody ogrzanej. Ten drugi etap projektu Mijnwater zapewnił ciepło oraz chłodzenie dla 200000 m² równoważnych budynków w czterech połączonych sieciach klastrowych, z nowo zainstalowaną mocą 4 MW do ogrzewania i chłodzenia. W Polsce, na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego mamy do dyspozycji znacznie większe zasoby ciepła w wodach wypompowywanych z kopalń czynnych oraz już zamkniętych i zasoby te są dostępne bez dodatkowych inwestycji związanych z odwiertami. Niemniej ich wykorzystanie z uwagi na zanieczyszczenia napotyka na ograniczenia. W rozdziale przedstawiono

problem związany z wymianą ciepła przy korzystaniu z podziemnych silnie zanieczyszczonych wód oraz zaproponowano zastosowanie dedykowanego do tego rodzaju wód, pośredniego, swobodnie przepływowego wymiennika ciepła, z systemem okresowego czyszczenia z osadów.

2. Ocena zasobu cieplnego wód wypompowywanych z kopalń

Według danych opracowanych w 2008 r. [2] szacowano, że z kopalń GZW wypompowywanych było 600 tys. m³ wody na dobę. Obecnie, według wykonanego rozpoznania na potrzeby opracowania [3], z 24 obiektów kopalnianych zlokalizowanych w GZW wypompowuje się mniej wody, tj. 248,775 m³/min (Tabela 1), czyli około 360 tys. m³ wody na dobę. Temperatura minimalna tych wód wynosi 13°C, ale są też kopalnie, w których temperatura wody przekracza 20°C. Możliwe do wykorzystania zasoby wodne czynnych kopalń GZW zestawiono w tabeli 1, w której podano poszczególne 24 obiekty pod względem ilości pompowanej wody oraz ilości posiadanych odstożników wody. Odstożniki mogą być bardzo korzystne, ponieważ bezpośrednio w nich można instalować wymienniki ciepła. Nie wyklucza się jednak wykonanie specjalnych zbiorników na okoliczność zagospodarowania ciepła, w obiektach które odstożników nie posiadają. Według [3] na podstawie tabeli 1 szacunkowo można określić potencjał jaki mógłby być wykorzystany, przy czym ilość realnie możliwych instalacji, biorąc pod uwagę wielkość dopływu wody w poszczególnych obiektach wynosiłaby około 40, ale liczba ta może być dużo wyższa, jeżeli uwzględnimy też wodę wypompowywaną z kopalń już zamkniętych.

Należy zaznaczyć, że w zależności od źródła dane dotyczące ilości wypompowywanych wód mogą się różnić np. ZG Sobieski należy do kopalń o największym dopływie wód dołowych do wyrobisk w Europie i osiąga wartość 50 m³/min (dane z 2005 r.), podczas gdy według tabeli 1 ilość ta dla najbardziej zawadnionej kopalni (poz. 3) wynosi 65,41 m³/min. Rozbieżności mogą wynikać z różnych dat opracowania informacji źródłowych.

Moc cieplną P , jaką można teoretycznie odzyskać ze wspomnianej ilości wody wypompowywanej w obrębie GZW w ilości 360 000 m³/dobę będzie uzależniona od sprawności odbierania ciepła. Dla zobrazowania skali poniżej obliczono jednostkową moc cieplną przy odebraniu od wody ciepła powodującego obniżenie temperatury masy całej dostępnej wody tylko o 1°C (1 K) w czasie 1 sekundy, według zależności (1):

$$P = \varphi_w \cdot Q_w \cdot c_w \cdot (T_1 - T_2) \quad (1)$$

gdzie:

φ_w - masa właściwa wody, w tym przypadku zastosujemy 1000 kg/m³

Q_w - sekundowe natężenie przepływu wody (w oparciu o informację dotyczącą 600 m³/dobę), wynoszące 4,14 m³/s

c_w - ciepło właściwe wody: 4200 J / kg · K

(T1-T2) – różnica temperatury wynikająca ze schłodzenia wody - przyjęto 1K

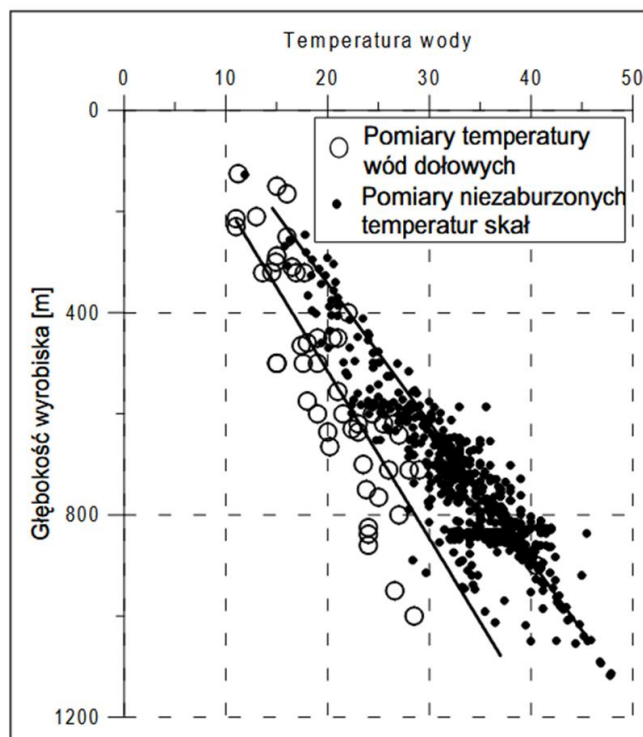
Charakterystyka 24 obiektów na terenie GZW pod względem ilości pompowanych wód z podziemi [3]

Tabela 1.

L.p.	Dopływ wody do kopalni [m ³ /min]	Osadniki na powierzchni (1), brak osadnika na powierzchni (0)	Osadniki powierzchniowe pojemność [m ³]	Liczba osadników powierzchniowych
1	8,49	1	966 625	1
2	13,80	1	1 057 895	2
3	65,41	1	1 452 900	1
4	10,40	1	9 120	3
5	9,44	0	0	0
6	12,49	1	15 750	7
7	3,73	1	198 000	1
8	5,75	1	198 000	1
9	2,99	1	16 850	1
10	12,05	1	34 258	2
11	14,35	1	93 670	2
12	2,85	1	27 715	7
13	4,28	1	9 598	7
14	16,02	0	0	0
15	3,21	1	135 000	1
16	16,66	0	0	0
17	30,66	1	509 000	3
18	3,159	1	85 725	3
19	1,079	1	31 500	3
20	5,72	1	66 400	6
21	4,2	1	45 000	1
22	0,465	0	0	0
23	0,788	1	brak danych	2
24	0,788	1	7 040	1
RAZEM	248,775	20	4 960 046	55

Po podstawieniu danych do zależności (1) otrzymujemy wartość jednostkowej mocy cieplnej $P = 17,39$ MWt możliwej do odzyskania sumarycznie ze wszystkich wód dołowych kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego przy obniżeniu temperatury o zaledwie 1°C. Od sprawności (intensywności) wykorzystania ciepła zawartego w wodzie, za pomocą odpowiednio dobranych wymienników ciepła, będzie zależało ile energii będziemy w stanie odzyskać. Teoretycznie można założyć, że wodę można schłodzić ze średniej temperatury 15°C do 5°C (gruntowe pompy ciepła wykorzystują w naszym klimacie temperaturę gruntu nawet 3-4°C). Wówczas teoretyczna ilość

energii wzrosło do 173,9 MWt. Temperatura wód dołowych wykazuje silną zależność od głębokości, z której jest wypompowywana, co przedstawiono w publikacji [4], a wykres temperaturowy na rys. 1 obrazuje tę zależność.



Rys. 1. Wykres temperatury skał i wód w wyrobiskach górniczych wybranych kopalń GZW [4]

Wody pompowane z podziemi kopalń cechują się przeważnie znacznym zasoleniem, zawartością związków żelaza oraz innych pierwiastków. Przykładowo według [5] temperatura wody odpływającej z osadnika KWK Ziemowit wynosi 18°C, jest też silnie zanieczyszczona co obrazuje tabela 2 (dane z 2002 r.)

Parametry wody odpływającej z osadnika KWK Ziemowit [5]

Tabela 2.

Wskaźnika, jednostka	Wartość średnia
Temperatura, °C	18
Mętność, NTU	60,7
pH	7,5
Tlen rozpuszczony, gO ₂ /m ³	5,7
Zawiesiny ogólne, g/m ³	78
Chlorki, gCl ⁻ /m ³	29400
Siarczany, gSO ₄ ²⁻ /m ³	1420
Substancje rozpuszczone, g/m ³	54000

Szacunkowe obliczenia wykazały, że przy odpowiedniej, ekonomicznie opłacalnej technologii warto sięgnąć do odzyskiwania energii cieplnej z wód kopalnianych. Temperatura czynnika grzewczego generowanego przez pompę ciepła mogłaby być dostosowywana do potrzeb odbiorców w granicach 60°C do 90°C. Czynnik grzewczy może zasilać pobliskie obiekty właściciela inwestycji, a jej nadwyżki odsprzedawane do zakładów typu PEC, które dostarczają ciepło do różnych obiektów mieszkalnych i przemysłowych. Należy jednak uwzględnić fakt, że im wyższa będzie temperatura wyjściowa czynnika grzewczego w odniesieniu do temperatury dolnego źródła pompy ciepła, tym mniejszy będzie współczynnik COP.

Warunkiem zastosowania pompy ciepła pracującej w oparciu o dolne źródło w postaci wody w odstojniku wód górniczych jest duża czystość tej wody, która mogłaby być bezpośrednio podawana na wymiennik pompy ciepła lub zastosowanie wymiennika pośredniego w przypadku silnie zanieczyszczonych wód. Nieuniknionym jest, że wymiennik pośredni będzie również ulegał zanieczyszczeniu na zewnętrznej stronie elementów wymiennikowych (rurek), ale w jego obiegu wewnętrznym wymiennika będzie krążył czysty czynnik podawany do wymiennika w pompie ciepła. W związku z tym powierzchnie zewnętrzne wymiennika pośredniego muszą być poddawane okresowemu czyszczeniu i w tym aspekcie należało przeanalizować stosowane techniki czyszczenia wymienników w obecnych zastosowaniach przemysłowych oraz zaproponować sposób czyszczenia wymiennika pośredniego, planowanego do zastosowania przy wykorzystywaniu silnie zanieczyszczonych wód kopalnianych.

3. Sposoby czyszczenia wymienników ciepła

Wymienniki ciepła stosowane w konstrukcjach pomp ciepła mają zwykle budowę zamkniętą, w której umieszcza się pęki rur wymiennikowych lub naprzemienne płyty wymiennikowe. Problemy wykorzystywania wód zanieczyszczonych w tego rodzaju wymiennikach pokonuje się różnymi metodami. Gromadzenie się zanieczyszczeń w wymienniku ciepła jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym, powodującym spadek sprawności (wydajności), a nawet w krytycznym przypadku całkowitą utratę zdolności odzyskania ciepła. Poprzez zastosowanie odpowiedniej konstrukcji samego wymiennika można to zjawisko ograniczyć, aczkolwiek w przypadku silnie zanieczyszczonych mediów pozwala to jedynie na zmniejszenie skutków osadzania się zanieczyszczeń i wydłużenie czasu między koniecznymi zabiegami czyszczenia. Dlatego też konieczne jest okresowe czyszczenie wymienników ciepła. W zakresie czyszczenia istnieje wiele rozwiązań, które można podzielić na dwie grupy tj. czyszczenie „on-line” polegające na usuwaniu zanieczyszczeń bez potrzeby wymontowania wymiennika, często nawet bez przerywania pracy wymiennika (systemy samoczyszczące) oraz czyszczenie „off-line”, gdzie wymiennik jest demontowany (całkowicie lub częściowo) z instalacji i poddawany zabiegom czyszczenia. Z punktu widzenia efektywności całego procesu wymiany ciepła

każda przerwa w pracy wymiennika jest niepożądana, stąd preferowane są systemy „on-line”. W przypadku stosowania wymiennika jako pośredniego źródła pompy ciepła, przerwy w jego działaniu, szczególnie w okresie zimowym, są niedopuszczalne. Zdecydowana większość stosowanych i opatentowanych metod obejmuje czyszczenie z osadów zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych powierzchni wymiany ciepła. W przypadku zastosowania wymiennika do odzysku ciepła z wód kopalnianych i ścieków największym problemem są zanieczyszczenia zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła. Obecnie stosuje się na skalę przemysłową szereg różnorodnych metod czyszczenia wymienników ciepła. Najpowszechniejsze zastosowanie ma czyszczenie mechaniczne polegające na fizycznym szorowaniu lub zeskrobywaniu osadów z powierzchni wymiany ciepła. Metody te są skuteczne w usuwaniu przylegających zanieczyszczeń, takich jak kamień, rdza lub cząstki stałe. Przykładem metody mechanicznej jest szczotkowanie ręczne lub automatyczne w zastosowaniu do szorowania powierzchni rurek, płytek lub żeber. Takie rozwiązanie proponuje firma Athco Engineering z Danii [6]. Do odspajania osadów z powierzchni wymiennika ciepła używa się specjalistycznych narzędzi, ale w większości przypadków odbywa się to po wymontowaniu wymiennika i poddaniu go konserwacji. Istnieje jednak urządzenie firmy Huber pod nazwą RoWin [7], zastosowane w wymienniku ciepła do ścieków. W tej metodzie skrobak przesuwają się automatycznie na zewnątrz rur wymiennika usuwając zanieczyszczenia, które opadają na dno zbiornika, skąd są okresowo usuwane. Wymiennik jest stale zanurzony w wodzie/ściekach. Alternatywne rozwiązanie usuwania osadów proponuje firma Pozzi Leopoldo [8], która opracowała specjalną konstrukcję wymiennika ciepła samoczyszczącego. W tym rozwiązaniu usuwanie osadów odbywa się poprzez obracające się tarcze wymiennika. Według firmy Pozzi wymiennik taki jest zalecany do brudnej wody i ścieków. Inną metodę czyszczenia powierzchni wymiennika poprzez odspajanie osadu oferuje firma Koellmann [9], oferując wymiennik pełniący też funkcję przenośnika śrubowego. Czyszczenie powierzchni wymiennika osiąga się dzięki dwóm wałom obracającym się w tym samym kierunku, gwarantując w ten sposób dużą prędkość względną między poszczególnymi powierzchniami, na których osadzają się zanieczyszczenia.

Kolejną metodą jest czyszczenie strumieniami wody pod wysokim ciśnieniem: Strumień wody pod ciśnieniem. Jest to podstawowa metoda czyszczenia wymienników w trybie „off-line”, czyli po zdemontowaniu i rozebraniu wymiennika. Jest wiele firm oferujących czyszczenie taką metodą jak np. AlpinJet [10].

Stosowane jest też czyszczenie chemiczne, które polega na użyciu środków czyszczących lub rozpuszczalników w celu rozpuszczenia lub rozluźnienia zanieczyszczeń. Stosuje się kwasy, roztwory alkaliczne i czynniki chelatujące. Ta metoda jest skuteczna w usuwaniu osadów organicznych, olejów i niektórych rodzajów kamienia. Metody te nie mogą być stosowane

w przypadku odzyskiwania ciepła z wód kopalnianych, gdyż wody te po opuszczeniu osadnika kierowane są do naturalnych cieków wodnych (rzek), zawierają i tak wiele szkodliwych składników, więc dodawanie jeszcze tak agresywnych i niszczących środowisko naturalne substancji jest niedopuszczalne. Należy też dodać, że metody chemiczne stosuje się przede wszystkim do zamkniętych obiegów wymienników ciepła, gdy oba czynniki (ogrzewany i ogrzewający) mogą być poddawane neutralizacji.

Do mechanicznego usuwania zanieczyszczeń wewnątrz wymiennika ciepła stosuje się specjalne kulki, które krążą w rurkach wymiennika ciepła w celu mechanicznego usunięcia osadów. Rozwiązanie takie proponuje niemiecka firma H2O GmbH. Wewnątrz wymiennika ciepła tej firmy znajdują się małe kulki ceramiczne, tzw. kule mielące Activepowerclean. Ze względu na duże natężenia przepływu wewnątrz rur wymiennika ciepła, kule mielące są cyrkulowane, co zmniejsza osadzanie się kamienia. W związku z tym zmniejsza się wysiłek eksploatacyjny, ponieważ nie jest konieczne intensywne chemiczne i ręczne czyszczenie rur wymiennika ciepła. Najbardziej rozwinięte odmiany tej metody od wielu lat propaguje firma Klaren International, która opracowała i opatentowała technologię samoczyszczących płaszczowo-rurowych wymienników ciepła do pracy przy zerowym zarastaniu. Technologia ta wykorzystuje ciągłą cyrkulację cząstek (kulek) stałych przez rury wymienników ciepła w celu usunięcia osadów zanieczyszczających ze ścianki rury. Według deklaracji firmy Klaren można tą metodą usunąć dowolną kombinację twardych lub miękkich, biologicznych lub chemicznych, włóknistych lub białkowych zanieczyszczeń lub ich kombinację. Mimo bardzo intensywnych zabiegów marketingowych firmy Klaren (szeroko reklamujących zalety rozwiązania) należy zaznaczyć, że metoda ta ma jednak istotne ograniczenia stosowania i w praktyce można ją stosować jedynie do zamkniętych obiegów płynów w wymiennikach.

Istnieją też rozwiązania, których autorzy proponują specjalne konstrukcje wymienników odpornych na osadzanie się zanieczyszczeń w wymienniku ciepła. Przykładem są wymienniki ciepła firmy Alfa Laval ze Szwecji [11]. Według deklaracji tej firmy dzięki dużej odległości między płytami i bardzo turbulentnemu przepływowi, wymiennik WideGap jest znacznie mniej podatny na zapychanie niż inne wymienniki ciepła. Szerokie kanały umożliwiają swobodny przepływ brudnych płynów przez wymiennik ciepła i unika się zatykania. Specjalny wzór pofałdowania płyt w jodełkę powoduje duże turbulencje, co dodatkowo pomaga zmniejszyć osadzanie się zanieczyszczeń, ale także zwiększa wymianę ciepła.

Jednym z częściej używanych metod czyszczenia wymienników jest metoda przeciwprądu, czyli przepuszczania płynów w odwrotnym kierunku niż przy normalnej pracy, zwykle stosując też znacznie większe prędkości [12]. W przypadku wód kopalnianych i odstojników, nie jest możliwe jej zastosowanie.

Pozostałe, rzadziej stosowane metody czyszczenia to: czyszczenie parą (stosowane w przypadkach, gdzie para technologiczna jest łatwo dostępna, jako produkt odpadowy procesów technologicznych), czyszczenie soniczne, hydroblasting (metoda łączy strumienie wody pod wysokim ciśnieniem z mieszaniem mechanicznym w celu usunięcia zanieczyszczeń) i śrutowanie za pomocą cząstek ściernie napędzanych sprężonym powietrzem.

4. Wymiennik swobodnie przepływowy według koncepcji KOMAG

Jak wspomniano, zasadniczym problemem do pokonania przy stosowaniu wód dołowych jako źródła dolnego dla pompy ciepła są zanieczyszczenia, które w praktyce uniemożliwiają bezpośrednie zasilanie wymiennika ciepła w pompie ciepła, gdyż ten ulega zwykle szybkiemu zanieczyszczeniu, spadkowi efektywności a nawet zatkanie. Powoduje to konieczność wymiany wymiennika lub poddanie go procesowi czyszczenia, co z kolei skutkuje okresowym wyłączeniem instalacji i przerwą w dostawie ciepła. Z kolei proces filtrowania wody przed skierowaniem na pompę, powoduje znaczne jej ochłodzenie, spore dodatkowe koszty i obniżenie efektywności. Praktycznie co do filtrowania zostało stwierdzone, na przykładzie instalacji w CZOK (SRK), że nie jest ono efektywne. Dlatego według koncepcji opracowanej w ITG KOMAG zakłada się zastosowanie pośredniego wymiennika ciepła, który okresowo byłby przemywany strumieniami wody według zasady on-line, co będzie polegało na wynurzaniu wymiennika ponad lustro wody, dzięki zastosowaniu elastycznych przewodów doprowadzających ogrzewane medium do wymiennika i czyszczenia powierzchni zewnętrznych wodą pod ciśnieniem z precyzyjnie rozmieszczonych dysz. Czasokres czyszczenia należałoby indywidualnie dobierać dla parametrów zanieczyszczeń wody. Klasyczne wymienniki z gęsto rozmieszczonymi elementami wymiennikowymi jak rury lub naprzemienne płyty, mają bardzo dobre parametry wymiany ciepła i ich zastosowanie do nieznacznie zanieczyszczonych wód jest uzasadnione. W tym przypadku wymiennik według koncepcji KOMAG nie byłby konkurencyjny. Natomiast wymiennik ten będzie bardzo konkurencyjny przy stosowaniu w wodach mocno zanieczyszczonych, a do takich wód z reguły zaliczane są wody wypompowywane z podziemi kopalń. Mniejsza sprawność wymiany ciepła w danej objętości wymiennika, gdzie odległości pomiędzy rurami są stosunkowo duże, będzie kompensowana możliwością rozbudowy wymiennika o kolejne bloki wymiennikowe. Dzięki temu, że wymiennik jest swobodnie-przepływowy, nie wprowadzamy do układu dławienia przepływu przez wymienniki zamknięte, co mogłoby skutkować koniecznością zastosowania dodatkowej pompy wspomagającej przepływ. Duże rozmiary zbiorników wodnych, czyli tak zwanych odstożników, stosowanych w kopalniach jako naczynia zbiorcze przed odprowadzeniem wód do cieków wodnych, w pełni uzasadniają zastosowanie do odzysku ciepła wymiennika przystosowanego do swobodnego przepływu wody. Drogą do tego celu jest zastosowanie

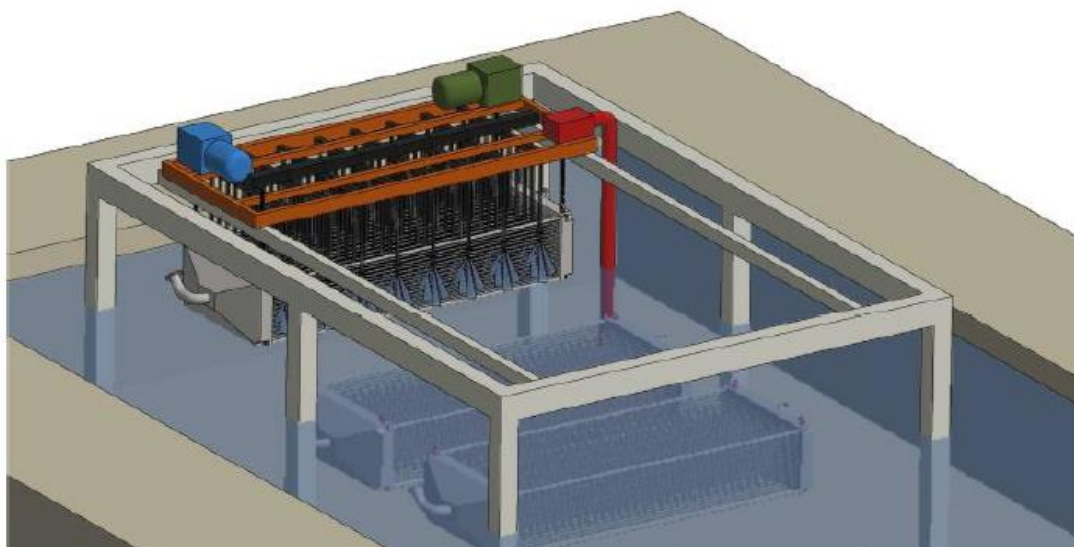
wymiennika swobodnie-przepływowego, o długim okresie użytkowania, bez problemów związanych z postojami instalacji wskutek konieczności czyszczenia lub wymiany drogich bezpośrednich wymienników ciepła zabudowanych w pompach ciepła.

Idea wymiennika swobodnie przepływowego z systemem okresowego oczyszczania, proponowana według koncepcji KOMAG polega na zastosowaniu rur wymiennikowych, przebiegających od kolektora dolotowego do kolektora wylotowego. Rury będą zgrupowane w kilku pionowych rzędach, przy czym odległość pomiędzy rzędami rur powinna być odpowiednia dla umożliwienia penetracji systemem czyszczących dysz wodnych, stosowanych do okresowego przemywania. Ponieważ wymiennik będzie zanurzony w wielkogabarytowym zbiorniku, czyli odstojniku wody, jaki istnieje na danej kopalni, będzie poddany swobodnemu przepływowi czynnika dolnego źródła. Odległości pomiędzy rurami będą znacznie większe niż w tradycyjnych kompaktowych wymiennikach o budowie zamkniętej, dlatego ilość czynnika grzewczego przypadającego na poszczególną rurę będzie znacznie większa niż w wymiennikach tradycyjnych, a moc całkowitą wymiennika można obliczać jako sumę mocy wszystkich jego rur składowych. Oczywiście woda dolnego źródła przepływając przez kolejne rury będzie się ochładzać, jednak z uwagi na „nadmiar masowy” wody dolnego źródła, nadal będzie dysponować energią cieplną, która będzie przechwytywana przez kolejne rury. Ogrzewany czynnik, którego temperatura w kolejnych wymiennikach będzie coraz niższa, będzie kierowany do kolektora zbiorczego, a następnie po wymieszaniu kierowany do wymiennika pompy ciepła. Bardzo istotną kwestią będzie dobranie częstotliwości okresów czyszczenia wymienników, aby nie dopuścić do osadzenia się osadu na tyle utwardzonego, że dysze nie zdołają go usunąć. Układ wynurzania wymiennika ponad lustro wody będzie zintegrowany z systemem dysz.

Docelowo zakłada się intensywne wykorzystanie zasobu cieplnego wypompowywanej wody, w granicach zredukowania jej temperatury pierwotnej nawet o 10°C poprzez wykorzystanie odpowiedniej ilości bloków wymiennikowych, umieszczanych jeden za drugim. Przykładowo dla uzyskania mocy 1 MW wymaganych będzie 5 bloków wymiennikowych o mocy nominalnej 200 kW, przy czym z uwagi na geometrię basenu, konfiguracja w tym przypadku 5-ciu wymienników będzie dobrana w sposób najbardziej korzystny energetycznie. Zakłada się również zastosowanie przegród rozprowadzających równomiernie dopływającą wodę dolnego źródła na poszczególne bloki wymienników. Cechą charakterystyczną pracy wymiennika jest stosunkowo powolny przepływ wody wynikający z określonego dopływu i odpływu pompowanej wody wprowadzanej do wielkogabarytowego wymiennika. Na rurach wymiennika będzie stopniowo osadzać się osad, a utrzymywanie go na rurach będzie powodować jego narastanie i utwardzanie, stąd konieczne będzie określenie częstotliwości przepłukiwania wymiennika adekwatnie do zanieczyszczeń wody. Sposób okresowego czyszczenia wymiennika będzie polegał na jego całkowitym wynurzeniu ze zbiornika i poddawaniu myciu strumieniami wodnymi podczas wynurzania i zanurzania. Jak wspomniano

wcześniej, poszczególne warstwy rur będą oddalone od siebie na tyle, aby pomiędzy nimi swobodnie mieściły się dysze myjące. Dysze będą umiejscowione na specjalnym stelażu ponad zanurzonym wymiennikiem. Ruch wymiennika w górę, a następnie w dół w celu ponownego zanurzenia, przy działających dyszach spowoduje oczyszczenie rur z nalotu jaki zaistniał od czasu poprzedniego czyszczenia. W przypadku zastosowania kilku wymienników, układ podnosząco-myjący będzie przemieszczany po zabudowanej ponad zbiornikiem specjalnej trasie, dzięki czemu jeden układ będzie w stanie obsłużyć wszystkie bloki wymiennika. Kolektor dolotowy i wylotowy każdego z bloku z wymienników będzie połączony elastycznymi przewodami, dzięki czemu wynurzanie i zanurzanie bloku wymiennika nie będzie powodowało przerw w dostarczaniu ciepła. Woda do mycia rur wymiennika będzie czerpana wprost ze zbiornika wodnego (odstojnika) i zanim trafi do dysz myjących zostanie przefiltrowana.

Konstrukcja wymiennika ciepła, a w szczególności sposób i metodyka skutecznego czyszczenia zewnętrznych powierzchni wymiennika ciepła (modułów wymiennika) „on-line” tj. bez potrzeby zatrzymywania pracy wymiennika i jego demontażu, pozwoli na ciągłe przekazywanie ciepła do pompy ciepła przy zachowaniu wysokich parametrów odbierania energii z ciepłej z wody opływającej wymiennik. Na rysunku 2 zilustrowano jedną z pierwszych koncepcji ustawionych posobnie trzech bloków wymiennika, ukazując pierwszy z nich, poddawany czyszczeniu za pomocą szeregu dysz wodnych, w trakcie, gdy jest on wynurzany i ponownie zanurzany. Cykli wynurzania i zanurzania podczas jednego mycia powinno być kilka, aby zapewnić maksymalną skuteczność, a z kolei częstotliwość procesu mycia powinna być uzależniona od właściwości i ilości zanieczyszczeń w wodzie. Urządzenie czyszczące po zakończeniu mycia danego bloku wymiennikowego będzie przemieszczane nad kolejny blok.



Rys.2. Idea swobodnie przepływowych wymienników ciepła, ilustrująca proces czyszczenia pierwszego bloku wymiennikowego za pomocą dysz wodnych [Źródło – opracowanie własne]

Przedstawione rozwiązanie jest tylko ideowe, nie rozwiązujące wszystkich spodziewanych problemów technicznych. Te będą przedmiotem analiz i opracowywanych dokumentacji technicznych w przypadku pozytywnej ewaluacji projektu TEWEG. Przykładowo zastosowanie dużej ilości równocześnie pracujących dysz wodnych, może skutkować koniecznością doboru pompy o nieakceptowalnie zbyt dużej wydajności. Koncepcja będzie prawdopodobnie ewoluować w kierunku zastosowania tylko jednego rzędu dysz, które będą przemieszczane wzdłuż całego wymiennika w trakcie czyszczenia.

5. Podsumowanie

Obecnie wody wypompowywane z podziemi kopalń są zagospodarowane energetycznie w niewielkiej skali, pomimo że stanowią potencjalnie bardzo korzystne ekologicznie i ekonomicznie źródło ciepła. Problem zanieczyszczenia wód i brak dedykowanych pomp ciepła do tego rodzaju zanieczyszczonych wód stanowi podstawową barierę w ograniczaniu ich energetycznego wykorzystania. Tych barier jest oczywiście więcej, ale z uwagi na założone ramy rozdziału nie zostały one omówione. Z pewnością omówiony w pracy pośredni wymiennik ciepła może przyczynić się do zwiększenia zainteresowania energią cieplną wód kopalnianych. W lutym 2025 r. złożono projekt o akronimie TEWEG wnioskowany do NCBiR w ramach programu strategicznego „Nowe technologie w zakresie energii”. O ile projekt zostanie przyznany, szereg zaprezentowanych aspektów zastosowania pośredniego wymiennika ciepła zostanie praktycznie sprawdzonych przez zbudowanie instalacji 30 kW w pierwszym etapie projektu i 200 kW w drugim etapie projektu.

Literatura

1. European Commission: Directorate-General for Energy, *The use of mine water in district heating systems – An example from Heerlen, Netherlands*, Publications Office of the European Union, 024, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/962328>
2. Biuletyn Górniczy GIPH nr 7-8 (157-158) „Ekologia z wód kopalnianych energia i ciepło” Lipiec –Sierpień 2008 r.
3. Drwięga A., Smutek A., Korski J., Kulesza K., Szewerda K., Tokarczyk J., Nieśpiałowski K. - praca niepublikowana „Opracowanie podstaw techniczno-ekonomiczno-ekologicznych do wniosku projektowego pt. Technologia efektywnego wykorzystania energii geotermalnej wód z podziemi kopalń” ITG KOMAG, grudzień 2024 r.
4. Solik-Heliarz E., Małolepszy Z.: ”Możliwości wykorzystania energii geotermalnej z wód kopalnianych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym”, Konferencja „Geothermal Energy in Underground Mines”, 21-23.11. 2001, Ustroń.

5. www.os.not.pl/docs/czasopismo/2006/Jablonska_3-2006.pdf [dostęp 042025].
6. <https://www.athco-engineering.dk/products/therm-x/> [dostęp 27 marzec 2025].
7. <https://www.huber-se.com/products/detail/huber-wastewater-heat-exchanger-rowin/> [dostęp 27 marzec 2025].
8. <https://www.pozzienergy.it/dirty-and-waste-water-heat-recovery.php> [dostęp 27 marzec 2025].
9. <https://www.koelmann.de/en/self-cleaning-screw-heat-exchanger/> [dostęp 27 marzec 2025].
10. <https://www.alpinjet.pl/en/services/heat-exchanger-cleaning/> [dostęp 27 marzec 2025].
11. <https://www.pollutionsolutions-online.com/news/water-wastewater/17/alfa-laval-ltd/newnbspccompact-heat-exchanger-for-dirty-fluids/34857> [dostęp 27 marzec 2025].
12. <https://www.watco-group.co/back-flushing-heat-exchangers/> [dostęp 27 marzec 2025].

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.4>

Zespoły zasilania bateryjnego konstrukcji KOMAG-u do samojezdnych wozów strzelniczych pracujących w KGHM-Polska Miedź S.A.

Przemysław Deja – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Opracowane w Instytucie KOMAG zespoły zasilania bateryjnego do samojezdnych wozów strzelniczych, są alternatywą dla rozwiązania z zasilaniem przewodowym. Zespoły zasilania bateryjnego opracowano w trzech wykonaniach. Wykonanie pierwsze zespołu zasilania bateryjnego (ZB-1) zastosowano samojezdnym na wozie strzelniczym typu WS-172 produkcji KGHM-Zanam. Wykonanie drugie zespołu zasilania bateryjnego (ZB-2) zastosowano na samojezdnych wozach strzelniczych WS-153, WS-173 oraz WS-173/S produkcji KGHM-Zanam. Są to rozwiązania oparte na ogniwach litowo-jonowych typu A123. Wykonanie trzecie zespołu zasilania bateryjnego zastosowano samojezdnym na wozach strzelniczych typu SWS-1700ENB produkcji LENA-Wilków. Trzecie wykonanie zespołu zasilania bateryjnego oparte jest na ogniwach niklowo-sodowych. Zespół zasilania bateryjnego zasila silnik elektryczny, który napędza pompę hydrauliczną, a ta z kolei modułowe urządzenie pompowe służące do wytwarzania i ładowania materiału wybuchowego.

Słowa kluczowe: górnictwo, wóz strzelniczy, bezpieczeństwo, zasilanie bateryjne

KOMAG-designed battery power supply units for self-propelled blasting vehicles operating at KGHM-Polska Miedź S.A.

Abstract: The battery power supply units for self-propelled gunnery vehicles developed at the KOMAG Institute are an alternative to the cable-powered solution. The battery power supply units were developed in three versions. The first version of the battery power supply unit (ZB-1) was used on a self-propelled gunnery vehicle type WS-172 manufactured by KGHM-Zanam. The second version of the battery power supply unit (ZB-2) was used on self-propelled gunnery vehicles type WS-153, WS-173 and WS-173/S manufactured by KGHM-Zanam. These are solutions based on lithium-ion cells. The third version of the battery power supply unit was used on self-propelled gunnery vehicles type SWS-1700ENB manufactured by LENA-Wilków. The third version of the battery power supply unit is based on nickel-sodium cells. The battery power unit powers an electric motor, which drives a hydraulic pump, which in turn drives a modular pumping device used to generate and charge the explosive.

Keywords: mining, blasting vehicle, safety, battery powered

1. Wprowadzenie

W zakładach górniczych pozyskujących kopalinę ze skał zwięzłych lub bardzo zwięzłych o wysokiej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (ponad 150 MPa), urabianie realizowane jest z wykorzystaniem robót wiertniczo-strzałowych [1]. Po wywierceniu otworów strzałowych w przodku, następuje ich załadowanie materiałem wybuchowym. Po wykonaniu odstrzału, urobek odstawiany jest przy wykorzystaniu ładowarek kołowych i wozów odstawczych, a strop zostaje zabezpieczony z zastosowaniem wozów kotwiących. Maszyny przodkowe (tj. wozy wierzące, wozy strzelnicze, wozy kotwiące) posiadają dwa źródła zasilania: do przemieszczania stosuje się napęd spalinowy, natomiast w przodkach (z uwagi na warunki wentylacyjne i emisję toksycznych spalin do otaczającej atmosfery kopalnianej) stosuje się zasilanie energią elektryczną. Wymaga to każdorazowo, po przyjeździe maszyny na miejsce pracy, rozwinięcia przewodu elektrycznego i jego zwinięcia po zakończeniu operacji technologicznych.

W samojezdnym wozach strzelniczych do napędu układu jazdy zastosowany jest wysokoprężny silnik spalinowy. Natomiast do napędu urządzeń technologicznych zabudowanych w tych wozach stosowany jest silnik elektryczny, który napędza pompę hydrauliczną, a ta z kolei modułowe urządzenie pompowe służące do wytwarzania i ładowania materiału wybuchowego [1]. Obsadę wozu strzelniczego stanowią 3 osoby: dwóch górników strzałowych oraz operator. W dotychczasowych rozwiązaniach silnik elektryczny zasilany był z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 500 V za pośrednictwem umieszczonego na zwijaku przewodu elektrycznego. Każdorazowe rozwijanie oraz zwijanie przewodu jest uciążliwe, często ulega uszkodzeniom mechanicznym i zajmuje ok. 2/3 czasu wykonywania operacji związanych z umieszczeniem materiałów wybuchowych w otworach strzałowych. Dodatkowo stwarza duże zagrożenie obwałem skał dla pracującej załogi wozu w rejonie przodka.

W rozdziale przedstawiono wyniki prac jakie zrealizowano w Instytucie KOMAG w Gliwicach nad opracowaniem, wykonaniem oraz wdrożeniem zespołów zasilania bateryjnego do samojezdnym wozów strzelniczych, będących alternatywą wobec rozwiązania z zasilaniem przewodowym.

2. Zespoły zasilania bateryjnego

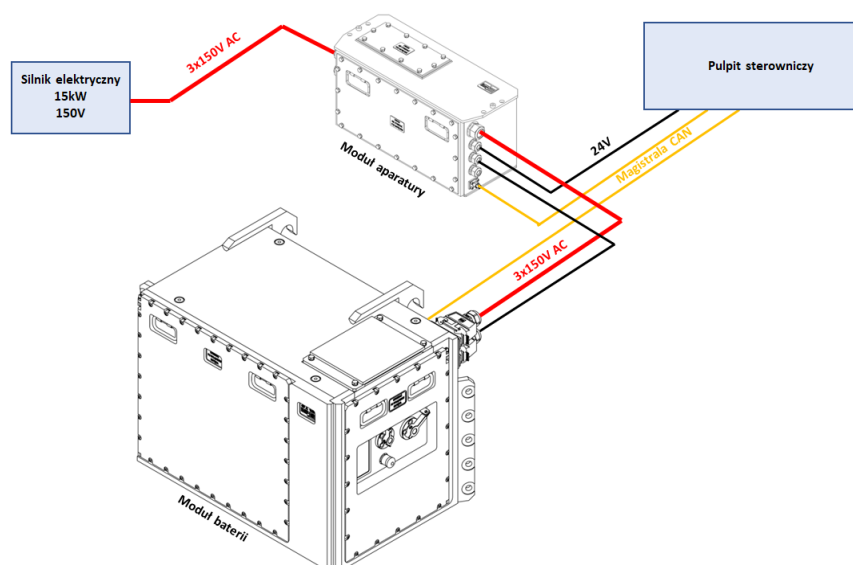
Zasadniczym celem konstruktorów na etapie projektowania zespołów zasilania bateryjnego do samojezdnym wozów strzelniczych była optymalizacja zużycia energii oraz podwyższenie bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Prace projektowo-konstrukcyjne zostały poprzedzone badaniami jakie wykonano w warunkach rzeczywistej eksploatacji istniejącego przewodowego układu zasilającego wozu strzelniczego.

Pierwsze wykonanie zespołu zasilania baterijnego opracowane w 2017 roku składało się z trzech podzespołów: modułu baterii (ZB-1), modułu aparatury (ZA-1) zabudowanych na wozie strzelniczym oraz wolnostojącego modułu ładowania (MW). Ze względu na ograniczoną przestrzeń konstrukcyjną wozu strzelniczego, wyposażenie elektryczne zespołu zasilania baterijnego zostało rozmieszczone w dwóch oddzielnych modułach: module baterii oraz module aparatury. Moduł baterii, zainstalowany bezpośrednio na wozie strzelniczym, zawiera zestaw ośmiu kaset z ogniwami litowo-żelazowo-fosforanowymi (LiFePO_4), wyposażonymi w system nadzoru BMS (ang. Battery Management System), a także falownik, wyłącznik główny, zasilacz 24 V oraz urządzenia kontrolno-zabezpieczające. Poszczególne obwody wyprowadzono za pomocą złączy wtykowych. Na bocznych drzwiach modułu baterii zamontowano napęd wyłącznika głównego, przełącznik trybu pracy (ładowanie/praca bateryjna), wyłącznik awaryjny oraz wziernik z wyświetlaczem. Zastosowane ogniwa baterii charakteryzują się hermetyczną obudową i nie emitują gazów w warunkach normalnej eksploatacji, co eliminuje ryzyko pożaru. Moduł aparatury, zawierający pozostałe elementy elektryczne, zainstalowano również wozie strzelniczym. Obwody elektryczne tego modułu, ze względu na stały charakter połączeń, wyprowadzono przez dławnice kablowe. Parametry techniczne zespołu zasilania baterijnego (wykonanie 1) przedstawiono w tabeli 1 (kolumna 2).

System BMS pełni kluczową rolę w ochronie i nadzorze zestawu baterii. Monitoruje napięcia poszczególnych ogniw, napięcie całkowite baterii, natężenie prądu (zarówno podczas ładowania, jak i rozładowywania), a także temperaturę ogniw. W oparciu o zaprogramowane ustawienia, system steruje procesami ładowania i rozładowywania, kontrolując przepływ prądu z uwzględnieniem granicznych wartości – maksymalnych i minimalnych. Podczas procesu ładowania oraz bezpośrednio po jego zakończeniu, BMS wyrównuje napięcia poszczególnych ogniw za pomocą wewnętrznych rezystorów bocznikowych. Każde ogniwo jest indywidualnie monitorowane, aby zapewnić, że napięcie nie przekroczy dopuszczalnych granic. Na podstawie danych wejściowych – temperatury, napięć, prądów oraz ustawień w profilu akumulatora – system oblicza opór wewnętrzny, a także dopuszczalne wartości prądu ładowania i rozładowania. Wyznaczone parametry są dostępne na magistrali CAN i wykorzystywane do sterowania wyjściami cyfrowymi, umożliwiającymi lub blokującymi ładowanie i rozładowanie baterii. Obliczenia te pozwalają również na szacowanie aktualnego stanu naładowania akumulatora.

Dodatkowo BMS realizuje funkcję wyrównywania napięć poprzez rozładowywanie ogniw, których napięcie przekracza poziom pozostałych. Warto zaznaczyć, że ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe, używane w systemie, są bezpieczne – podczas normalnej pracy nie wydzielają gazów i nie stwarzają zagrożenia pożarowego. Na rysunku 1 przedstawiono blokowy schemat elektryczny ilustrujący

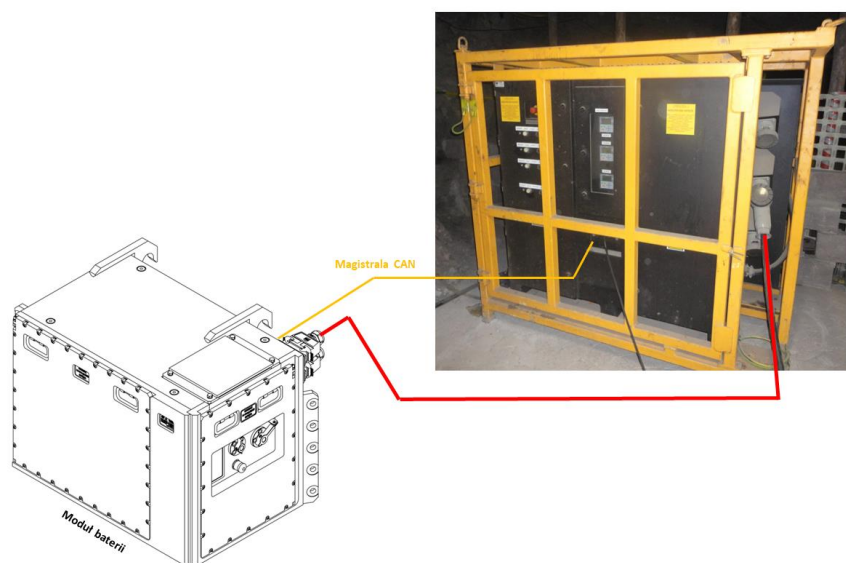
współpracę obu modułów z silnikiem elektrycznym o mocy 15 kW oraz pulpitem sterowniczym w trybie pracy bateryjnej.



Rys. 1. Blokowy schemat elektryczny (tryb pracy bateryjnej)

Moduł ładowania (MW) to wolnostojące urządzenie przeznaczone do ładowania modułu baterii (ZB-1). Jego producentem jest Zakład Energoelektroniki Twerd. Zasilanie modułu ładowania odbywa się z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 500 V, z izolowanym punktem neutralnym transformatora. Moduł posiada trzy niezależne wyjścia o mocy 20 kW każde, co umożliwia jednoczesne, bezpieczne ładowanie trzech modułów baterii o łącznej pojemności 96 kWh w czasie krótszym niż 2 godziny. Komunikacja z systemem nadzoru BMS realizowana jest przez magistralę CAN. Wyposażenie elektryczne modułu ładowania mieści się w metalowej obudowie o stopniu ochrony IP56, zabezpieczonej antykorozyjnie. Chłodzenie odbywa się pasywnie – wewnątrz szafy umieszczono wentylatory zapewniające cyrkulację powietrza.

Na rysunku 2 przedstawiono blokowy schemat elektryczny ukazujący współpracę modułu ładowania z modułem baterii podczas ładowania.



Rys. 2. Blokowy schemat elektryczny (tryb ładowania baterii)

Parametry techniczne zespołów zasilania bateryjnego

Tabela 1.

	Wykonanie 1	Wykonanie 2	Wykonanie 3
Rodzaj ogniw baterii	litowo-żelazowo-fosforanowe		sodowo-niklowe
Znamionowe napięcie baterii	264 V _{DC}		650 V _{DC}
Energia baterii	32 kWh		2 x 24,7 kWh
Napięcie znamionowe wyjściowe	3 x 150V; 50 Hz		3 x 400 V; 50 Hz
Maksymalna moc wyjściowa	15 kW		22 kW
Ładowanie baterii	Moduł ładowania baterii BCK-60	3x500V	3 x 500 V lub 3 x 1000 V
Doładowywanie baterii podczas jazdy wozu	brak		generator 3 x 500 V; 6 kW
Chłodzenie	pasywne		wodne
Interfejs komunikacyjny	magistrala CAN		
Stopień ochrony obudowy	IP 67		
Wymiary	1025 x 760 x 720 mm	1215 x 755 x 700 mm	1126 x 885 x 1270 mm
Masa	800 kg	875 kg	1250 kg

Proces ładowania przebiega w sposób całkowicie bezemisyjny, bezpieczny dla środowiska oraz ludzi, bez generowania zagrożenia pożarowego. Dzięki temu możliwe jest ładowanie baterii w dowolnym miejscu na terenie kopalni, bez konieczności korzystania ze specjalnych, wentylowanych pomieszczeń.

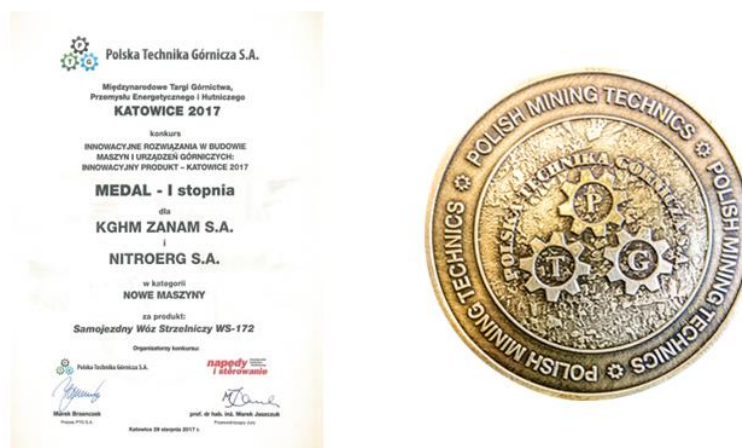
Pierwsze wykonanie zespołu zasilania bateryjnego zostało zastosowane w samojezdnym wozie strzelniczym WS-172 produkcji KGHM-Zanam (rys. 3). Po pomyślnym zakończeniu badań certyfikacyjnych i na podstawie decyzji Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego, wóz ten został dopuszczony do pracy w podziemiach kopalń. W latach 2018-2024 był eksploatowany w jednej z kopalń rudy miedzi, gdzie cieszył się bardzo dobrą opinią zarówno wśród górników strzałowych, jak i dozoru kopalnianego. Niemniej jednak, pewną niedogodnością tego rozwiązania pozostawała konieczność podjeżdżania wozu strzelniczego do dedykowanego modułu (MW) w celu naładowania baterii akumulatorów.



Rys. 3. Samojezdny wóz strzelniczy WS-172 produkcji KGHM-Zanam [2]

Wóz strzelniczy WS-172 był pierwszą na świecie maszyną wyposażoną w zasilanie bateryjne modułowego urządzenia do pompowania emulsyjnego materiału wybuchowego do otworów strzałowych oraz system podnoszenia kosza.

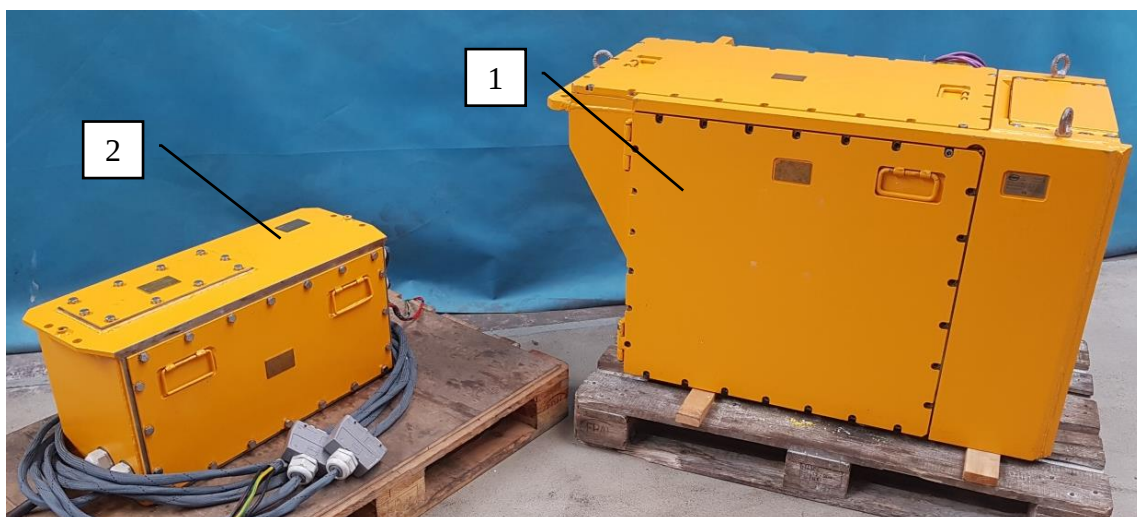
Samojezdny wóz strzelniczy WS-172 został wyróżniony jako innowacyjny produkt w kategorii „Nowe maszyny”. Nagroda została przyznana 29 sierpnia 2017 roku podczas Międzynarodowych Targów Górnictwa, Przemysłu Energetycznego i Hutniczego w Katowicach (rys. 4).



Rys. 4. Wyróżnienie - Innowacyjny produkt w kategorii „Nowe maszyny” [3]

Doświadczenia z pierwszego okresu eksploatacji wozu strzelniczego WS-172, a także analiza zgłaszanych uwag i sugestii jakościowych, umożliwiły rozpoczęcie w 2019 roku prac nad opracowaniem nowego, udoskonalonego rozwiązania zespołu zasilania bateryjnego dla układu roboczego samojezdnych wozów strzelniczych. Najistotniejszą zmianą w porównaniu do pierwotnej wersji było zintegrowanie ładowarki elektrycznej bezpośrednio w zespole baterii. Dzięki temu możliwe stało się ładowanie baterii bezpośrednio z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 500 V, bez potrzeby podjeżdżania wozu do dedykowanego stanowiska ładowania.

Projektując nowe rozwiązanie, konstruktorzy czerpali z doświadczeń zdobytych przy opracowywaniu pierwotnej wersji systemu. Głównym celem było zachowanie dotychczasowych parametrów technicznych, przy jednoczesnym zwiększeniu poziomu bezpieczeństwa oraz ergonomii obsługi. Nowa konstrukcja oraz zastosowane komponenty elektryczne bazują na rozwiązaniach z 2017 roku, uzupełnionych o dodatkowe elementy podnoszące funkcjonalność systemu. Jednym z wyzwań było umieszczenie ładowarki elektrycznej wewnątrz obudowy modułu baterii, przy ograniczonych możliwościach zwiększenia jego gabarytów. Podobnie jak w pierwotnym rozwiązaniu, z uwagi na ograniczoną przestrzeń na wozie oraz wymagania odbiorcy dotyczące wymiarów, wszystkie elementy elektryczne układu zasilającego zostały rozmieszczone w dwóch podzespółach: module baterii ZB-2 oraz module aparatury ZA-2 (rys. 5).



Rys. 5. Zespół zasilania bateryjnego (wykonanie 2) [3]

1) moduł baterii ZB-2, 2) moduł aparatury ZA-2

Proces ładowania baterii trwa maksymalnie 3,5 godziny, w zależności od stopnia jej rozładowania i odbywa się w sposób bezpieczny zarówno dla środowiska, jak i dla ludzi. Z tego względu możliwe jest ładowanie baterii w dowolnym miejscu w kopalni, bez potrzeby kierowania wozu do specjalnie wentylowanych pomieszczeń. Zwiększony czas ładowania w stosunku do wykonania pierwszego związany z aspektem termicznym. Zabudowanie dodatkowego elementu w postaci ładowarki w obudowie modułu baterii (ZB-2) jest dodatkowym i znaczącym źródłem ciepła. W związku z tym dla zapewnienia poprawności działania urządzenia konieczne było zmniejszenie prądu ładowania, a co za tym idzie zwiększenie czasu ładowania baterii. Parametry techniczne zespołu zasilania bateryjnego (wykonanie 2) przedstawiono w tabeli 1 (kolumna 3).

Nowe rozwiązanie w postaci drugiego wykonania zespołu zasilania bateryjnego zostało zastosowane w samojezdnym wozach strzelniczych typu WS-153, WS-173 oraz WS-173/S produkowanych przez KGHM-Zanam w Polkowicach (rys. 6). Wozy te po pozytywnym zakończeniu badań decyzją Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego zostały dopuszczone do pracy w podziemiach kopalń rudy miedzi. W 2020 r. w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach zbudowano 12 egzemplarzy drugiego wykonania zespołu zasilania bateryjnego [4]. Od lutego 2021 roku wozy strzelnicze z nowym wykonaniem zespołu zasilania bateryjnego sukcesywnie wprowadzane zostały do pracy w kopalniach rudy miedzi, gdzie są eksploatowane do dnia dzisiejszego, uzyskując również się bardzo dobrą opinię użytkowników. Zastosowanie wewnętrznej ładowarki elektrycznej pozwala na ładowanie baterii akumulatorów w dowolnym miejscu z sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 500 V, bez konieczności dojazdu wozu strzelniczego do komory ładowania.



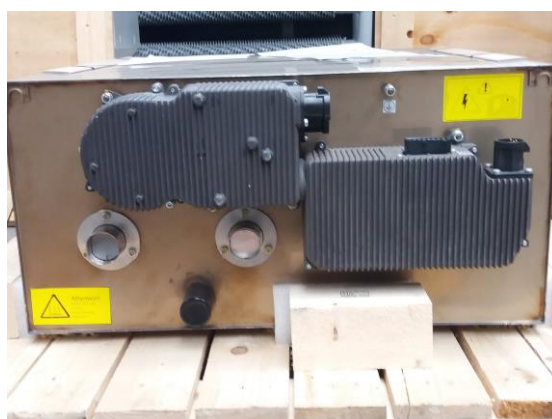
Rys. 6. Wóz strzelniczy produkcji KGHM-Zanam [7]

a) typu WS-153, b) typu WS-173, c) typu WS-173/S

Kolejnym etapem rozwoju zespołu zasilania bateryjnego (wykonanie 3) (rys. 7) jest zastosowanie baterii sodowo-niklowych (rys. 8). Rozwiązanie to zostało wdrożone w 2023 roku w samojezdnych wozach strzelniczych typu SWS-1700ENB produkowanych przez firmę Lena Wilków Sp. z o.o. (rys. 9). Sterowanie zespołem zasilania odbywa się z poziomego panelu sterującego, zainstalowanego w kabinie operatora wozu. W tej samej kabinie umieszczono również złącza diagnostyczne, służące do celów serwisowych. Wykonanie 3 umożliwia zasilanie silnika elektrycznego o mocy 22 kW i napięciu 400 V. Ładowanie baterii odbywa się z kopalnianej sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 500 V lub 1000 V. Wybór napięcia ładowania odbywa się automatycznie – nie wymaga manualnych przełączy elektrycznych. Zastosowano dwa osobne przewody: jeden dedykowany napięciu 500 V, drugi – 1000 V. Dzięki odpowiedniemu kodowaniu przewodów, system sterowania samodzielnie rozpoznaje, do której sieci został podłączony. Dodatkowo, w trakcie jazdy wozu możliwe jest doładowywanie baterii z pokładowego generatora elektrycznego o mocy 6 kW. Parametry techniczne zespołu zasilania bateryjnego (wykonanie 3) przedstawiono w tabeli 1 (kolumna 4).



Rys. 7. Zespół zasilania bateryjnego (wykonanie 3) [5]



Rys. 8. Bateria sodowo-niklowa [materiały własne]



Rys. 9. Wóz strzelniczy SWS-1700ENB produkcji LENA-Wilków [8]

Panel sterowania zapewnia zarówno tekstową, jak i graficzną sygnalizację alarmową oraz umożliwia monitorowanie przebiegu kluczowych procesów — pracy silnika elektrycznego, ładowania baterii z sieci oraz z generatora. Wszystko to prezentowane jest w formie ekranu synoptycznego oraz zestawień parametrów roboczych. W panelu zaimplementowano program zarządzający pracą zespołu zasilania. Natomiast w samym zespole zasilania bateryjnego zainstalowano programowalny sterownik, dedykowany do aplikacji mobilnych. Pełni on rolę modułu wejść/wyjść i umożliwia sterowanie urządzeniami wewnętrznymi systemu. Komunikacja pomiędzy panelem sterowania, sterownikiem, systemem MBS (nadzorującym pracę baterii), falownikiem oraz ładowarką odbywa się za pośrednictwem magistrali CAN. Magistrala ta wykorzystywana jest również do przesyłania danych do wyświetlacza parametrów, zainstalowanego bezpośrednio w zespole zasilania. Wyświetlacz ten posiada funkcjonalność zbliżoną do panelu operatorskiego, a jego lokalizacja w samym zespole znacząco usprawnia obsługę serwisową.

W Wykonaniu 3 zespołu zasilania bateryjnego zastosowano baterie serii Z60 o napięciu znamionowym 650 V i pojemności 38 Ah. Są to baterie wysokotemperaturowe, których ogniwa zostały termicznie odizolowane od obudowy i umieszczone w komorze z utrzymywaną wewnątrz próżnią. Na zewnątrz obudowy każdej baterii znajduje się moduł elektroniczny BMI, pełniący funkcje kontrolno-sterujące. Seria Z60 została zaprojektowana z myślą o aplikacjach mobilnych, dlatego zastosowano w niej szczelne, odporne na wstrząsy złącza, a komunikacja z elektroniką baterii odbywa się za pomocą magistrali CAN. System sterowania baterii umożliwia również pomiar rezystancji izolacji elektrycznej, a w przypadku wykrycia zagrożenia — automatycznie odłącza zaciski baterii od obciążenia po zaniku zasilania linii EMERGENCY. Bateria może być wyposażona w opcjonalny układ chłodzenia powietrznego, który pozwala na odprowadzenie nadmiaru ciepła po intensywnej eksploatacji. W tym przypadku zrezygnowano jednak z tego rozwiązania ze względu na stosunkowo niskie obciążenie oraz przerywany charakter pracy tych jednostek.

Funkcjonalność modułu BMI obejmuje sterowanie wbudowanymi stycznikami, zarządzanie obwodami rozgrzewania baterii, pomiar rezystancji izolacji oraz funkcje komunikacyjne i pomiarowe (w tym pomiar napięcia, prądu, temperatury baterii oraz obliczanie SOC). Dodatkowo, BMI wyposażono w układ łagodnego startu („precharge”), który ogranicza prąd rozruchowy baterii, oraz w funkcje autodiagnostyki. W razie potrzeby moduł zgłasza błędy na czterech poziomach istotności, które mają różny wpływ na działanie baterii – od poziomu informacyjnego po natychmiastowe odłączenie baterii od instalacji wozu strzelniczego [6].

Bateria wyposażona jest w dwie grzałki. Pierwsza, o mocy 750 W, zasilana jest z sieci 230V AC (50/60 Hz) i służy do rozgrzewania baterii, także podczas ładowania. Czas potrzebny na rozgrzanie baterii z temperatury tzw zimnej do temperatury umożliwiającej ładowanie i pracę wynosi

standardowo do 24 godzin. Druga grzałka, o mniejszej mocy 200 W, zasilana napięciem DC z baterii, służy do utrzymania temperatury baterii.

W pojazdach pracujących w kopalniach podziemnych konieczne jest zainstalowanie transformatora, który dostarcza napięcie 230 V (zasilanie z 500 V lub 1000 V). Wiąże się to z koniecznością wygospodarowania dodatkowego miejsca na transformator oraz jego osprzęt (stycznik, bezpiecznik itp.). Warto także zauważyć, że nie w każdej lokalizacji ładowania dostępne jest zasilanie 230 V, które można wykorzystać. Ponadto, wymagałoby to podłączenia dodatkowego przewodu i obecności dodatkowego gniazda.

Ładowanie baterii jest procesem długotrwałym, który składa się z dwóch głównych faz. Pierwsza to faza ładowania stałym prądem o natężeniu 10 A (faza CC), która następnie przechodzi w fazę ładowania przy stałym napięciu wynoszącym $672,8 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$ (faza CV). Proces ładowania kończy się, gdy prąd spadnie poniżej wartości 0,5 A przez ustalony czas. Podczas procesu ładowania występuje przerwa zarządzana przez moduł BMI, typowo przy osiągnięciu poziomu SOC = 80%. Przerwa ta trwa od 25 do 30 minut i jest niezbędna do przeprowadzenia wewnętrznego testu OCV (napięcia otwartego obwodu). W tym czasie mierzone jest napięcie spoczynkowe baterii oraz skuteczność grzania za pomocą wbudowanej grzałki DC. Zaleca się pełne naładowanie baterii (osiągnięcie stanu EOC) w każdym cyklu ładowania, a także co 24 godziny, w trakcie użytkowania baterii. Jeśli bateria pozostaje nieładowana przez 36 godzin od osiągnięcia ostatniego stanu EOC, generowane jest ostrzeżenie, a po kolejnych 24 godzinach pojawia się ponaglenie do przeprowadzenia pełnego procesu ładowania. Po tym okresie, aby zapobiec dalszemu rozładowaniu, uruchamiane są ograniczenia prądu rozładowania, a w ostateczności następuje blokada rozładowania, która zostaje zdjęta dopiero po przeprowadzeniu pełnego ładowania do stanu EOC.

Zalecany czas rozładowania baterii wynosi minimum 2 godziny. Chwilowe rozładowania o wyższej mocy są dopuszczalne, pod warunkiem, że całkowity czas rozładowania nie będzie krótszy niż 2 godziny. W takich przypadkach należy uwzględnić wzrost temperatury wewnętrznej baterii oraz w razie potrzeby, zastosowanie układu chłodzenia. Dla pojedynczej baterii o pojemności 38 Ah dopuszczalny chwilowy prąd rozładowania wynosi 85 A, co odpowiada chwilowej mocy przekraczającej 50 kW. Moc ciągła, która zapewnia rozładowanie w ciągu 2 godzin, wynosi około 12 kW (zależnie od napięcia baterii). Prąd powodujący błąd w systemie i generujący komunikat o zwarcu to 270 A.

Do magistrali B-CAN można również podłączyć komputer diagnostyczny z oprogramowaniem ZEBRA Monitor. Program ten służy do monitorowania stanu baterii, odczytu bieżących informacji diagnostycznych, analizy danych historycznych oraz resetowania błędów. Umożliwia również

rejestrację danych w czasie rzeczywistym, co jest pomocne przy analizie anomalii. S. Protokół wymiany danych na magistrali B-CAN jest niejawny i nieudostępniany użytkownikowi.

Samojezdne wozy strzelnicze SWS-1700ENB z zespołem zasilania bateryjnego (wykonanie 3) z początkiem 2023 roku zostały wdrożone w podziemnych wyrobiskach KGHM Polska Miedź S.A. Zakładu Górniczego Rudna w liczbie 11 sztuk.



Rys. 10. Platynowy medal

Samojezdny wóz strzelniczy SWS-1700ENB z zespołem zasilania bateryjnego został nagrodzony platynowym medalem (rys. 10) podczas 17. Międzynarodowych Targów Wynałazków i Innowacji INTARG 2024, które odbyły się 21-23 maja 2024 r. w Międzynarodowym Centrum Kongresowym w Katowicach.

Wszystkie przedstawione wykonania w rozdziale zespoły zasilania bateryjnego poddano badaniom akredytacyjnym w Laboratorium Badań Stosowanych Instytutu KOMAG. Badania przeprowadzono zgodnie z zaleceniami obowiązujących norm i procedur badawczych. Każde wykonanie poddano badaniom typu oraz wyrobu, które obejmowało:

- badanie stopnia ochrony, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 60529:2003+A2:2014-07,
- test klimatyczny Bd (suche gorąco), zgodnie z normą PN-EN 60068-2-2:2009 oraz PN-G-50003:2003,
- test klimatyczny wilgotne gorąco stałe, zgodnie z wewnętrzną procedurą badawczą Laboratorium Badań Stosowanych ITG KOMAG,
- pomiary rezystancji izolacji, zgodnie z normą PN-G-50003:2003,
- pomiary wytrzymałości elektrycznej izolacji, zgodnie z normą PN-G-50003:2003,
- pomiary odstępów izolacyjnych, zgodnie z normą PN-G-50003:2003,

- kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), zgodnie z normą PN-EN IEC 61000-6-2: 2019-04 oraz PN-EN IEC 61000-6-4:2019-12,
- testy funkcjonalne według wewnętrznej procedury ITG KOMAG.

Zespoły zasilania bateryjnego są eksploatowane w bardzo trudnych warunkach środowiskowych, gdzie temperatura otoczenia dochodzi do 55°C, a wilgotność powietrza do 98%. Duża agresywność wody kopalnianej oraz zapylenie pyłem kaniennym negatywnie wpływa na stan obudowy urządzeń. Ponadto cały układ elektryczny narażony jest na wstrząsy oraz uderzenia i udary mechaniczne podczas jazdy wozu strzelniczego.

4. Podsumowanie

Przedstawione w pracy zespoły zasilania bateryjnego do samojezdných wozów strzelniczych mogą być stosowane w podziemnych, niemietanowych zakładach górniczych, wydobywających rudy metali i zakładach górniczych wydobywających inne kopaliny.

Rozwiązania przedstawione w niniejszym rozdziale cechują efekty proekonomiczne jak również efekty zwiększające bezpieczeństwo m.in.:

- zwiększenie efektywności pracy wozu strzelniczego, w stosunku do dotychczasowych rozwiązań z zasilaniem przewodowym, poprzez skrócenie czasu operacji ładowania materiału wybuchowego do otworów strzałowych,
- zapewnienie pracy wozu do 3 zmian roboczych po jednym naładowaniu baterii (zaaplikowanie ponad 2 ton ładunku wybuchowego we wcześniej wykonanych otworach strzałowych),
- zwiększenie mobilności wozu podczas operacji ładowania materiału wybuchowego do otworów strzałowych – w przypadku nagłego zagrożenia, maszyna może być natychmiast wycofana z przodka,
- zwiększenie bezpieczeństwa prac poprzez wyeliminowanie wykonywanych prac poza kabiną związanych z rozwinięciem i zwinięciem kabla zasilającego,
- ograniczenie emisji spalin oraz hałasu przodkach,
- możliwość ładowania baterii z kopalnianej sieci elektrycznej o napięciu znamionowym 500 V lub 1000 V (różne rejony kopalni),
- funkcjonalny interfejs dla operatora wozu z pełnym, bieżącym monitoringiem parametrów pracy baterii, w każdym stanie jej pracy.

We wszystkich wcześniejszych rozwiązaniach wozów strzelniczych stosowano zasilanie z przewodem elektrycznym bądź silnikiem spalinowym. Rozwijanie przewodu elektrycznego w przodku jest trudne i czasochłonne, stwarza zagrożenie obwałami skał, stąd operatorzy wybierają czasami zasilanie z silnika spalinowego pomimo uciążliwości związanej ze spalinami i pogorszeniem mikroklimatu oraz komfortu pracy.

Przedstawione w rozdziale alternatywne rozwiązania zespołów zasilania bateryjnego znacząco poprawiają stopień bezpieczeństwa i komfort pracy operatora oraz górników strzałowych.

Literatura

1. Marcinowicz I., Górniak J.: Rozwój wozów strzelniczych – pracować bezpieczniej i szybciej. Napędy Sterowanie 2019 nr 7/8 s. 64-67.
2. Deja P., Okrent K., Polnik B.: Zastosowanie ogniw litowych do zasilania urządzeń technologicznych w górniczych wozach strzelniczych. Maszyny Górnicze 2019 nr 3 s. 42-49.
3. Deja P., Okrent K., Polnik B.: Akumulatorowy zespół zasilający samojezdnego wozu strzelniczego. Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe 2019 nr 122 s. 9-13.
4. Deja P., Skóra M., Hylla P.: ZZB battery supply unit for the self-propelled SWS-1700ENB blast truck, Mining Machines 2024 nr 4 s. 249-263.
5. Deja P., Hylla P., Polnik P., Skóra M., Niedworok A. Nowe rozwiązanie akumulatorowego układu zasilającego dla samojezdných wozów strzelniczych. Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność - Niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice. - 2021, s. 82-88.
6. FZSONICK SA. (2023). 202302_UM-Zebra Battery Handbook EN FZS_Rev2.3. FZSONICK SA. Available at: <http://www.FZSONICK.com>
7. <http://www.kghmzanam.com> (dostęp: 03.04.2025).
8. <https://lena.com.pl/> (dostęp: 03.04.2025).

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.5>

Zastosowanie autorskiego oprogramowania ITG KOMAG do analizy zużycia i prognozowania produkcji energii z OZE

Joanna Rogala-Rojek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Sławomir Bartoszek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Jakub Bernatt – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono rezultaty opracowania i walidacji autorskiego oprogramowania ITG KOMAG przeznaczonego do analiz techniczno-ekonomicznych w projektach związanych z odnawialnymi źródłami energii (OZE). System został zaprojektowany z myślą o wspieraniu procesów decyzyjnych związanych z projektowaniem i optymalizacją instalacji fotowoltaicznych, w tym prognozowaniem produkcji energii oraz analizą profilu zużycia. Narzędzie wykorzystuje środowisko programistyczne łączące graficzny interfejs użytkownika i obsługę baz danych z obliczeniami realizowanymi za pomocą skryptów w języku Python (z wykorzystaniem bibliotek, takich jak pvlib, Pandas czy scikit-learn), co umożliwia elastyczne przetwarzanie danych oraz modelowanie scenariuszy energetycznych zgodnie z założeniami Przemysłu 4.0 i Internetu Rzeczy (IoT). Szczególny nacisk położono na ocenę profilu zużycia energii w obiektach instytucjonalnych, umożliwiając identyfikację obszarów o ponadprzeciętnym zapotrzebowaniu, występowaniu sezonowości oraz charakterystycznych wzorców dobowych. Dokładna analiza struktury i dynamiki zużycia pozwala na identyfikację potencjalnych nieefektywności energetycznych oraz wskazanie kierunków działań optymalizacyjnych. Analizy przeprowadzono na przykładzie danych rzeczywistych pochodzących z infrastruktury Instytutu KOMAG. W literaturze przedmiotu rośnie liczba publikacji poświęconych zastosowaniu metod AI w sektorze energetycznym, szczególnie modeli, takich jak LSTM, XGBoost czy sieci neuronowe do prognoz krótkoterminowych, co stanowi kierunek rozwoju aplikacji ITG KOMAG. W rozdziale podkreślono rolę danych pomiarowych wysokiej rozdzielczości jako fundamentu skutecznych modeli predykcyjnych.

Słowa kluczowe: OZE, fotowoltaika, mikrosieci, magazynowanie energii, prognozowanie zapotrzebowania

Application of proprietary ITG KOMAG software for consumption analysis and forecasting of energy production from renewable energy sources

Abstract: The chapter presents the results of the development and validation of ITG KOMAG's proprietary software designed for technical and economic analyses in projects related to renewable energy sources (RES). The system was designed to support decision-making processes related to the design and optimization of photovoltaic installations, including energy production forecasting and consumption profile analysis. The tool uses a programming environment that combines a graphical user interface and database support with calculations performed using Python scripts (using libraries such as pvlib, Pandas, and scikit-learn), which enables flexible

data processing and energy scenario modeling in line with Industry 4.0 and the Internet of Things (IoT) principles. Particular emphasis was placed on assessing the energy consumption profile in institutional facilities, enabling the identification of areas with above-average demand, seasonality, and characteristic daily patterns. A thorough analysis of the structure and dynamics of consumption allows for the identification of potential energy inefficiencies and the indication of directions for optimization measures. The analyses were carried out using real data from the KOMAG Institute's infrastructure. The number of publications devoted to the application of AI methods in the energy sector is growing, particularly models such as LSTM, XGBoost, and neural networks for short-term forecasting, which is the direction of development for ITG KOMAG applications. The chapter emphasizes the role of high-resolution measurement data as the foundation for effective predictive models.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaics, microgrids, energy storage, demand forecasting

1. Wprowadzenie

Transformacja energetyczna w kierunku odnawialnych źródeł energii (OZE) stanowi kluczowy element globalnych strategii przeciwdziałania zmianom klimatycznym, poprawy bezpieczeństwa energetycznego oraz redukcji zależności od paliw kopalnych. W odpowiedzi na rosnące zagrożenia klimatyczne i polityczne, państwa oraz organizacje międzynarodowe intensyfikują działania zmierzające do dekarbonizacji gospodarki oraz zwiększenia udziału energii pochodzącej z OZE. Zgodnie z najnowszymi prognozami Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA, 2024), roczne przyrosty mocy zainstalowanej w OZE wzrosną z 666 GW w 2024 roku do niemal 935 GW w roku 2030. Dominującą rolę odgrywać będą systemy fotowoltaiczne i elektrownie wiatrowe, które dzięki niższym kosztom wytwarzania energii oraz korzystnemu otoczeniu regulacyjnemu odpowiadać będą za około 95% nowych instalacji. W efekcie globalna moc zainstalowana w odnawialnych źródłach energii zwiększy się w latach 2024–2030 o ponad 5500 GW, co oznacza tempo ponad dwukrotnie szybsze niż w poprzednich sześciu latach [1, 2].

W obliczu tak dynamicznego rozwoju sektora odnawialnych źródeł energii rośnie zapotrzebowanie na narzędzia analityczne wspierające podejmowanie racjonalnych decyzji inwestycyjnych. Kluczowe znaczenie zyskują rozwiązania umożliwiające kompleksową ocenę opłacalności projektów, uwzględniającą zarówno uwarunkowania techniczne, jak i ekonomiczne. W odpowiedzi na te potrzeby, w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG opracowano autorskie narzędzie przeznaczone do wspomagania projektantów i inwestorów w planowaniu oraz optymalizacji inwestycji w OZE. Narzędzie to umożliwia przeprowadzanie analiz techniczno-ekonomicznych, wspierając tym samym proces transformacji energetycznej na poziomie lokalnym i regionalnym.

Instytut KOMAG od wielu lat prowadzi prace badawczo-rozwojowe w obszarze odnawialnych źródeł energii, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z fotowoltaiką oraz systemów

wspomagających ich eksploatację. Obecnie, prowadzone w Instytucie badania ukierunkowane są na rozwój praktycznych narzędzi analitycznych, które umożliwiają ocenę efektywności pracy instalacji OZE oraz optymalizację ich integracji z odbiornikami energii [3, 4, 5].

2. Metodyka

W niniejszym rozdziale zaprezentowano autorskie oprogramowanie opracowane w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, służące do analizy zużycia energii oraz prognozowania produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE). Narzędzie zostało zaprojektowane jako system ekspercki wspomagający proces projektowania, optymalizacji oraz oceny techniczno-ekonomicznej instalacji opartych na fotowoltaice i magazynach energii. Rozwiązanie odpowiada na rosnącą potrzebę integracji danych lokalnych, prognoz meteorologicznych i modeli fizycznych w planowaniu rozproszonych systemów energetycznych, zgodnie z założeniami Przemysłu 4.0 oraz koncepcją Internetu Rzeczy (IoT).

Oprogramowanie opracowano w środowisku umożliwiającym budowę aplikacji desktopowych z graficznym interfejsem użytkownika oraz integrację z modułami obliczeniowymi zaimplementowanymi w języku Python. W celu umożliwienia bezpośredniego wykonywania skryptów Pythona oraz integracji z zaawansowanymi funkcjami analitycznymi i obliczeniowymi opracowanymi w tym języku, w przedmiotowym rozwiązaniu zastosowano bibliotekę Python4Delphi (P4D). Pozwoliło to na powiązanie środowiska programistycznego (IDE) z interpreterem Pythona, co umożliwia wymianę danych pomiędzy logiką aplikacyjną a zewnętrznymi modułami analitycznymi. Zastosowana architektura pozwala na połączenie responsywnej warstwy interfejsowej z zaawansowanymi funkcjonalnościami analitycznymi, opartymi na bibliotekach Python, takich jak *pvlib*, *NumPy*, *Pandas*, *Matplotlib* i *scikit-learn*. Rozdzielenie warstw obliczeniowej i prezentacyjnej umożliwia elastyczne rozwijanie aplikacji oraz integrację nowych algorytmów i źródeł danych [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Python4Delphi to zestaw komponentów typu open-source umożliwiających integrację interpretera Pythona z aplikacjami tworzonymi w środowiskach programistycznych obsługujących kompilację natywną. Komponenty te pozwalają na wykonywanie skryptów Python, tworzenie własnych modułów i typów, a także budowę rozszerzeń w postaci dynamicznych bibliotek współdzielonych (DLL). P4D udostępnia funkcjonalność na różnych poziomach: od niskopoziomowego dostępu do API Pythona, poprzez wysokopoziomą, dwukierunkową interakcję z aplikacją, aż po odwzorowywanie obiektów i klas z użyciem mechanizmów RTTI (Run-Time Type Information).

Zastosowanie P4D umożliwia łatwe wykorzystanie języka Python jako zintegrowanego języka skryptowego w aplikacjach rozwijanych w tradycyjnych środowiskach kompilowanych. Rozwiązanie to sprawdza się szczególnie w projektach wymagających zaawansowanej analizy danych, przetwarzania numerycznego lub korzystania z bibliotek uczenia maszynowego i obliczeń naukowych. Biblioteka P4D objęta jest licencją MIT (Massachusetts Institute of Technology License), czyli otwartą licencją zezwalającą na swobodne korzystanie, modyfikowanie i rozpowszechnianie oprogramowania, i jest wspierana przez aktywną społeczność użytkowników, a jej dokumentacja zawiera szeroki zbiór przykładów i samouczków ułatwiających praktyczne wdrożenie.

Jedną z kluczowych części narzędzia jest moduł do modelowania systemów PV, oparty na bibliotece pvlib. Wykorzystano w nim klasę ModelChain, umożliwiającą symulację produkcji energii w zadanych warunkach. Parametry wejściowe mogą być podane przez użytkownika lub pobrane z bazy danych (np. Sandia, CEC). System umożliwia również korzystanie z danych meteorologicznych opartych na TMY (Typical Meteorological Year), pozyskiwanych ze źródeł takich jak Climate.OneBuilding.org. Wyniki symulacji zawierają informacje na temat profilu generacji energii oraz uzysku rocznego, co umożliwia wstępną ocenę opłacalności inwestycji i dopasowanie instalacji do rzeczywistego profilu zużycia.

Istotną częścią oprogramowania jest moduł analizy magazynowania energii, który na podstawie danych zużycia i produkcji energii umożliwia określenie: poziomu autokonsumpcji energii z OZE, niezależności energetycznej obiektu, zapotrzebowania na pojemność magazynu dobowego oraz bilansu energetycznego (nadwyżki i niedobory w ujęciu dobowym i miesięcznym). Zaimplementowane algorytmy pozwalają również analizować wpływ pojemności magazynu na zwiększenie samowystarczalności energetycznej oraz ocenić optymalny punkt pracy systemu w kontekście opłacalności inwestycji.

W narzędziu zaimplementowano również funkcje umożliwiające analizę i prognozowanie zapotrzebowania na energię. Modele prognozujące opracowano w języku Python z wykorzystaniem bibliotek Pandas i scikit-learn, co umożliwia uwzględnienie szeregu czynników wpływających na konsumpcję energii, takich jak: sezonowość i zmienność dzienna oraz dni tygodnia i święta. Wizualizacje wyników generowane są w postaci wykresów godzinowych, dobowych i miesięcznych, co umożliwia identyfikację charakterystycznych wzorców konsumpcji oraz dostosowanie instalacji OZE do profilu zużycia.

Opracowane oprogramowanie zostało zaprojektowane w sposób modułowy i skalowalny, co pozwala na jego dalszy rozwój oraz elastyczne dostosowywanie do zmieniających się wymagań użytkowników. Architektura systemu umożliwia integrację z komponentami analitycznymi

opracowanymi w języku Python, co stwarza szerokie możliwości rozbudowy narzędzia o kolejne algorytmy, moduły optymalizacyjne oraz dostęp do zewnętrznych baz danych. Dzięki temu system może być w przyszłości wykorzystywany w różnych skalach projektowych: od analiz pojedynczych budynków, przez lokalne mikrosieci, aż po kompleksowe instalacje przemysłowe.

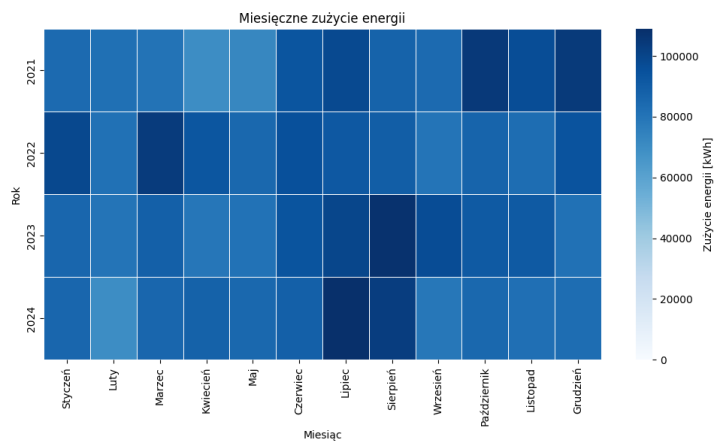
3. Wyniki

Zastosowanie autorskiego oprogramowania opracowanego w ITG KOMAG umożliwiło przeprowadzenie kompleksowej analizy zużycia energii elektrycznej w obiekcie badanym w latach 2021–2025 (2025 – I kwartał). Analizie poddano profile zużycia energii w różnych przedziałach czasowych (rocznym, miesięcznym, tygodniowym i dobowym), rozkład zużycia względem stref taryfowych, strukturę opłat związaną z energią bierną oraz występowanie przekroczeń mocy zamówionej. Narzędzie pozwoliło również na przeliczenie danych według alternatywnych systemów taryfowych, umożliwiając ocenę potencjału oszczędnościowego wynikającego z ich wdrożenia.

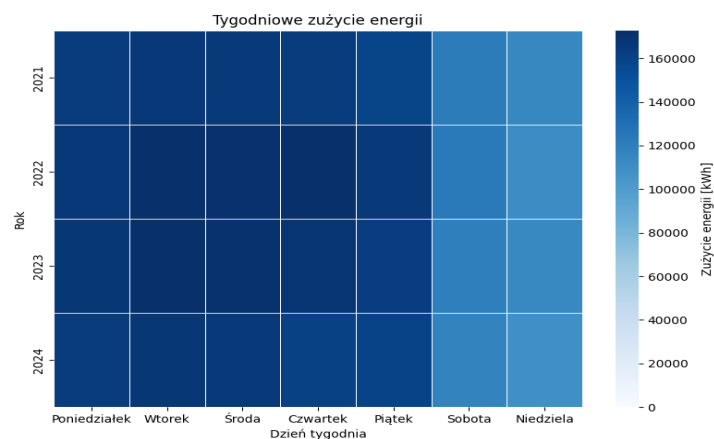
Na podstawie opracowanych skryptów analitycznych zaimplementowanych w języku Python, wykorzystujących metodę map ciepła (ang. heatmaps), możliwe było przeprowadzenie szczegółowej analizy struktury czasowej zużycia energii elektrycznej. Mapy ciepła umożliwiają przedstawienie dużych wolumenów danych pomiarowych w formacie wielowymiarowym. Ich zastosowanie pozwala na jednoczesne uchwycenie zmienności sezonowej, dobowej oraz tygodniowej, co wspomaga proces identyfikacji powtarzalnych wzorców zużycia, anomalii operacyjnych oraz cyklicznych zależności charakterystycznych dla analizowanego obiektu lub systemu energetycznego.

Roczny profil zużycia energii elektrycznej w analizowanym okresie 2021-2024 wykazał względną stabilność. Wartości mieściły się w przedziale od 1046 MWh (2024) do 1085 MWh (2022), bez istotnych odchyleń w trendzie. Średni miesięczny rozkład ujawnił wyraźną sezonowość. Najwyższe zużycie odnotowano w miesiącach letnich (czerwiec - sierpień), a najniższe w okresie zimowo-wiosennym (luty - maj). Mapa ciepła potwierdziła te obserwacje, wskazując na powtarzalność wzorców sezonowych w ujęciu rocznym.

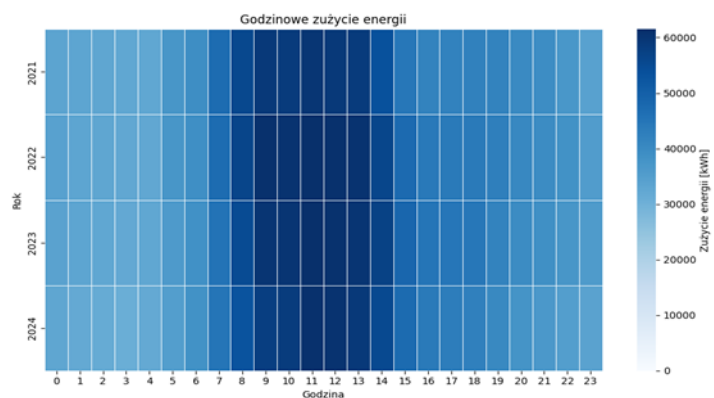
Analiza dni tygodnia wykazała, że największe zużycie przypada na dni robocze, ze szczytem w środkowej części tygodnia (wtorek - czwartek), natomiast weekendy charakteryzują się znaczącym spadkiem zapotrzebowania na energię. Dobowy profil zużycia ujawnił typowy rozkład z minimalnym zużyciem w godzinach nocnych (00:00 - 05:00) i maksymalnym w godzinach przedpołudniowych (szczyt między 09:00 a 13:00). Taki układ godzinowy odpowiada intensywnemu wykorzystaniu urządzeń biurowych w godzinach pracy (rys. 1, 2, 3).



Rys. 1. Zużycie energii w poszczególnych miesiącach w latach 2021-2024 (tzw. mapa ciepła)



Rys. 2. Zużycie energii w poszczególnych dniach tygodnia w latach 2021-2024 (tzw. mapa ciepła)



Rys. 3. Zużycie energii w poszczególnych godzinach doby w latach 2021-2024 (tzw. mapa ciepła)

Instytut objęty analizą korzysta obecnie z taryfy B21, czyli taryfy jednostrefowej, w której obowiązuje jednolita stawka za dystrybucję energii elektrycznej niezależnie od pory dnia. Taryfa ta

jest najprostsza administracyjnie, ale nie pozwala na elastyczne dopasowanie kosztów do godzinowego profilu zużycia. W celu oceny, czy obecna taryfa B21 jest najbardziej korzystna, dokonano przeliczenia zużycia energii według struktur charakterystycznych dla taryf B22 (dwustrefowej – tab. 1) oraz B23 (trójstrefowej – tab. 2). Celem analizy było zbadanie, w jakich przedziałach czasowych zużywana jest największa część energii oraz czy możliwa jest optymalizacja kosztów poprzez zmianę taryfy.

Strefy czasowe stosowane w rozliczeniach z odbiorcami wybranych grup taryfowych (m.in. B22)

Tabela 1.

Lp.	Miesiąc	Strefa szczytowa [godz.]	Strefa pozaszczytowa [godz.]
1	Styczeń	8:00 – 11:00, 16:00 – 21:00	11:00 – 16:00, 21:00 – 8:00
2	Luty	8:00 – 11:00, 16:00 – 21:00	11:00 – 16:00, 21:00 – 8:00
3	Marzec	8:00 – 11:00, 18:00 – 21:00	11:00 – 18:00, 21:00 – 8:00
4	Kwiecień	8:00 – 11:00, 19:00 – 21:00	11:00 – 19:00, 21:00 – 8:00
5	Maj	8:00 – 11:00, 20:00 – 21:00	11:00 – 20:00, 21:00 – 8:00
6	Czerwiec	8:00 – 11:00, 20:00 – 21:00	11:00 – 20:00, 21:00 – 8:00
7	Lipiec	8:00 – 11:00, 20:00 – 21:00	11:00 – 20:00, 21:00 – 8:00
8	Sierpień	8:00 – 11:00, 20:00 – 21:00	11:00 – 20:00, 21:00 – 8:00
9	Wrzesień	8:00 – 11:00, 19:00 – 21:00	11:00 – 19:00, 21:00 – 8:00
10	Październik	8:00 – 11:00, 18:00 – 21:00	11:00 – 18:00, 21:00 – 8:00
11	Listopad	8:00 – 11:00, 16:00 – 21:00	11:00 – 16:00, 21:00 – 8:00
12	Grudzień	8:00 – 11:00, 16:00 – 21:00	11:00 – 16:00, 21:00 – 8:00

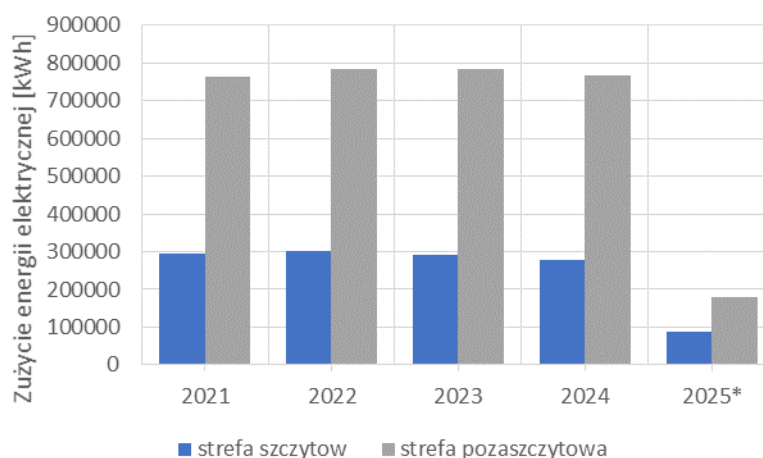
Strefy czasowe stosowane w rozliczeniach z odbiorcami wybranych grup taryfowych (m.in. B23)

Tabela 2.

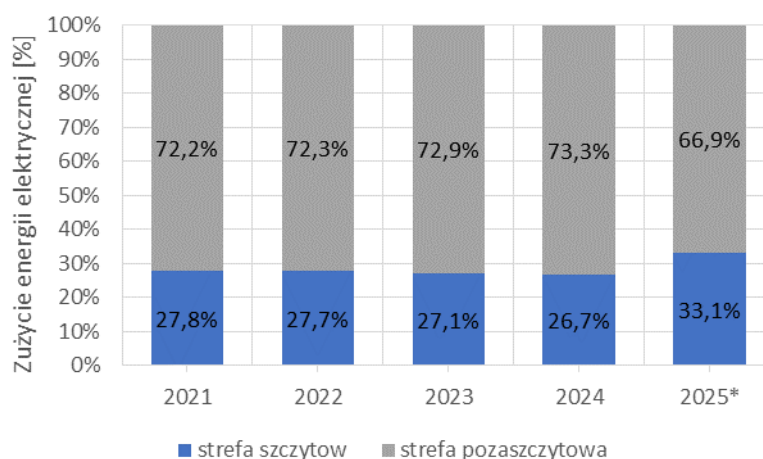
Strefa doby	Okres czasowy	
	Lato (od 01.04 do 30.09) [godz.]	Zima (od 01.10 do 31.03) [godz.]
Szczyt przedpołudniowy	7:00 – 13:00	7:00 – 13:00
Szczyt popołudniowy	19:00 – 22:00	16:00 – 21:00
Pozostałe godziny doby	13:00 – 19:00	13:00 – 16:00
	22:00 – 7:00	21:00 – 7:00

Analiza wykazała, że zdecydowana większość energii elektrycznej zużywana jest w godzinach pozaszczytowych (rys. 4 i 5). W latach 2021–2024 udział zużycia w pozaszczytynie wahał się od 72,2% do 73,3%. Dane za pierwszy kwartał 2025 roku wskazują na nieco niższy udział pozaszczytu (66,9%),

jednak może to wynikać z sezonowych zmian zapotrzebowania. Stabilna i wyraźna przewaga pozaszczytu w zużyciu oznacza, że można rozważyć taryfę B22.



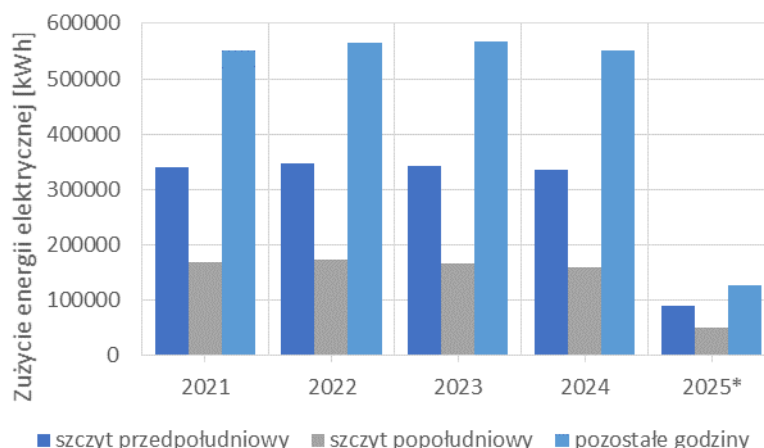
Rys. 4. Zużycie energii elektrycznej w układzie dwustrefowym: szczyt i pozaszczyt w latach 2021-2025* (2025 - I kwartał)



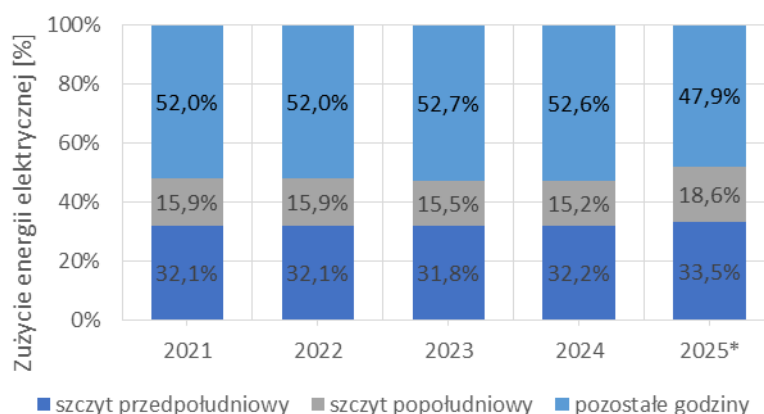
Rys. 5. Rozkład zużycia energii elektrycznej w układzie dwustrefowym: szczyt i pozaszczyt w latach 2021-2025* (2025 - I kwartał)

W przypadku przeliczenia danych według struktury taryfy B23 zauważono, że największa część energii zużywana jest w tzw. „pozostałych godzinach” – czyli poza szczytem porannym i popołudniowym (rys. 6 i 7).

W latach 2021–2024 udział tych godzin wynosił od 51,9% do 52,7% całkowitego rocznego zużycia. W pierwszym kwartale 2025 roku udział ten był nieco niższy i wyniósł 47,9%, co nadal stanowi znaczącą część. W świetle tych danych można przypuszczać, że również taryfa B23 mogłaby być opłacalna, zwłaszcza jeżeli stawki dla „pozostałych godzin” są istotnie niższe od tych obowiązujących w godzinach szczytu.

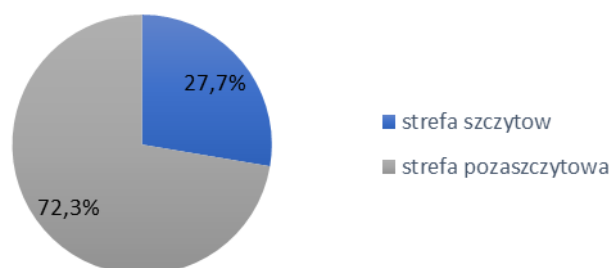


Rys. 6. Zużycie energii elektrycznej w układzie trójstrefowym: dwa szczyty i godziny pozostałe w latach 2021-2025* (2025 - I kwartał)

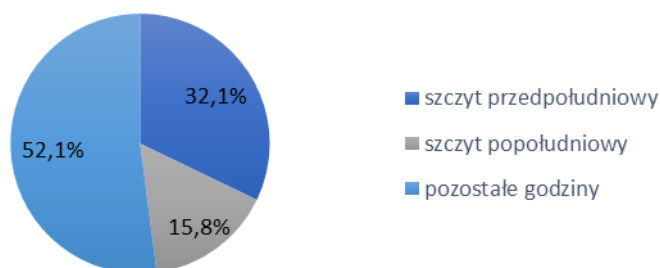


Rys. 7. Rozkład zużycia energii elektrycznej w układzie trójstrefowym: szczyt i pozaszczyt w latach 2021-2025* (2025 - I kwartał)

Analiza pełnych danych za okres 2021–2025 (rys. 8 i 9) pokazuje, że Instytut charakteryzuje się korzystnym rozkładem zużycia energii w czasie – dominacja godzin pozaszczytowych w taryfie B22 oraz godzin „pozostałych” w taryfie B23 pozwala rozważyć realną możliwość obniżenia kosztów dystrybucyjnych poprzez zmianę taryfy.



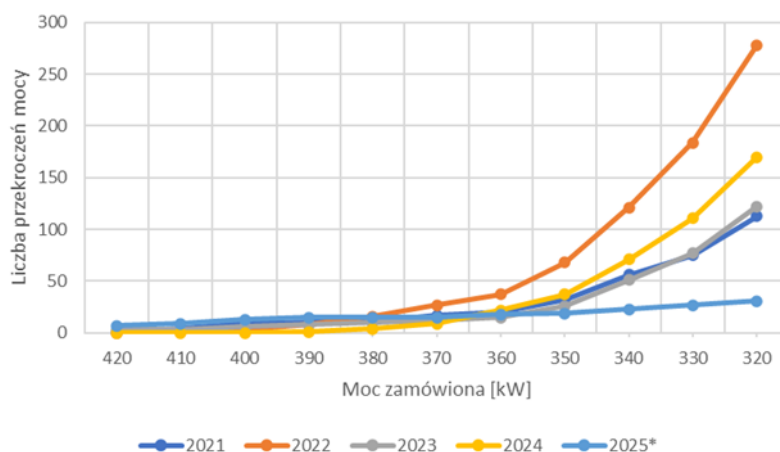
Rys. 8. Rozkład zużycia energii elektrycznej w układzie dwustrefowym w analizowanym okresie (lata 2021-2025*)



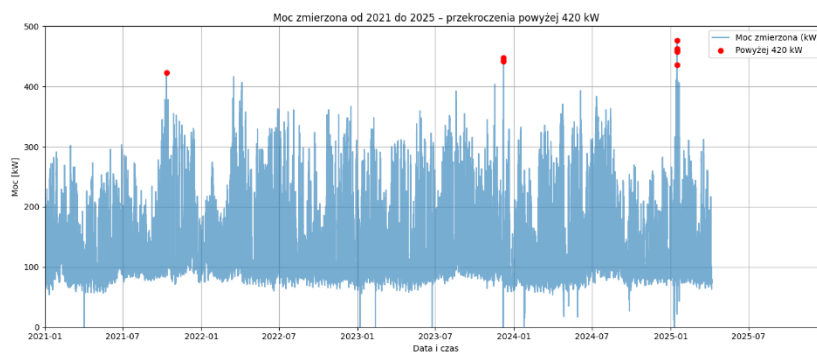
Rys. 9. Rozkład zużycia energii elektrycznej w układzie trójstrefowym w analizowanym okresie (lata 2021-2025*)

Zgodnie z obowiązującą taryfą jednostrefową, koszty dystrybucji energii są niezależne od pory dnia. Przeprowadzona analiza wykazała jednak, że struktura zużycia energii może sprzyjać wdrożeniu taryf wielostrefowych. W przypadku symulacji taryfy dwustrefowej, udział zużycia w godzinach pozaszczytowych wynosił od 72% do 73% w latach 2021-2024, co wskazuje na wysoką efektywność ekonomiczną tej opcji. W przypadku taryfy trójstrefowej, ponad 50% zużycia przypadało na godziny pozaszczytowe (tzw. „pozostałe”), co również sugeruje możliwość redukcji kosztów, zwłaszcza przy korzystnych stawkach w tej strefie.

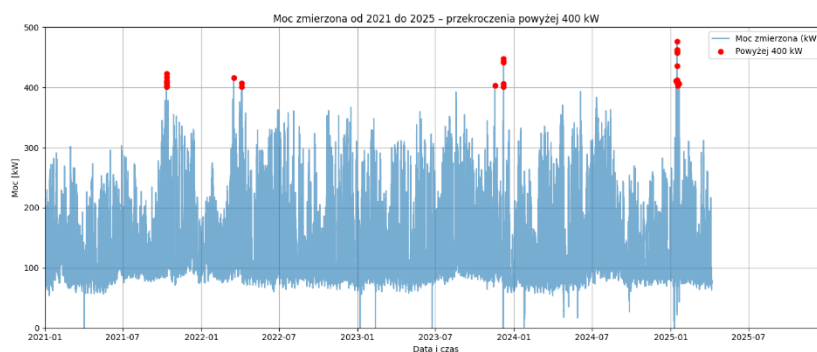
Oprogramowanie umożliwiło przeprowadzenie szczegółowej analizy przekroczeń mocy zamówionej przy różnych wariantach jej ustawienia (420 - 320 kW). Poniższy wykres (rys. 10) przedstawia liczbę przekroczeń mocy zamówionej w latach 2021–2025 (dla 2025 roku uwzględniono jedynie I kwartał) w zależności od przyjętej wartości mocy zamówionej (w przedziale od 420 do 320 kW). Analiza pozwala ocenić, jak zmiana poziomu mocy zamówionej wpływa na ryzyko jej przekroczenia oraz jak sytuacja ewoluowała w poszczególnych latach. Wykres ilustruje, że wraz z obniżaniem mocy zamówionej poniżej 360 kW, liczba przekroczeń zaczyna gwałtownie rosnąć. Szczególnie niekorzystnie pod względem przekroczeń wypada rok 2022. Przy mocy zamówionej ustawionej na 320 kW odnotowano by ponad 250 przekroczeń (rys. 11-16).



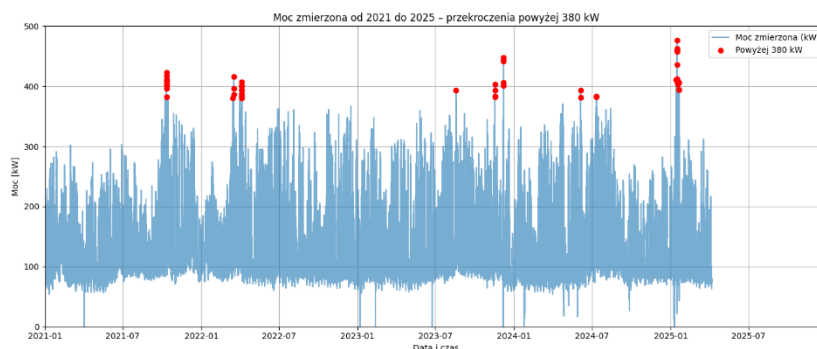
Rys. 10. Liczba przekroczeń mocy zamówionej w latach 2021-2025* (2025 – I kwartał)



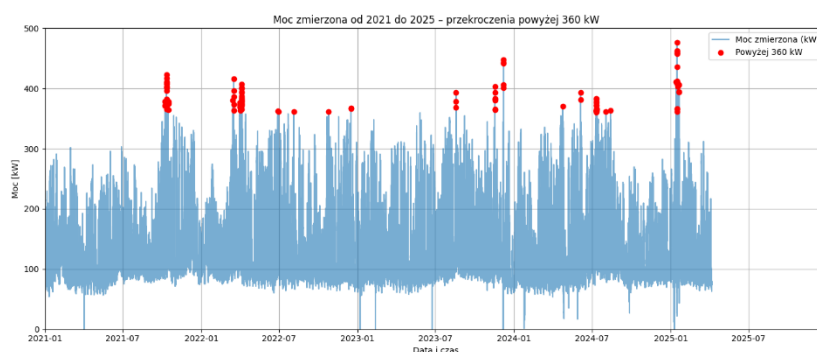
Rys. 11. Moc zmierzona – przebiegi w czasie w latach 2021-2025 z punktami przekroczenia mocy zamówionej na poziomie 420 kW (odczyty co 15 minut)



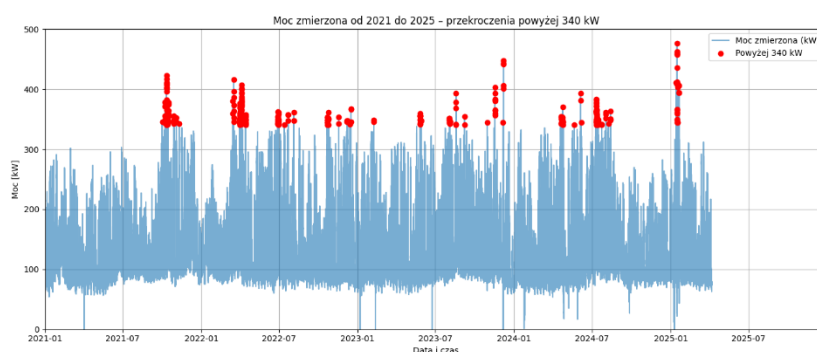
Rys. 12. Moc zmierzona – przebiegi w czasie w latach 2021-2025 z punktami przekroczenia mocy zamówionej na poziomie 400 kW (odczyty co 15 minut)



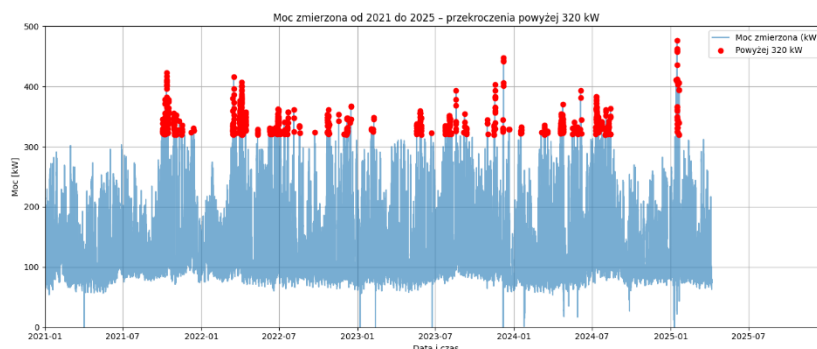
Rys. 13. Moc zmierzona – przebiegi w czasie w latach 2021-2025 z punktami przekroczenia mocy zamówionej na poziomie 380 kW (odczyty co 15 minut)



Rys. 14. Moc zmierzona – przebiegi w czasie w latach 2021-2025 z punktami przekroczenia mocy zamówionej na poziomie 360 kW (odczyty co 15 minut)



Rys. 15. Moc zmierzona – przebiegi w czasie w latach 2021-2025 z punktami przekroczenia mocy zamówionej na poziomie 340 kW (odczyty co 15 minut)



Rys. 16. Moc zmierzona – przebiegi w czasie w latach 2021-2025 z punktami przekroczenia mocy zamówionej na poziomie 320 kW (odczyty co 15 minut)

Tabela 3 zawiera zestawienie zidentyfikowanych okresów, w których doszło do przekroczenia mocy zamówionej. Każdy wiersz reprezentuje ciągły okres przekroczeń, czyli sytuację, gdy kolejne odczyty (co 15 minut) wskazywały wartość mocy powyżej ustalonego limitu. Dane obejmują cztery takie epizody.

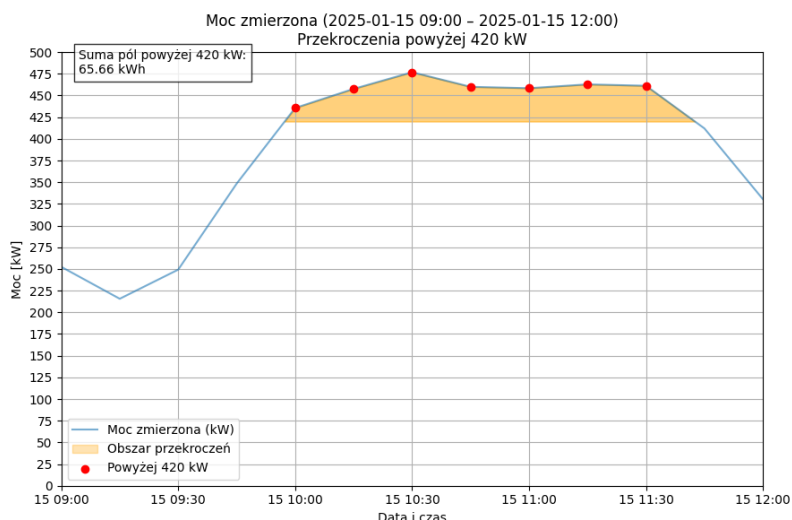
Najdłuższy zarejestrowany okres przekroczenia miał miejsce 15 stycznia 2025 r. Przekroczenie trwało 90 minut i obejmowało 7 odczytów z rzędu (rys. 17). Suma nadwyżki energetycznej (65,66 kWh) wskazuje, że możliwe byłoby zniwelowanie tego przekroczenia np. poprzez uruchomienie magazynu energii, czasowe ograniczenie obciążeń albo optymalizację harmonogramu pracy urządzeń.

7 grudnia 2023 r. wystąpiły dwa oddzielne przypadki przekroczeń. Jeden z nich trwał 15 minut (2 odczyty), a drugi zaledwie jeden odczyt. Pojedyncze przekroczenie odnotowano również 11 października 2021 r. Rozproszenie czasowe przekroczeń (od 2021 do 2025) sugeruje, że nie mają one charakteru systemowego, lecz mogą być efektem nieregularnych zdarzeń. W przypadku dłuższych przekroczeń (takich jak 15.01.2025) warto przeanalizować ich przyczyny i zbadać, czy istniała możliwość ich uniknięcia.

**Okresy przekroczenia mocy zamówionej
(na poziomie 420 kW) w okresie 2021-2025**

Tabela 3.

Początek	Koniec	Liczba odczytów	Czas [min]
15.01.2025 10:00	15.01.2025 11:30	7	90
07.12.2023 10:00	07.12.2023 10:15	2	15
07.12.2023 09:15	07.12.2023 09:15	1	0
11.10.2021 10:15	11.10.2021 10:15	1	0



Rys. 17. Okres przekroczenia mocy zamówionej, zarejestrowany w dniu 15.01.2025

Dodatkowo, analiza rozkładu przekroczeń mocy zamówionej w ciągu doby pozwala zidentyfikować, w jakich godzinach najczęściej dochodziło do naruszenia progu 420 kW. W badanym okresie (2021–I kwartał 2025) zarejestrowano łącznie 11 odczytów przekroczeń mocy, z czego:

- 7 przypadków wystąpiło między 10:00 a 11:00,
- 3 przypadki odnotowano między 11:00 a 12:00,
- 1 przypadek miał miejsce tuż po godzinie 09:00.

Wszystkie przekroczenia miały miejsce w przedziale czasowym 09:00–12:00, co pokrywa się z wcześniej zidentyfikowanym dobowym szczytem zapotrzebowania na energię, widocznym także na wykresach zużycia godzinowego. Brak przekroczeń w pozostałych godzinach doby świadczy o tym, że ryzyko naruszenia limitu mocy występuje wyłącznie w godzinach porannego i przedpołudniowego szczytu energetycznego. Jest to zatem obszar kluczowy dla wdrożenia działań korygujących, takich jak przesunięcie części procesów na godziny poza szczytem lub aktywacja lokalnego magazynu energii tylko w tym przedziale czasowym.

Dla zgromadzonych danych, obejmujących okres od 2021 roku do pierwszego kwartału 2025, przeprowadzono analizę przekroczeń mocy zamówionej przy teoretycznym założeniu jej poziomu na 320 kW. Dla tej wysokości mocy zamówionej łącznie zarejestrowano 214 okresów przekroczeń, zróżnicowanych pod względem liczby kolejnych odczytów (czyli czasu trwania).

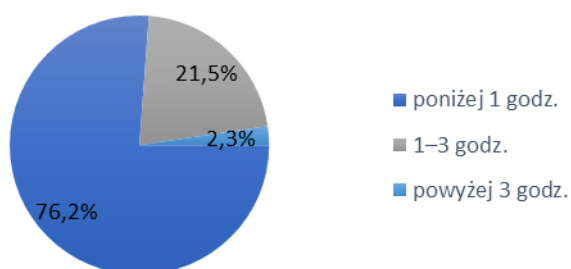
Najwięcej przypadków to pojedyncze odczyty przekroczenia, aż 85 przypadków, co stanowi 39% wszystkich wystąpień. 2 odczyty z rzędu odnotowano w 36 przypadkach, a 3 – w 32 przypadkach.

To oznacza, że ponad 75% przekroczeń trwało 45 minut lub krócej. Rozkład czasu trwania przekroczeń przedstawiono na rys. 18.

**Okresy przekroczenia mocy zamówionej (na poziomie 320 kW),
trwające przynajmniej 10 kolejnych odczytów, w okresie 2021-2025**

Tabela 4.

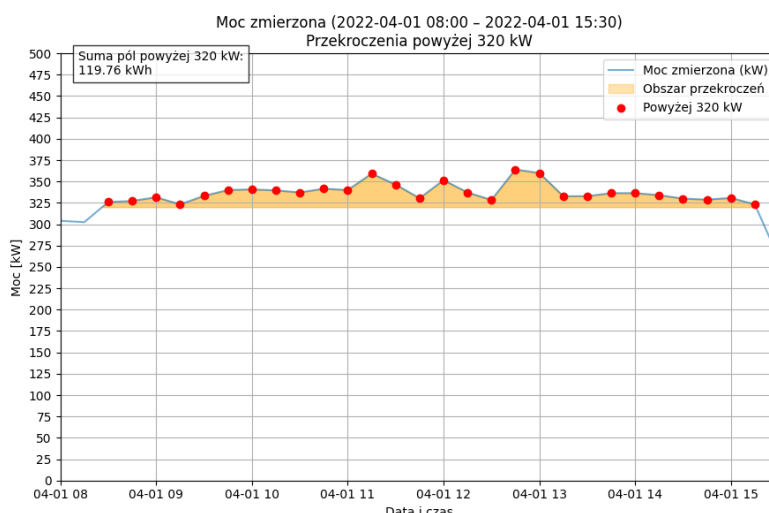
Początek	Koniec	Liczba odczytów	Czas [min]
01.04.2022 08:30	01.04.2022 15:15	28	405
11.10.2021 08:30	11.10.2021 13:45	22	315
14.04.2022 09:15	14.04.2022 12:45	15	210
05.04.2022 09:15	05.04.2022 12:30	14	195
08.10.2021 09:00	08.10.2021 12:15	14	195
31.03.2022 10:30	31.03.2022 13:30	13	180
15.01.2025 09:45	15.01.2025 12:30	12	165
15.07.2024 10:45	15.07.2024 13:15	11	150
11.07.2024 11:00	11.07.2024 13:30	11	150
17.11.2023 08:45	17.11.2023 11:15	11	150
05.04.2022 13:00	05.04.2022 15:30	11	150
15.10.2021 08:45	15.10.2021 11:15	11	150
30.06.2022 08:15	30.06.2022 10:30	10	135
28.10.2021 08:45	28.10.2021 11:00	10	135



Rys. 18. Rozkład czasu trwania przekroczeń

Najdłuższy okres przekroczenia miał miejsce 1 kwietnia 2022 r. Przekroczenia rozpoczęły się tuż po godzinie 08:30 i trwały do 15:15, obejmując 28 kolejnych 15-minutowych odczytów, co odpowiada 405 minutom (6 godzin i 45 minut) (rys. 19). Przez cały ten czas moc chwilowa nie spadła poniżej wartości granicznej, co oznacza stabilne przeciążenie systemu względem zakładanej mocy zamówionej. To najdłuższy zarejestrowany przypadek przekroczenia progu 320 kW, co klasyfikuje go jako przekroczenie ciągłe o wysokim wpływie. Pole powierzchni powyżej progu 320 kW (obszar

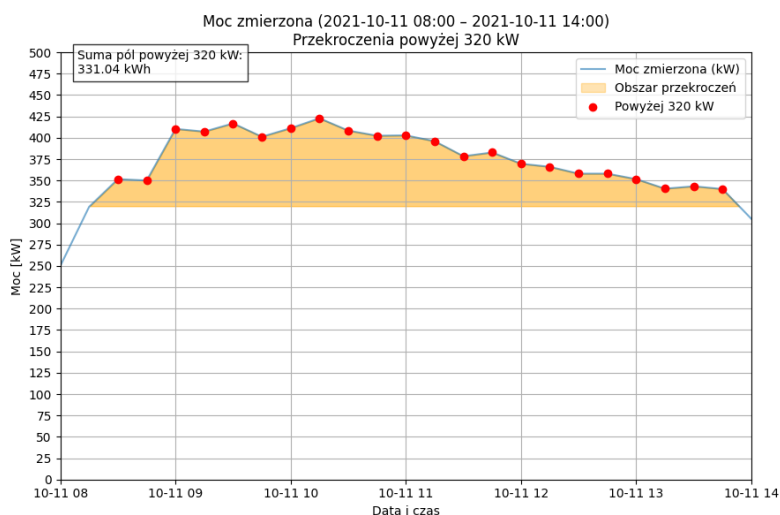
wypełniony kolorem pomarańczowym) odpowiada wartości 119,76 kWh – tyle dodatkowej energii pobrano ponad limit w analizowanym czasie. Moc wahała się w granicach ok. 325–345 kW, co oznacza, że nie były to ekstremalne szczyty mocy, lecz umiarkowane i długotrwałe przekroczenie progu.



Rys. 19. Okres przekroczenia mocy zamówionej, zarejestrowany w dniu 01.04.2022

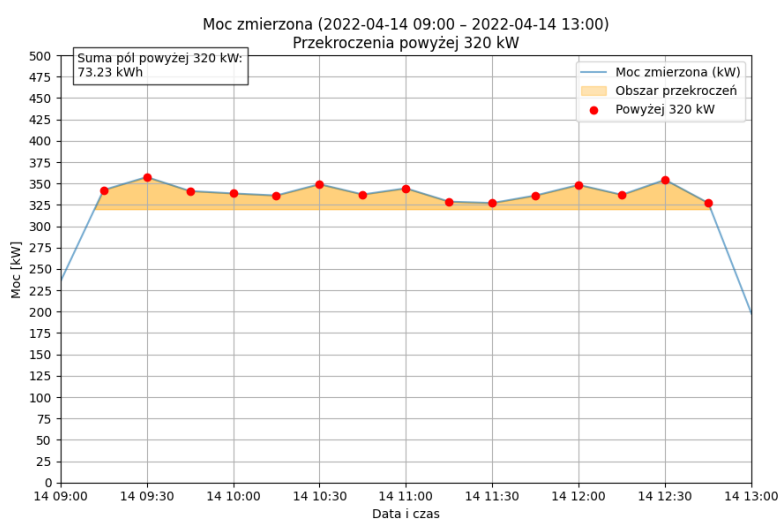
Poniższy wykres (rys. 20) przedstawia przebieg mocy zmierzonej w dniu 11 października 2021 r. w godzinach 08:00–14:00, z uwzględnieniem przekroczeń wartości teoretycznie przyjętej mocy zamówionej na poziomie 320 kW. Jest to drugi najdłuższy okres ciągłego przekroczenia mocy zarejestrowany w analizowanym przedziale lat 2021–2025. Przekroczenie rozpoczęło się tuż przed godziną 08:30 i trwało do około 13:45, co odpowiada 22 kolejnym odczytom (czyli 330 minutom / 5,5 godziny ciągłego przekroczenia).

Całkowita nadwyżka energii ponad próg 320 kW w analizowanym okresie wyniosła 331,04 kWh – wartość istotna, blisko trzykrotnie wyższa niż w przypadku najdłuższego przekroczenia z 2022 roku. To oznacza, że choć przekroczenie to było nieco krótsze niż najdłuższe (z 1 kwietnia 2022), jego energetyczna skala jest nawet większa, co wynika z wyższych wartości chwilowej mocy.



Rys. 20. Okres przekroczenia mocy zamówionej, zarejestrowany w dniu 11.10.2021

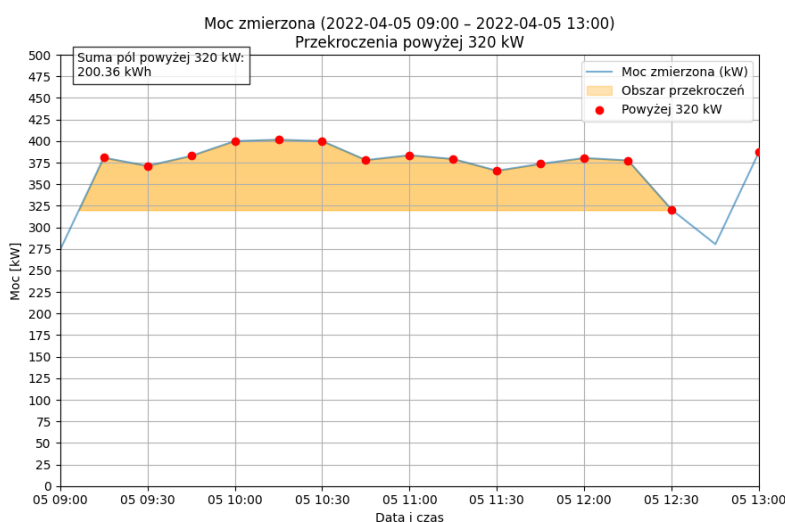
Rysunek 21 przedstawia przebieg mocy zmierzonej w dniu 14 kwietnia 2022 r. w godzinach 09:00–13:00, z zaznaczeniem przekroczeń teoretycznej mocy zamówionej na poziomie 320 kW. Jest to trzeci najdłuższy okres przekroczenia mocy w analizowanym przedziale czasowym 2021-2025. Przekroczenie miało umiarkowaną intensywność, lecz długotrwały charakter – moc przez cały ten czas utrzymywała się powyżej 320 kW, co klasyfikuje ten przypadek jako operacyjnie istotny. Suma nadwyżki energii powyżej progu 320 kW wyniosła 73,23 kWh – jest to znacznie mniej niż w dwóch wcześniej analizowanych przypadkach (331 kWh i 119 kWh), ale nadal oznacza realne przekroczenie, mogące mieć wpływ na rozliczenia z dostawcą energii. Moc zmierzona oscylowała w przedziale 325-340 kW, utrzymując się względnie stabilnie. Nie odnotowano ostrych szczytów – moc przebiegała płasko, ale konsekwentnie powyżej limitu.



Rys. 21. Okres przekroczenia mocy zamówionej, zarejestrowany w dniu 14.04.2022

Rysunek 22 przedstawia czwarty najdłuższy okres przekraczania mocy w analizowanym okresie 2021–2025. Przekroczenia rozpoczęły się w dniu 5 kwietnia 2022 po godzinie 09:00 i trwały do 12:30, obejmując 14 kolejnych odczytów, co odpowiada 210 minutom (3,5 godziny). Przekroczenia były ciągłe i regularne, z jednym chwilowym spadkiem tuż przed końcem analizowanego przedziału.

Suma nadwyżki energii pobranej ponad próg 320 kW wyniosła 200,36 kWh, co czyni ten przypadek jednym z najbardziej energochłonnych w całym zestawieniu. Mimo że czas trwania był krótszy niż w przypadku pierwszych trzech analizowanych przekroczeń, średnia nadwyżka mocy była wyraźnie wyższa. Wartości mocy zmierzonej oscylowały w przedziale 370–400 kW, z kulminacją około godziny 10:15. Krzywa mocy miała wyraźnie „płaski” przebieg – brak nagłych skoków, ale utrzymywanie się mocy znacznie powyżej progu.

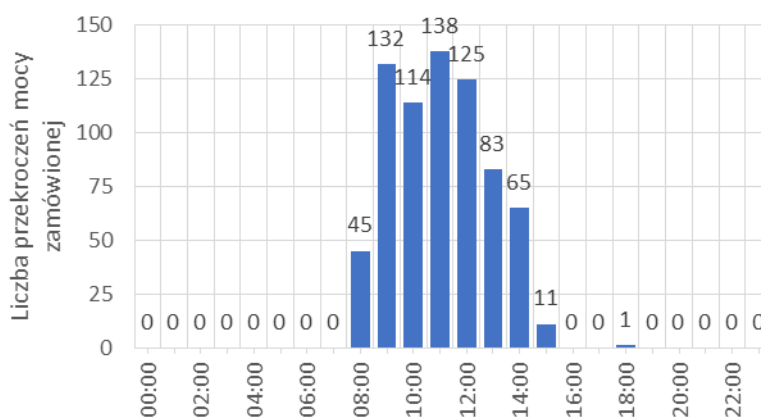


Rys. 22. Okres przekroczenia mocy zamówionej, zarejestrowany w dniu 05.04.2022

We wszystkich czterech przypadkach przekroczenia miały stabilny charakter – krzywe mocy przebiegały bez gwałtownych skoków, utrzymując się powyżej progu przez długi czas. To sugeruje, że przekroczenia te wynikały nie z incydentalnych obciążeń. Wszystkie przekroczenia miały miejsce między 08:30 a 14:00, a ich kulminacje przypadały na godziny 09:00–12:00. To potwierdza wcześniejsze analizy wskazujące, że szczytowe godziny dziennego zapotrzebowania energetycznego są najbardziej narażone na przekroczenia – zarówno pod względem liczby przypadków, jak i ich intensywności. Ze względu na przewidywalność przekroczeń (czasową i charakterystyczną dla określonych dni roboczych), możliwe jest wdrożenie działań ograniczających ich występowanie.

Rysunek 23 pokazuje, jak rozkłada się liczba odczytów przekroczeń mocy w ciągu doby. Dane wskazują, że przekroczenia są silnie skoncentrowane w godzinach przedpołudniowych. Ponad 80% przekroczeń występuje między 09:00 a 13:00 – to klasyczne godziny szczytu dziennego.

Większość przekroczeń ma charakter krótkotrwały i impulsowy, co oznacza, że mogłyby być z powodzeniem ograniczone przez zastosowanie odpowiednich narzędzi, np. magazynu energii lub systemu peak-shaving. Wprowadzenie mocy zamówionej na poziomie 320 kW mogłoby być wykonalne, o ile wdrożono by rozwiązania ograniczające ryzyko przekroczeń w konkretnych godzinach, głównie w przedziale 09:00–13:00.

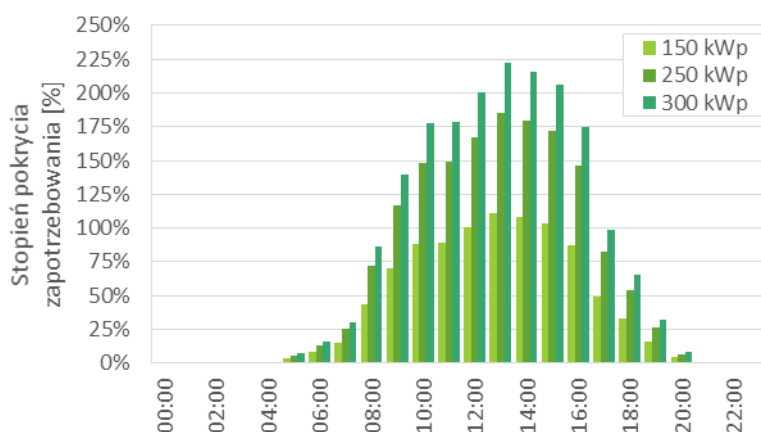


Rys. 23. Liczba odczytów przekroczenia mocy zamówionej w danej godzinie w latach 2021-2025*
(2025 – I kwartał)

W ramach przeprowadzonych badań, opracowane autorskie oprogramowanie analityczne, wykorzystano w celu przeprowadzenia symulacji produkcji energii elektrycznej z planowanych instalacji fotowoltaicznych o różnych mocach zainstalowanych. Analiza miała na celu ocenę stopnia pokrycia rzeczywistego zapotrzebowania energetycznego Instytutu przez energię generowaną z odnawialnego źródła, w zależności od skali planowanej inwestycji. Przeprowadzone obliczenia uwzględniały historyczne dane pomiarowe dotyczące zużycia energii elektrycznej, zarejestrowane z rozdzielczością czasową co 15 minut, co umożliwiło szczegółową analizę dopasowania profilu produkcji do profilu konsumpcji zarówno w skali dobowej, jak i sezonowej.

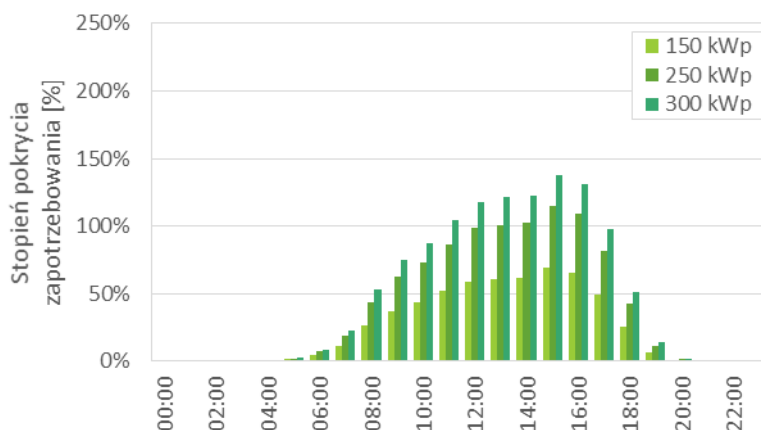
Symulacje wykonano dla trzech wariantów instalacji PV o mocach znamionowych 150 kWp, 250 kWp oraz 300 kWp. Porównanie rocznego zużycia energii elektrycznej z prognozowaną produkcją systemów fotowoltaicznych o mocach zainstalowanych 150, 250 oraz 300 kWp wykazało, że już instalacja o mocy 150 kWp może istotnie wpłynąć na pokrycie miesięcznego zapotrzebowania, choć jej zdolność bilansowania różni się w zależności od sezonu.

Symulacja profilu produkcji energii przeprowadzona dla letniego, bezchmurnego dnia wolnego od pracy wykazała, że nawet instalacja fotowoltaiczna o mocy 150 kWp może wytwarzać ilość energii przekraczającą chwilowe zapotrzebowanie analizowanego obiektu (rys. 24). W analizowanych warunkach autokonsumpcja, rozumiana jako udział energii wyprodukowanej zużytej bezpośrednio na potrzeby własne, spadała wraz ze wzrostem mocy zainstalowanej systemu PV, osiągając wartość jedynie 60,9% dla instalacji o mocy 300 kWp. Sugeruje to konieczność wdrożenia mechanizmów zarządzania nadprodukcją, takich jak magazyny energii, elastyczne odbiory bądź eksport do sieci.



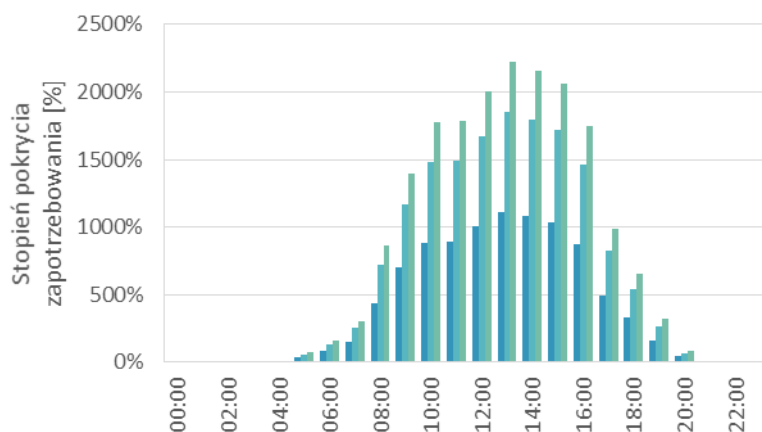
Rys. 24. Prognozowany stopień pokrycia zapotrzebowania na energię z instalacji PV (150, 250, 300) kWp (czerwiec, dzień wolny od pracy)

W warunkach dnia roboczego, mimo wyższej wartości zapotrzebowania w godzinach pracy, również odnotowano zjawisko nadprodukcji, szczególnie przy instalacjach PV o większej mocy. Autokonsumpcja osiąga poziom 100% dla instalacji 150 kWp, ale już dla 300 kWp spada do 88,3%. Wskazuje to, że dla optymalnego wykorzystania energii konieczne jest zrównoważenie mocy instalacji względem profilu zużycia (rys. 25).



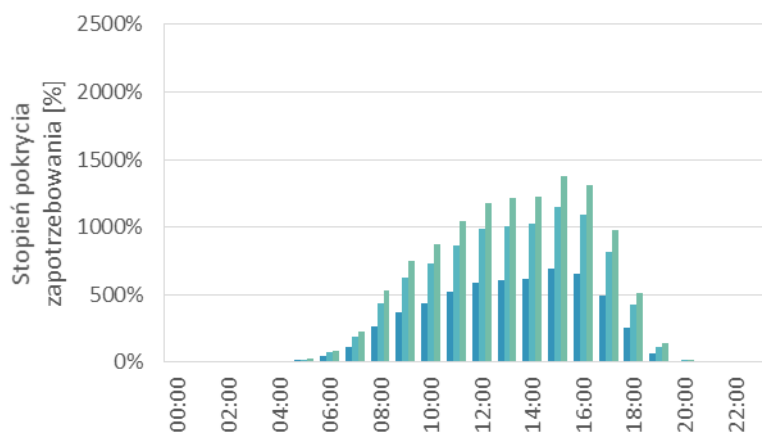
Rys. 25. Prognozowany stopień pokrycia zapotrzebowania na energię z instalacji PV (150, 250, 300) kWp (czerwiec, dzień „roboczy”)

W analizie ograniczonej do części biurowej obiektu wykazano bardzo niską wartość autokonsumpcji: zaledwie 15,1% przy instalacji 150 kWp oraz poniżej 10% dla instalacji większych. Wyniki te ilustrują skalę nadprodukcji w dniach o niskim zapotrzebowaniu i podkreślają znaczenie doboru mocy PV w zależności od charakterystyki użytkowania obiektu (rys. 26).



Rys. 26. Prognozowany stopień pokrycia zapotrzebowania na energię (tylko biurowiec) z instalacji PV (150, 250, 300) kWp (czerwiec, dzień wolny od pracy)

Również w dniu roboczym obserwowano niską autokonsumpcję energii wygenerowanej przez instalację PV, co może być związane z ograniczonymi godzinami aktywności odbiorców energii w budynku biurowym (rys. 27). Wartość autokonsumpcji nie przekracza 22% nawet dla najmniejszej instalacji, co potwierdza potrzebę zastosowania magazynowania lub zmiany harmonogramów zużycia.



Rys. 27. Prognozowany stopień pokrycia zapotrzebowania na energię (tylko biurowiec) z instalacji PV (150, 250, 300) kWp (czerwiec, dzień wolny od pracy)

4. Wnioski

Dzięki wykorzystaniu autorskiego narzędzia możliwe było nie tylko odwzorowanie rzeczywistych wzorców zużycia, ale także ich przeliczenie w kontekście alternatywnych scenariuszy taryfowych i technicznych.

Zastosowanie autorskiego oprogramowania opracowanego w Instytucie KOMAG umożliwiło przeprowadzenie analizy struktury zużycia energii elektrycznej w badanym obiekcie w latach 2021–2025. Dzięki integracji komponentów analitycznych z systemem wizualizacji danych, możliwe było uchwycenie wielowymiarowych zależności czasowych w profilu obciążenia. W szczególności, zastosowanie map ciepła pozwoliło na identyfikację charakterystycznych wzorców sezonowych, tygodniowych i dobowych, a także na wykrycie potencjalnych anomalii oraz wskazanie okresów o najwyższym zapotrzebowaniu. Dodatkowo, oprogramowanie umożliwiło przeprowadzenie analizy występowania przekroczeń mocy zamówionej, a także symulację alternatywnych wariantów taryfowych.

Oprogramowanie umożliwiło również precyzyjne oszacowanie liczby i czasu trwania przekroczeń mocy zamówionej, w zależności od przyjętego progu, w przedziale od 420 do 320 kW oraz ocenę zmian w tym zakresie na przestrzeni lat 2021–2025. W przypadku limitu 420 kW liczba przekroczeń była niska i rozproszona. Odnotowano łącznie 11 przypadków w całym okresie 2021 - 2025. Wszystkie wystąpiły w godzinach 09:00–12:00, co wskazuje na wysoką przewidywalność czasową i możliwość zastosowania środków zaradczych (np. magazyn energii, przesunięcie procesów). Natomiast, w scenariuszu z obniżeniem limitu do 320 kW zarejestrowano 214 epizodów przekroczenia, z czego ponad 75% trwało krócej niż 45 minut. Najdłuższy przypadek miał miejsce 1 kwietnia 2022 r. i trwał ponad 6 godzin, z łączną nadwyżką energetyczną sięgającą 119,76 kWh. W innym przypadku (11 października 2021 r.) odnotowano jeszcze większą nadwyżkę (331,04 kWh), mimo nieco krótszego czasu trwania. Analiza wykazała, że większość przekroczeń miała stabilny charakter. Krzywa mocy utrzymywała się ponad progiem przez dłuższy czas, bez gwałtownych szczytów.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że nawet instalacja PV o stosunkowo niewielkiej mocy zainstalowanej (150 kWp) może znacząco przyczynić się do redukcji zapotrzebowania na energię z sieci, zwłaszcza w miesiącach letnich. Jednocześnie, obserwowane zjawisko nadprodukcji, zarówno w dni wolne, jak i robocze, potwierdza konieczność uwzględnienia mechanizmów zagospodarowania nadwyżek energii. W analizowanych warunkach, wraz ze wzrostem mocy instalacji, spada udział energii zużywanej na potrzeby własne, co może prowadzić do obniżenia efektywności ekonomicznej

inwestycji w przypadku braku systemów magazynowania lub odpowiednio dostosowanej infrastruktury odbiorczej.

Wnioski z przeprowadzonej analizy wskazują na potrzebę racjonalnego doboru mocy instalacji PV w oparciu o rzeczywisty profil zużycia energii oraz rozważenie uzupełnienia systemu o magazyny energii elektrycznej lub rozwiązania umożliwiające elastyczne sterowanie obciążeniem. Uwzględnienie tych czynników może istotnie zwiększyć poziom autokonsumpcji, ograniczyć ryzyko nadprodukcji i tym samym poprawić całkowitą efektywność wdrażanych rozwiązań opartych na odnawialnych źródłach energii.

Aplikacja stanowi praktyczne narzędzie wspierające projektantów i inwestorów w podejmowaniu racjonalnych decyzji energetycznych. Wysoka elastyczność i skalowalność systemu umożliwiają jego zastosowanie zarówno w projektach komercyjnych, jak i badawczych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy możliwe było sformułowanie zaleceń mających na celu poprawę efektywności wykorzystania energii elektrycznej oraz ograniczenie kosztów związanych z jej zużyciem. Jednym z rekomendowanych kierunków działań jest zastosowanie magazynu energii o odpowiednio dobranej pojemności, który pozwoli na kompensowanie krótkotrwałych szczytów zapotrzebowania mocy. Rozwiązanie to umożliwi wyrównanie profilu obciążenia i może prowadzić do redukcji opłat związanych z przekroczeniami mocy zamówionej.

Kolejnym istotnym elementem strategii optymalizacyjnej jest opracowanie i wdrożenie automatycznego systemu zarządzania obciążeniem, który pozwoli na dynamiczne sterowanie wybranymi odbiornikami energii w celu ograniczenia mocy chwilowej w godzinach krytycznych. Tego typu system może reagować w czasie rzeczywistym na zmienne warunki pracy instalacji oraz taryfowe sygnały cenowe, przyczyniając się do zwiększenia elastyczności energetycznej obiektu.

Uzupełnieniem powyższych działań będzie szczegółowa analiza przebiegu różnego rodzaju procesów badawczych realizowanych w Instytucie oraz ich harmonogramów w celu zidentyfikowania możliwości przesunięcia części energochłonnych operacji poza godziny szczytowego zapotrzebowania. Taka reorganizacja może przynieść istotne korzyści zarówno w wymiarze technicznym, jak i ekonomicznym, zwłaszcza w kontekście rosnącej zmienności cen energii oraz presji na ograniczanie emisji związanych z jej wytwarzaniem.

Literatura

1. IEA. Renewables 2024. Available online: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024> (accessed on 25 July 2025).

2. The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource Data: SOLARGIS. Available online: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/Poland> (accessed on 25 July 2025).
3. Woszczyński M.: Model inteligentnego systemu monitoringu i diagnostyki paneli fotowoltaicznych. Napędy Sterow. 2018 nr 5 70-73.
4. Woszczyński M., Rogala-Rojek J., Bartoszek S., Gaiceanu M., Filipowicz K., Kotwica K.: In Situ Tests of the Monitoring and Diagnostic System for Individual Photovoltaic Panels. Energies 2021, nr 14(6) 1770, 1-16.
5. Woszczyński M., Stankiewicz K.: Analiza efektywności energetycznej i założenia techniczne rozbudowy instalacji fotowoltaicznych na dachach obiektów przemysłowych. KOMEKO 2021, Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych. Bezpieczeństwo - Jakość - Efektywność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice - 2021, 67-82.
6. Python GUI. Python 4 Delphi. Available online: <https://pythongui.org/python4delphi/> (accessed on 25 July 2025).
7. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy. Nature 2020, 585, 357–362.
8. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., van der Walt S. J., Brett M., Wilson J., Millman K. J., Mayorov N., Nelson A. R. J., Jones E., Kern R., Larson E. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Nature Methods 2020, 17, 261–272.
9. Holmgren W. F., Hansen C. W., Mikofski M. A. pvlib python: Open source photovoltaic system modeling functions for python. Journal of Open Source Software 2018, 3(29), 884.
10. Anderson K., Hansen C., Holmgren W., Jensen A., Mikofski M., Driesse A. pvlib python: 2023 project update. Journal of Open Source Software, 8(92), 5994.
11. AlFaraj J., Popovici E., Leahy P. Solar Irradiance Database Comparison for PV System Design: A Case Study. Sustainability 2024, 16, 6436.
12. Nguyen N.Q., Bui L.D., Van Doan B., Sanseverino E.R., Di Cara D., Nguyen Q.D. A new method for forecasting energy output of a large-scale solar power plant based on long short-term memory networks: A case study in Vietnam. Electr. Power Syst. Res. 2021, 199.
13. Stein J. Energy Prediction and System Modeling: From Fundamentals to Applications. In: Photovoltaic Solar Energy. Chichester, West Sussex UK, Wiley 2017, 564-578.
14. Bień J., Bień B. Rapid assessment of solar PV micro-system energy generation in Poland based on freely pvlib-python library. Production Engineering Archives 2024, 30, 326-332.



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.6>

Zmiany w systemie oceny zgodności maszyn w świetle rozporządzenia maszynowego UE 2023/1230

Andrzej Figiel – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W dniu 14 czerwca 2023 r. opublikowano nowe rozporządzenie maszynowe UE 2023/1230, które zacznie obowiązywać od 20 stycznia 2027 roku, zastępując stosowaną od wielu lat dyrektywę 2006/42/WE. Rozporządzenie UE 2023/1230 wprowadza szereg istotnych zmian w zakresie oceny zgodności maszyn oraz maszyn nieukończonych, odzwierciedlając najnowsze europejskie trendy w obszarze zrównoważonego rozwoju.

W niniejszym rozdziale dokonano przeglądu najważniejszych zmian wprowadzonych nowym aktem prawnym, w celu zwrócenia uwagi zainteresowanych stron — producentów, importerów oraz użytkowników maszyn — na konieczność dostosowania się do nowych wymagań technicznych i formalnych.

Słowa kluczowe: dyrektywa, rozporządzenie maszynowe, procedury oceny zgodności, modyfikacja sprzętowa lub cyfrowa

Changes to the conformity assessment system for machinery in light of the EU Machinery Regulation 2023/1230

Abstract: On 14 June 2023, the new EU Machinery Regulation 2023/1230 was published and will become applicable from 20 January 2027, replacing Directive 2006/42/EC, which has been in use for many years. The EU Regulation 2023/1230 introduces a number of important changes regarding conformity assessment of machinery and partly completed machinery, reflecting the latest European sustainability trends. This chapter reviews the most important changes introduced by the new piece of legislation in order to make stakeholders (manufacturers, importers, users of machinery) aware of the need to adapt to the new technical and formal requirements.

Keywords: Directive, Machinery Regulations, conformity assessment procedures, hardware or digital modification

1. Wprowadzenie

Większość wyrobów wprowadzanych do obrotu handlowego podlega co najmniej jednej dyrektywie Nowego Podejścia (ang. New Approach Directive). Dyrektywy nowego podejścia zawierają warunki wprowadzania wyrobów do obrotu, zasady swobodnego przepływu i domniemania zgodności, procedury oceny zgodności, zasady nanoszenia oznakowania CE, wymagania dla jednostek notyfikowanych (o ile jednostki takie uczestniczą w procedurach oceny zgodności) oraz zasadnicze wymagania bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. Zawarte w dyrektywach wymagania dotyczące



bezpieczeństwa i ochrony zdrowia mają charakter ogólny a szczegółowe wymagania techniczne są określone w zharmonizowanych normach europejskich, przy czym producenci mają swobodę wyboru środków technicznych zastosowanych w celu zapewnienia zgodności z wymaganiami zasadniczymi (mogą zastosować własne rozwiązania techniczne, jednak ich poziom bezpieczeństwa nie może być niższy, od określonego w normach zharmonizowanych).

W odniesieniu do bezpieczeństwa maszynowego, obowiązuje Dyrektywa 2006/42/WE w sprawie maszyn, przyjęta 17 maja 2006 roku i obowiązująca od 29 grudnia 2009 roku, wdrożona do prawodawstwa krajowego rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. [1] w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn. Jest to jedna z najstarszych dyrektyw nowego podejścia.

W celu dostosowania przepisów technicznych do obecnego stanu techniki, zapewnienia wyższego poziomu bezpieczeństwa i uproszczenia procedur dla producentów w dniu 14 czerwca 2023 r. opublikowano nowe rozporządzenie maszynowe UE 2023/1230 [2], które zacznie obowiązywać od 20 stycznia 2027 roku, zastępując dyrektywę 2006/42/WE.

Rozporządzenie maszynowe (UE) 2023/1230 nadal wpisuje się w filozofię Nowego Podejścia, opierając się na zasadniczych wymaganiach bezpieczeństwa i ochrony zdrowia oraz normach zharmonizowanych. Zostało również dostosowane do Nowych Ram Prawnych (ang. New Legislative Framework, NLF), zdefiniowanych w decyzjach Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 768/2008/WE [3], nr 765/2008 [4], nr 219/1020 [5], w celu zapewnienia większej spójności, lepszego nadzoru rynku oraz precyzyjnego określenia obowiązków dla wszystkich podmiotów (producentów, upoważnionych przedstawicieli, importerów, dystrybutorów) operujących na rynku maszyn w Unii Europejskiej.

2. Podstawowe zmiany w systemie oceny zgodności maszyn w świetle rozporządzenia maszynowego UE 2023/123

Do najważniejszych zmian wprowadzonych w Rozporządzeniu maszynowym należą:

- a) forma prawna,
- b) wymagania dla maszyn wykorzystujących sztuczną inteligencję (AI) i oprogramowanie wpływające na bezpieczeństwo, w szczególności wymagania dotyczące cyberbezpieczeństwa,
- c) procedury oceny zgodności - zakres oceny zgodności dla niektórych typów maszyn oraz wprowadzenie modułu G „Zgodność w oparciu o weryfikację jednostkową”, który wymaga udziału jednostki notyfikowanej w procesie certyfikacji,
- d) lista maszyn podlegających ocenie zgodności przez stronę trzecią (tzw. maszyny wysokiego ryzyka),
- e) cyfrowa dokumentacja – możliwość dostarczania instrukcji w formie elektronicznej,
- f) zdefiniowanie pojęcia „istotna modyfikacja” maszyny.

Powyższe zmiany zostały omówione w dalszej części niniejszego rozdziału.

2.1. Forma prawna

Rozporządzenie (UE) 2023/1230 w sprawie maszyn nie musi być wdrożone do prawa krajowego przez poszczególne państwa członkowskie Unii Europejskiej – nie wymaga transpozycji do ustawodawstwa krajowego w drodze przepisów krajowych. Obowiązuje bezpośrednio we wszystkich krajach Unii Europejskiej, począwszy od daty wskazanej w rozporządzeniu, tj. od 20 stycznia 2027 r. Takie podejście skutkuje ujednoliceniem przepisów na jednolitym rynku Unii Europejskiej i eliminację rozbieżności w ich interpretacji na poziomie krajowym.

Takie podejście ma szereg zalet, niemniej jednym z problemów jest terminologia używana w rozporządzeniu przetłumaczonym na język polski. Przykładowo, w treści rozporządzenia dostępnego na stronie internetowej Unii Europejskiej, znajduje się pojęcie „produkt”, podczas gdy w krajowych przepisach technicznych używa się pojęcia „wyrób”. Produkt to szerokie pojęcie obejmujące każdą rzecz wprowadzaną na rynek, niezależnie od jej przeznaczenia, sposobu wykonania czy poziomu przetworzenia, natomiast wyrób to termin stosowany w odniesieniu do urządzeń spełniających konkretne wymagania techniczne lub prawne. Pojawia się szczególnie w kontekście oceny zgodności, bezpieczeństwa i oznakowania CE.

2.2. Zmiana wymagań technicznych

Dyrektywa 2006/42/WE określała podstawowe zasady bezpieczeństwa układów sterowania, ale nie odnosiła się do nowoczesnych zagrożeń cyfrowych. Rozporządzenie 2023/1230 wprowadza nowe wymagania, wynikające z upowszechnienia technologii cyfrowych, takich jak sztuczna inteligencja (AI), uczenie maszynowe (ML), Internet rzeczy (IoT) i robotyka. W przypadku wykorzystania tych technologii w układach sterowania maszyn, nowe regulacje wymagają od producentów większej dbałości o odniesienie do cyberbezpieczeństwa i zarządzania oprogramowaniem w celu zabezpieczenia systemów sterowania przed atakami cybernetycznymi, nieautoryzowanym dostępem oraz manipulacją, które mogą prowadzić do niebezpiecznych sytuacji, awarii lub utraty kontroli nad maszyną [8].

Współczesne maszyny są coraz bardziej zautomatyzowane, połączone z siecią i wykorzystują oprogramowanie oraz AI, co czyni je podatnymi na ataki cybernetyczne. Brak odpowiednich zabezpieczeń może prowadzić do zagrożenia życia ludzi, awarii i znacznych strat finansowych i operacyjnych. Zagrożenia związane ze zdalnym dostępem do programowalnych systemów sterowania, umożliwiającym dezaktywację sygnałów wejściowych oraz parametrów pracy były wcześniej uwzględniane w procesie projektowania [6], jednak stosowane środki bezpieczeństwa nie były sformalizowane – nie wynikały bezpośrednio z przepisów dotyczących bezpieczeństwa technicznego.

Ustanowienie rozporządzenia UE 2019/881 zawierającego zasadnicze wymagania bezpieczeństwa i ochrony zdrowia dotyczące maszyn i ich systemów sterowania wykorzystujących technologie AI, ML, IoT, zmienia ten stan rzeczy. Porównanie wymagań dotyczących układów sterowania w Dyrektywie 2006/42/WE i Rozporządzeniu UE 2023/1230 przedstawiono w Tabeli 1.

Wymagania dotyczące układów sterowania

Tabela 1.

Aspekt	Dyrektywa 2006/42/WE	Rozporządzenie UE 2023/1230
Niezawodność układów sterowania	Niezawodność wymagana, ale jest ogólnie zdefiniowana.	Niezawodność nadal wymagana, ale jest bardziej szczegółowo zdefiniowana.
Odporność na defekty (awarie)	Defekty nie mogą prowadzić do powstawania sytuacji niebezpiecznych.	Dodatkowo jest wymagana zdolność do samodiagnostyki i detekcji defektów.
Cyberbezpieczeństwo	Brak szczególnych wymagań.	Nowe wymagania dotyczące ochrony przed cyberatakami i manipulacją.
Zarządzanie oprogramowaniem	Brak precyzyjnych regulacji.	Wymagane procedury bezpiecznych aktualizacji i kontroli zmian.
Inteligentne systemy sterowania	Brak regulacji dotyczących AI i autonomicznych systemów.	Wprowadza nowe zasady dla maszyn wykorzystujących AI i uczenie maszynowe (ang. machine learning).

Układy sterowania maszyn wykorzystujących AI i uczenie maszynowe (maszyn o samo-zmieniającym się zachowaniu lub samozmieniającej się logice układów sterowania), przeznaczonych do działania na różnych poziomach autonomii [2]:

- a) nie mogą powodować wykonywania przez maszynę działań wykraczających poza określone zadanie i przestrzeń ruchu,
- b) powinny umożliwiać rejestrację danych dotyczących procesu podejmowania decyzji przez systemy bezpieczeństwa oraz ich zabezpieczenie przez okres roku od zgromadzenia, wyłącznie w celu wykazania zgodności maszyny na uzasadniony wniosek właściwego organu krajowego,
- c) powinny w każdej chwili umożliwiać skorygowanie maszyny w celu utrzymania jej inherentnego bezpieczeństwa.

Zgodnie z nowym rozporządzeniem, układy sterowania maszyn spełniają wymagania dotyczące bezpieczeństwa cyfrowego, jeżeli zapewniają:



- a) ochronę przed nieautoryzowanym dostępem – układy sterowania muszą mieć zabezpieczenia przed przejęciem kontroli,
- b) bezpieczną aktualizację oprogramowania – maszyny muszą mieć procedury zapobiegające instalacji nieautoryzowanego oprogramowania,
- c) odporność na cyberataki – układy sterowania powinny być odporne na ataki hakerskie, typu malware oraz typu ransomware,
- d) rejestrowanie i monitorowanie zdarzeń – maszyny powinny posiadać systemy logowania aktywności użytkowników i rejestracji błędów,
- e) ochronę przed zmianą parametrów bezpieczeństwa – zapobieganie manipulacji ustawieniami, które mogłyby zagrozić użytkownikom.

W praktyce, cyberbezpieczeństwo układów sterowania maszyn, polega na:

- a) stosowaniu bezpiecznych protokołów komunikacyjnych – stosowanie szyfrowania danych i uwierzytelniania użytkowników,
- b) ograniczeniu dostępu i zarządzaniu uprawnieniami – tylko autoryzowane osoby mogą zmieniać krytyczne parametry maszyny,
- c) regularnych aktualizacjach i wprowadzaniu poprawek funkcji związanych z bezpieczeństwem – producent musi zapewniać bezpieczne mechanizmy aktualizacji,
- d) zapewnieniu odporności na zakłócenia i ataki – ochrona przed złośliwym oprogramowaniem i wrogimi próbami przejęcia kontroli,
- e) stosowaniu systemu wykrywania i raportowania zagrożeń – maszyna powinna wykrywać anomalie i ostrzegać przed cyberatakami.

Nowoczesne układy sterowania umożliwiają zdalną zmianę parametrów (np. progów wyzwalania zabezpieczeń) oraz aktywację/dezaktywację dowolnych sygnałów wejściowych, wykorzystywanych w procesie sterowania. Taka funkcjonalność z jednej strony ułatwia obsługę maszyn, z drugiej, w przypadku niewłaściwego użycia, może stwarzać zagrożenie lub zwiększać ryzyko do poziomu nieakceptowalnego. Z tego powodu, oprócz wdrożenia środków zapewniających cyberbezpieczeństwo, należy również tak projektować układy sterowania, aby ingerencja operatorów z poziomu lokalnego, jak i nadrzędnego systemu sterowania, nie dotyczyła funkcji bezpieczeństwa (oraz dezaktywacji zabezpieczeń) lub nieautoryzowanej zmiany ich nastaw. Funkcje bezpieczeństwa muszą być zawsze aktywne, niezależnie od realizowanego trybu pracy.

Jeśli maszyna zawiera komponenty cyfrowe lub IoT, ich producent może skorzystać z programu certyfikacji cyberbezpieczeństwa przyjętego zgodnie z rozporządzeniem UE 2019/881 [7]. Rozporządzenie UE 2019/881 nie dotyczy bezpośrednio maszyn - tworzy ramy certyfikacji

cyberbezpieczeństwa dla wyrobów, usług i procesów cyfrowych wykorzystujących technologie informacyjno-komunikacyjne ICT (*ang. information and communication technologies*). Certyfikacji mogą podlegać sterowniki PLC, interfejsy HMI, systemy IoT, które mogą być stosowane w systemach sterowania maszynami.

2.3. Procedury oceny zgodności

W celu wykazania zgodności maszyny z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia należy przeprowadzić odpowiednie procedury oceny zgodności przewidziane w Rozporządzeniu Maszynowym (UE) 2023/1230. Procedury te zostały zaktualizowane ze względu na dostosowanie do Nowych Ram Prawnych (*ang. New Legislative Framework – NLF*). Procedury oceny zgodności, przewidziane w Rozporządzeniu Maszynowym, przedstawiono w Tabeli 2.

Procedury oceny zgodności według Rozporządzenia maszynowego

Tabela 2.

Procedura	Opis	Zakres stosowania	Udział jednostki notyfikowanej
<u>Moduł A</u> Wewnętrzna kontrola produkcji	Producent samodzielnie ocenia zgodność maszyny, sporządza dokumentację techniczną, wystawia deklarację UE i oznacza maszynę znakiem CE.	Maszyny nie wymienione w Załączniku I oraz wymienione w Załączniku I, sekcja B.	Nie
<u>Moduł B</u> Badanie typu UE + <u>Moduł C</u> Zgodność z typem w oparciu o wewnętrzną kontrolę produkcji	<u>Moduł B</u> Jednostka notyfikowana bada i zatwierdza wzorzec konstrukcyjny maszyny (badanie typu UE). <u>Moduł C</u> Producent zapewnia, że produkowane maszyny są zgodne z zatwierdzonym typem.	Maszyny wymienione w Załączniku I, sekcja A i B	Tak (Moduł B)
<u>Moduł H</u> Ocena zgodności w oparciu o pełne zapewnienie jakości	Producent wdraża i stosuje system zarządzania jakością, który podlega audytowi jednostki notyfikowanej. Maszyny są wytwarzane zgodnie z zatwierdzonym systemem.	Maszyny wymienione w Załączniku I, sekcja A i B.	Tak



Moduł G Ocena zgodności w oparciu o weryfikację jednostkową	Zgodność każdej maszyny jest indywidualnie oceniana przez jednostkę notyfikowaną przed wprowadzeniem na rynek.	Maszyny unikatowe, wyprodukowane jednostkowo, wymienione w Załączniku I, sekcja A i B	Tak
--	--	--	-----

Wewnętrzną kontrolę produkcji (moduł A) można zastosować w odniesieniu do maszyn wymienionych w Załączniku I, sekcji B, jeśli maszyna została zaprojektowana i wytworzona zgodnie z normami zharmonizowanymi obejmującymi wszystkie odpowiednie zasadnicze wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa.

Najważniejszą zmianą jest dodanie nowej procedury oceny zgodności – modułu G, który wymaga udziału jednostki notyfikowanej w procesie oceny zgodności.

2.4. Zakres wyrobów podlegających ocenie z udziałem jednostki notyfikowanej

Możliwe do przeprowadzenia procedury oceny zgodności zależą od ryzyka, jakie się wiąże z użytkowaniem danego rodzaju maszyn. Za maszyny, które uważa się za stwarzające największe ryzyko dla zdrowia i życia ludzi, zalicza się maszyny wymienione w Załączniku I, sekcja A.

Należą do nich:

- odłączalne urządzenia do mechanicznego przenoszenia napędu wraz z osłonami,
- osłony odłączalnych urządzeń do mechanicznego przenoszenia napędu,
- podnośniki do obsługi pojazdów,
- przenośne maszyny montażowe i inne uderowe uruchamiane za pomocą naboju,
- elementy bezpieczeństwa o całkowicie lub częściowo samoczynnym się zachowaniu z wykorzystaniem uczenia maszynowego, które zapewniają funkcje bezpieczeństwa,
- maszyny z wbudowanymi systemami o całkowicie lub częściowo samoczynnym się zachowaniu z wykorzystaniem uczenia maszynowego, które zapewniają funkcje bezpieczeństwa i które nie zostały wprowadzone do obrotu niezależnie, wyłącznie w odniesieniu do tych systemów.

W procedurach oceny zgodności tej grupy maszyn obligatoryjnie bierze udział jednostka notyfikowana (moduły: B, H, G).

Warto zauważyć, że procedurom oceny zgodności, w których bierze udział jednostka notyfikowana podlegają maszyny sterowane algorytmami uczenia maszynowego oraz elementy realizujące funkcje bezpieczeństwa wykorzystujących AI i uczenie maszynowe ML.



Producent maszyn wymienionych w Załączniku I, sekcja B ma możliwość wyboru procedury oceny zgodności, spośród wszystkich modułów przewidzianych w Rozporządzeniu dotyczącym maszyn.

2.5. Instrukcje obsługi w formie cyfrowej

Nowe regulacje umożliwiają dostarczanie instrukcji obsługi w formie elektronicznej, co pozwala na redukcję kosztów i ślad węglowy produkcji. Użytkownicy, na życzenie, nadal będą mogli zamówić wersję papierową instrukcji. Do zalet instrukcji w formie cyfrowej dla użytkowników należy zaliczyć łatwy dostęp do instrukcji, w tym do najnowszej, na bieżąco aktualizowanej wersji, natomiast dla producenta to mniejsze koszty oraz dogodny sposób wprowadzania zmian i dystrybucji.

Instrukcja może być dostarczana w wersji elektronicznej, pod warunkiem spełnienia wymagań wymienionych w Tabeli 3.

Warunki dostarczania instrukcji w formie cyfrowej

Tabela 3.

Wymaganie	Opis
Łatwość dostępu	Instrukcja musi być dostępna online lub w inny, równie dogodny sposób (np. na stronie producenta, w aplikacji).
Bezpłatne pobieranie i przechowywanie	Użytkownik musi mieć możliwość bezpłatnego pobrania, zapisania i wydruku instrukcji w dowolnym momencie.
Informacje dotyczące instrukcji w momencie zakupu	Informacje o sposobie uzyskania dostępu do instrukcji w postaci cyfrowej muszą być wskazane na maszynie, na opakowaniu lub dokumencie towarzyszącym (np. w formie kodu QR, linku do strony internetowej).
Język kraju użytkownika	Instrukcja musi być dostępna w języku łatwo zrozumiałym dla użytkowników, wskazanym przez zainteresowane państwo członkowskie.
Wersja papierowa na żądanie	Użytkownik ma prawo otrzymać drukowaną instrukcję bez dodatkowych opłat, jeśli tego zażąda w momencie zakupu.
Dostępność przez cały cykl życia maszyny	Instrukcja musi być dostępna online w przewidywanym cyklu życia maszyny przez co najmniej 10 lat po wprowadzeniu maszyny do obrotu

2.6. Wprowadzanie modyfikacji w maszynie wprowadzonej do obrotu

W przypadku wprowadzenia w maszynę, która została wprowadzona do obrotu handlowego lub oddana do użytku, modyfikacji sprzętowych lub cyfrowych, wykraczających poza zakres przewidziany przez producenta i wpływających na bezpieczeństwo przez stworzenie nowego zagrożenia lub

zwiększających ryzyko już istniejące, modyfikacje uznaje się za istotne, jeżeli wymagają podjęcia znacznych środków bezpieczeństwa, takich jak:

- a) dodania do tej maszyny osłon lub urządzeń ochronnych, których działanie wymaga modyfikacji istniejącego systemu związanego z bezpieczeństwem; lub
- b) zastosowania dodatkowych środków ochronnych w celu zapewnienia stateczności lub wytrzymałości mechanicznej tej maszyny.

Napraw i czynności konserwacyjnych, które nie wpływają na spełnianie przez maszynę odpowiednich zasadniczych wymagań w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia, nie uważa się za istotne modyfikacje. Konsekwencją wprowadzenia istotnych modyfikacji jest konieczność przeprowadzenia nowej oceny zgodności maszyny, przed jej wprowadzeniem do obrotu lub oddania do użytku tak, aby wykazać jej zgodność z wymaganiami bezpieczeństwa. Podmiot dokonujący istotnej ingerencji w konstrukcję lub oprogramowanie maszyny jest uznawany za jej producenta i musi wywiązać się ze wszystkich obowiązków na nim ciążyących, w szczególności powinien opracować dokumentację techniczną, zapewnić i zadeklarować, na swoją wyłączną odpowiedzialność, zgodność maszyny z mającymi zastosowanie wymaganiami oraz zastosować odpowiednią procedurę oceny zgodności przewidzianą w Rozporządzeniu (UE) 2023/1230.

W swoich działaniach nie musi powtarzać badań i sporządzać nowej dokumentacji technicznej w odniesieniu tych części czy zespołów maszyny, na które modyfikacja nie ma wpływu. W przypadku modyfikacji zatwierdzonego przez jednostkę notyfikowaną typu, producent powinien się zwrócić do tej jednostki o dokonanie przeglądu certyfikatu badania typu UE.

3. Podsumowanie

W chwili obecnej, Rozporządzenie (UE) 2023/1230 to dokument zawierający regulacje, które dotyczą wszystkich podmiotów gospodarczych związanych z projektowaniem, wytwarzaniem, importem, dystrybucją i oceną zgodności maszyn. Biorąc pod uwagę czas niezbędny na uwzględnienie w tych procesach nowych przepisów technicznych oraz brak norm zharmonizowanych i niewystarczającą liczbę jednostek notyfikowanych, zdecydowane działania należy podjąć już teraz. Dotyczy to w szczególności projektantów i producentów maszyn, których układy sterowania są zrealizowane w oparciu o technologie cyfrowe, takie jak sztuczna inteligencja i systemy autonomiczne. Wyzwaniem jest również zapewnienie cyberbezpieczeństwa maszyn – odporności na nieuprawnioną ingerencję z zewnątrz poprzez systemy teleinformatyczne. Podsumowując, rozporządzenie przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa, ale proces jego wdrożenia wydaje się bardzo trudny.



Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz. U. Nr 199 z 2008 r., poz. 1228).
2. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1230 z dnia 14 czerwca 2023 r. w sprawie maszyn oraz w sprawie uchylecia dyrektywy 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady i dyrektywy Rady 73/361/EWG (Dz. Urz. UE L 165, z 29.6.2023 r., str. 1–102).
3. Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 768/2008/WE z dnia 9 lipca 2008 r. w sprawie wspólnych ram dotyczących wprowadzania produktów do obrotu, uchylająca decyzję Rady 93/465/EWG (Dz. Urz. UE, L 218, 13.8.2008, s. 82–128).
4. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 765/2008 z dnia 9 lipca 2008 r. ustanawiające wymagania w zakresie akredytacji i nadzoru rynku odnoszące się do warunków wprowadzania produktów do obrotu i uchylające rozporządzenie (EWG) nr 339/93 (Dz. Urz. UE L 218, 13.8.2008, s. 30-47).
5. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 219/1020 z dnia 20 czerwca 2019 r. w sprawie nadzoru rynku i zgodności produktów oraz zmieniające dyrektywę 2004/42/WE oraz rozporządzenia (WE) nr 765/2008 i (UE) nr 305/2011 (Dz. Urz. UE, L 169, 25.6.2019, s. 1-44).
6. Figiel A., Klačková I.: Safety requirements for mining systems controlled in automatic mode. *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 25 (3), 417-426.
DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v25i3.13>
7. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/881 z dnia 17 kwietnia 2019 r. w sprawie ENISA (Agencji Unii Europejskiej ds. Cyberbezpieczeństwa) oraz certyfikacji cyberbezpieczeństwa w zakresie technologii informacyjno-komunikacyjnych oraz uchylecia rozporządzenia (UE) nr 526/2013 (akt o cyberbezpieczeństwie) (Dz. Urz. UE L 151, 7.6.2019, s. 15).
8. Monografia. Cyberbezpieczeństwo AI. AI w cyberbezpieczeństwie. Dział Strategii i Rozwoju Bezpieczeństwa Cyberprzestrzeni. NASK - Państwowy Instytut Badawczy, ISBN 978-83-65448-55-2, 2023.

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.7>

Badania i wymagania bezpieczeństwa chemicznego kabli elektrycznych

Beata Grynkiewicz-Bylina – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Bożena Rakwic – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Monika Gawlik-Jędrusiak – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono problematykę bezpieczeństwa chemicznego kabli elektrycznych w kontekście rosnącej ilości odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego oraz zaostrzających się wymagań Dyrektywy RoHS. Omówiono zagrożenia wynikające z obecności w materiałach przewodzących i izolacyjnych szkodliwych substancji chemicznych oraz wskazano metody badawcze wykorzystywane do ich identyfikacji. Wskazano konieczność stosowania w badaniach kabli zaawansowanych technik analitycznych, jak GC-MS, ICP-MS do identyfikacji substancji szkodliwych celem potwierdzenia zgodności z wymaganiami dotyczącymi ochrony środowiska i zdrowia ludzi.

Słowa kluczowe: odpady, sprzęt elektryczny i elektroniczny, kable elektryczne, substancje niebezpieczne, RoHS (Restriction of Hazardous Substances), bezpieczeństwo chemiczne

Testing and requirements for chemical safety of electric cables

Abstract: This chapter addresses the chemical safety of electrical cables in the context of the growing amount of electrical and electronic equipment waste and the increasingly stringent requirements of the RoHS Directive. The hazards arising from the presence of harmful chemicals in conductive and insulating materials as well as outlines of testing methods used to identify them are discussed. It also highlights the need to use advanced analytical techniques, such as GC-MS and ICP-MS, in cable testing to identify harmful substances to confirm their compliance with environmental and human health protection requirements.

Keywords: waste, electrical and electronic equipment, electric cables, hazardous substances, RoHS (Restriction of Hazardous Substances), chemical safety

1. Wprowadzenie

Dynamiczny wzrost produkcji oraz powszechne zastosowanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych przyczyniają się do systematycznego wzrostu ilości odpadów tego rodzaju. Zgodnie z danymi Eurostatu, odpady sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE – *ang.* Waste Electrical and Electronic Equipment) stanowią najszybciej rosnący strumień odpadów powstających w Unii Europejskiej. Zgodnie z danymi Komisji Europejskiej, w 2022 roku zebrano około 5 mln ton tego rodzaju odpadów, co odpowiadało 40% średniej masy sprzętu elektrycznego i elektronicznego wprowadzonego do obrotu w latach 2019-2021 [1, 2]. Strumień WEEE obejmuje szerokie spektrum wyrobów, w tym zużyty sprzęt gospodarstwa domowego, urządzenia informatyczne i telekomunikacyjne, sprzęt audiowizualny, elektronarzędzia, zabawki, urządzenia medyczne oraz

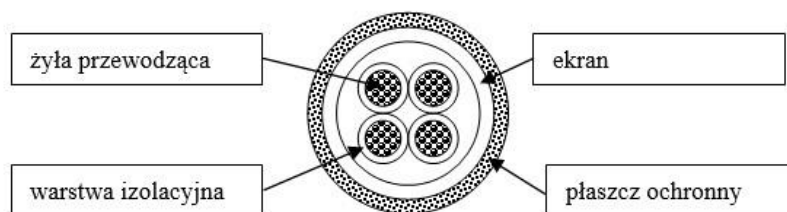
infrastrukturę teleinformatyczną. Wśród elementów wchodzących w skład ww. wyrobów występują kable elektryczne, służące do przesyłu energii elektrycznej pomiędzy źródłami zasilania a odbiornikami. Dokładne oszacowanie udziału kabli elektrycznych w całkowitej masie odpadów WEEE napotyka trudności związane z brakiem jednolitego systemu klasyfikacji tych elementów w oficjalnej sprawozdawczości, m.in. Eurostatu. Na podstawie dostępnych danych brytyjskiej organizacji charytatywnej Material Focus, tylko w Wielkiej Brytanii corocznie utylizowanych jest około 627 milionów metrów kabli, które zawierają łącznie nawet 38 449 ton miedzi, co świadczy o dużym potencjale surowcowym tej frakcji [3]. Ekstrapolując te dane na poziom Unii Europejskiej, można szacować, że masa odpadów kabli generowanych rocznie przez państwa członkowskie przekracza kilkadziesiąt tysięcy ton.

Obecność kabli elektrycznych w strumieniu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego ma istotne znaczenie z perspektywy realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Kable stanowią cenne źródło metali nieżelaznych, takich jak miedź i aluminium, których odzysk wpisuje się w cele GOZ związane z ograniczeniem zużycia surowców pierwotnych i zwiększeniem efektywności wykorzystania zasobów. Jednocześnie materiały wykorzystane do produkcji kabli mogą zawierać niebezpieczne substancje chemiczne, które stanowią poważne wyzwanie dla bezpiecznego recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów. Substancje te mogą być toksyczne, wykazywać właściwości do kumulowania się w organizmach żywych oraz charakteryzować się długotrwałą obecnością w środowisku.

Ich emisja na kolejnych etapach cyklu życia produktu może prowadzić do zanieczyszczenia powietrza, wód i gleby, a tym samym stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi oraz równowagi środowiska naturalnego. W związku z powyższym skuteczna i precyzyjna identyfikacja materiałów kabli oraz zawartych w nich niebezpiecznych metali i związków organicznych za pomocą badań laboratoryjnych stanowi istotny element strategii ograniczania negatywnego wpływu na środowisko i zdrowie ludzi.

2. Budowa i podział kabli elektrycznych

Kable elektryczne składają się z jednej lub większej liczby żył przewodzących, które są otoczone warstwami izolacyjnymi, ekranami oraz płaszczem ochronnym – rysunek 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat budowy kabla elektrycznego

Ze względu na liczbę żył, kable elektryczne dzielą się na jednożyłowe wykorzystywane przeważnie do wykonywania połączeń wewnątrz urządzeń lub jako przewody do prowadzenia pojedynczych linii oraz kable wielożyłowe stosowane w złożonych układach zasilających i sterujących. Biorąc pod uwagę strukturę żyły przewodzącej wyróżnia się kable jednodrutowe (lite), charakteryzujące się większą sztywnością, stosowane głównie w instalacjach stałych, oraz kable wielodrutowe (linki), które dzięki swojej elastyczności wykorzystywane są w urządzeniach przenośnych oraz w miejscach wymagających giętkich połączeń.

Żyły przewodzące, nazywane przewodami, wykonywane są z materiałów o wysokiej przewodności elektrycznej. Najczęściej stosuje się miedź, ze względu na jej właściwości przewodzące i odporność na korozję, oraz aluminium, które, mimo że ma wyższą rezystywność właściwą niż miedź, jest materiałem lżejszym i tańszym. W zastosowaniach specjalistycznych, takich jak instalacje wysokotemperaturowe, wykorzystywane są również stopy metali.

Materiał izolacyjny kabli odgrywa kluczową rolę w ochronie przewodów przed zwarciami, uszkodzeniami mechanicznymi oraz wpływem czynników środowiskowych. W przypadku kabli niskonapięciowych najczęściej stosuje się izolacje wykonane z polichlorku winylu (PVC), który wykazuje odporność na działanie olejów i substancji chemicznych. Polietylen sieciowany (XLPE) zapewnia wysoką odporność termiczną i dielektryczną, natomiast guma oraz silikon stosowane są w kablach specjalistycznych, wymagających elastyczności oraz odporności na ekstremalne temperatury [4, 5].

W zależności od przeznaczenia oraz warunków eksploatacyjnych, kable mogą być dodatkowo wyposażone w ekran elektromagnetyczny oraz zewnętrzny płaszcz ochronny. Ekranowanie kabli, realizowane najczęściej jest za pomocą opłotu lub taśmy z miedzi, aluminium bądź materiałów kompozytowych. Ma to na celu ograniczenie emisji oraz przenikania zakłóceń elektromagnetycznych (EMI), co jest szczególnie istotne w instalacjach przesyłających sygnały sterujące, informacyjne lub wrażliwe na zakłócenia. Obecność ekranu pozwala również na zabezpieczenie przesyłanego sygnału przed interferencją pochodzącą z zewnętrznych źródeł pola elektromagnetycznego. Szczególne

warunki zabezpieczenia dotyczą kabli przeznaczonych do stosowania w podziemnych zakładach górniczych [6].

Płaszcz ochronny stanowi zewnętrzną warstwę kabla, pełniąc funkcję zabezpieczającą całą strukturę przewodu przed uszkodzeniami mechanicznymi, wilgocią, działaniem promieniowania UV, chemikaliami oraz innymi agresywnymi czynnikami środowiskowymi. W zależności od wymagań aplikacyjnych, stosuje się różne materiały płaszcza, w tym polichlorek winylu (PVC), poliuretan (PUR), polietylen (PE) oraz elastomery fluorowe (np. FEP lub ETFE) w zastosowaniach wysokotemperaturowych lub specjalistycznych [4, 5]. W kablach przeznaczonych do użytku w trudnych warunkach technicznych lub w środowiskach zagrożonych wybuchem stosuje się także dodatkowe wzmocnienia mechaniczne, np. zbrojenie stalowe, które zwiększa odporność na zginięcie, rozciąganie czy przetarcia.

W przypadku elementów kabli elektrycznych wytworzonych z materiałów polimerowych, do ich produkcji stosowane są różnorodne dodatki funkcjonalne, takie jak ftalany pełniące rolę plastyfikatorów, chlorowane parafiny oraz bromowane środki zmniejszające palność, a także stabilizatory zawierające metale ciężkie [4]. Substancje te, mimo że poprawiają właściwości techniczne i użytkowe kabli, mogą stanowić poważne zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi ze względu na długotrwałą persystencję, potencjalną toksyczność oraz zdolność do bioakumulacji. Ich obecność może prowadzić do uwalniania substancji niebezpiecznych do środowiska. W celu ograniczenia zagrożeń niezbędne jest systematyczne prowadzenie badań laboratoryjnych mających na celu identyfikację i ocenę zawartości szkodliwych metali ciężkich i związków organicznych w kablach.

3. Wymagania dotyczące zawartości substancji chemicznych w kablach elektrycznych

Kable elektryczne wprowadzane na rynek Unii Europejskiej, podobnie jak inne komponenty sprzętu elektrycznego i elektronicznego, muszą spełniać rygorystyczne wymagania Dyrektywy RoHS [7-9]. Regulacja ta została oparta na przesłankach naukowych związanych z toksykologicznym i środowiskowym oddziaływaniem substancji stosowanych w produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Badania wykazały, że niektóre substancje chemiczne wykorzystywane w produkcji tych urządzeń charakteryzują się wysoką toksycznością, trwałością w środowisku oraz zdolnością do bioakumulacji, co stwarza długofalowe ryzyko dla zdrowia ludzi i funkcjonowania ekosystemów. Ograniczenie stosowania tych substancji przyczynia się do zmniejszenia ich niekontrolowanego uwalniania do środowiska, w szczególności na etapie zagospodarowania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Jednocześnie wycofanie określonych substancji z produkcji jest technicznie i ekonomicznie wykonalne, dzięki dostępności alternatywnych rozwiązań materiałowych

o niższym profilu toksykologicznym. Dyrektywa wpisuje się w unijną strategię zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym, realizując zasadę przezorności oraz dążenie do eliminacji zagrożeń u źródła [10].

Pierwotna wersja regulacji została przyjęta w 2003 roku jako Dyrektywa 2002/95/EC mająca na celu ograniczenie stosowania sześciu substancji niebezpiecznych w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym, w tym ołowiu, rtęci, kadmu, sześciowartościowego chromu oraz dwóch rodzajów bromowanych środków zmniejszających palność (PBDE i PBB) [7]. W 2011 roku przyjęto zaktualizowaną wersję przepisów w postaci Dyrektywy 2011/65/UE (tzw. RoHS II), która wprowadziła szereg istotnych zmian w stosunku do pierwotnej regulacji [8]. Rozszerzono zakres stosowania dyrektywy na kable elektryczne oraz przewody wprowadzane włącznie ze sprzętem elektrycznym i elektronicznym oraz jako samodzielne wyroby [11]. Ponadto, zgodność z wymaganiami RoHS II stała się warunkiem dopuszczenia produktu do obrotu na rynku unijnym i została powiązana z obowiązkiem nadania oznakowania CE oraz sporządzenia deklaracji zgodności przez producenta. Nowelizacja dyrektywy określiła także szczegółowe obowiązki uczestników łańcucha dostaw – producentów, importerów i dystrybutorów – związane z zapewnieniem zgodności wyrobów z wymaganiami prawnymi. Kolejną kluczową zmianą było ustanowienie mechanizmu umożliwiającego okresowe aktualizowanie listy substancji objętych ograniczeniami, w oparciu o analizę ryzyka i postęp naukowo-techniczny.

Do 2025 roku Dyrektywa 2011/65/UE była nowelizowana ponad 85 razy w drodze aktów delegowanych oraz aktów wykonawczych Komisji Europejskiej. Zmiany te dotyczyły głównie doprecyzowania wyjątków od zakazów stosowania niektórych substancji, wprowadzenia nowych substancji do wykazu oraz harmonizacji procedur oceny zgodności w świetle doświadczeń rynkowych i rozwoju technologii [12-14]. Ograniczenia dotyczące stosowania substancji chemicznych w materiałach kabli elektrycznych podano w tabeli 1.

Dopuszczalne stężenia substancji chemicznych w materiałach kabli elektrycznych

Tabela 1.

Parametr	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Ołów, CAS 7439-92-1	Pb	0,1	% wag.
Rtęć, CAS 7439-97-6	Hg	0,1	% wag.
Kadm, CAS 7440-43-9	Cd	0,1	% wag.
Sześciowartościowy chrom, CAS 18540-29-9	Cr(VI)	0,01	% wag.
Polibromowane bifenyle	PBB	0,1	% wag.
Polibromowane etery difenyłowe	PBDE	0,1	% wag.
Ftalan di(2-etyloheksylu, CAS 117-81-7	DEHP	0,1	% wag.
Ftalan benzylu butylu, CAS 85-68-7	BBP	0,1	% wag.
Ftalan dibutylu, CAS 84-74-2	DBP	0,1	% wag.
Ftalan diizobutylu, CAS 84-69-5	DIBP	0,1	% wag.

Źródło: opracowano na podstawie [8]

W Załącznikach III i IV Dyrektywy podano wyłączenia z ww. wymagań oraz określono dla nich czas obowiązywania, np. z wymagania dla zawartości ołowiu wyłączone są dla połączeń przewodów elektrycznych w obudowach stosowanych w polach magnetycznych w promieniu 1 m od izocentrum magnesu w sprzęcie medycznym do obrazowania rezonansem magnetycznym [8].

Zgodnie z mechanizmem określonym w art. 6 Dyrektywy, umożliwiającym systematyczną aktualizację wykazu substancji objętych ograniczeniami, Komisja Europejska podejmuje działania mające na celu identyfikację nowych substancji wykazujących właściwości szkodliwe dla środowiska oraz zdrowia ludzkiego. Proces ten realizowany jest z uwzględnieniem obowiązujących regulacji prawnych dotyczących chemikaliów, w szczególności Rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 (REACH) wraz z załącznikami XIV i XVII [15]. Przy przeprowadzaniu przeglądu wykorzystuje się dostępne dane naukowe oraz techniczne, pozyskane w wyniku implementacji wskazanych aktów prawnych.

Komisja, dokonując rewizji załącznika II, analizuje substancje, w tym te występujące w bardzo małych ilościach lub o specyficznej strukturze, oraz grupy o podobnych właściwościach, z uwzględnieniem następujących kryteriów [16]:

- potencjalny negatywny wpływ na gospodarowanie użytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym, w tym możliwości ponownego użycia i recyklingu;

- ryzyko niekontrolowanego uwalniania substancji lub powstawania niebezpiecznych pozostałości podczas przygotowania do ponownego wykorzystania, recyklingu lub innych metod przetwarzania zgodnie z obowiązującymi warunkami;
- możliwość nieakceptowalnego narażenia pracowników zajmujących się zbiórką i przetwarzaniem zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego;
- dostępność substytutów lub technologii o niższym potencjale szkodliwości.

Trwające prace w tym zakresie obejmowały następujące substancje lub grupy związków [16]:

- Chlorowane parafiny o średnim łańcuchu (MCCP) – alkany C14–C17 chlorowane, Tris(2-chloroetyl) fosforan (TCEP), stosowane jako plastyfikatory oraz środki zmniejszające palność,
- Tetrabromobisfenol A (TBBP-A) – pochodna bisfenolu A, Tris(2-chloro-1-metyloetyl) fosforan (TCCP) i Tris(1,3-dichloro-2-propyl) fosforan (TDCP), stosowane jako środki zmniejszające palność,
- Dipentyl ftalan (DPP) oraz kwas borowy i jego związki – substancje podejrzewane o działanie reprotoksyczne,
- Kwas perfluorononanowy (PFNA) – substancja trwała i wykazująca zdolność do bioakumulacji,
- Formaldehyd – substancja rakotwórcza,
- Heksabromocyklododekan (HBCD) – środek zmniejszający palność, stanowiący trwałe zanieczyszczenie organiczne,
- Antymon trójtlenek (ATO) – substancja wskazana na konieczność dalszej analizy jako synergisty w halogenowych środkach zmniejszających palność np. izolacji.

4. Metoda badań

Badania kabli elektrycznych w zakresie spełnienia wymagań dyrektywy RoHS II, ze względu na zróżnicowanie materiałowe poszczególnych ich elementów, wymagają wykorzystania wielu zaawansowanych technik analitycznych. Badania powinny być prowadzone metodami znormalizowanymi lub w przypadku ich braku, zgodnie z procedurami badawczymi opracowanymi przez specjalizujące się w tym zakresie akredytowane laboratoria badawcze. W tabeli 2 zamieszczono zestawienie wybranych norm określających metody badań zawartości substancji chemicznych w wyrobach elektrotechnicznych, do których zaliczane są kable elektryczne. W normach podano również wytyczne dla procesu przygotowania próbek do badań, uwzględniając etap dekompozycji i rozbiórki wyrobu oraz mechanicznego rozdrobnienia i homogenizacji materiału pobranych próbek.

**Zestawienie norm dotyczących badań zawartości substancji chemicznych
w kablach elektrycznych**

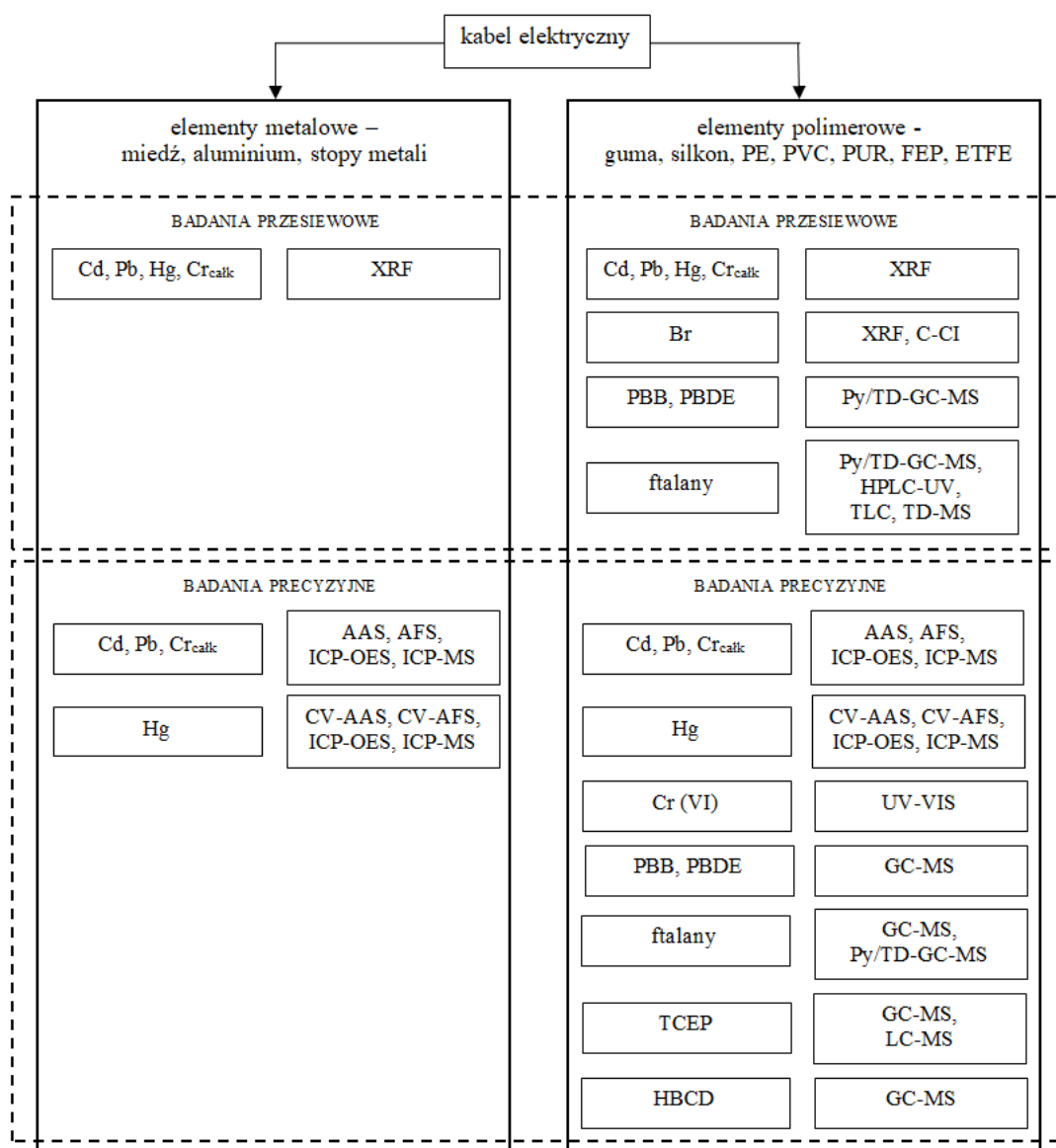
Tabela 2.

Oznaczenie normy	Tytuł normy
PN-EN 62321-1	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 1: Wstęp i informacje ogólne.
PN-EN 62321-2	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 2: Demontaż, rozbiórka i mechaniczne przygotowanie próbki.
PN-EN 62321-3-1	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 3-1: Badanie przesiewowe - Oznaczanie ołowiu, rtęci, kadmu, całkowitej zawartości chromu oraz całkowitej zawartości bromu metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej.
PN-EN 62321-3-2	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 3-2: Badanie przesiewowe - Oznaczanie całkowitej zawartości bromu w tworzywach sztucznych i wyrobach elektronicznych metodą spalania próbki i chromatografii jonowej.
PN-EN 62321-3-3	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 3-3: Badanie przesiewowe - Oznaczanie polibromowanych bifenyli, polibromowanych eterów difenyłowych i ftalanów w polimerach metodą chromatografii gazowej ze spektrometrią mas oraz sprzężonej z pirolizerem lub termodesorberem (Py/TD-GC-MS).
PN-EN 62321-3-4	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 3-4: Badania przesiewowe - Oznaczanie ftalanów w tworzywach sztucznych, znajdujących się w wyrobach elektrotechnicznych, metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej z detektorem ultrafioletowym (HPLC-UV), chromatografii cienkowarstwowej (TLC) i spektrometrii mas z desorpcją termiczną (TD-MS).
PN-EN 62321-4	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 4: Oznaczanie rtęci w tworzywach sztucznych, metalach i urządzeniach elektronicznych metodami: CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES oraz ICP-MS.
PN-EN 62321-5	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 5: Oznaczanie kadmu, ołowiu i chromu w tworzywach sztucznych i urządzeniach elektronicznych oraz kadmu i ołowiu w metalach metodami: AAS, AFS, ICP-OES oraz ICP-MS.
PN-EN 62321-6	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 6: Oznaczanie bifenyli polibromowanych i difenyłowych eterów polibromowanych w tworzywach sztucznych metodą chromatografii gazowej ze spektrometrią mas (GC-MS).
PN-EN 62321-7-1	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 7-1: Określanie obecności sześciowartościowego chromu (Cr(VI)) metodą kolorymetryczną w barwnych i bezbarwnych powłokach antykorozyjnych metali.
PN-EN 62321-7-2	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 7-2: Chrom sześciowartościowy - Określanie metodą kolorymetryczną zawartości sześciowartościowego chromu (Cr(VI)) w tworzywach sztucznych i urządzeniach elektronicznych.

PN-EN 62321-8	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 8: Oznaczanie ftalanów w tworzywach sztucznych metodą chromatografii gazowej ze spektrometrią mas (GC-MS) oraz metodą pirolizy lub desorpcji termicznej z chromatografią gazową ze spektrometrią mas (Py/TD-GC-MS).
PN-EN 62321-9	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 9: Oznaczanie heksabromocyklododekanu w polimerach metodą chromatografii gazowej ze spektrometrią mas (GC-MS).
PN-EN 62321-11	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 11: Oznaczanie fosforanu tris(2-chloroetylu) (TCEP) w tworzywach sztucznych metodą chromatografii gazowej ze spektrometrią mas (GC-MS) i metodą chromatografii cieczowej ze spektrometrią mas (LC-MS).
PN-EN 62321-12	Oznaczanie wybranych substancji w wyrobach elektrotechnicznych - Część 12: Oznaczanie jednocześnie - Oznaczanie polibromowanych bifenyli, polibromowanych eterów difenyłowych i ftalanów w polimerach metodą chromatografii gazowej ze spektrometrią mas.

Źródło: opracowano na podstawie [17]

Przedstawione w normach metody można podzielić, ze względu na precyzję uzyskanych wyników, na przesiewowe (przybliżone) oraz precyzyjne (dokładne). Metody przybliżone obarczone są dużym błędem, np. w przypadku oznaczania zawartości Cd, Pb, Hg, Cr, Br techniką XRF dochodzi on do 30% lub pozwalają jedynie wskazać, czy oznaczany związek w próbce występuje (analiza jakościowa) bez określenia poziomu jego zawartości. Wykrycie oznaczanych związków metodami przesiewowymi, wymaga prowadzenia dalszych badań z wykorzystaniem metod dokładnych, pozwalających uzyskać precyzyjną wartość, będącą podstawą do oceny spełnienia wymagań wskazanych w Dyrektywie RoHS [18]. Techniki analityczne dedykowane oznaczaniu poszczególnych związków chemicznych w elementach metalowych i polimerowych kabli przedstawiono na rysunku 2.



Oznaczenia:

AAS	absorpcyjna spektrometria atomowa
AFS	fluorescencyjna spektrometria atomowa
C-IC	chromatografia jonowa ze spalaniem
CV-AAS	absorpcyjna spektrometria atomowa z zastosowaniem zimnych par
CV-AFS	fluorescencyjna spektrometria atomowa z zastosowaniem zimnych par
GC-MS	chromatografia gazowa z detekcją spektrometrią mas
HPLC-UV	wysokosprawna chromatografia cieczowa sprzężona ze spektrofotometrią w ultrafiolecie
ICP-OES	spektrometria emisyjna ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej
ICP-MS	spektrometria mas z plazmą indukcyjnie sprzężoną
LC-MS	chromatografia cieczowa z detekcją spektrometrią mas
Py/TD-GC-MS	chromatografia gazowa ze spektrometrią mas sprzężona z pirolizerem / termodesorberem
TD-MS	spektrometria mas z desorpcją termiczną
TLC	chromatografia cienkowarstwowa
UV-VIS	spektrofotometria w zakresie światła ultrafioletowego i widzialnego
XRF	fluorescencyjna spektrometria rentgenowska

Rys. 2. Schemat doboru technik analitycznych stosowanych w badania substancji w zależności od rodzaju materiału kabla elektrycznego

W przypadku oznaczania zawartości metali Cd, Pb, Hg, Cr (VI) próbki wymagają wcześniejszej mineralizacji za pomocą kwasów: solnego, azotowego oraz fluorowodorowego, użytych w odpowiednich proporcjach, z wykorzystaniem urządzenia - wysokociśnieniowego mineralizatora mikrofalowego. Roztwory po mineralizacji poddawane są kolejno analizie technikami zgodnymi z rysunkiem 2, tj.:

- Hg za pomocą technik CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES, ICP-MS,
- Cd, Pb, Cr_{całk} za pomocą technik AAS, AFS, ICP-OES, ICP-MS,
- Cr (VI) za pomocą techniki UV-VIS.

W przypadku oznaczania zawartości związków organicznych w matrycach polimerowych, w pierwszym etapie należy przeprowadzić ich ekstrakcje rozpuszczalnikami organicznymi z wykorzystaniem łaźni ultradźwiękowej, ekstraktora Soxhlet'a lub wysokociśnieniowego ekstraktora SPE. Rozpuszczalnikami właściwym do ekstrakcji ftalanów (DBP, BBP, DIBP, DEHP) są dichlorometan lub heksan, w przypadku polibromowanych eterów difenyłowych (PBDE) oraz polibromowanych bifenyli (PBB) wykorzystuje się toluen. Roztwory po ekstrakcji analizowane są najczęściej za pomocą chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią mas.

5. Podsumowanie

Dynamiczny wzrost ilości odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego w Unii Europejskiej wymusza konieczność analizy wchodzących w ich skład kabli elektrycznych. W świetle wymagań gospodarki o obiegu zamkniętym stanowią one istotne źródło cennych surowców wtórnych (np. miedzi). Ze względu na stosowane do ich produkcji materiały polimerowe mogą one zawierać substancje niebezpieczne dla zdrowia ludzi i środowiska. Ich źródłem są dodatki modyfikujące właściwości, w tym plastyfikatory, uniepalniacze i stabilizatory. Dla ograniczenia zagrożeń związanych z obecnością niebezpiecznych substancji chemicznych w odpadach sprzętu elektrycznego i elektronicznego wprowadzono w Unii Europejskiej przepisy prawne w formie Dyrektywy RoHS. Komisja Europejska regularnie aktualizuje wykaz substancji objętych ograniczeniami Dyrektywy RoHS, uwzględniając dane toksykologiczne i środowiskowe pochodzące z badań naukowych [12-14]. Podstawą aktualizacji są oceny właściwości substancji, takich jak kancerogenność, mutagenność, reprotoksyczność, trwałość, zdolność do bioakumulacji oraz potencjał uwalniania w cyklu życia produktu.

Dla zapewnienia zgodności z wymaganiami Dyrektywy RoHS, szczególne istotne jest potwierdzenie, za pomocą badań laboratoryjnych, bezpieczeństwa chemicznego kabli elektrycznych przed wprowadzeniem ich na rynek Unii Europejskiej. Realizacja tego celu wymaga stosowania

odpowiednio czułych i selektywnych metod analitycznych, umożliwiających oznaczanie metali ciężkich i związków organicznych na poziomach śladowych. Z tego względu wymaga wykorzystania zaawansowanych technik analitycznych, takich jak GC-MS czy ICP-MS, charakteryzujących się wysoką rozdzielczością i niskimi granicami oznaczalności. Metody przesiewowe mogą znaleźć zastosowanie na etapie wstępnej identyfikacji potencjalnie problematycznych substancji, jednak ich ograniczona czułość może prowadzić do niedoszacowania lub pominięcia związków występujących w niskich stężeniach. W związku z cyklicznym poszerzaniem listy ograniczeń o nowe substancje chemiczne konieczny jest również rozwój metod analitycznych i ich doskonalenie.

Literatura

1. European Commission: Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en [dostęp 10 czerwca 2025]
2. Eurostat: Statistics Explained: Waste statistics – electrical and electronic equipment. Data from October 2022 https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment [dostęp 10 czerwca 2025].
3. The Guardian 2024, October 8. Britons urged to dig out unwanted electricals to tackle copper shortage. <https://www.theguardian.com/environment/2024/oct/08/britons-urged-to-dig-out-unwanted-electricals-to-tackle-copper-shortage> [dostęp 10 czerwca 2025].
4. Kumar H., Kumagai S., Saito Y., Yoshioka T.: Latest trends and challenges in PVC and copper recovery technologies for End-of-Life thin cables, *Waste Management*, Vol. 174, 2024, pp. 400-410, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.012>.
5. Socolof M.L., Smith J., Cooper D., Amarakoon S.: Wire and cable insulation and jacketing: Life-cycle assessments for selected applications. Public Review Draft. EPA 744-R-08-001. 2008 <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P1000LF1.TXT>
6. Figiel A.: Badanie i ocena przewodów i kabli elektrycznych, *MASZYNY GÓRNICZE NR 3/2019*, <https://doi.org/10.32056/KOMAG2019.3.1>
7. Dyrektywa 2002/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym, Dz.U. L 37 z 13.2.2003, str. 19-23 z późn.zm.
8. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/65/UE z dnia 8 czerwca 2011 r. w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym, Dz.U. L 174 z 1.7.2011, p. 88-110 z późn.zm.

9. Kolasa D., Lach J., Wróbel K., Samsonowska K., Kaszuba A., Stępkowska A., Wróbel J.: Requirements for the content of harmful substances in market products of plastics and rubber. Part III. Electrical and electronic equipment, batteries and accumulators. *Polimery*, 68(1), 32-47. <https://doi.org/10.14314/polimery.2023.1.5>
10. Komisja Europejska (2020): Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy, COM(2020)98 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098> [dostęp 10 czerwca 2025].
11. European Commission: FAQ key guidance document – RoHS, 2012, https://environment.ec.europa.eu/document/download/051e7e21-a0cc-4cb0-a3aa-ae6cb7f13488_en?filename=FAQ%20key%20guidance%20document%20-%20RoHS.pdf
12. European Commission: Directorate-General for Environment: Support for the evaluation of Directive 2011/65/EU on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment – Final report, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/89335> [dostęp 10 czerwca 2025].
13. European Commission: Directorate-General for Environment, Ramboll: Gustavsson N., de Bruijne E., Berlinghof T., Frick F., Schramm B., Allberg A., Berninger A., Scheer S., Obajdin K., Zotz F.; Öko-Institut e.V.: Baron Y., Moch K., Magrini C.: Study to support the assessment of impacts associated with the general review of Directive 2011/65/EU (RoHS Directive) – Final report, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/809625> [dostęp 10 czerwca 2025].
14. European Commission: Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions on the review of the Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. COM(2023) 760 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2023:760:FIN> [dostęp 10 czerwca 2025].
15. Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH), utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów, zmieniające dyrektywę 1999/45/WE oraz uchylające rozporządzenie Rady (EWG) nr 793/93 i rozporządzenie Komisji (WE) nr 1488/94, jak również dyrektywę Rady 76/769/EWG i dyrektywy Komisji 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/WE i 2000/21/WE, Dz.U. L 396, 30/12/2006, str. 1-794 z późn.zm.

16. European Commission: Directorate-General for Environment, Fraunhofer IZM: Deubzer O, Clemm C, Oeko-Institut e.V.: Baron Y., Köhler A.R., Gensch C.O., Löw C., Moch K., Möller M.: Study to support the review of the list of restricted substances and to assess a new exemption request under RoHS 2 (Pack 15) – Final report, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/47125>
17. <https://wiedza.pkn.pl/> [dostęp 10 czerwca 2025]
18. Balaram V., Rambabu U., Reddy M.R.P., Munirathnam N.R., Chatterjee S.: RoHS Regulation: Challenges in the Measurement of Substances of Concern in Industrial Products by Different Analytical Techniques. MAPAN 33, 329-346 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12647-018-0263-7>

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2025.8>

Metan w powietrzu wentylacyjnym a Rozporządzenie Metanowe UE

Jacek Korski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Rozporządzenie metanowe Unii Europejskiej wprowadza także dla górnictwa węgla kopalnych nowe obowiązki i zadania, które w istotny sposób mogą wpłynąć na koszty operacyjne przedsiębiorstw górniczych i kopalń węgla kamiennego i brunatnego, podziemnych i odkrywkowych. Dotyczy także zlikwidowanych zakładów górniczych. Jednym z poważnych problemów związanych z implementacją tego rozporządzenia jest metan zawarty w powietrzu wentylacyjnym uwalnianym do atmosfery przez wydechowe szyby wentylacyjne. Stężenie tego gazu jest bardzo niskie, ale sumaryczna ilość metanu jest stosunkowo duża. W rozdziale przedstawiono propozycję ograniczenia objętości emitowanego w ten sposób gazu, co powinno wpłynąć na dość proste ograniczenie przewidywanych przyszłości kar finansowych i opłat za emisję metanu z powietrzem wentylacyjnym z podziemnych kopalń węgla kamiennego.

Słowa kluczowe: gazy cieplarniane, metan, metan w powietrzu wentylacyjnym, efekt cieplarniany

Metan w powietrzu wentylacyjnym a Rozporządzenie Metanowe UE

Abstract: The European Union's methane regulation also introduces new obligations and tasks for fossil coal mining, which may significantly affect the operating costs of mining companies and hard coal and lignite mines, underground and open-pit mines. It also applies to decommissioned mines. One of the serious problems related to the implementation of this regulation is the methane contained in the ventilation air released into the atmosphere through exhaust ventilation shafts. The concentration of this gas is very low, but the total amount of methane is relatively large. The chapter presents a proposal to limit the volume of gas emitted in this way, which should result in a fairly simple reduction of the expected future financial penalties and fees for methane emissions with ventilation air from underground hard coal mines.

Keywords: greenhouse gases, methane, ventilation air methane, greenhouse effect.

1. Wprowadzenie

Efekt cieplarniany jest porównywany do szklanego dachu, który przepuszcza promieniowanie świetlne słońca, które zamienia się w procesach przyrodniczych na promieniowanie ciepłe, ale dach ten nie pozwala na swobodne wypromieniowanie tego ciepła poza atmosferę Ziemi. Rola gazów cieplarnianych (np. dwutlenku węgla czy metanu) w atmosferze bywa często porównywana do takiego szklanego dachu. Ziemia absorbuje padające na nią krótkofalowe promieniowanie słoneczne. To zamienia się na energię ciepłą, ogrzewając jej powierzchnię. Następnie planeta emituje promieniowanie długofalowe, a to ucieka w przestrzeń kosmiczną przez atmosferę. System jest w równowadze, gdy strumień padającej energii równa się strumieniowi energii opuszczającej. Dzięki

temu możemy wyliczyć, że w przypadku braku atmosfery średnia temperatura dla naszej półkuli wynosiłaby około -18°C . Tymczasem średnia temperatura w skali globalnej wynosi około $14,5^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że różnica między temperaturą efektywną bez atmosfery a faktyczną wynosi w przybliżeniu 33°C . To właśnie jest miarą naturalnego efektu cieplarnianego [1]. W wyniku gospodarczej działalności człowieka w mniej więcej ostatnich 100 latach istotnej zmianie uległa atmosfera Ziemi, między innymi skład chemiczny powietrza. Wskutek spalania dużych ilości paliw kopalnych, wylesiania powierzchni, intensywnego rozwoju hodowli zwierząt oraz innych działań wzrasta zawartość w atmosferze gazów uznawanych za cieplarniane, w tym metanu. W związku z tym, po okresie dążenia do ograniczenia emisji dwutlenku węgla, podjęto w ostatnich latach działania na rzecz ograniczenia emisji metanu z przemysłowej działalności człowieka. Należy zauważyć, że istotnym źródłem wydzielania metanu do atmosfery jest hodowla zwierząt, której skala rośnie i rośnie, kosztem lasów, powierzchnia upraw roślin paszowych i przetwórstwo pasz.

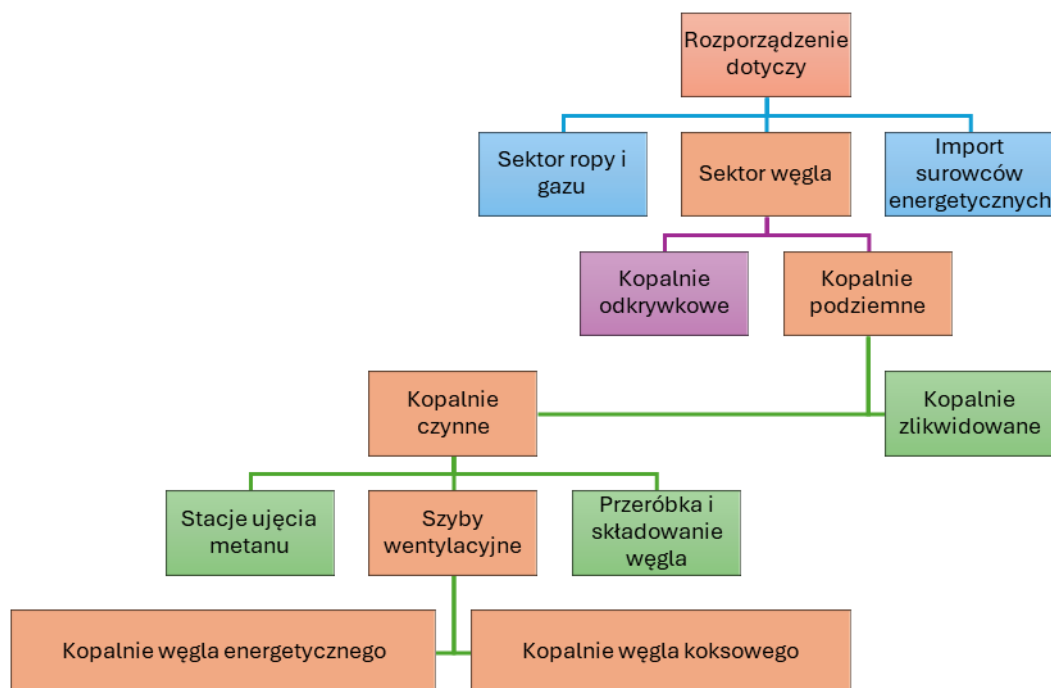
Metan to najmniejszy węglowodór, którego cząsteczka składa się z jednego atomu węgla i czterech atomów wodoru. Metan podlega bardzo wolnemu samoutlenianiu, które przyspiesza ze wzrostem temperatury (szczególnie w temperaturze $850\text{--}900^{\circ}\text{C}$).

Metan jest ważnym gazem wywołującym efekt cieplarniany, ustępującym jedynie CO_2 . Choć ilość emisji metanu ustępuje dwutlenkowi węgla to ma on znacznie większą zdolność do zatrzymywania ciepła w atmosferze. Metan jest gazem cieplarnianym, którego potencjał cieplarniany jest 72-krotnie większy niż dwutlenku węgla (w skali 20 lat) lub 25 (w skali 100 lat).

Szacuje się, że w 2001 roku metan odpowiadał za 20% wymuszenia radiacyjnego wśród gazów cieplarnianych (bez uwzględnienia pary wodnej).

2. Rozporządzenie metanowe Unii Europejskiej a górnictwo węglowe

Wydane w 2024 roku Rozporządzenie w sprawie redukcji emisji metanu w sektorze energetycznym [2] dotyczy szeroko rozumianego sektora energetycznego, górnictwa i obrotu gazem ziemnym. Na rysunku 1 pokazano podstawowe obszary objęte tym Rozporządzeniem ze szczególnym uwzględnieniem górnictwa węglowego, a w tym górnictwa podziemnego.



Rys. 1. Zakres regulowany Rozporządzeniem Metanowym ze szczególnym uwzględnieniem podziemnych kopalń węgla kamiennego [Źródło: opracowanie własne]

Ogólne założenia i informacje wynikające z Rozporządzenia to:

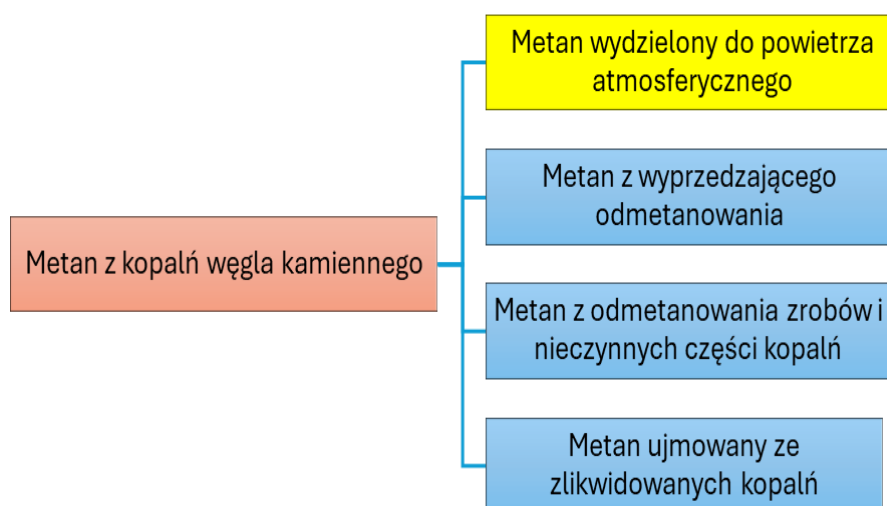
- Jednolite ramy prawne dotyczące monitorowania, raportowania i ograniczania emisji metanu w szeroko rozumianej energetyce.
- Wyznaczenie w każdym państwie co najmniej jednego organu egzekwującego przepisy oraz niezależnych akredytowanych weryfikatorów.
- Wyposażenie organów kontrolnych w uprawnienia pełnej kontroli (także niezapowiedzianej).
- Stworzenie możliwości wnoszenia przez osoby fizyczne i prawne do tych organów skarg.
- UWAGA: W zakresie czynnych kopalń węgla kamiennego rozporządzenie dotyczy w istocie Polski.
- Rozporządzenie nakłada konieczność wdrożenia procedur monitorowania emisji metanu we wszystkich podziemnych kopalniach węgla kamiennego, w tym czynnych, nieczynnych (także uznanych za niemetanowe).
- Państwa członkowskie zobowiązane są do ustanowienia przepisów dotyczących sankcji w przypadku naruszeń rozporządzenia. Kary muszą być skuteczne, proporcjonalne i odstrasżające oraz pozbawiające korzyści gospodarczych.

- Państwa członkowskie mogą stosować system zachęt dla operatorów czynnych kopalń do ograniczania emisji metanu, bazując na opłatach, należnościach lub karach, o których mowa w Rozporządzeniu, w szczególności przeznaczonych na inwestycje wychwytu metanu oraz redukcji emisji metanu z szybów wentylacyjnych.

Należy zauważyć, że rozporządzenie nakłada bezwarunkowe zobowiązanie państw członkowskich (a w istocie Polski) do redukcji emisji metanu z powietrzem wentylacyjnym, czyli powietrzem o skrajnie niskiej zawarości metanu. Rozporządzenie nakłada także nowe, trudne zadania związane z pomiarami emisji metanu.

3. Metan z podziemnych kopalń węgla kamiennego

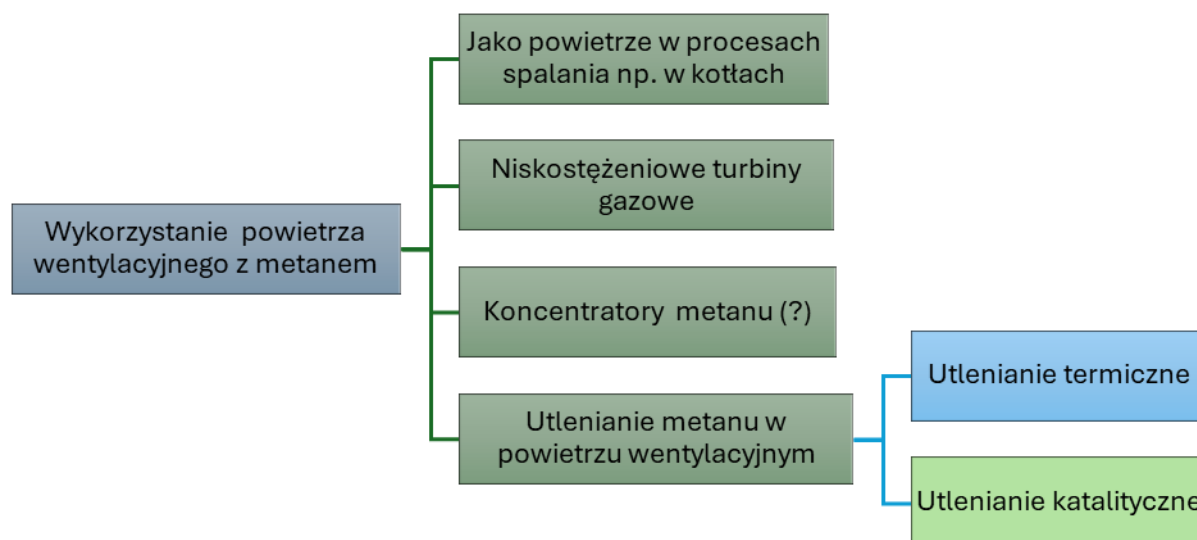
Metan występuje w pokładach węgla kamiennego i skałach otaczających, a w związku z jego właściwościami (palny, wybuchowy, lżejszy od powietrza) podejmuje się działania na rzecz jego wychwytywania lub rozrzedzania przez drenaż lub rozrzedzanie [3, 4, 5]. Na rysunku 2 pokazano źródła potencjalnego wydzielania lub ujmowania metanu w kopalniach podziemnych.



Rys. 2. Metan z podziemnych kopalń węgla kamiennego [Źródło: Opracowanie własne]

W rozporządzeniu metanowym zwrócono uwagę na metan wydzielany do atmosfery wraz z powietrzem wentylacyjnym. W przypadku metanu wydzielającego się do powietrza w wyrobiskach kopalnianych i następnie oddawanego do atmosfery cechuje on się niskim stężeniem (w przypadku polskich przepisów górniczych to do 0,75% CH₄) przy bardzo dużych objętościach przepływającego powietrza. Przykładowo: wentylator kopalniany o wydajności 20 000 m³/min przy stężeniu metanu (przykładowo) 0,5 % wydymuchuje do atmosfery w ciągu doby 144 000 m³ tego gazu (ok. 103 220 kg).

Od wielu lat podejmuje się próby wykorzystywania takiego, niskostężeniowego metanu gospodarczo lub unieszkodliwiania, co pokazano na rysunku 3 [6].



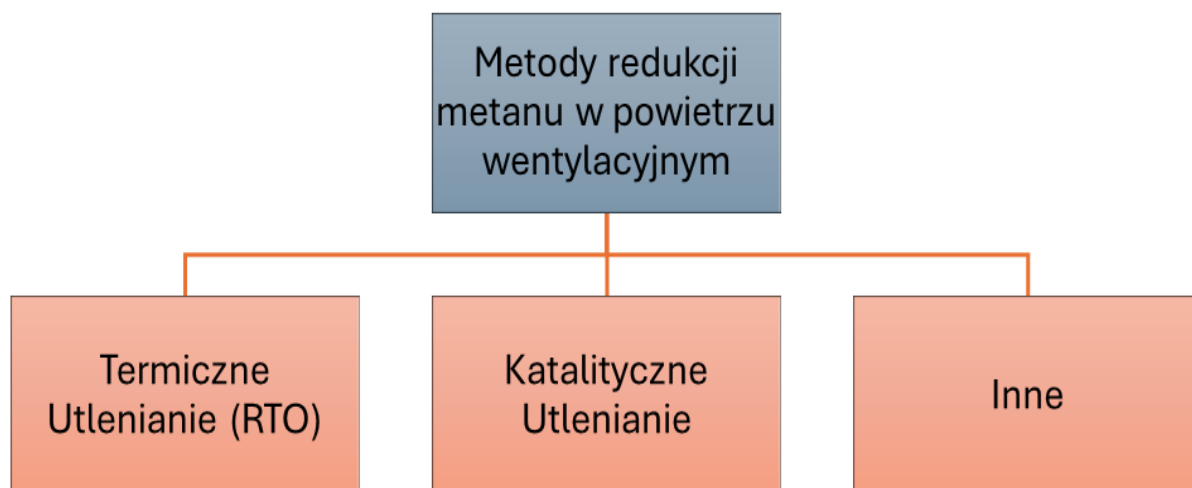
Rys. 3. Metody wykorzystania metanu z powietrza wentylacyjnego [Źródło: Opracowanie własne]

Z powietrza wentylacyjnego z różnych przyczyn wykorzystanie metanu z powietrza wentylacyjnego ma niewielki zakres. Ograniczanie emisji metanu z powietrza wentylacyjnego należy traktować jako ważne działanie, bowiem jest skutecznym sposobem na redukcję poziomu emisji metanu do atmosfery. Obecnie tylko jedna metoda (Regeneracyjne Utlenianie Termiczne, czyli RTO – Regenerative Thermal Oxidation) jest sprawdzona technicznie.

Jeżeli nie będziemy mogli dążyć do wykorzystania metanu zawartego w powietrzu wentylacyjnym to powinniśmy w pierwszej kolejności skupić się na sprawnej eliminacji metanu z tego powietrza.

2. Możliwości redukcji lub eliminacji metanu z powietrza wentylacyjnego

Z punktu widzenia Rozporządzenia UE metan wentylacyjny to metan wydzielany z wentylatorów szybów wydechowych. Z punktu widzenia technicznego można wskazać kilka grup metod redukcji metanu w powietrzu wentylacyjnym (rys. 4).



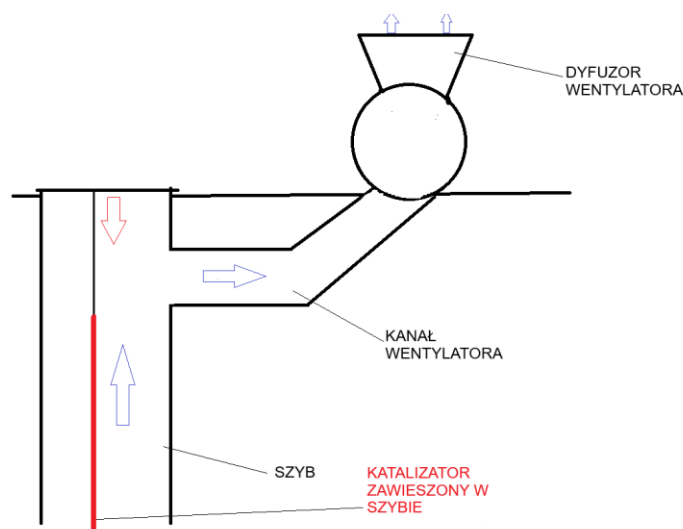
Rys. 4. Metody redukcji metanu w powietrzu wentylacyjnym [Źródło: Opracowanie własne]

Ograniczenia metody RTO powodują, że korzystne jest zastosowanie rozwiązań z katalitycznym utlenianiem metanu w powietrzu wentylacyjnym. Katalityczne utlenianie metanu z powietrza kopalnianego wymaga opracowania skutecznych, trwałych i wygodnych w utrzymaniu katalizatorów przy zachowaniu oczekiwanych parametrów powietrza wentylacyjnego.

Poniżej przedstawiono trzy potencjalnie możliwe opcje zabudowy katalizatorów dla ograniczenia lub wyeliminowania emisji metanu z powietrza kopalnianego do atmosfery.

3.1. Katalizator w szybie wentylacyjnym - idea

Katalizator zawieszony w szybie wentylacyjnym powyżej najwyższego poziomu pozwoliłby na zabudowanie go na znacznej długości celem uzyskania pożądanej sprawności.

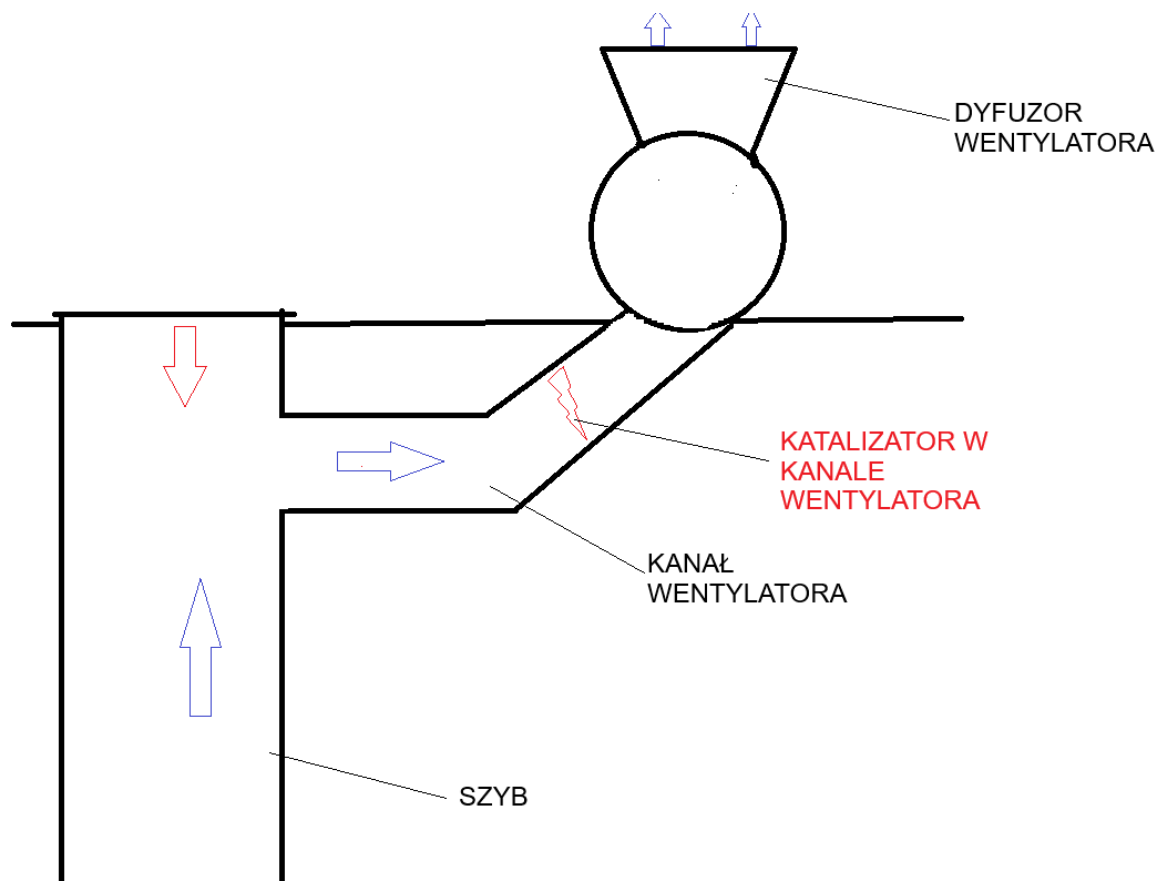


Rys. 5. Idea katalizatora w szybie kopalnianym [Źródło: Opracowanie własne]

Problemem może być obsługa takiej instalacji, w tym podnoszenie i opuszczanie katalizatora.

3.2. Katalizator w kanale wentylatora - idea

Na rysunku 6 pokazano schematycznie zabudowę katalizatora w kanale dolotowym wentylatora rozwiązanie takie wymaga dla każdego szybu wentylacyjnego tylu katalizatorów, ile jest kanałów dolotowych do wentylatorów (za wyjątkiem wentylatorów pracujących stale jako podwójne).



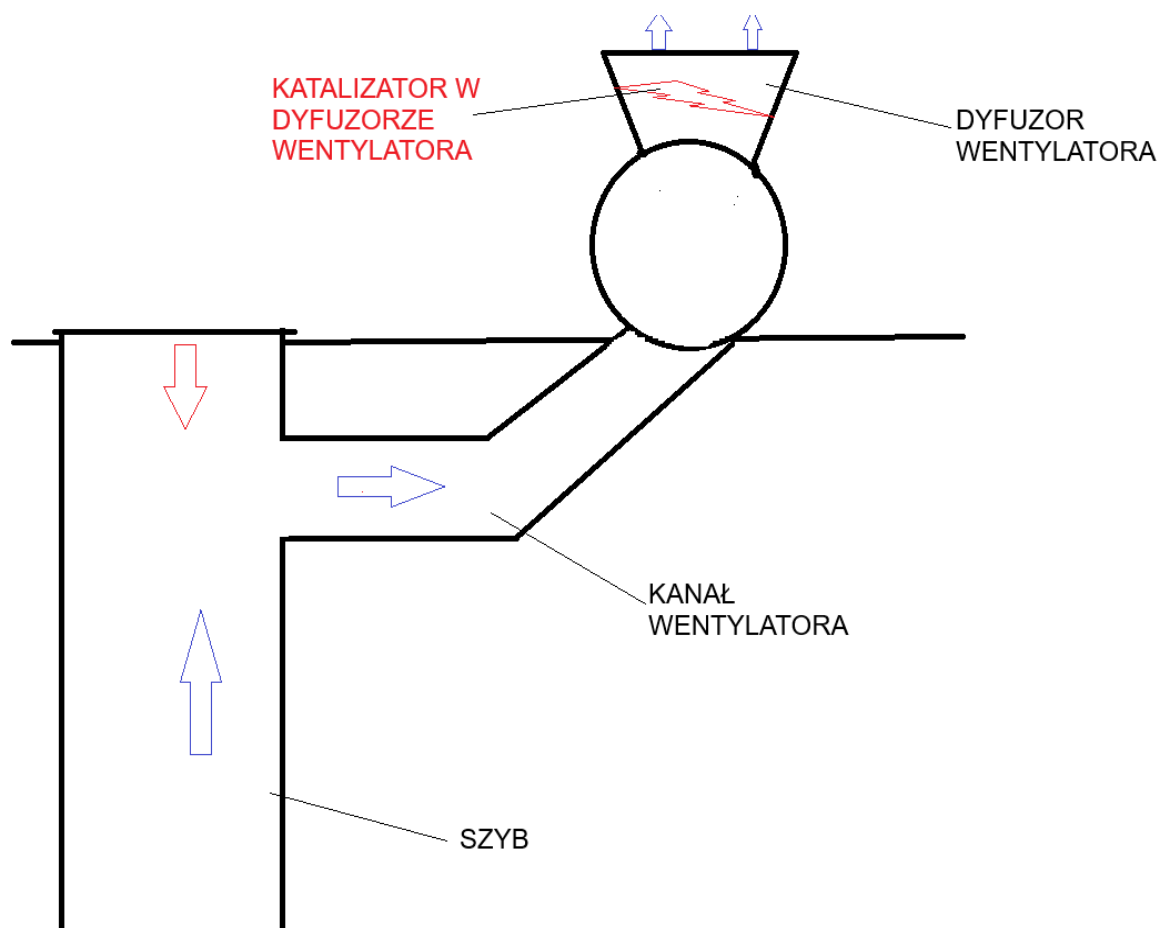
Rys. 6. Idea katalizatora zabudowanego w kanale dolotowym wentylatora głównego przewietrzania

[Źródło: Opracowanie własne]

Katalizatory takie były łatwiej dostępne do prac serwisowych, a ze względu na stosowanie wentylatorów rezerwowych ich dostępność obsługowa byłaby lepsza niż katalizatorów zawieszonych w szybie kopalnianym.

3.3. Katalizator w dyfuzorze wentylatora głównego – idea

Katalizator zabudowany w dyfuzorze wentylatora stwarza dogodne warunki do zabudowy w postaci odpowiednio dobranych i przygotowanych nakładek na dyfuzor wentylatora z dobrą dostępnością serwisową, w tym diagnostyczną.



Rys. 7. Metody redukcji metanu w powietrzu wentylacyjnym [Źródło: Opracowanie własne]

Zlokalizowany na powierzchni katalizator narażony będzie na oddziaływanie czynników atmosferycznych, co uwzględnić należy w procesie projektowania.

Przedstawione wyżej propozycje mogą zostać zastosowane łącznie, co skomplikuje jednak instalację i niezbędne nakłady.

4. Podsumowanie

Katalityczne utlenianie powietrza kopalnianego z metanem stawia liczne wyzwania, takie jak:

- Dobór materiału katalizatora pod kątem skuteczności utleniania i trwałości.
- Lokalizacja katalizatora (np. kanał wentylacyjny, dyfuzor, niektóre grupowe prądy zużytego powietrza).
- Konstrukcja katalizatora do warunków zabudowy.
- Odzysk, recykling katalizatora.

Problemy te wydają się jednak możliwe do w miarę szybkiego rozwiązania. Jest to istotne w świetle zapisów Rozporządzenia UE i prawdopodobnie długiego cyklu dochodzenia do stworzenia funkcjonalnych rozwiązań umożliwiających gospodarcze wykorzystanie metanu o niskich stężeniach, zawartego w powietrzu wentylacyjnym.

Literatura

1. <https://pl.tergo.io/blog/nauka-i-natura/metan-gazy-cieplarniane/> [dostęp. 10.01.2025].
2. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1787 z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie redukcji emisji metanu w sektorze energetycznym oraz zmieniające rozporządzenie (UE) 2019/942.
3. Szlęzak N., Swolkień J.: Wentylacja kopalń. Wydawnictwo AGH, Kraków 2023.
4. Swolkień J.: Przepływ gazów w zrobach ścian zawałowych i ocena wpływu zmian ciśnienia barometrycznego na wydzielanie gazów do wyrobisk.
5. Praca zbiorowa: Metan i jego wykorzystanie. Zakład Odmetanowania Kopalń "ZOK", Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2011.
6. UNECE: Best Practice Guidance on Ventilation Air Methane (VAM) Mitigation. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva 2025.

INDEKS AUTORÓW

Sławomir Bartoszek (rozdz. 5)
Jakub Bernatt (rozdz. 5)
Przemysław Deja (rozdz. 4)
Andrzej Drwięga (rozdz. 3)
Andrzej Figiel (rozdz. 6)
Monika Gawlik-Jędrysiak (rozdz. 7)
Beata Gryniewicz-Bylina (rozdz. 7)
Przemysław Jura (rozdz. 1)
Marek Kalita (rozdz. 2)
Jacek Korski (rozdz. 8)
Bożena Rakwicz (rozdz. 7)
Joanna Rogala-Rojek (rozdz. 5)
Arkadiusz Sobolewski (rozdz. 2)
Zbigniew Szkudlarek (rozdz. 2)