

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Bartłomieja Ziętka,
pt.: „Metody analizy danych z systemów o architekturze Internetu
Rzeczy i przetwarzania w chmurze na potrzeby monitorowania
procesów technologicznych pozyskiwania rudy miedzi”

I. Podstawa recenzji

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 18 czerwca 2025 r. w oparciu o otrzymany egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z pismem przewodnim z dnia 26.06.2025 r., sygnowanym przez Przewodniczącego RDN IŚGiE, Pana prof. dr hab. inż. Roberta Króla.

II. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „Metody analizy danych z systemów o architekturze Internetu Rzeczy i przetwarzania w chmurze na potrzeby monitorowania procesów technologicznych pozyskiwania rudy miedzi” stanowi interdyscyplinarną pracę z pogranicza informatyki, automatyki przemysłowej i inżynierii górniczej. Praca liczy około 200 stron i składa się z siedmiu rozdziałów głównych, obejmujących przegląd literatury, opis metodyki badawczej, prezentację wyników eksperymentów oraz wnioski i rekomendacje.

Zakres tematyczny pracy jest szeroki i ambitny, obejmując zarówno aspekty teoretyczne, jak i praktyczne zastosowania w rzeczywistych warunkach kopalni podziemnej rud miedzi. Autor przedstawia rezultaty badań prowadzonych dla różnorodnych procesów głównych oraz procesów wsparcia w zakładzie górniczym, wykorzystując pomiary z różnych typów maszyn i urządzeń. Pomiary te realizowane były na dwa sposoby: bezpośrednio oraz pośrednio. Pomiar bezpośredni oznacza instalację czujników lub systemów pomiarowych bezpośrednio na maszynie górniczej i monitorowanie jej pracy „u źródła” – dotyczy to na przykład maszyn wierzących czy maszyn kotwiących, gdzie sygnały rejestrowano wprost z układów napędowych lub zintegrowanych rejestratorów. Pomiar pośredni natomiast polegał na rejestrowaniu sygnałów prądowych urządzeń energomechanicznych – takich jak przenośniki taśmowe, wentylatory głównego przewietrzania, układy klimatyzacji lokalnej, pompy odwadniające czy pompy wody technologicznej – z wykorzystaniem cęgów pomiarowych zakładanych na przewody zasilające wychodzące z rozdzielni oddziałowej zasilającej cały oddział wydobywczy lub automatyki nadrzędnej. Taka dwoistość podejścia do pomiarów pozwoliła na kompleksowe objęcie monitoringiem zarówno głównych elementów procesu technologicznego, jak i kluczowych urządzeń służących utrzymaniu odpowiednich warunków technicznych i środowiskowych w kopalni.

Rozprawa dotyczy implementacji systemów pomiarowych IoT w środowisku górniczym, metod analizy sygnałów z różnorodnych czujników mierzących m.in. prąd, gazy oraz obrazy, a także technik sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do klasyfikacji stanów operacyjnych sprzętu górniczego, szczególnie istotnych przy analizie i interpretacji przebiegu procesów technologicznych. W pracy został również zaproponowany autorski mechanizm obrotowy do skanera lidarowego, który umożliwia dynamiczne obracanie sensora podczas pomiarów w wyrobiskach górniczych, co przekłada się na istotne zwiększenie zasięgu oraz gęstości rejestrowanej chmury punktów. Takie rozwiązanie pozwala na znacznie dokładniejsze odwzorowanie przestrzeni w trudnych warunkach podziemnych i stanowi praktyczny wkład do rozwoju narzędzi monitoringu przestrzennego w górnictwie. Dodatkowo praca obejmuje koncepcję przetwarzania danych w chmurze obliczeniowej oraz aspekty cyberbezpieczeństwa systemów przemysłowych.

Pierwszy rozdział wprowadza czytelnika w tematykę pracy, zawierając określenie celu i zakresu badań, sformułowanie hipotez badawczych oraz uzasadnienie podjęcia problematyki. Doktorant przedstawia znaczenie problematyki IoT w górnictwie oraz motywację do prowadzenia badań, tworząc solidne fundamenty teoretyczne dla dalszych rozważań.

Drugi rozdział, zatytułowany "Problem formulation", definiuje obszar problemowy badań. Autor opisuje możliwości transformacji różnych obszarów kopalni z użyciem nowych technologii oraz przedstawia wyzwania związane z adaptacją innowacyjnych rozwiązań w przemyśle górniczym. Rozdział ten ustanawia kontekst badawczy dla całej pracy.

Trzeci rozdział obejmuje kompleksowy przegląd literatury dotyczącej technologii IoT, przetwarzania danych w chmurze oraz ich zastosowań w górnictwie. Szczególną uwagę poświęcono modelom usług chmurowych oraz aktualnym trendom w dziedzinie Industry 4.0 w kontekście przemysłu wydobywczego. Rozdział ten stanowi podstawę teoretyczną dla dalszych rozważań badawczych.

Czwarty rozdział prezentuje przyjętą metodykę badawczą wraz z opisem narzędzi i technik wykorzystanych w pracy. Zawiera charakterystykę wykorzystanych technik analizy sygnałów, metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, oraz opis architektury systemów IoT zastosowanych w eksperymentach. Można przyjąć, że ta część pracy stanowi pomost między teorią a praktyką, przygotowując czytelnika pod szczegółową prezentację eksperymentów.

Piąty rozdział stanowi najbardziej obszerną część pracy i przedstawia szczegółowe eksperymenty oraz implementację systemów pomiarowych. Sekcja dotycząca eksperymentów z maszyną kotwiącą prezentuje metodę zbierania i analizy danych z rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Opis testowania czujnika gazów pokazuje praktyczne aspekty implementacji systemów pomiarowych w środowisku górniczym. Szczegółowy opis urządzeń wchodzących w skład systemu demonstruje kompleksowe podejście do budowy infrastruktury pomiarowej, uwzględniając specyfikę warunków podziemnych.

Szósty rozdział przedstawia metodykę analizy danych oraz wyniki eksperymentów. Prezentuje etapy przetwarzania danych oraz szczegółowe kroki procedur, pokazując systematyczne podejście do analizy zebranych informacji. Ta część pracy dokumentuje praktyczne zastosowanie opracowanych metod oraz prezentuje osiągnięte rezultaty badawcze.

Siódmy rozdział obejmuje testy wykonane w ramach walidacji opracowanych metod oraz analizę aspektów cyberbezpieczeństwa. Przedstawia procedury testowe oraz sposób oceny

bezpieczeństwa systemów, uzupełniając całościowy obraz opracowanych rozwiązań o kluczowe aspekty praktycznej implementacji.

Język i forma rozprawy są poprawne i odpowiadają standardom akademickim. Struktura pracy jest logiczna i przejrzysta, umożliwiając czytelnikowi systematyczne śledzenie toku rozumowania Autora. Wstęp i streszczenie precyzyjnie przedstawiają cel i zakres pracy, a wykaz publikacji Autora dokumentuje aktywność naukową Doktoranta w omawianych obszarach badawczych.

Praca wykazuje się ponadprzeciętnym poziomem merytorycznym oraz praktyczną orientacją, łącząc koncepcje teoretyczne z rzeczywistymi wyzwaniami przemysłu górnictwa.

III. Ocena realizacji celu naukowego pracy

Głównym celem pracy mgr inż. Bartłomieja Ziętka było opracowanie i weryfikacja metod analizy danych pozyskiwanych z prototypowych systemów pomiarowych opartych o architekturę Internetu Rzeczy (IoT) oraz przetwarzania w chmurze, dedykowanych do monitorowania wybranych procesów technologicznych w podziemnych kopalniach rud miedzi. Autor sformułował ten cel w sposób klarowny, nawiązując do rzeczywistych wyzwań i potrzeb współczesnego górnictwa, gdzie zdalny nadzór i automatyzacja odgrywają rosnącą rolę, a jednocześnie wdrożenia rozwiązań IT muszą mierzyć się ze specyfiką trudnego, nieprzewidywalnego środowiska pracy.

Oceniając stopień realizacji celu naukowego należy podkreślić, że Autor wykazał się dużą samodzielnością zarówno w budowie aparatury pomiarowej, modeli analitycznych jak również w nawiązywaniu współpracy z przedstawicielami kopalni. Zastosowanie badań w podziemnych warunkach kopalni umożliwiło Autorowi realizację wszystkich kluczowych eksperymentów na rzeczywistych obiektach. Monitorowanie zmienności sygnału prądowego, estymacja zużycia energii maszyn, ocena procesu kotwienia oraz analizy zagrożeń gazowych zostały przeprowadzone w autentycznym środowisku górnictwa. Autor testował zaprojektowane urządzenia i systemy pomiarowe w konkretnych scenariuszach wdrożeniowych, co pozwoliło na wiarygodną ocenę ich funkcjonowania w praktyce.

Analizy i rozwiązania z zakresu cyberbezpieczeństwa przedstawione w pracy stanowią dobrze przemyślaną koncepcję, która trafnie odpowiada na specyficzne potrzeby sektora wydobywczego. Autor opracował szczegółowe założenia oraz cele systemu bezpieczeństwa informatycznego, proponując kompleksową architekturę dostosowaną do wymagań branży. Przedstawione rozwiązania uwzględniają realia technologiczne i zagrożenia typowe dla instalacji przemysłowych, co świadczy o gruntownej analizie tematu i rozpoznaniu istotnych problemów środowiska wydobywczego.

Praca badawcza Doktoranta stanowi wynik jego wieloletnich badań prowadzonych m.in. w międzynarodowych konsorcjach projektowych oraz w projekcie komercyjnym na rzecz przemysłu. Zaprojektowane prototypowe urządzenia pomiarowe oraz autorskie metody przetwarzania danych zostały przetestowane w rzeczywistych warunkach przemysłowych.

Opracowane przez Doktoranta urządzenia pomiarowe i procedury analizy nadają się do dalszego rozwijania i mogą stanowić podstawę do przyszłych prac wdrożeniowych lub rozszerzonych badań w większej skali.

Podsumowując, cel naukowy pracy został zrealizowany w sposób adekwatny do aktualnych potrzeb i uwarunkowań górnictwa podziemnego rud miedzi. Autor potwierdził, że potrafi samodzielnie zaplanować, przygotować i przeprowadzić eksperymenty badawcze w warunkach rzeczywistych oraz wyciągnąć z nich wnioski. Prezentowana praca powiększa

wiedzę w zakresie wdrażania systemów IoT w trudnym środowisku kopalnianym i dobrze wpisuje się w aktualne trendy rozwoju technologii w górnictwie podziemnym.

IV. Oryginalność pracy oraz ocena wiedzy teoretycznej Doktoranta

W przypadku rozprawy mgr inż. Bartłomieja Ziętka wyraźnie widoczna jest próba podjęcia oryginalnej problematyki polegającej na transferze wyzwań architektury IoT oraz rozwiązań chmurowych do wymagającego środowiska górnictwa podziemnego. Praca doktorska wprowadza szereg nowych lub słabo obecnych w krajowej praktyce górniczej rozwiązań – szczególnie w zakresie prototypowania niskokosztowych systemów pomiarowych, integracji różnych technologii sensorowych, jak i analiz serii danych z maszyn czy środowiska pracy. Opracowane koncepcje i procedury, stanowią oryginalny wkład w rozwój narzędzi informatycznych potencjalnie użytecznych dla zarządzania, diagnostyki i bezpieczeństwa w kopalniach miedzi.

Na uwagę zasługuje umiejętność krytycznego wyboru tematyki, oddzielenia aspektów wdrożeniowych od poznawczych. Autor prezentuje wysoki poziom samodzielności w definiowaniu celów eksperymentalnych, doborze narzędzi sprzętowych i programowych oraz w prowadzeniu samej analizy sygnałów, co potwierdzają zarówno analiza literaturowa, jak i zaproponowane metody przetwarzania i segmentacji sygnału prądowego, metody detekcji cykli pracy czy koncepcje integracji pomiarów środowiskowych.

Wiedza teoretyczna Doktoranta pokrywa szerokie spektrum zagadnień inżynierii danych, przetwarzania sygnałów, informatyki i technologii górniczych. Dobrze udokumentowana znajomość aktualnego stanu wiedzy, bogaty przegląd literatury światowej oraz stosowanie terminologii właściwej dla analizowanych obszarów potwierdzają bardzo dobre przygotowanie merytoryczne Autora, jak również rozumienie interdyscyplinarnego charakteru podejmowanych zadań. W mojej ocenie Autor wykazał się wysoką dużą dojrzałością naukową oraz umiejętnością konceptualizacji problemu na gruncie teoretycznym i praktycznym.

Podsumowując, recenzowana praca doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Ziętka stanowi oryginalny wkład w rozwój narzędzi pomiarowych i analitycznych w górnictwie i dowodzi ugruntowanej, samodzielnej wiedzy Autora w zakresie swojej dyscypliny badawczej.

V. Uwagi szczegółowe

1. Organizacja i metodyka badań:

- W zakresie struktury pracy należy zauważyć, że rozprawa składa się z sześciu różnych modułów badawczych, które nie stanowią do końca spójnej, integralnej całości.
- Każdy z praktycznych rozdziałów został podzielony na sześć podrozdziałów, co powoduje, że zamiast analizować każdy obiekt od początku do końca, analizowane są różne jego aspekty w sposób fragmentaryczny. Dodatkowo, ogólna koncepcja mająca spinać całość zostaje przedstawiona na końcu pracy, a nie na początku, co w mojej ocenie nie sprzyja klarowności odbioru.
- Reprezentatywność próbek badawczych w prezentowanych analizach nie została jednoznacznie doprecyzowana, co budzi pewne wątpliwości w interpretacji wyników. Na podstawie opisów zawartych w pracy, można odnieść mylne wrażenie, że badania oparto o stosunkowo krótkoterminową próbkę, mimo iż faktyczna kampania pomiarowa obejmowała dłuższy okres czasu. W przyszłości zaleca się bardziej szczegółowy i jednoznaczny opis danych pomiarowych wykorzystanych w analizie, aby zapewnić czytelnikowi pełny wgląd w stopień zróżnicowania danych ze względu na różne typy

maszyn. Jasne przedstawienie zakresu oraz charakterystyki próbek pozwoli na właściwą ocenę reprezentatywności oraz wiarygodności wyników badań. Taka praktyka istotnie podniesie transparentność pracy i umożliwi czytelnikom lepsze zrozumienie kontekstu prowadzonych analiz.

- Autor w rozprawie połączył różne doświadczenia projektowe realizowane w zespole, wprowadzając wielokrotnie dygresje odbiegające od głównego wątku pracy poświęconego metodom analizy danych oraz interpretacji procesów technologicznych. Po tego typu wtrąceniach często kieruje czytelnika do własnych publikacji, co sprawia, że trudno miejscami jednoznacznie rozróżnić, które elementy należą do głównej treści rozprawy, a które stanowią wyłącznie dodatkowe uzupełnienia czy kontekst zewnętrzny. Zaburza to klarowność narracji i może utrudniać odbiorcy orientację w tym, które treści są kluczowe dla celu rozprawy, a które stanowią jedynie uzupełniające konteksty.

2. Aspekty techniczne i metodyczne:

- Kalibracja czujników wymaga komentarza odnośnie procedury wykonania. W rozdziale 5.2.4 Autor skalibrował czujnik gazów poprzez korelację jego odczytów z czujnikiem prawidłowo skalibrowanym w certyfikowanym laboratorium. Relacja między czujnikami może być nieliniowa. Brakuje informacji o wykonaniu kalibracji dla całego przedziału pomiarowego.
- Pewne warunki testowe wymagają uwagi. W sekcji 7.5 testy wykonano w laboratorium, a nie w docelowym środowisku podziemnym. Autor mógłby uzasadnić ten wybór, na przykład wskazując na ograniczenia organizacyjne czy bezpieczeństwa. Na stronie 50 Autor sugeruje, że rysunek przedstawia robota wykonującego inspekcje przenośnika w warunkach kopalni odkrywkowej, podczas gdy na zdjęciu przedstawiony jest przenośnik eksploatowany w hali, co potwierdza później w tekście. Te różne warunki eksploatacyjne mogą wpływać na reprezentatywność wyników i nie należy ich mylić ze sobą.

3. Analiza danych i klasyfikacja procesów:

- Metodyka analizy procesu wiercenia w przyszłości mogłaby być rozszerzona. Opracowana metoda zapewnia wykrywanie reżimu pozycjonowania, zawierania, wiercenia oraz biegu jałowego. Dobrym kierunkiem jest rozróżnienie w sygnałach obecności przerwy w wierceniu wynikającej ze zjawiska zakleszczenia narzędzia wierzącego. Dodatkowo maszyny przepływają otwory. Praktykowane są również procedury wykrywania niedozwolonego odgarniania zwiercin przy spągu przodka. Tego typu operacje nie są zauważalne w sygnale prądowym, jednak ich wymienienie wzbogaciłoby treść rozprawy. Dobrym kierunkiem badań jest również opracowanie metody wykrywającej otwór, w którym procedura zawierania została pominięta.
- Wykorzystanie operacyjne danych wymaga dopracowania. Doktorant skupił się na wykorzystaniu technik przetwarzania sygnałów połączonych z metodami statystycznymi i technikami sztucznej inteligencji do segmentacji sygnałów w celu detekcji wzorców odzwierciedlających różne reżimy operacyjne sprzętu górniczego. Zabrakło jednak propozycji dalszego wykorzystania tak przygotowanych danych do celów operacyjnych, strategicznych, optymalizacyjnych czy planistycznych.
- Analiza danych lidarowych z robota, w obecnym kształcie, nie przynosi jeszcze w pełni wymiernych korzyści dla oceny procesów technologicznych czy precyzyjnego określania uwarunkowań eksploatacyjnych. W obecnej wersji zastosowana metoda nie została jeszcze wykorzystana do bezpośredniej oceny stanu wyrobiska czy identyfikacji zagrożeń, co sprawia, że jej praktyczne zastosowanie w głównych celach

pracy jest na razie ograniczone. Warto jednak podkreślić, że opracowany przez Doktoranta moduł obrotowy do kamery lidar stanowi wartościowe rozwiązanie techniczne, pozwalające uzyskać lepsze pokrycie chmury punktów i zwiększyć potencjał dalszych badań nad rozwojem tej technologii. Rozwój tego modułu traktowany jest jako istotny, choć poboczny element względem głównego wątku badawczego. Można się spodziewać, że w przyszłości zarówno metody oceny uwarunkowań pracy maszyn, jak i metody oceny bezpieczeństwa w wyrobiskach będą dalej rozwijane i pozwolą na pełniejsze wykorzystanie możliwości analizy danych lidarowych.

- Autor wykorzystał czujnik IMU do określania dystansu jako odniesienia do pomiarów gazów w wyrobisku. W przyszłości mógłby rozważyć bardziej dokładne metody lokalizowania pomiarów, które będą adekwatne do śledzenia nieliniowej trajektorii ruchu górnika.

4. Testowanie i walidacja:

- W sekcji 7.6 Autor wspomina o wykorzystaniu metody burzy mózgów do tworzenia analiz ryzyka, jednak brakuje informacji o składzie zespołu, doświadczeniu uczestników oraz wypracowanych wnioskach.
- Rozdział o cyberbezpieczeństwie jest merytorycznie poprawny, lecz sprawia wrażenie nieco odrębnego od głównego nurtu badań nad analizą danych i procesami technologicznymi. Widać, że Autor z dużą pasją podchodzi do tematyki IoT oraz cyberbezpieczeństwa, jednak w mojej ocenie ten wątek mógłby zostać ograniczony lub nawet pominięty, nie umniejszając przy tym wartości oraz znaczenia rozprawy.

VI. Pozostałe uwagi

1. Koncepcyjne aspekty pracy:

- Istnieje pewna nieścisłość co do rzeczywistego efektu prac. We wstępie mowa jest o metodach lub systemie, a w hipotezach pojawia się nawet system wspomagania decyzji.

2. Specyfika środowiska górniczego:

- Opis procesu produkcyjnego mógłby zostać przedstawiony bardziej szczegółowo. Wiele informacji dotyczących procesów technologicznych oraz zarządzania parkiem maszynowym zostało opisanych w sposób bardzo ogólny.
- W streszczeniu oraz w dalszej części rozprawy Autor wielokrotnie formułuje zdania, z których wynika, że monitorowanie zagrożeń naturalnych stanowi proces technologiczny, np. „Odpowiednia ich analiza umożliwia dalszy rozwój wiedzy w zakresie procesów technologicznych (np. wiercenie, kotwienie, monitorowanie zagrożeń naturalnych) w kopalniach rud miedzi”.
- Dobrym uzupełnieniem badań byłoby rozpoznanie istniejących źródeł propagacji zakłóceń połączenia internetowego, co pozwoliłoby określić praktyczną aplikowalność proponowanych rozwiązań i uwarunkowania, jakie należy spełnić.

3. Uwagi redakcyjne:

- Figura 2 przedstawia populację maszyn rok do roku z zainstalowanym systemem pomiarowym SYNAPSA, jednak Autor mógłby wyjaśnić w nawiasie, że SYNAPSA to system monitoringu, o którym mowa w akapicie wyżej. Dodatkowo, Autor wspomina,

że systemy monitoringu są instalowane tylko na części maszyn, ale wykres nie pozwala na oszacowanie tej proporcji.

- Terminologia i konsekwencja stylistyczna wymagają uwagi. W pracy często stosowane są zwroty typu "nasz", gdzie występuje konflikt ze względu na to, że praca pisana jest w trzeciej osobie. Ponadto, skoro rozprawa doktorska jest pracą samodzielną, zwroty w liczbie mnogiej wydają się nieadekwatne. W rozdziale 3.4 skróty PaaS i SaaS powinny być rozwinięte odpowiednio jako Platform as a Service i Software as a Service.
- Opis matematyczny wymaga doprecyzowania. We wzorach (1) i (2) symbol ϕ pozostaje nieopisany.
- Na stronie 76 figura 42 została umieszczona między równaniem a jego opisem, co zakłóca płynność odbioru tekstu.
- W podpisie pod rysunkiem 14 określenie "ZWR District" można zastąpić bardziej precyzyjnym "ore enrichment plant".
- Bibliografia wymaga ujednolicenia. W wykazie publikacji Autora i artykułów konferencyjnych obie listy powinny mieć osobną numerację, zamiast być kontynuacją jednej sekwencji. Dodatkowo występuje brak konsekwencji w podawaniu danych Autorów - w większości przypadków podane są pełne imiona, ale w dwóch przypadkach tylko inicjały.

Wszystkie powyższe uwagi mają charakter konstruktywny i mogą służyć Doktorantowi jako wskazówki do dalszego rozwoju naukowego i zawodowego. Nie obniżają one pozytywnej oceny rozprawy, lecz wskazują obszary, które mogą zostać rozwinięte w przyszłości.

4. VII. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Bartłomieja Ziętka pt. „**Metody analizy danych z systemów o architekturze Internetu Rzeczy i przetwarzania w chmurze na potrzeby monitorowania procesów technologicznych pozyskiwania rudy miedzi**” stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój nowoczesnych technologii informatycznych w przemyśle górniczym. Praca charakteryzuje się wysoką aktualnością tematyki oraz zgodnością z międzynarodowymi trendami transformacji cyfrowej przemysłu, szczególnie w kontekście koncepcji Przemysłu 4.0.

Mocne strony rozprawy obejmują przede wszystkim praktyczny charakter badań prowadzonych w rzeczywistych warunkach przemysłowych kopalń, co nadaje pracy walor aplikacyjny i przemysłowy. Interdyscyplinarne podejście łączące wiedzę informatyczną, automatykę przemysłową oraz inżynierię górnictwa świadczy o dojrzałości naukowej Autora i głębokim zrozumieniu badanej problematyki. Szczególnie pozytywnie należy ocenić świadomość specyfiki środowiska górniczego, w tym niestacjonarności pracy maszyn, zróżnicowanych warunków eksploatacyjnych oraz różnic konstrukcyjnych między maszynami tego samego przeznaczenia.

Znaczący potencjał wdrożeniowy prezentowanych rozwiązań, szczególnie w kontekście wykorzystania skalowalnych i niskokosztowych czujników IoT, które można łatwo rozszerzyć w przyszłości na całą kopalnię, stanowi istotną wartość praktyczną pracy. Opracowane metody analizy sygnałów z wykorzystaniem technik sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do klasyfikacji stanów operacyjnych maszyn górniczych mogą przyczynić się do znaczącej poprawy efektywności monitoringu i zarządzania procesami technologicznymi.

Autor wykazał się wysokim poziomem wiedzy teoretycznej oraz umiejętnością praktycznego zastosowania zaawansowanych technik analitycznych w specyficznych warunkach przemysłu wydobywczego. Kompleksowe ujęcie problematyki, od aspektów technologicznych po

implementacyjne, potwierdza wszechstronność przygotowania naukowego Doktoranta oraz jego zdolność do prowadzenia samodzielnych badań na poziomie odpowiadającym wymaganiom stopnia doktora nauk technicznych.

Prezentowane rozwiązania wpisują się w strategiczne kierunki rozwoju przemysłu górniczego oraz mogą przyczynić się do zwiększenia konkurencyjności polskiego sektora wydobywczego na arenie międzynarodowej. Rosnące zapotrzebowanie przemysłu na rozwiązania zgodne z koncepcją inteligentnej kopalni oraz możliwości integracji z istniejącymi systemami monitoringu stwarzają realne perspektywy praktycznego wykorzystania wyników pracy.

Rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim w zakresie:

- rozwiązania aktualnego i istotnego problemu z zakresu dyscypliny naukowej inżyniera środowiska, górnictwo i energetyka,
- oryginalności i nowatorstwa naukowego,
- poziomu merytorycznego i metodycznego,
- praktycznego znaczenia wyników badań,
- samodzielności wykonania pracy,
- zgodności z profilem kierunku studiów.

Wartość naukowa i praktyczna prezentowanych osiągnięć, połączona z wysokimi kompetencjami teoretycznymi i praktycznymi Doktoranta, uzasadnia pozytywną ocenę całości pracy. Przedstawione rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A., lecz również w innych zakładach przemysłu wydobywczego, co potwierdza uniwersalność opracowanych metod.

Wobec powyższego, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Ziętka **spełnia wymogi** stawiane w obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742). Z tego względu wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżyniera Środowiska, Górnictwo i Energetyka o przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Z uwagi na kompleksowe podejście do badań, Autor stworzył dość szeroki obszar do dalszego rozwoju nauki w danej problematyce. Z tego względu wnioskuję również o wyróżnienie pracy.