Dr hab. inż. Adam Szurlej, prof. AGH
Katedra Inżynierii Gazowniczej
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: szua@agh.edu.pl

Kraków, 3 maja 2023 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Waniczka
pt.: *System magazynowania energii w sprężonym powietrzu sprofilowany na potrzeby dużych jednostek wytwórczych*

1. Podstawa formalna recenzji

Przedmiotową recenzję opracowałem jako recenzent wyznaczony uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej. Pan prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin, Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, wystosował do mnie pismo o znakach RIE-BD.512.12.2023 w dniu 28 lutego 2023 r.

2. Wybór tematu i ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Sebastiana Waniczka powstała pod kierunkiem Pana dr. hab. inż. Łukasza Barteli, Profesora Politechniki Śląskiej, pełniącego w przewodzie doktorskim obowiązki promotora oraz opiekuna ze strony przedsiębiorstwa dr. inż. Mariana Lipki, Energoprojekt Katowice S.A. Rozprawa doktorska została przygotowana w ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki – Doktorat wdrożeniowy II edycja.

Mając na uwadze, że obecnie moc zainstalowana w OZE kształtuje się na poziomie 23,4 GW, a zgodnie z aktualizacją *Polityki Energetycznej Polski do 2040 r.*, w perspektywie do 2030 r. wzrośnie do 50 GW, zaś do 2040 r. planowany jest czterokrotny wzrost mocy z OZE – 88 GW (dane Ministerstwa Klimatu i Środowiska z 3 kwietnia 2023 r.), jak również nastąpił dynamiczny przyrost energii elektrycznej wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej w ciągu ostatnich lat – tylko w 2022 r. o prawie 5,8 TWh, co przekłada się na wzrost o 109% w porównaniu do 2021 r. (dane Urzędu Regulacji Energetyki z marca 2023 r.), a także zmiany otoczenia regulacyjnego, zarówno na poziomie Unii Europejskiej (np. plan *REPowerEU* z 2022 r.), jak i krajowe, które wspiera rozwój wykorzystania OZE, warto podkreślić, zarówno znaczenie, jak i aktualność problematyki podjętej przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej. Dynamiczny przyrost mocy zainstalowanej w OZE, w tym przede wszystkim w źródłach niesterowalnych, a więc fotowoltaice i elektrowniach wiatrowych, sprawia, że rozwiązanie problemu magazynowania energii, jest niezbędne zarówno dla zapewnienia stabilności pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), jak i dalszych inwestycji w OZE, umożliwiających osiągnięcie zakładanych celów w zakresie polityki energetycznej. Jak ważny jest to problem może

świadczyć chociażby komunikat Polskich Sieci Elektroenergetycznych z dnia 30 kwietnia 2023 r. dotyczący polecenia zaniżenia generacji źródeł OZE w związku z występującą nadwyżka podaży energii elektrycznej ponad zapotrzebowanie w godzinach od 11 do około 16 w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.

Praca będąca przedmiotem recenzji liczy łącznie 193 strony, bez uwzględnienia załączników (42 strony) i składa się z 2. rozdziałów wstępnych, 4. merytorycznych rozdziałów, konkluzji i wniosków, bibliografii oraz spisów rysunków i tabel zawartych w pracy.
W zasadniczej części pracy zamieszczono 78 rysunków oraz 22 tabele. Bibliografia obejmuje 164 pozycji reprezentatywnych dla tematu dysertacji, zdecydowana większość to pozycje w języku angielskim. Dominują pozycje z ostatnich lat, które są odpowiednie dla przygotowania przeglądu literatury przedmiotu. Warto podkreślić obecność 11 pozycji literaturowych w Bibliografii, których współautorem jest Autor rozprawy.

Struktura pracy jest poprawna. Strona formalna – właściwa. Praca napisana jest odpowiednim językiem naukowo-technicznym. Autor nie ustrzegł się drobnych błędów, które zostaną przybliżone w dalszej części recenzji.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej: *System magazynowania energii w sprężonym powietrzu sprofilowany na potrzeby dużych jednostek wytwórczych* jest bardzo istotna zarówno z naukowego, jak i utylitarnego punktu widzenia, biorąc pod uwagę m.in. bieżące uwarunkowania funkcjonowania KSE. Cel rozprawy został sprecyzowany w rozdziale 2. i koncentrował się na ocenie możliwości wykorzystania szybu pokopalnianego na potrzeby zabudowy hybrydowego magazynu na sprężone powietrze i ciepło, pracujące w ramach systemu ACAES (cel główny). Doktorant w pracy także opracował w sposób kompleksowy rozwiązania techniczne umożliwiające zabudowę oraz bezpieczną eksploatację hybrydowego magazynu na sprężone powietrze i ciepło w szybie pokopalnianym. Przeprowadził także analizę termodynamiczną dla wybranych wariantów systemu ACES oraz analizę ekonomiczną dla wybranych wariantów ACAES. W rozdziale 2 została także przedstawiona teza pracy, a właściwie dwie tezy pracy.

Pozytywnie oceniam fakt, że Doktorant podjął się realizacji tak złożonego i trudnego problemu, który, jak już wcześniej zasygnalizowałem, jest niezmiernie ważny z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Zagadnienie badawcze, jak już zaznaczyłem jest złożone i wielowymiarowe, a jego analiza skomplikowana i trudna główne ze względu na nowatorki charakter rozważanego rozwiązania magazynowania energii. Doktorant musiał się zmierzyć z wieloma poważnymi problemami, m.in. pozyskaniem odpowiednich danych wejściowych, umożliwiających przeprowadzenie wielowariantowych symulacji numerycznych. W realizacji tematu pracy pomocne było bogate doświadczenie zawodowe Autora rozprawy w branży energetycznej, jak również bardzo dobre przygotowanie merytoryczne, o czym mogą świadczyć jego zaangażowanie w trzy zgłoszenia patentowe (polskie oraz europejskie), w tym uzyskaniu w marcu 2023 r. patentu EPO dla wynalazku, który jest przedmiotem zainteresowania Autora w jego pracy doktorskiej. Mając na uwadze problematykę rozprawy doktorskiej, uważam, że świetnie wpisuje się ona w ramy ministerialnego programu *Doktorat wdrożeniowy*.

Praca rozpoczyna się wstępem (s. 11–21) przedstawiającym główne uwarunkowania związane z funkcjonowaniem KSE, w tym rosnący udział energii elektrycznej wytworzonej w OZE i ich wpływ na pracę bloków energetycznych. Autor przeanalizował dynamikę wzrostu mocy zainstalowanej w KSE w ciągu ostatnich dekad oraz wstępnie przybliżył technologię CAES jako perspektywiczny system wielkoskalowego systemu magazynowania energii przez pryzmat pracujących instalacji.

W rozdziale 2. (s.21-22) Autor sprecyzował cel i zakres pracy doktorskiej. W mojej opinii zbędnym było tworzenie tego rozdziału jako odrębnego, jego treść można było włączyć z powodzeniem do *Wstępu*.

Rozdział 3. (s. 22-42) rozpoczyna się od przybliżenia podstaw teoretycznych cyklu Braytona-Joule'a, różnic pomiędzy cyklem teoretycznym, a rzeczywistym obiegu turbiny gazowej. Doktorant w dalszej części podrozdziału 3.1 przywołał szereg równań, których wykorzystanie jest niezbędne do realizacji założonego celu pracy, a więc m.in.: równanie na moc ekspandera, temperaturę wylotową ze sprężarki, temperaturę wylotową z ekspandera, czy też sprawność magazynu energii. W podrozdziale 3.2. Autor przybliżył podział systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu, biorąc za kryterium podziału parametr ciśnienia, magazyny dzielą się wówczas na: system izochoryczny oraz system izobaryczny. Z kolei przyjmując za kryterium sposób doprowadzenia oraz odprowadzenia ciepła w systemie magazynowania energii, obowiązuje podział na system diabatyczny (DCAES), adiabatyczny (ACAES lub AACAES) oraz izotermiczny (ICAES). Proponując ten podział warto było przywołać pełne nazwy w języku angielskim poszczególnych systemów magazynowania energii. W kolejnym podrozdziale Autor scharakteryzował cztery systemy CAES na świecie: Huntorf, McIntosh, Hydrostor Goderich A-CAES oraz Centrum Energetyczne Bethel. Charakterystyka ta ukazuje, jak niewielka jest liczba w skali świata systemów magazynowania energii w technologii CAES, cechujących się dojrzałością technologiczną.

Rozdział 4. (s. 43-66) poświęcony jest możliwościom budowy systemu CAES w Polsce. Doktorant w tym rozdziale przeanalizował następujące struktury magazynujące sprężone powietrze: naziemne zbiorniki magazynowe, kawerny solne, struktury porowate, warstwy wodonośne i wyeksploatowane złoża węglowodorów, komory skalne oraz nieczynne kopalnie. Na s. 47 Autor użył sformułowania: *płynne lub gazowe węglowodory*, z punktu widzenia termodynamiki poprawny zapis brzmi: *ciekłe lub gazowe węglowodory*. Z przeglądu poszczególnych struktur na potrzeby magazynowania powietrza w kraju brakuje jednoznacznego odniesienia się Doktoranta do możliwości wykorzystania kawern solnych dla tych potrzeb. Z jednej strony na zamieszczonej w pracy doktorskiej mapie (*Rysunek 4.4*, s.53) przedstawiono lokalizacje wysadowych i pokładowych złóż soli kamiennej, z którymi wydaje się można wiązać spory potencjał na magazynowanie powietrza, z drugiej zaś w *Tabeli 4.2*, stanowiącej podsumowanie poszczególnych struktur magazynujących, w kolumnie dotyczącej kawern solnych wskazano: *Niska/Brak* w odniesieniu do *Potencjalna dostępność w Polsce dla systemów CAES*. Dalsza część 4. rozdziału dotyczy aspektów magazynowania ciepła. Jest to bardzo ważne dla kompleksowego podejścia do zagadnienia systemów CAES, w kontekście oceny ekonomiki pracy tych systemów. Końcowa część rozdziału dotyczy sprężarek i ekspanderów, kluczowych maszyn dla systemów CAES.

Rozdział 5. (s.66-149) jest jednym z dwóch kluczowych rozdziałów recenzowanej pracy. W rozdziale tym Doktorant szczegółowo scharakteryzował autorską koncepcję podziemnego

magazynu na sprężone powietrze zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym. Rozdział rozpoczyna się od przybliżenia koncepcji magazynu w dwóch wariantach: pierwszy zakłada wykorzystanie jedynie objętości szybu pokopalnianego (z izochorycznym zbiornikiem na sprężone powietrze), natomiast drugi wariant przewiduje wykorzystanie kompensacji wodnej, a więc wymaga wykorzystania korytarzy kopalni (z izobarycznym zbiornikiem na sprężone powietrze). Przedstawienie szczegółów koncepcji magazynu powietrza wymagało od Doktoranta m.in. przeprowadzenie szeregu symulacji numerycznych, umożliwiających np. oszacowanie wytrzymałości granicznej dla poszczególnych elementów instalacji. Do tego celu zostały wykorzystane specjalistyczne oprogramowania: *Dlubal RFEM 5.18, Solidworks Simulation Premium 2021.* Odnosząc się do *Rysunku 5.24* należałoby uzupełnić o opis prezentowanych wielkości: p_{wf}, p_{hf} *oraz* p_{vf}. Dla przeprowadzenia analizy termodynamicznej zaproponowanego systemu magazynowania energii Doktorant zaproponował odpowiednią metodologię (*Rysunek 5.37*). Na s. 122 w opisie równania 5.19 dla wyrażenia objętości właściwej sugeruję dokonać zmiany oznaczenia z V_m na v (małe v) oraz uzupełnić opis o: T_r – temperatura zredukowana oraz a i b – parametry równania stanu Peng-Robinsona oraz α – funkcja Soavego. Z przeprowadzonych w niniejszym rozdziale analiz wynika, że biorąc za kryterium sprawność instalacji, przewagę ma system z izobarycznym magazynem sprężonego powietrza.

W rozdziale 6 (s.150-169) przeprowadzono ocenę efektywności ekonomicznej systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Rozdział ten można traktować jako uproszczoną analizę ekonomiczną z racji wykorzystania przede wszystkim wskaźnika NPV. Mając na uwadze bardzo dynamiczne zmiany cen energii elektrycznej w ciągu ostatnich lat, a szczególnie w 2022 r., pozytywnie oceniam dobór założeń dla cen energii w szczycie i dolinie – trzy warianty cenowe. Przeprowadzona analiza ekonomiczna wykazała, że przewagę ma wariant systemu z izobarycznym magazynem sprężonego powietrza, z wykorzystaniem wymiennika ciepłowniczego.

W rozdziale *7. Konkluzje i wnioski* zestawiono najważniejsze wnioski, które zwieńczają rozprawę doktorską.

Podsumowując, stwierdzam, że zarówno struktura pracy, jak i sekwencja kolejnych rozdziałów oraz ich objętość są dobrane właściwe.

Za oryginalne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- przedstawienie koncepcji adiabatycznego systemu magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym wraz z analizami termodynamicznymi dla różnych kombinacji warunków pracy instalacji – dobór odpowiednich ciśnień i temperatur ładowania zasobnika ciepła;
- przeprowadzenie analizy ekonomicznej umożliwiającej oszacowanie, przy jakiej różnicy cen energii elektrycznej zaproponowany magazyn energii może być komercyjnie opłacalny.

4. Uwagi i kwestie dyskusyjne

Uważam, że rozprawa została napisana przejrzyście, klarownie i logicznie. Układ pracy jest prawidłowy, a kolejność rozdziałów nie budzi żadnych zastrzeżeń. Język użyty w pracy jest prawidłowy i jedynie w niewielu miejscach wymaga drobnej korekty. Doktorant nie ustrzegł się jednak drobnych usterek o różnym charakterze, w tym redakcyjnych, stylistycznych,

interpunkcyjnych oraz błędów literowych. Praca dodatkowo zyskałaby na przejrzystości, jeżeli kolejne rozdziały rozpoczynałyby się od nowej strony i zastosowano akapity.

Uwagi szczegółowe

1. Na s. 11 użyto sformułowania: *energia solarna*. Mając na uwadze charakter pracy proponuję zamienić na: *energia słoneczna lub energia promieniowania słonecznego*.
2. Na s. 11 jest powtórzenie: *źródeł konwencjonalnych źródeł*.
3. Na s. 11 Autor wskazuje, że w ciągu ostatnich 13 lat w kontekście mocy zainstalowanej w KSE, udział OZE *wzrósł od 0 do 28% w ogólnym miksie energetycznym*. Nie można się z tym zgodzić, bo przecież przed 2008 r. w KSE także były zainstalowane moce przypadające na OZE: elektrownie wodne i wiatrowe.
4. Odnosząc się do zapisu na s. 14 dotyczącego projektu elektrowni szczytowo-pompowej Młoty jako jedynego projektu obecnie do realizacji, warto dodać, że rozważane są także inne, np. ESP Tolkmicko, czy też ESP Rożnów II.
5. Na s. 24 w opisie równania 3.1 błędnie użyto: *Sprawność*, zamiast: *sprawność*.
6. Brak odniesienia w tekście pracy do *Rysunku 3.1* oraz *Rysunku 3.2* (s.22-23).
7. Na s. 25 powinny być wymienione przemiany (wypunktowanie) z małej litery: *przemiana izotermiczna, przemiana izentropowa, przemiana politropowa*.
8. W opisach równań 3.3-3.6 na s. 26-27 – dotyczy Z_a – sugeruję posługiwać się terminem: *uśredniony współczynnik ściśliwości* zamiast *średnia ściśliwość gazu*.
9. Na s. 32 oraz 35 omyłkowo wstawiono dużą literę w środku zdania, odpowiednio: *przesyłu I sprzedaży* oraz *roku – Ostatnie pręty paliwowe*.
10. Na s. 54 jest mowa o *ilości zakładów górniczych w Polsce*, sugerowana zmiana: *liczba zakładów górniczych w Polsce*.
11. Na s. 58 jest błąd literowy: *zliczyć*, zamiast: *zaliczyć*.
12. Należałoby ujednolicić stosowanie w pracy separatorów w tabelach w przypadku liczb składających się zarówno z liczb czterocyfrowych, jak i dłuższych, np. w *rys* (s. 60-61) warto zastosować dla kolumny przedstawiającej gęstości.
13. Brak wstawienia przecinków (,) np. na końcu ostatniego wiersza na s. 61 oraz na s. 64, przed: *jak i ciśnienia*.
14. Na s. 63 Autor posługuje się sformułowaniem: *kosztów inwestycyjnych*, a czy nie powinien użyć: *nakładów inwestycyjnych*?
15. Mając na uwadze przyjętą w rozprawie przez Doktoranta formę podpisów rysunków i tabel, w przypadku: *Rysunku 3.3*, *Rysunku 3.7, Rysunku 5.16, Rysunku 5.24*, *Rysunku 5.37* czy też: *Tabeli 2.1* zbędna jest kropka (.) na końcu podpisu.
16. Na s. 78 Doktorant wskazuje, że przy maksymalnej wartości ciśnienia, maksymalna wartość przemieszczenia obudowy betonowej wyniesie 10 cm. Czy taka wartość odkształcenia obudowy betonowej umożliwi utrzymanie liniowości materiału?
17. Jak duże elementy zostały zastosowane do modelu korka szybowego (s. 90)?
18. Na s. 140 Autor posługuje się sformułowaniem: *ilość segmentów TES*, sugerowana zmiana: *liczba segmentów TES*.
19. Na s. 144 niezbędna korekta fragmentu: *wraz z ze zrostem*, na: *wraz ze wzrostem*.
20. Na s. 147 należy sformułowanie: *Z uwagi limity* zamienić na: *Z uwagi na limity*.

21. Na s. 157 Autor odwołuje się do danych *Polskich Sieci Przesyłowych*, sugerowana zmiana na: *Polskich Sieci Elektroenergetycznych.*
22. Brak opisu rys.6.1 w języku polskim (s. 161).
23. Wymagana korekta z racji powtórzenia, na s. 164: *warianty wszystkie warianty.*
24. Na s. 167 warto ujednolicić stosowane znaki interpunkcyjne na końcach poszczególnych punktów dotyczących zalet systemu izobarycznego.
25. Błąd literowy (s. 236): *toczenia*, zamiast *tłoczenia.*
26. W pracy pozostawiono liczne tzw. sieroty, czyli pozostające na końcu wiersza pojedyncze spójniki i przyimki.
27. Z uwarunkowań natury formalnoprawnej wynika, że aby nadać pewnej części pracy rangę rozdziału, powinna ona mieć określoną, minimalną objętość. W związku z powyższym *Cel i zakres pracy* oraz *Biografia*, to części pracy, które nie spełniając określonych kryteriów, zatem nie powinny posiadać rangi rozdziału.

Reasumując, pragnę jednocześnie stwierdzić, że nie mam żadnych wątpliwości co do faktu, że Doktorant prawidłowo zrealizował zamierzony cel pracy i udowodnił postawione tezy. Recenzowana praca jest udanym eksperymentem badawczym, ma charakter wdrożeniowy, a omawiany w niej problem ma ważne znaczenie gospodarcze, zwłaszcza obecnie, gdzie obserwuje się dynamiczny przyrost udziału energii wytworzonej w instalacjach OZE w bilansie energii elektrycznej i związane z tym problemy funkcjonowania KSE. Tym samym chcę jednoznacznie podkreślić, że wymienione powyżej drobne uwagi nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny merytorycznej dysertacji.

Pytania do Doktoranta

Wnikliwa lektura pracy nasunęła mi następujące pytania:

1. W podrozdziale 5.2.1 (s. 90) Autor podaje, że jednym z warunków dla możliwości eksploatacji kopalni jako magazynu sprężonego powietrza jest zapewnienie, aby maksymalne ciśnienie magazynowania było niższe od ciśnienia szczelinującego górotwór w najpłytszym miejscu magazynu. Proszę zatem oszacować wartość ciśnienia szczelinującego górotwór.
2. Mając na uwadze zakres przeprowadzonych w pracy doktorskiej symulacji, czy nie rozważane było wykorzystanie do tego celu oprogramowania *Ansys Mechanical*?
3. Czy rozważał Pan w jaki sposób na efektywność ekonomiczną analizowanych systemów magazynowania energii wpłynęłyby instrumenty wsparcia związane z rynkiem mocy?

Uważam, że zarówno zakres pracy, jak również sposób kompleksowego podejścia do opracowania i przedstawienia złożonego problemu zasługują na docenienie. Realizacja wyznaczonego celu pracy doktorskiej nie byłaby możliwa bez interdyscyplinarnego podejścia i wymagało od Doktoranta bardzo dobrej znajomości zagadnień z zakresu termodynamiki, energetyki, budownictwa, mechaniki płynów oraz ekonomii, jak również posługiwania się specjalistycznym oprogramowaniem. Otrzymane wyniki pracy stanowią oryginalny dorobek naukowy Doktoranta.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest złożona i trudna, ale zarazem niezwykle istotna, mając na uwadze obecne uwarunkowania funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. W wyniku realizacji doktoratu wdrożeniowego opracowano nowatorską koncepcję adiabatycznego system magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym. Zaprezentowanie innowacyjnego pomysłu na wielkoskalowe magazynowanie energii, poparte otrzymaniem patentu europejskiego w marcu 2023 r., kreatywność i publikacyjne osiągnięcia Doktoranta, a także wysoki potencjał aplikacyjny przedstawionego rozwiązania, który może być pomocny dla utrzymania wzrostowej tendencji wykorzystania OZE, są wystarczającymi przesłankami do upoważnienia mnie jako recenzenta do przedstawienia wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Reasumując, stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Waniczka, spełnia warunki stawiane rozprawą doktorskim w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm).* Zawiera bowiem oryginalne wyniki z zakresu wielkoskalowego magazynowania energii w sprężonym powietrzu oraz dowodzi odpowiedniej wiedzy Doktoranta. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr inż. Sebastiana Waniczka do dalszych etapów procedury nadania stopnia naukowego doktora.

A. Szurlej