Katowice, 30 marca 2023 r.

Prof. dr hab. Adam Smoliński
Główny Instytut Górnictwa
Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice
asmolinski@gig.eu

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Sebastiana Waniczka

pt. „System magazynowania energii w sprężonym powietrzu sprofilowany na potrzeby dużych jednostek wytwórczych"

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina z dnia 28 lutego 2023 roku. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. Politechniki Śląskiej a opiekunem z ramienia przedsiębiorcy jest dr inż. Marian Lipka.

1. Tematyka rozprawy doktorskiej i trafność jej wyboru

Wyzwania transformacji energetycznej, w tym w szczególności zwiększony udział odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym oraz problemy związane z

niestabilnością OZE w porównaniu do źródeł kopalnych, stwarzają konieczność poszukiwania efektywnych sposobów magazynowania energii. Na chwilę obecną wzrost produkcji energii elektrycznej w oparciu o źródła odnawialne wymusza obniżenie produkcji tejże energii ze źródeł konwencjonalnych, co w praktyce sprowadza się do utrzymania bloków energetycznych w ruchu przy minimum technicznym gwarantującym możliwość szybkiego powrotu do obciążenia nominalnego oraz ich odstawienia (szczególnie w okresach dolin weekendowych). Obecnie dotyczy to w Polsce głównie bloków 200MW, jednak w perspektywie odstawiania przestarzałych bloków elektrowni oraz wzrostu mocy zainstalowanych w farmach wiatrowych i elektrowniach słonecznych, wkrótce problem ten będzie również dotyczył nowoczesnych bloków o parametrach nadkrytycznych, które będą musiały przejąć rolę regulatorów Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. W świetle tego należy zauważyć, że prowadzone przez Doktoranta prace badawcze wpisują się w światowy nurt badań nad poszukiwaniem skutecznych sposobów magazynowania energii. Jak zauważono, najwięcej energii magazynowane jest na świecie z wykorzystaniem elektrowni szczytowo-pompowych. Doktorant wskazuje, że alternatywną technologią pod względem dostępnej mocy oraz pojemności magazynowej są magazyny energii z wykorzystaniem sprężonego powietrza. W tym przypadku kluczowym jest dostęp do odpowiedniej struktury magazynującej, który w przypadku Polski sprowadza się do wykorzystania odpowiedniej kawerny solnej lub nieczynnej kopalni. Należy jednak zauważyć, że w przypadku kawern solnych praktycznie nie ma możliwości zmiany przeznaczenia istniejących formacji, a tworzenie nowych do celów magazynowania energii jest mało prawdopodobne. Dlatego też Doktorant skupił się na możliwości wykorzystania potencjału likwidowanych zakładów górniczych, w tym w szczególności przeglądu struktur możliwych do wykorzystania jako magazynów sprężonego powietrza.

Opracowana w ramach pracy doktorskiej koncepcja adiabatycznego systemu magazynowania energii z wykorzystaniem sprężonego powietrza w dwóch zaproponowanych wariantach, tj. z izochorycznym i z izobarycznym magazynem sprężonego powietrza wpisuje się bez wątpienia w obszar ważnych i aktualnych

problemów dotyczących efektywnych sposobów magazynowania energii. Podjęcie tematu należy uznać za w pełni uzasadnione.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera 236 stron, 7 rozdziałów, 78 rysunków, 22 tabele, 164 pozycje bibliograficzne, wśród których dominują artykuły naukowe w języku angielskim z ostatnich kilku lat oraz dwa załączniki obejmujące zestawienie projektów CAES (ang. Compressed Air Energy Storage) i zestawienie wyników badań.

Rozprawę doktorską rozpoczyna krótki Wstęp, w którym mgr inż. Waniczek opisał i uzasadnił problem badawczy związany z koniecznością magazynowania energii z wykorzystaniem technologii magazynowania energii w sprężonym powietrzu. W tabelaryczny sposób przedstawił parametry charakterystyczne dla magazynowania energii z wykorzystaniem sprężonego powietrza przez pryzmat pracujących instalacji, co ułatwia czytelnikowi zrozumienie całości zagadnienia. Już na wstępie nasuwa się jednak pytanie odnośnie parametru jakim jest czas magazynowania. O ile nie budzi wątpliwości uwaga dotycząca długich czasów magazynowania w szczelnych kawernach solnych (dwie pracujące instalacje) o tyle komentarza wymaga stwierdzenie, że „w przypadku innych struktur parametr ten (czytaj czas magazynowania) może nie być tak wysoko oceniany". W dalszej części pracy Doktorant jasno zdefiniował cel i zakres pracy oraz postawił dwie tezy, mówiące odpowiednio że jest technicznie możliwa budowa adiabatycznego systemu CAES na terenie Polski przy wykorzystaniu infrastruktury pokopalnianej ze szczególnym uwzględnieniem szybu kopalnianego oraz że adiabatyczny system CAES wyposażony w innowacyjne rozwiązanie magazynu na sprężone powietrze i ciepło może być efektywny ekonomicznie biorąc pod uwagę wielkość nakładów inwestycyjnych oraz sprawność magazynowania energii.

Rozważania przedstawione w części teoretycznej pracy obejmują szczegółowe omówienie technologii CAES wraz z podaniem pracujących instalacji (Huntorf, McIntosh, Hydrostor Goderich A-CAES oraz Centrum Energetyczne Bethel). Doktorant szczegółowo omówił podstawy teoretyczne technologii CAES oraz

przedstawił podział systemów magazynowania energii z wykorzystaniem sprężonego powietrza. Omawiając system diabatyczny Doktorant scharakteryzował niemiecki system Huntorf oraz amerykański system McIntosh zwracając uwagę na różnicę w sprawnościach w pełnym cyklu pracy systemów na korzyść magazynu McIntosch, co związane jest z zastosowaniem rekuperatora, który umożliwia podgrzanie powietrza przed wprowadzeniem do komory spalania z wykorzystaniem ciepła spalin opuszczających ekspander. Doktorant wspomniał również, że niemiecki system Huntorf przeszedł modernizację. Nasuwa się pytanie czego dotyczyła ta modernizacja oraz czy i jak zmieniła się w jej wyniku sprawność systemu Huntorf?

Na koniec przedstawionego opisu stanu wiedzy zabrakło krótkiego, syntetycznego podsumowania części teoretycznej pracy, uzasadniającego cel prowadzenia podjętych badań i stanowiącego nawiązanie do kolejnej części rozprawy, przedstawiającej metodykę i część badawczą.

Ponieważ recenzowana praca stanowi doktorat wdrożeniowy szczególnie ważnym w moim odczuciu jest rozdział czwarty pracy, w którym mgr inż. Waniczek przedstawił kwestie struktur geologicznych używanych do magazynowania gazów oraz omówił możliwości budowy systemu CAES w Polsce. Szczególnie ciekawa wydaje się być możliwość wykorzystania potencjału likwidowanych kopalń jednak należy pamiętać, że jest to uzależnione od materiału górotworu w jakim były drążone chodniki oraz wymaga szczegółowej analizy geologicznej. Konieczny jest tu jednak również dodatkowy komentarz Doktoranta podczas publicznej obrony na temat kryteriów jakie powinien spełniać szyb/wyrobisko by można było je wykorzystać do magazynowania energii z wykorzystaniem sprężonego powietrza w technologii CAES. Jakie zagrożenia należy uwzględnić? W Tabeli 4.2 Doktorant przedstawił porównanie struktur magazynujących. Prosiłbym o komentarz w kwestii kosztów budowy magazynu, w szczególności proszę o komentarz dot. średnich kosztów w przypadku kawerny solnej i nieczynnej kopalni.

Omawiając dostępność systemów termicznego magazynowania energii (TES, ang. Thermal Energy Starage) na potrzeby budowy systemu CAES w Polsce przedstawiono koncepcję TES możliwie najbardziej korzystną z punktu widzenia wykonalności

technicznej oraz kosztów inwestycyjnych, która zakłada wykorzystanie szybu kopalnianego. Należy podkreślić, że koncepcja ta jest przedmiotem patentów: krajowego i europejskiego. Z opisu nie wynika jednak jaki jest wkład Doktoranta w powstanie tych patentów. Każdy patent ma czterech autorów, w tym Doktorant jest czwartym autorem. Ponadto w dalszej części podrozdziału 4.2.4 Doktorant podkreślił, że opracowana koncepcja „stała się przedmiotem badań prowadzonych przez szeroki zespół pracowników Politechniki Śląskiej, szczególnie w obszarze termodynamiki oraz mechaniki płynów". Ponadto w pracy Doktorant wskazał, że w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej powstało stanowisko badawcze, z wykorzystaniem którego możliwa była walidacja opracowanych modeli numerycznych. Nie jest jasne czy stanowisko badawcze zostało zbudowane przez Doktoranta.

Najważniejsze części pracy stanowią rozdziały 5 i 6, w których została przedstawiona koncepcja systemu ACAES (ang. Adiabatic Compressed Air Energy Storage) z wykorzystaniem hybrydowego zbiornika wraz z analizą ekonomiczną proponowanego rozwiązania. W badaniach wykazano, że pojemność energetyczna systemu ACAES zależy od ciśnienia przy jakim powietrze może być magazynowane w zbiorniku ciśnieniowym. Wstępne badania wykazały, ze szyby kopalniane o korzystnych charakterystykach technicznych są zdolne do magazynowania powietrza przy ciśnieniu wynoszącym nawet 8MPa co jest porównywalne z wartościami ciśnienia pod jakim powietrze jest magazynowanie w kawernach solnych w instalacjach działających komercyjnie.

Koncepcja, która została poddana szczegółowym analizom zakłada budowę systemu adiabatycznego ACAES, należącego do systemów trzeciej generacji, który składał się z hybrydowego zasobnika sprężonego powietrza i ciepła w dwóch konfiguracjach. W pierwszej opcji Doktorant założył wykorzystanie jedynie objętości szybu pokopalnianego jako magazynu na sprężone powietrze natomiast, a w drugiej opcji wprowadził tzw. kompresję wodną, która wymaga wykorzystania korytarzy kopalni. Zaproponowane rozwiązanie zakłada wykorzystanie potencjału likwidowanych kopalń węgla kamiennego w Polsce, w tym infrastruktury podziemnej i powierzchniowej

kopalni. Doktorant zwrócił słusznie uwagę na kwestie związane z przyłączami elektroenergetycznymi dużej mocy, które będę potrzebne w fazie sprężania jak i produkcji energii elektrycznej z dużą mocą w fazie rozprężania. Takie moce linii przesyłowych są dostępne w zakładach górniczych. Doktorant wskazał również, że w każdej analizowanej konfiguracji w systemie będzie każdorazowo pracować sprężarka dwusekcyjna z chłodzeniem międzystopniowym, wymiennik ciepłowniczy, hybrydowy zasobnik sprężonego powietrza i ciepła, zawór regulacyjny oraz jednosekcyjny ekspander sprężonego powietrza. Szczególnie istotnym z punktu widzenia opracowanej koncepcji magazynowania energii są szczegółowo omówione w rozdziale 5.1 wyzwania budowlane i konstrukcyjne, w tym analiza stateczności wyrobiska szybowego jako podziemnego magazynu energii sprężonego powietrza i ciepła. W analizach tych wykorzystano dwuwymiarowy program numeryczny Universal Distinct Element Code, który przeznaczony jest do analiz geomechanicznych w nieciągłych, anizotropowych ośrodkach, takich jak masywy skalne, w których zazwyczaj wiercone są szyby górnicze. W pracy zadeklarowano, że ta część badań była wykonana w ramach prac Katedry Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców Politechniki Śląskiej. Nie jest jasne jaka była rola Doktoranta w tych badaniach. Przykładowo, na str. 80 znajduje się stwierdzenie, że „Autor analizy wskazuje, iż proces rozprężania wywołuje sprężyste odkształcenia obudowy, a ruch punktów następuje w kierunku wnętrza wyrobiska ....". Czy Autorem jest Doktorant? Ponadto w ramach tego etapu powstały modele. Jak zostały one zwalidowane?

Kluczowe znaczenie w kontekście możliwości zastosowania przedstawionego w pracy rozwiązania ma dyskutowana w rozdziale 6 analiza ekonomiczna. Rozdział ten Doktorant rozpoczął od omówienia zastosowanej metodologii (podrozdział 6.1) a dopiero w dalszej części wprowadził czytelnika w zakres przedstawianej analizy ekonomicznej (podrozdział 6.2). Właściwszym byłoby odwrócenie kolejności, tudzież dodanie odpowiedniego kilkuzdaniowego wprowadzenia na samym początku rozdziału 6. W konkluzji rozdziału Doktorant przedstawił wartości NPV i IRR dla wszystkich analizowanych wariantów, przy najkorzystniejszych, analizowanych warunkach makroekonomicznych. Pozwoliło to Doktorantowi na stwierdzenie, że wszystkie

analizowane warianty umożliwiają uzyskanie satysfakcjonujących wyników ekonomicznych.

Część dotyczącą badań własnych kończy rozdział 7, w którym Doktorant w sposób zwięzły przedstawił podsumowanie osiągnięć pracy oraz trafnie sformułował wnioski.

Czytając rozprawę doktorską zauważono pewne niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym. Wybrane z nich przedstawiono poniżej:

- ✓ Nie uniknięto drobnych potknięć o charakterze edycyjnym (np. na str. 22 jest „...jest determinowana glownie wielkością..." a powinno być „„...jest determinowana głównie wielkością..."; na str. 25 jest „...konstrukcji o d 12 do30%." a powinno być „...konstrukcji od 12 do 30%."; na str. 28 jest „...zaliczany jest do grupy mechanicznych magazynów energii, gdzie tania, produkowane w okresie nadprodukcji...." a powinno być „...zaliczany jest do grupy mechanicznych magazynów energii, gdzie tania, produkowana w okresie nadprodukcji...."; na str.44 jest „Budowa kawerny solnej polega na wykonaniu odwiertu, który po uzbrojeniu w Budowa kawerny solnej polega na wykonaniu odwiertu, który po uzbrojeniu w odpowiedni osprzęt..." a powinno być „Budowa kawerny solnej polega na wykonaniu odwiertu, który po uzbrojeniu w odpowiedni osprzęt..."; na str. 115 podpis Rys.5.34 jest niedokończony „Rysunek 5.34 Pierścień nośny – widok na rejon występowania największych..."; na str. 119 jest „System przedstawiony na schemacie różni się tym od systemu przedstawionego na rysunku 5.2 tym, iż nie posiada pośredniego układu ..." a powinno być „System przedstawiony na schemacie różni się od systemu przedstawionego na rysunku 5.2 tym, iż nie posiada pośredniego układu ..."; Na rys. 5.37 brak wyjaśnienia numeracji elementów przedstawionych na schemacie systemu ACAES; na str.144 jest „Sprawność układu wyposażonego w wymiennik ciepłowniczy wzrasta wraz z ze zrostem ciśnienia..." a powinno być „Sprawność układu wyposażonego w wymiennik ciepłowniczy wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia..."; na str. 147 jest „Z uwagi limity konstrukcyjne..." powinno być „Z uwagi na limity konstrukcyjne..."; na str. 164 jest „Jak pokazują to wyniki analiz, warianty wszystkie warianty

pozwoliły na uzyskanie…" a powinno być „Jak pokazują to wyniki analiz, wszystkie warianty pozwoliły na uzyskanie…".

- ✓ W całej pracy powinny być konsekwentnie stosowanie jednostki SI jak również nomenklatura IUPAC (np. na stronie 20 jest 107,6 mln ton, powinno być 107,6 mln Mg; na str.30 jest „dwutlenek węgla" a powinien być „ditlenek węgla"; w całej pracy temperatura podawana jest naprzemiennie w °C i K a powinna być podawana w K.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Waniczka spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. Poz. 595 z późniejszymi zmianami). Zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z wnioskiem o dopuszczenie mgr inż. Sebastiana Waniczka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z wnioskiem o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Waniczka. Praca prezentuje wysoki poziom merytoryczny i dotyka jednego z kluczowych wyzwań współczesnej energetyki, jakim jest opracowanie i wdrożenie na skalę przemysłową efektywnych magazynów energii. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystania szybu pokopalnianego na potrzeby zabudowy hybrydowego magazynu na sprężone powietrze i ciepło, pracującego w ramach przeanalizowanego w pracy systemu ACAES, jest właśnie jednym z takich efektywnych sposobów magazynowania energii. Proponowany system gromadzenia energii, zwłaszcza w kontekście gwałtownego rozwoju OZE, może stanowić istotną korzyść dla systemów elektroenergetycznych poprzez dostarczenie mocy podczas szczytu zapotrzebowania na energię jak i przyczynić się do poprawy stabilności sieci. Uzasadniając wniosek o wyróżnienie pracy należy podkreślić, że wynalazek dotyczący podziemnego magazynu na sprężone powietrze zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym, który

jednocześnie jest magazynem ciepła dla systemu CAES, jest przedmiotem dwóch patentów (polskiego i europejskiego), których Doktorant jest jednym ze współautorów.

30.III.23