

dr hab. inż. Piotr Olczak, prof. instytutu
Instytut Gospodarki Surowcami
Mineralnymi i Energią PAN
ul. J. Wybickiego 7a, 31-261 Kraków
e-mail: olczak@min-pan.krakow.pl

Kraków, 05.12.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. Przemysława Ogarka

pt.: *Autonomiczny system energetyczny zasilany źródłami odnawialnymi z hybrydowym magazynowaniem energii*

1. Podstawa formalna recenzji

Przedmiotową recenzję opracowałem jako recenzent wyznaczony uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Rzeszowskiej. Pismo w dniu 16.10.2025 r. wystosował do mnie Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Daniel Słyś.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr. Przemysława Ogarka powstała pod opieką zespołu Promotorów, w skład którego weszli: prof. dr hab. inż. Daniel Słyś oraz dr hab. Mariusz Ruszel, prof. PRz. Praca liczy łącznie 347 numerowanych stron i składa się z 17. rozdziałów oraz z wielu części uzupełniających, tj. spisu treści, spisu najważniejszych skrótów i symboli, spisu rysunków i tabel oraz załączników A-J. Dodatkowo zamieszczono streszczenie w języku polskim oraz w języku angielskim. Bibliografia (rozdział 17.) liczy ponad 300 pozycji.

Problematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy metodyki oceny autonomicznego systemu energetycznego zasilanego OZE z hybrydowym magazynem energii. Jest to przedstawienie pierwszego w Polsce, w określonych warunkach, funkcjonowania lokalnego systemu opartego o elektrownię wodną, niesterowalne OZE oraz magazynowanie energii. W ramach dysertacji opracowano autorski model obliczeniowy *ATS_OZE_H2* uwzględniający algorytmy optymalizacyjne oraz integrujący moduły: techniczny, finansowy oraz środowiskowy. W konsekwencji opracowany model został użyty do analiz technicznych, ekonomicznych i środowiskowych. Utworzony model i algorytm bazowały na danych pozyskanych głównie z i dla gminy Ropa (woj. małopolskie).

3. Ocena merytoryczna pracy

3.1. Treść rozprawy

Rozdział 1. Wprowadzenie (s. 21–24) odnosi się do wyzwań dot. transformacji energetycznej oraz opisuje przedmiot badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej. W ramach rozdziału 2. (s. 25–26) Autor zamieścił cel i zakres pracy oraz Tezę doktoratu: *System energetyczny oparty na źródłach odnawialnych, wspierany magazynami energii oraz technologiami do produkcji, przechowywania i konwersji wodoru, może zapewnić autonomię energetyczną, opłacalność finansową w długim horyzoncie czasowym oraz eliminację emisji gazów cieplarnianych i innych substancji powstających w procesach przetwarzania energii.*

W rozdziale tym sformułowano także szczegółowe tezy badawcze. Pierwsza z nich dotyczy zastosowania technologii produkcji magazynowania i konwersji wodoru do efektywnego zagospodarowania nadwyżek energii elektrycznej, przez co zwiększa udział wykorzystania lokalnie dostępnej energii odnawialnej. Druga szczegółowa teza dotyczy efektywności długoterminowego magazynowania energii w wodorze. Natomiast trzecia teza dotyczy wpływu zwiększenia objętości zbiornika wodnego m.in. na zmniejszenie wolumenu produkcji wodoru.

Rozdział 3. (s. 27–39) zawiera przegląd literatury i uzasadnienie podjęcia tematu.

Rozdział 4. obejmuje opis teoretycznych podstaw pracy systemów zasilanych OZE. Zawiera on wyszczególnienie strategii zarządzania, technologii magazynowania energii oraz działania elektrowni wodnych i technologii wodorowych w kontekście magazynowania energii.

W rozdziale 5. (s. 63–102) Autor przedstawił metodykę badań, uwzględniającą autorskie algorytmy jak również matematyczny opis pracy poszczególnych komponentów proponowanego systemu.

Rozdział 6. (s. 103–138) zawiera opis dedykowanego algorytmu optymalizacyjnego, w tym założeń projektowych; przebiegu procesu optymalizacyjnego, a także etapów wyznaczania funkcji celu w zakresie operacyjnym.

W rozdziale 7. przedstawia przypadek studyjny, w którym jako obszar referencyjny przyjęto gminę Ropa. Dla tej gminy określono profil zużycia energii elektrycznej, z uwzględnieniem danych z grupy taryfowej G z Tauron Dystrybucja. W zakresie danych meteorologicznych i hydrologicznych wykorzystano informacje z rzeczywistych pomiarów z okresu trzech lat. W rozdziale tym uwzględniono także założenia techniczne dla: elektrowni wodnej, zbiornika wodnego, elektrowni fotowoltaicznej, elektrowni wiatrowej, ogniwa paliwowego, magazynu bateryjnego, elektrolizera, zbiornika wodoru, konwertera, wymiennika ciepła. Dodatkowo zawarto założenia obliczeniowe, głównie dla algorytmu optymalizacyjnego oraz model finansowy, a także założenia do szacowania w zakresie wpływu środowiskowego funkcjonowania hybrydowej instalacji OZE.

Rozdział 8 zawiera opis strategii optymalizacji struktury systemu. Natomiast rozdział nr 9 obejmuje dyskusję otrzymanych optymalnych konfiguracji, w tym bilansu energetycznego oraz aspektów dotyczących efektywności finansowej.

W rozdziale nr 10 zawarto analizę kosztów jednostkowych energii, wyrażonych dla każdej z analizowanych technologii za pomocą wskaźnika $LCOE^1$. Kolejny rozdział zawiera wyniki w postaci wektorów przepływu energii, ze szczególnym uwzględnieniem zmienności mocy źródeł energii elektrycznej w czasie oraz wpływu magazynowania energii. Dodatkowo uwzględniono aspekty zarządzania energią w warunkach chwilowych nadwyżek lub deficytu energii oraz bilansowania i funkcjonowania systemu.

W rozdziale nr 12 zawarto wyniki analiz w zakresie środowiskowych aspektów eksploatacji systemu. W kolejnym rozdziale zawarto metodykę oraz wyniki analizy korelacji w zakresie wolumenu generacji, magazynowania i poboru energii. W tym zakresie Autor skorzystał m.in. z testu *Lillieforsa* oraz korelacji rang *Spearmana*.

W rozdziale nr 14 zawarto analizę wrażliwości finansowej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (z użyciem oprogramowania *Statistica*). Kolejny rozdział zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Natomiast rozdział 16. uwzględnia kierunki dalszych badań.

¹ średnioważonego kosztu wytwarzania energii

3.2. Ocena merytoryczna pracy

W zakresie postawionego celu badawczego: „ocena możliwości wdrożenia koncepcji systemu energetycznego, który poprzez integrację źródeł odnawialnych z technologiami magazynowania energii mógłby zapewnić autonomię energetyczną, długookresową opłacalność oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych i pozostałych zanieczyszczeń związanych z procesami konwersji energii”, Doktorant wykonał szereg prac o charakterze interdyscyplinarnym, ze szczególnym uwzględnieniem autorskich algorytmów.

W odniesieniu do sformułowanej w rozprawie doktorskiej tezy można stwierdzić, że proponowany system może zapewnić autonomię energetyczną oraz opłacalność finansową w długim horyzoncie czasowym. Zostało to wykazane przy określonych, specyficznych warunkach.

Mocną stroną analizowanej pracy jest zidentyfikowanie ograniczeń oprogramowania *HOMER Pro* i na tej bazie opracowanie dedykowanego algorytmu optymalizacyjnego z uwzględnieniem danych z pomiarów.

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorant zrealizował postawiony w pracy cel i udowodnił postawioną w niej tezę.

3.3. Pytania do Doktoranta

Gruntowna analiza pracy pozwoliła wskazać pewne obszary niejasności, które wymagają precyzyjniejszego wyjaśnienia i przedstawienia:

1. Proszę o przedstawienie ciągu obliczeniowego w zakresie osiągnięcia wartości *GTI* ze szczególnym uwzględnieniem w jakim zakresie i jakie dane użyto, jak synchronizowano czas w poszczególnych krokach obliczeniowych. Pytanie wynika m.in. z zawartości „Rys. 7.3. Dobowa zmienność parametrów hydrologicznych i meteorologicznych przyjętych do analizy (2021–2023), na podstawie danych (Państwowe...)”. Zapisy te wskazują na wyniki pomiarów. Dopiero po lekturze dalszego tekstu można wywnioskować, że pokazane wartości są wynikami obliczeń w zakresie *GTI*, jak również prędkości wiatru na wysokości 80 m. Następnie podano „W ramach symulacji założono orientację modułów na południe ($\varphi = 180^\circ$) przy kącie nachylenia β wynoszącym 35° , co miało na celu maksymalizację uzysku energii w lokalnych warunkach nasłonecznienia”.
2. Proszę o tabelaryczne przedstawienie zidentyfikowanych problemów badawczych związanych z optymalizacją z uwzględnieniem stosowanych

kryteriów i funkcji celu. Przegląd literatury zawiera wzmianki o kilku artykułach dotyczących optymalizacji, m.in.

- a. „Jego kluczowy wniosek wskazał, że optymalizacja kąta ustawienia modułów PV i proporcji mocy zainstalowanej między elektrownią fotowoltaiczną a wiatrową pozwala zwiększyć efektywność pracy systemu w ujęciu całorocznym.” Dodatkowy komentarz: nie jest jasny kontekst efektywności pracy systemu.
 - b. „Jurasz i Ciapała (2017) zaproponowali model matematyczny optymalizujący współpracę systemów PV z elektrowniami wodnymi wyposażonymi w zbiorniki wyrównawcze.”
 - c. „Uzupełnieniem dotychczasowych badań jest analiza (Kumar i in., 2024), w której badacze przeanalizowali możliwości optymalnej integracji elektrowni fotowoltaicznej z HYD w warunkach indyjskich, wykazując, że nawet przy niewielkiej mocy elektrowni wodnej możliwe jest zapewnienie 100% udziału energii odnawialnej w bilansie systemu, z wysoką efektywnością finansową i operacyjną.”
 - d. „Autorzy podkreślili, że potrzebne są zoptymalizowane modele kontraktowe i mechanizmy współdzielenia korzyści, aby zachęcić operatorów elektrowni wodnych do inwestycji w infrastrukturę wodorową”. Komentarz dodatkowy: Proszę o wyjaśnienie sformułowania „zoptymalizowane modele”.
3. Proszę o odniesienie się do uwarunkowań wykazanych w artykule Tian i in. w kontekście głównych wyników Pana pracy.
Str. 35. „Z kolei Tian i in. (2024) wykazali, że nadwyżki energii w systemach PV–WT–HYD mogą zostać zagospodarowane poprzez produkcję wodoru, co nie tylko redukuje straty energetyczne i zwiększa roczne wykorzystanie generacji odnawialnej, ale także generuje dodatkowe zyski finansowe.” Brakuje odniesienia do informacji o miejscu badań (Chiny), skali instalacji (połączone instalacje hybrydowe o mocy zainstalowanej ponad 1 GW), co stawia pod znakiem zapytania porównywalność/aplikowalność modelu biznesowego w zakresie np. rozliczeniowym. W odpowiedzi zalecam odniesienie się także do zastosowanej terminologii w ww. artykule, a także skomentowanie użytych 40 wzorów: które z nich mogłyby być użyte lub zostały użyte w przedstawionej do oceny pracy doktorskiej.
4. Rozdział 12: „Zestawienie wskazuje na znaczący potencjał środowiskowy systemu, który dzięki lokalnej generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł umożliwia uniknięcie emisji ponad 25 000 ton CO₂ w przyjętym 25-letnim horyzoncie czasowym.” Proszę o podanie metodyki obliczeniowej wraz z przyjętymi wartościami wskaźników jednostkowej emisji CO₂ w kontekście zmieniającego się miksu energetycznego w Polsce.

3.4. Uwagi edycyjne i redakcyjne

Praca została wykonana w sposób wyjątkowo staranny w kontekście jej dużej objętości. Poziom uchybień natury edycyjno-redakcyjnej jest znacznie niższy niż w innych pracach. Ponadto uchybienia te nie wpływają w znaczący sposób na jakość merytoryczną całości rozprawy. Wśród nich wyróżniam następujące:

1. str. 21. w zdaniu „Istotą tego procesu jest również kształtowanie trwałych przewag konkurencyjnych poprzez tworzenie warunków do rozwoju nowoczesnych technologii oraz wdrażania innowacyjnych rozwiązań systemowych” Proszę o doprecyzowanie: jakiego typu przewagi konkurencyjne w zakresie rozwoju nowoczesnych technologii dotyczą Polski. Chociaż idea jest ogólnie znana, jednak nie jest ona realizowalna z wielu przyczyn.
2. str. 31. w zdaniu „W pracy (Jurasz i in., 2020) wykazano, że system PV–HYD zwiększył przychody o 5%, poprawił retencję wody latem i utrzymał wypełnienie zbiornika wodnego powyżej 73%.” Brakuje jasności co do kontekstu zwiększenia przychodów. Warto odnieść wykazane liczby do wskaźników użytych w pracy, lub wykazać ich podobieństwo metodyczne lub numeryczne. Na przykład, należy wyjaśnić, czy Autor Rozprawy również zastosował warunek wypełnienia zbiornika powyżej 73% – nie wiadomo, czy uznano tę wartość za istotną w badaniach, czy np. pominięto.
3. str. 32 „De Jong i in. (2013) przeanalizowali komplementarność fotowoltaiki, elektrowni wiatrowej i wodnej w północno-wschodniej Brazylii. Wykazali sezonowe uzupełnianie się źródeł oraz ich zdolność do zasilania sieci w okresach szczytowych, co przyczyniło się do zwiększenia odporności operacyjnej i elastyczności systemu.” Komentarz: warto dodać, jakie mierniki zostały zastosowane i w jaki sposób ich wartości poprawiono/zmieniono.
4. str. 43 „Strategia ta umożliwi również lepsze wykorzystywanie niesterowalnej generacji z OZE poprzez przesunięcie zużycia energii w czasie i przestrzeni.” Nie jest jasne w jaki sposób Autor definiuje lepsze/gorsze wykorzystanie niesterowalnej generacji.
5. str. 74 w opisie skrótów i symboli, jak również w głównej treści rozprawy, brakuje wyjaśnienia dla *HDKR*.
6. wzory 5.36 – 5.38 wymagają doprecyzowania użytych jednostek w celu zachowania spójności obliczeniowej. Wzór 5.36: w obliczeniach wskazuje na wielkości bezwymiarowe (człon logarytmiczny), podczas gdy w opisie symboli (str. 11) przypisana jest jednostka *kWh/kg*. Natomiast wynik wzoru 5.37 wskazuje na jednostkę *kJ/kg* (w opisie symboli *kWh/kg*). Wzór 5.38 dotyczy średniej arytmetycznej z tych wartości. Operacja uśrednienia wymaga, aby zarówno wzór 5.36 jak i wzór 5.37 były wyrażone w tej samej jednostce zgodnej np. z opisem symboli tj. *kWh/kg*.

7. wzór 5.62. Dla zwiększenia czytelności tego wzoru (dotyczącego przepływów pieniężnych) oraz wszystkich innych wzorów opierających się na zbiorze parametrów wejściowych (np. ekonomicznych, technicznych), sugeruje się dodanie bezpośredniego odniesienia (np. do numeru tabeli, numeru podrozdziału). W obecnej postaci zapisu np. wartość ceny sprzedaży energii elektrycznej C, E znajduje się na stronie 153., a wzór na stronie 88., bez łącznika (odwołania) w obie strony. Tabela ta powinna zbiorczo przedstawiać poszczególne wartości kluczowych parametrów użytych w analizie, takich jak: ceny energii, koszty inwestycyjne, ceny wodoru oraz inne zmienne kosztowe i przychodowe. Takie rozwiązanie ułatwi czytelnikowi weryfikację i zrozumienie założeń modelu.
8. rys. 7.3. wymaga doprecyzowania czy prędkość wiatru na wysokości turbiny jest zarejestrowanym pomiarem czy np. wynikiem symulacji.
9. rys. 9.1. nie jest jasne jak definiowane są zyski, czy tak jak wcześniej jako dodatnie przepływy pieniężne? Ponadto definiowanie kosztów wymaga doprecyzowania np. poprzez odniesienie do wzorów, symboli.
10. tab. 11.2 wymaga doprecyzowania czy liczba cykli ładowania dotyczy okresu rocznego, czy innego (w tym przypadku sugeruję dodać liczbę/rok).
11. str. 223 rys. 14.2 brakuje informacji o jednostce w jakiej wyrażone jest NPV , dopiero ze strony 224 wynika, że jednostką jest mln zł.
12. str. 231 niepoprawne sformułowanie: „założeń metodologicznych” – powinno być założeń metodycznych
13. str. 231 „...odnawialnych oraz poprawę opłacalności finansowej inwestycji.” – sformułowanie wymaga doprecyzowania. Zalecam wykazanie jak opłacalność zmieniła się posługując się odpowiednimi miernikami.
14. rys. C1 – C3 . Brakuje informacji o jednostkach, najprawdopodobniej powinny być „kW”.
15. zał. G i zał. H: dla wykazanych wartości brakuje jednostek.

Ponadto, wybrane oczywiste omyłki to:

- wzór 5.3 vs wzór 5.6 w pracy w języku polskim zalecane jest stosowanie przecinka jako oddzielenia wartości całkowitych od dziesiętnych,
- str. 109 W2: „elektronia”,
- str. 112 „Moc wyjściowe elektrowni wodnej...”, powinno być „Moc wyjściowa...”

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa potwierdza, że Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu narzędzi obliczeniowych, w tym autorskich narzędzi (algorytmów). Przedstawione analizy w ramach pracy stanowią o oryginalności rozwiązania problemu badawczego i pomimo wymienionych drobnych uwag, głównie natury edytorskiej, prezentuje ona bardzo dobry poziom merytoryczny.

Biorąc pod uwagę całość pracy i przedstawione powyżej spostrzeżenia, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Tym samym jest to jedna z podstaw do nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Jednocześnie wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

Ze względu na ww. bardzo dobry poziom merytoryczny oraz unikatowość poruszonego zagadnienia badawczego wnioskuję również o wyróżnienie pracy doktorskiej.