

Gliwice, 01.12.2025 r. .

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Przemysława Ogarka pt. **“Autonomiczny system energetyczny zasilany źródłami
odnawialnymi z hybrydowym magazynowaniem energii”**
wykonanej pod kierunkiem
prof. dr hab. inż. Daniela Słysia oraz dr hab. Mariusz Ruszel, prof. PRz
na Politechnice Rzeszowskiej

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Rzeszowskiej, Pana prof. dr hab. inż. Daniela Słysia z dnia 16 października 2025 roku.

2. Wprowadzenie

Współczesna transformacja energetyczna oznacza stopniowe odchodzenie od tradycyjnego miksu energetycznego opartego na paliwach kopalnych – węgla, ropy i gazu ziemnym – na rzecz nisko- i zeroemisyjnych źródeł energii. Przez dziesięciolecia to klasyczne, scentralizowane elektrownie systemowe zapewniały bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej, jednak ich wysoka szkodliwość środowiskowa, rosnące koszty zewnętrzne oraz wymogi polityki klimatycznej powodują konieczność głębokich zmian w sposobie wytwarzania i użytkowania energii. Zmiany te dotyczą nie tylko struktury paliwowej, ale także architektury całego systemu elektroenergetycznego.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają nowe technologie wytwarzania energii z odnawialnych źródeł energii (OZE) – wiatru, promieniowania słonecznego oraz zasobów wodnych – a także koncepcje systemów zdecentralizowanych, w tym systemów autonomicznych. Zamiast jednego, dużego systemu opartego na kilku elektrowniach centralnych, coraz częściej rozważa się rozwiązania lokalne, wykorzystujące dostępne na danym obszarze zasoby OZE. Takie podejście sprzyja zwiększeniu niezależności energetycznej, może ograniczać straty przesyłowe i pozwala lepiej dostosować strukturę wytwarzania do lokalnych potrzeb odbiorców. Istotnym elementem tej koncepcji jest



WYDZIAŁ
INŻYNIERIA I
TECHNIKA

magazynowanie energii w różny sposób i w różnych horyzontach czasowych. W systemach bazujących na lokalnych OZE wykorzystuje się magazyny krótkoterminowe (np. bateryjne), magazynowanie w postaci energii potencjalnej wody w zbiornikach oraz rozwiązania umożliwiające bilansowanie sezonowe, w tym technologie wodorowe. Każde z tych rozwiązań pełni odmienną funkcję w systemie i wiąże się z innymi ograniczeniami technicznymi, ekonomicznymi i środowiskowymi, co wymaga ich przemysłowej integracji.

OZE, mimo swoich licznych zalet środowiskowych, mają także istotne wady z punktu widzenia pracy systemu elektroenergetycznego. Niestabilność i trudna do przewidzenia generacja z farm wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych, uzależniona od zmieniających się warunków pogodowych, utrudnia bieżące bilansowanie mocy. Przy rosnącym udziale takich źródeł pojawia się ryzyko problemów ze stabilnością sieci oraz w skrajnych przypadkach – zagrożenie wystąpieniem rozległych awarii (tzw. blackout). Stąd tak ważne staje się wprowadzanie rozwiązań umożliwiających stabilne zasilanie odbiorców także w warunkach dużej zmienności generacji z OZE.

W tym obszarze szczególne znaczenie mają rozwiązania łączące w jednym systemie różne technologie wytwórcze – elektrownie wodne, instalacje fotowoltaiczne i wiatrowe – ze zintegrowanym układem magazynowania energii obejmującym magazyny bateryjne oraz część wodorową (elektrolizery i ogniwa paliwowe). Pozwala to na bardziej elastyczne zarządzanie nadwyżkami energii, jej przekształcanie i wykorzystanie w innych sektorach (np. w transporcie), a także na poprawę bezpieczeństwa zasilania odbiorców w ujęciu dobowym i sezonowym.

Rozprawa doktorska mgr. Przemysława Ogarka pt. „Autonomiczny system energetyczny zasilany źródłami odnawialnymi z hybrydowym magazynowaniem energii” wpisuje się w ten kontekst, podejmując aktualny i praktycznie zorientowany problem zaprojektowania oraz oceny pracy autonomicznego systemu energetycznego, wykorzystującego lokalne odnawialne źródła energii oraz zróżnicowane technologie magazynowania energii, w tym technologię wodorową. Autor koncentruje się na opracowaniu modelu takiego systemu, analizie jego funkcjonowania w warunkach zmienności warunków pogodowych i zapotrzebowania na energię oraz ocenie możliwości zapewnienia wysokiego poziomu niezależności energetycznej przy jednoczesnym uwzględnieniu uwarunkowań ekonomicznych i środowiskowych.

Celem rozprawy jest zatem nie tylko analiza teoretyczna, lecz także przedstawienie narzędzi i wyników, które mogą być wykorzystane przy projektowaniu realnych, lokalnych systemów autonomicznych opartych na OZE i hybrydowym magazynowaniu

energii. Obejmuje to zarówno dobór struktury systemu (udział poszczególnych technologii wytwórczych i magazynujących), jak i ocenę jego efektywności w różnych wariantach i scenariuszach pracy.

Mając powyższe na względzie, uważam rozprawę doktorską mgr. Przemysława Ogarka pt. „Autonomiczny system energetyczny zasilany źródłami odnawialnymi z hybrydowym magazynowaniem energii” za ważną zarówno z poznawczego, jak i utylitarnego punktu widzenia, a tematykę pracy za niezwykle aktualną.

3. Zakres i ocena rozprawy

Praca doktorska mgr. Przemysława Ogarka została napisana w języku polskim i liczy imponującą, rzekłbym „powieściową” liczbę 347 stron. Składa się z siedemnastu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu stosowanych skrótów, wprowadzenia, nienumerowanego wykazu literatury, spisu tabel, rysunków i załączników. Układ pracy jest logiczny, a zawartość spójnie przedstawia wyniki badań modelowych, obliczeniowych, optymalizacyjnych, analitycznych i koncepcyjnych.

Rozdział 1 (str. 21-24) ma charakter wprowadzający. Autor osadza rozważania w szerokim kontekście transformacji energetycznej, wychodząc od tradycyjnego, scentralizowanego miksu energetycznego opartego na paliwach kopalnych oraz dalekosiężnym przesyłaniu energii. Omawia ograniczenia takiego modelu w warunkach rosnącego udziału OZE, zwłaszcza fotowoltaiki i energetyki wiatrowej, wskazując na problemy zmienności generacji, trudności w bilansowaniu systemu, ryzyko przeciążeń sieci i sytuacji zbliżonych do blackoutów. W dalszej części rozdziału Autor przechodzi do idei zdecentralizowanych, a w szczególności autonomicznych systemów energetycznych, wykorzystujących lokalne zasoby OZE (energię wodną, słoneczną i wiatrową) oraz zróżnicowane formy magazynowania energii. Podkreślono rolę magazynów bateryjnych, zbiorników wodnych oraz technologii wodorowych – elektrolizerów i ogniw paliwowych – jako elementów zwiększających elastyczność i odporność systemu na zakłócenia oraz umożliwiających lepsze wykorzystanie nadwyżek energii. Rozdział w sposób spójny prowadzi od ogólnej diagnozy wyzwań stojących przed współczesną energetyką do sformułowania przesłanek podjęcia badań nad autonomicznym systemem energetycznym z hybrydowym magazynowaniem energii.

W rozdziale 2 (str. 25-26) Autor precyzuje cel, zakres i tezy rozprawy. Głównym celem pracy jest ocena możliwości wdrożenia koncepcji systemu energetycznego, który – poprzez integrację lokalnych źródeł odnawialnych z technologiami magazynowania energii, w tym technologiami wodorowymi – mógłby zapewnić autonomię energetyczną,



długookresową opłacalność oraz redukcję emisji zanieczyszczeń związanych z konwersją energii. Cel ten zostaje uszczegółowiony poprzez zestaw zadań obejmujących opracowanie autorskiego modelu ATS_OZE_H2, podzielonego na moduł techniczny, finansowy i środowiskowy, określenie struktury autonomicznego systemu wraz z wariantami konfiguracji oraz przyjęcie metodyki badawczej opartej na matematycznym opisie komponentów, analizie efektywności finansowej i środowiskowej oraz wykorzystaniu algorytmów genetycznych, analizy korelacji, sztucznych sieci neuronowych i analizy wrażliwości. W dalszej części rozdziału Autor formułuje główną tezę badawczą, zgodnie z którą system energetyczny oparty na OZE, wspierany magazynami energii oraz technologiami produkcji, przechowywania i konwersji wodoru, może zapewnić autonomię energetyczną, opłacalność finansową w długim horyzoncie oraz eliminację emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń. Teza ta zostaje rozwinięta w zestaw tez szczegółowych, dotyczących m.in. roli technologii wodorowych w zagospodarowaniu nadwyżek energii, zwiększaniu elastyczności operacyjnej systemu oraz wpływu pojemności zbiornika wodnego na skalę wymaganych mocy wytwórczych i magazynowych.

W rozdziale 3 (str. 27-39) Autor przedstawia obszerny przegląd literatury oraz uzasadnienie podjęcia tematu. Wywód rozpoczyna od historycznego tła rozwoju energetyki, przechodząc od klasycznych systemów opartych na paliwach kopalnych do współczesnej transformacji energetycznej i rosnącej roli OZE w skali świata i Polski. Omawia aktualne dane dotyczące zapotrzebowania na energię, struktury miksu energetycznego oraz dynamiki przyrostu mocy zainstalowanej w źródłach odnawialnych, ze szczególnym uwzględnieniem energetyki wiatrowej, fotowoltaiki i w mniejszym stopniu hydroenergetyki. Na tym tle prezentuje kierunki rozwoju systemów zdecentralizowanych, mikrosieci i układów autonomicznych, w których lokalne OZE łączone są z różnymi technologiami magazynowania energii. W dalszej części rozdziału Autor syntetyzuje wyniki licznych prac dotyczących pracy i komplementarności źródeł PV i wiatrowych, roli zbiorników wodnych, magazynów bateryjnych oraz technologii wodorowych (elektrolizerów i ogniw paliwowych) w bilansowaniu systemu. Omawia także dostępne w literaturze modele i narzędzia obliczeniowe do analizy systemów hybrydowych, wskazując ich ograniczenia – w szczególności ogólny charakter części modeli, uproszczone ujęcie magazynowania sezonowego oraz fragmentaryczne podejście do powiązania aspektów technicznych, ekonomicznych i środowiskowych. Z punktu widzenia recenzenta można mieć jednak wrażenie, że rozdział ten miejscami przybiera zbyt opisowy, podręcznikowy charakter, co nieco zaciera główną oś wywodu ukierunkowaną na identyfikację kluczowej luki badawczej. Końcowe partie rozdziału prowadzą do jasno sformułowanego wniosku, że w dostępnej literaturze brakuje kompleksowych analiz autonomicznych systemów



energetycznych zasilanych OZE, w których hybrydowe magazynowanie – w szczególności z wykorzystaniem wodoru jako nośnika sezonowego – byłoby rozpatrywane w sposób zintegrowany, z uwzględnieniem jednocześnie kryteriów technicznych, finansowych i środowiskowych. Na tym tle Autor uzasadnia potrzebę podjęcia własnych badań i wskazuje miejsce recenzowanej rozprawy w istniejącym dorobku naukowym.

W rozdziale 4 (str. 41-61) pt. „Teoretyczne podstawy pracy systemów zasilanych OZE” Autor przedstawia podstawy funkcjonowania rozpatrywanego typu układów. W podrozdziale 4.1 Autor omawia podstawowe podejścia do zarządzania energią w systemach z niestabilnymi OZE, pokazując kolejność wykorzystania poszczególnych źródeł i magazynów oraz typowe reguły sterowania w warunkach nadwyżek i deficytów energii. Zarysowuje też logikę decyzji, która później jest rozwijana w modelu autorskim. Można odnieść wrażenie, że fragment ten chwilami ma charakter przeglądowny, a dopiero w dalszych rozdziałach w pełni ujawnia się jego autorski wymiar. W podrozdziale 4.2 przedstawiono główne sposoby gromadzenia energii w systemach hybrydowych: magazyny bateryjne, magazynowanie w wodzie w zbiornikach oraz rozwiązania umożliwiające sezonowe bilansowanie, stanowiące wprowadzenie do technologii wodorowych. Autor podkreśla ich wzajemną komplementarność oraz znaczenie dla stabilizacji pracy systemu autonomicznego. Jediną uwagą recenzenta jest pewna syntetyczność ujęcia zagadnień ekonomicznych – te wątki pojawiają się dopiero później. Podrozdział 4.3 poświęcony jest roli elektrowni wodnych w systemie autonomicznym, w tym funkcji zbiornika jako magazynu energii i elementu regulacyjnego. Autor omawia podstawowe zależności między przepływem, spadem i mocą oraz wskazuje na znaczenie struktury pojemności zbiornika (strefa martwa, wyrównawcza, powodziowa) dla możliwości regulacyjnych układu. Opis jest poprawny merytorycznie, choć utrzymany raczej w konwencji klasycznego wykładu niż wyraźnie autorskiej narracji. W podrozdziale 4.4 Autor syntetycznie prezentuje działanie elektrolizerów, zbiorników wodoru i ogniw paliwowych oraz ich potencjalną rolę w bilansowaniu systemu OZE, zarówno w ujęciu dobowym, jak i sezonowym. Zwraca uwagę na możliwość wykorzystania wodoru jako nośnika energii także poza sektorem elektroenergetycznym. Z punktu widzenia recenzenta jest to dobrze napisane wprowadzenie, które jednak dopiero w dalszych rozdziałach (model i studium przypadku) zyskuje pełnię znaczenia.

W rozdziale 5 (str. 63-101) Autor przedstawia metodykę badań zastosowaną w rozprawie. W podrozdziale 5.1 Autor przedstawia logicznie uporządkowany, ośmioetapowy plan postępowania badawczego – od zdefiniowania obiektu badań i tezy, poprzez opracowanie modelu ATS_OZE_H2 i algorytmu optymalizacyjnego, przygotowanie przypadku studyjnego, aż po analizy wyników i ocenę wrażliwości.

Podrozdział dobrze pokazuje, że cała metodyka ma charakter spójnego, przemysłanego procesu, choć momentami opis ten jest dość gęsty jak na wprowadzający fragment rozdziału. W podrozdziale 5.2 opisano strukturę i główne założenia modelu, który integruje część techniczną, finansową i środowiskową autonomicznego systemu energetycznego. Autor wskazuje, jakie dane wejściowe są przetwarzane i jakie wielkości wyjściowe model generuje, podkreślając modułowy charakter rozwiązania. Podrozdział 5.3 zawiera opis konfiguracji systemu stanowiącego przedmiot badań – z wyszczególnieniem głównych komponentów (HYD, PV, WT, BAT, H₂, ogniwo paliwowe, konwertery) i struktury połączeń między obwodami AC i DC. Jest to przejrzyste przejście od poziomu koncepcji do konkretnego układu, choć czytelnik nieobeznany z oznaczeniami może w tym miejscu odczuwać lekki nadmiar skrótów. W rozbudowanym podrozdziale 5.4 Autor prezentuje równania opisujące pracę poszczególnych elementów: elektrowni wodnej, zbiornika wodnego, elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej, ogniwa paliwowego, magazynu bateryjnego, elektrolizera, zbiornika wodoru oraz konwertera. Ten fragment stanowi twarde jądro metodyki – jest poprawny i konsekwentny, ale z perspektywy recenzenta może być odbierany jako najbardziej „matematycznie ciężki” fragment pracy, wymagający od czytelnika dużej koncentracji. W podrozdziale 5.5 zebrano kluczowe parametry opisujące pracę systemu – zakresy zmian mocy, pojemności magazynów, czasy pracy, dopuszczalne poziomy napętnienia zbiornika wodnego i stanów naładowania magazynu bateryjnego oraz przyjęte ograniczenia eksploatacyjne. Fragment ten porządkuje wcześniejsze zapisy matematyczne w postaci czytelnych założeń operacyjnych. Podrozdział 5.6 definiuje stosowane wskaźniki ekonomiczne (m.in. strumień nakładów i kosztów, horyzont analizy, dyskontowanie), sposób wyznaczania wyniku finansowego systemu oraz kryterium funkcji celu wykorzystywanej w optymalizacji. Autor wyraźnie pokazuje, że system oceniany jest nie tylko technicznie, ale również pod kątem opłacalności inwestycyjnej, co dobrze wpisuje się w praktyczny charakter pracy. W podrozdziale 5.7 przedstawiono założenia dotyczące oceny emisji zanieczyszczeń i korzyści środowiskowych wynikających z zastąpienia miksu konwencjonalnego autonomicznym systemem OZE. Zdefiniowano wskaźniki emisyjności i sposób porównania rozpatrywanych wariantów, co pozwala później jednoznacznie pokazać efekt dekarbonizacji. Podrozdział 5.8 opisuje przyjętą metodę optymalizacji – strukturę algorytmu, dobór parametrów (liczebność populacji, liczba pokoleń, operatory krzyżowania i mutacji, elityzm) oraz sposób kodowania zmiennych decyzyjnych. Jest to fragment dobrze napisany i czytelny, choć chwilami zbliża się w formie do „mini-podręcznika” algorytmów genetycznych. W podrozdziale 5.9 Autor przedstawia zastosowanie metod korelacyjnych do wstępnej oceny związków pomiędzy parametrami wejściowymi a wynikami modelu. Analiza ta pełni rolę uzupełniającą wobec optymalizacji, pomagając zidentyfikować zmienne szczególnie istotne dla

funkcjonowania systemu. Podrozdział 5.10 pokazuje wykorzystanie modeli MLP jako narzędzia do aproksymacji złożonych zależności nieliniowych i wsparcia globalnej analizy wrażliwości. Autor krótko omawia architekturę sieci, sposób uczenia i weryfikacji jakości modeli, co stanowi nowoczesny i wartościowy element metodyki. Wreszcie w podrozdziale 5.11 opisano procedurę badania wpływu zmienności kluczowych parametrów (technicznych, ekonomicznych i środowiskowych) na wynik działania systemu i wartość funkcji celu. Ten fragment domyka rozdział 5, pokazując, że Autor nie poprzestaje na wyznaczeniu pojedynczej konfiguracji optymalnej, lecz świadomie bada stabilność uzyskanych wniosków. Rozdział 5 jest rzeczowy i kompletny, choć z perspektywy recenzenta miejscami bardzo szczegółowy – bogactwo równań i oznaczeń sprawia, że ogólną ideę metodyki trzeba chwilami „wydobywać” z dość gęstego opisu matematycznego.

W rozdziale 6 (str. 103-138). „Dedykowany algorytm optymalizacyjny” Autor przedstawia własny algorytm służący do wyznaczania optymalnej konfiguracji autonomicznego systemu energetycznego. W podrozdziale 6.1 omawia założenia projektowe i bardzo jasno uzasadnia potrzebę stworzenia własnego narzędzia: wskazuje ograniczenia HOMER Pro dotyczące m.in. odwzorowania pracy małej elektrowni wodnej ze zbiornikiem wyrównawczym, pracy w horyzoncie wieloletnim, możliwości uwzględnienia odzysku ciepła z elektrolizy, implementacji autorskich strategii sterowania oraz definiowania alternatywnych funkcji celu. W podrozdziale 6.2 opisany jest proces optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego zaimplementowanego w Pythonie (biblioteka DEAP) – od sposobu kodowania zmiennych decyzyjnych, przez inicjalizację populacji, selekcję, krzyżowanie i mutację, aż po zastosowanie osobników elitarnych i mechanizmu wczesnego zatrzymania. Podrozdział 6.3 prezentuje etapy operacyjne wyznaczania funkcji celu, czyli szczegółową sekwencję działań wykonywanych dla każdego osobnika: inicjalizację danych, bilansowanie pracy źródeł i magazynów według zdefiniowanych warunków logicznych, obliczanie wskaźników technicznych i ekonomicznych oraz generowanie wartości funkcji celu. Cały rozdział robi bardzo dobre wrażenie pod względem rzetelności i transparentności opisu, choć z perspektywy recenzenta jest chwilami tak drobiazgowy, że niebezpiecznie zbliża się do formy dokumentacji technicznej kodu – aż „boli” swoją szczegółowością, nawet jeśli świadczy to niewątpliwie o dużym nakładzie pracy i świetnym opanowaniu narzędzi optymalizacyjnych.

W rozdziale 7 (str. 139-162) „Przypadek studyjny” Autor przenosi zaproponowany model autonomicznego systemu energetycznego w realne uwarunkowania przestrzenne, przyjmując jako obszar referencyjny gminę Ropa w Beskidzie Niskim. W podrozdziale

7.1 przedstawiono syntetyczną charakterystykę gminy – położenie, strukturę zabudowy oraz podstawowe dane demograficzne – wyraźnie podkreślając, że opracowanie ma charakter koncepcyjny i nie obejmuje szczegółowej analizy lokalizacyjnej poszczególnych elementów systemu (dostępność terenów, ograniczenia środowiskowe, strefy ochronne). W podrozdziale 7.1.1 Autor odtwarza profil zużycia energii elektrycznej na podstawie standardowego profilu taryfowego grupy G (dane operatora systemu dystrybucyjnego), skalowanego do liczby gospodarstw domowych w gminie, co pozwala określić roczne zapotrzebowanie na poziomie ok. 6,8 GWh oraz sezonowo-dobowy przebieg obciążenia. Z kolei podrozdział 7.1.2 zawiera szczegółową analizę warunków hydrologicznych i meteorologicznych w horyzoncie trzech lat (2021–2023), obejmującą przepływy wody, promieniowanie słoneczne, temperaturę powietrza i prędkość wiatru, które stanowią bazę danych wejściowych do dalszych symulacji. Podrozdział 7.2 systematyzuje założenia techniczne dla wszystkich kluczowych komponentów systemu: małej elektrowni wodnej (wraz z przyjętym schematem pracy dwóch turbin), zbiornika wodnego Klimkówka, instalacji fotowoltaicznej i wiatrowej, ogniwa paliwowego, magazynu bateryjnego, elektrolizera, zbiornika wodoru, konwertera dwukierunkowego oraz wymiennika ciepła. Parametry pracy urządzeń (sprawności, krzywe charakterystyczne, zakresy mocy, ograniczenia operacyjne) zostały dobrane w oparciu o literaturę i dane eksploatacyjne, co zapewnia spójność modelu technicznego. W podrozdziale 7.3 Autor explicite definiuje założenia finansowe – nakłady inwestycyjne, koszty operacyjne, koszty wymiany oraz żywotności technologiczne poszczególnych komponentów, a także przyjętą stopę dyskontową i inflację; szczególnym przypadkiem jest tu hydroelektrownia traktowana jako obiekt istniejący, dla którego nie odtwarza się pełnego CAPEX w realiach współczesnych. Podrozdział 7.4 gromadzi założenia środowiskowe, oparte na wskaźnikach emisyjności KOBiZE dla energii elektrycznej i ciepła oraz danych z Elektrociepłowni Gorlice, a także na charakterystykach emisyjnych różnych technologii napędu autobusów (FCEV, BEV, ICE-D), co umożliwi późniejszą ocenę efektu redukcji emisji wynikającego z lokalnej generacji energii i wytwarzania wodoru. Wreszcie, w podrozdziale 7.5 Autor precyzuje założenia modelowe algorytmu optymalizacyjnego, definiując pięć zmiennych decyzyjnych (moce PV i wiatru, pojemności magazynu bateryjnego i zbiornika wodoru, dzienne zapotrzebowanie kontraktowe na wodór) oraz zakresy ich poszukiwań w dwustopniowej procedurze, co stanowi bezpośrednie przejście do dalszej części analitycznej pracy. Cały rozdział 7 jest logicznie uporządkowany i dobrze łączy warunki lokalne z wcześniej zbudowanym aparatem modelowym, choć kumulacja bardzo wielu szczegółowych parametrów i założeń w jednym miejscu powoduje, że lektura wymaga od Czytelnika dużej koncentracji przy śledzeniu zależności między komponentami i scenariuszami.

W rozdziale 8 (str. 163-165) „Strategia optymalizacji struktury systemu” Autor przechodzi od opisu algorytmu do konkretnych wyników optymalizacji, definiując zestaw pięciu zmiennych decyzyjnych: moce znamionowe elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej (PPV, PWT), pojemność magazynu bateryjnego (CapBAT), pojemność zbiornika wodoru (CapH₂T) oraz dzienne zapotrzebowanie kontraktowe na wodór (H₂,Lbase). Wynikiem rozdziału jest zestawienie w tabeli 8.1 optymalnych wartości tych parametrów dla wariantów A1–A6 oraz B1–B6 wraz z odpowiadającymi im wartościami funkcji celu, co stanowi punkt wyjścia do dalszej dyskusji techniczno-finansowej w kolejnych rozdziałach. Całość uzupełnia ilustracja przebiegu procesu optymalizacji, pokazująca zbieżność algorytmu; z perspektywy recenzenta rozdział jest rzeczowy i zwarty, choć raczej „techniczny”, z minimalną warstwą komentarza interpretacyjnego.

Rozdział 9 (str. 167-175) pt. „Dyskusja optymalnych konfiguracji” stanowi ważne ogniwo łączące wyniki procesu optymalizacji z ich interpretacją techniczną i energetyczną. W podrozdziale 9.1 Autor koncentruje się na porównaniu bilansu energetycznego wariantów z grup A i B, zestawiając dla nich moce i pojemności poszczególnych komponentów oraz całkowitą produkcję energii w okresie wieloletniej eksploatacji, ze szczególnym uwzględnieniem skali nadwyżek energii oraz ich strat. Kluczowe znaczenie ma tu tabela 9.1, w której pokazano, że w konfiguracjach z infrastrukturą wodorową (elektrolizer, zbiornik wodoru, ogniwo paliwowe) możliwe jest utrzymanie pełnej autonomii energetycznej przy równoczesnym istotnym ograniczeniu udziału niewykorzystanych nadwyżek – na poziomie rzędu 3–4% – niezależnie od pojemności zbiornika wodnego i obecności elektrowni wodnej. W wariantach pozbawionych technologii wodorowych uzyskanie autonomii formalnie także jest możliwe, ale kosztem bardzo dużego przewymiarowania mocy źródeł OZE i baterii, co skutkuje narastaniem nadwyżek energii sięgających i przekraczających 70% całkowitej produkcji w niektórych konfiguracjach. Autor słusznie podkreśla, że technologie wodorowe pełnią w takim układzie rolę „bezpiecznika” systemowego, umożliwiając głębokie wykorzystanie energii odnawialnej, a nie tylko jej formalne wytworzenie. Pewnym niedosytem – z punktu widzenia recenzenta – pozostaje fakt, że rozważania o możliwości redukcji nadwyżek poprzez alternatywne kombinacje mocy OZE i pojemności magazynów bateryjnych mają raczej charakter komentarza niż rozwiniętego studium wariantowego, co mogłoby dodatkowo wzmocnić walor aplikacyjny tej części analizy. W podrozdziale 9.2 Autor przechodzi do szczegółowej oceny efektywności finansowej poszczególnych konfiguracji, wykorzystując typowy zestaw wskaźników inwestycyjnych: całkowite nakłady inwestycyjne (CAPEX), skumulowane koszty eksploatacyjne, sumaryczne przychody, wartość bieżącą netto (NPV) oraz prosty okres zwrotu (PBP), zestawione syntetycznie w tabeli 9.2 i rozwinięte dla wybranych wariantów w tabeli 9.3 oraz w załączniku A. Analiza pokazuje, że

warianty z grupy A, mimo wyższych nakładów początkowych wynikających z obecności technologii wodorowych, generują istotnie dodatnie wartości NPV i relatywnie akceptowalne okresy zwrotu (rzędu 10–18 lat), co pozwala uznać je za finansowo uzasadnione w zadanym horyzoncie czasowym. Dla kontrastu, warianty z grupy B – pozbawione infrastruktury wodorowej – charakteryzują się co prawda niższym CAPEX w konfiguracjach o mniejszej skali, ale w miarę wzrostu mocy i pojemności magazynów ich efektywność finansowa gwałtownie się pogarsza, prowadząc do wartości NPV ujemnych i okresów zwrotu przekraczających przyjęty czas analizy. Autor w przekonujący sposób łączy wyniki energetyczne z finansowymi, pokazując, że opłacalność i możliwość praktycznej implementacji systemu są wprost determinowane przez przyjętą strukturę źródeł, magazynów i technologii wodorowych. Można jedynie zauważyć, że przy tak rozbudowanym zestawie danych finansowych nieco skromnie wybrzmiewa dyskusja wrażliwości wyników na kluczowe założenia ekonomiczne (np. ceny energii, wodoru, stopy dyskontowej), choć Autor częściowo uzupełnia ten aspekt w dalszych rozdziałach pracy.

W rozdziale 10 (str. 177-179) Autor analizuje koszt jednostkowy energii (LCOE) dla całego systemu oraz osobno dla elektrowni wodnej, fotowoltaicznej, wiatrowej i ogniwa paliwowego, pokazując, jak zmiana struktury układu w wariantach A1–A6 wpływa na opłacalność poszczególnych technologii. Wykazuje, że wraz z ograniczaniem udziału hydroenergii rośnie całkowity LCOE (z 0,28 do 0,36 zł/kWh), przy względnie stabilnych kosztach PV i wiatru, natomiast jednostkowy koszt pracy ogniwa paliwowego – mimo że najwyższy – wyraźnie maleje (z 13,98 do 5,67 zł/kWh) dzięki intensywniejszemu wykorzystaniu tej technologii. Całość stanowi klarowne uzupełnienie analizy finansowej z poprzedniego rozdziału, choć utrzymana jest w dość „wskaźnikowej” konwencji, z ograniczonym komentarzem interpretacyjnym.

W rozdziale 11 (str. 181-204) pt. „Wektory przepływu energii” Autor szczegółowo analizuje dynamikę pracy systemu w czasie. W podrozdziale 11.1 przedstawia zmienność mocy źródeł energii elektrycznej, pokazując – na przykładzie wariantu A1 – jak w skali wieloletniej, sezonowej i dobowej kształtują się profile generacji z hydroenergii, PV i wiatru w odniesieniu do zapotrzebowania odbiorców. W podrozdziale 11.2 przechodzi do opisu pracy magazynów energii w warunkach zmiennej generacji OZE, ilustrując liczbę cykli pracy zbiornika wodnego, zbiornika wodoru i magazynu bateryjnego oraz definiując i obliczając miary autonomii poszczególnych technologii (APON, AH2T, ABAT) dla wariantów A1–A6. Podrozdział 11.3 dotyczy zarządzania energią w warunkach nadwyżek i deficytu – Autor ilościowo pokazuje, jaki udział nadmiarowej energii przejmują elektrolizery i magazyny bateryjne oraz jak kształtują się straty i udział poszczególnych technologii w pokrywaniu niedoborów energii; wykazuje m.in., że

średnio ok. 80% nadwyżek kierowane jest do elektrolizerów, a baterie pełnią uzupełniającą rolę. W podrozdziale 11.4 omawia bilans energetyczny w różnych skalach czasowych, a w 11.5 – funkcjonowanie systemu w okresach najtrudniejszych deficytów energetycznych, pokazując, jak współdziałanie magazynów wodnych, bateryjnych i wodorowych pozwala utrzymać ciągłość zasilania mimo skrajnie niekorzystnych warunków zewnętrznych. Cały rozdział bardzo dobrze odsłania „wewnętrzną mechanikę” systemu, choć miejscami jest tak naszpikowany tabelami i wskaźnikami, że wymaga od czytelnika sporej cierpliwości, zanim wyłuska on główne wnioski jakościowe.

W rozdziale 12 (str. 205-208) „Środowiskowe aspekty eksploatacji systemu” Autor koncentruje się na ocenie wpływu projektowanego, autonomicznego systemu energetycznego zintegrowanego z technologiami wodorowymi na bilans emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń w porównaniu ze scenariuszem referencyjnym opartym na konwencjonalnych źródłach energii. Analiza obejmuje trzy zasadnicze obszary: zastąpienie energii elektrycznej z krajowej sieci lokalną generacją OZE dla bazowego zapotrzebowania gminy Ropa (6791,752 MWh/rok), odzysk ciepła odpadowego z pracy elektrolizerów oraz wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie publicznym. Na podstawie wskaźników emisji KOBiZE dla energii elektrycznej Autor wykazuje, że lokalna generacja z OZE pozwala uniknąć w 25-letnim horyzoncie emisji ponad 25 tys. ton CO₂ oraz istotnych ilości SO_x, NO_x, CO i pyłu całkowitego – wartości te, z uwagi na identyczne bazowe zapotrzebowanie, są stałe we wszystkich wariantach. Następnie analizuje efekt środowiskowy odzysku ciepła odpadowego z elektrolizerów, pokazując dodatkowe redukcje emisji, szczególnie wyraźne w wariantach o dużej produkcji wodoru. Uzupełnieniem jest porównanie emisji w transporcie przy zasilaniu autobusów wodorem (FCEV) względem energii elektrycznej z sieci (BEV) oraz oleju napędowego (ICE-D); dla wariantów A1–A6 uzyskano znaczące redukcje emisji CO₂ i pozostałych zanieczyszczeń, sięgające dziesiątek tysięcy ton w całym okresie eksploatacji. Z punktu widzenia recenzenta rozdział ten przekonująco dokumentuje skalę korzyści emisyjnych, choć skupia się niemal wyłącznie na wskaźnikach emisji, pozostawiając na drugim planie inne potencjalne aspekty środowiskowe (np. pełnocyklową ocenę wpływu).

W rozdziale 13 (str. 209-219) „Korelacja generacji, magazynowania i poboru energii” Autor wykorzystuje analizę korelacji rang Spearmana do ilościowego opisanie związków pomiędzy zmiennością generacji z OZE, stanem napełnienia magazynów energii (zbiornika wodnego, magazynu bateryjnego, zbiornika wodoru) a profilem zapotrzebowania w systemie. Na podstawie statystyk opisowych, testów normalności

oraz macierzy korelacji pokazuje, jak poszczególne komponenty układu „reakcyjnie” odpowiadają na zmiany warunków zewnętrznych i obciążenia – w szczególności podkreślając silne ujemne korelacje pomiędzy poziomem napełnienia magazynów a deficytami mocy. Rozdział ten w sposób uporządkowany syntetyzuje wcześniej przedstawione wyniki, choć jego mocną stroną są przede wszystkim liczby i współczynniki, a nieco mniej – komentarz jakościowy pokazujący praktyczne konsekwencje zaobserwowanych zależności.

W rozdziale 14 (str. 225-229) Autor wykorzystuje sztuczne sieci neuronowe do aproksymacji wybranych wielkości opisujących pracę systemu oraz przeprowadza globalną analizę wrażliwości, identyfikując parametry (m.in. ceny energii i wodoru, moce źródeł, pojemności magazynów), które w największym stopniu wpływają na wynik finansowy i autonomię systemu. Uzyskane wyniki potwierdzają kluczową rolę komponentów wodorowych i struktury miksu OZE w kształtowaniu efektywności układu. Rozdział stanowi wartościowe uogólnienie wcześniejszych analiz, choć – jak na tak ważny etap wnioskowania – komentarz interpretacyjny mógłby być nieco bardziej rozbudowany.

Rozdział 15 (str. 231-233) zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań oraz zestaw wniosków końcowych, które w sposób uporządkowany potwierdzają główną tezę pracy o możliwości zaprojektowania autonomicznego systemu opartego na OZE i technologiach wodorowych, zapewniającego autonomię, opłacalność finansową i eliminację emisji. Wnioski dobrze spinają w całość część teoretyczną, metodyczną i aplikacyjną, choć można odczuć, że stosunkowo mało miejsca poświęcono wprost zarysowaniu ograniczeń modelu i wynikających z nich restrykcji interpretacyjnych.

Rozdział 16 zawiera zwięzłe propozycje dalszych kierunków badań, logicznie wynikające z uzyskanych wyników, natomiast rozdział 17 obejmuje obszerną, aktualną i poprawnie przygotowaną bibliografię, adekwatną do zakresu podjętej problematyki. Dalszą część pracy stanowią załączniki oraz odpowiednie spisy.

Za główne osiągnięcia Autora pracy uważam:

1. Opracowanie autorskiego, zintegrowanego modelu autonomicznego systemu energetycznego ATS_OZE_H2, obejmującego spójnie część techniczną, finansową i środowiskową.
2. Zaprojektowanie i implementację dedykowanego algorytmu optymalizacyjnego opartego na algorytmie genetycznym, dostosowanego do specyfiki rozpatrywanego układu i przyjętych funkcji celu.

3. Przeprowadzenie szczegółowego studium przypadku dla konkretnej gminy, z pełnym odwzorowaniem lokalnych uwarunkowań (profil zapotrzebowania, warunki hydrologiczne i meteorologiczne) oraz oceną autonomii, opłacalności i emisyjności systemu.
4. Dogłębną analizę wewnętrznej pracy systemu – w tym przepływów energii, roli poszczególnych magazynów oraz kształtu nadwyżek i deficytów – w różnych skalach czasowych, z wprowadzeniem miar autonomii poszczególnych komponentów.
5. Wykazanie, na podstawie obliczeń, znaczącej roli technologii wodorowych w ograniczaniu nadwyżek energii z OZE, poprawie stabilności zasilania i osiąganiu dodatnich wyników finansowych, a także szczegółową ocenę efektów emisyjnych, w tym w sektorze transportu.
6. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych i globalnej analizy wrażliwości do identyfikacji kluczowych parametrów wpływających na wynik techniczny i ekonomiczny systemu, co podnosi walor poznawczy i aplikacyjny pracy.

Mając to wszystko na względzie, stwierdzam, że tytuł rozprawy trafnie oddaje jej zakres. Geneza tematu i uzasadnienie celowości podjęcia go jako problemu badawczego wynikają z przeglądu stanu wiedzy. W rozprawie wyznaczono cel, sformułowano tezy i określono zakres badań. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i interesująca. Warto zauważyć kompleksowy charakter prowadzonych badań. Uważam zakres, strukturę merytoryczną i układ recenzowanej za właściwe.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne, dyskusyjne oraz formalno-redakcyjne jakie nasunęły się podczas lektury pracy:

1. Skrót WT (ang. *wind turbine*) został przetłumaczony przez Autora jako elektrownia wiatrowa, co wydaje się nadmiernym uproszczeniem – odnosi się on bowiem do pojedynczej turbiny wiatrowej, a nie do całego obiektu wytwórczego.
2. Literą delta (Δ) Autor oznacza zarówno współczynnik (temperaturowy mocy) jak i wzrost
3. Oznaczenia nazywane „współczynnikami” powinny mieć jednostkę; jeśli jej nie mają należałoby je nazywać np. Indeksami.
4. Wartość $L_{j,EZ}$ nie ma jednostki a jest to „okres eksploatacji”; czy nie powinna być jednostka „lata”?

5. Jako uzasadnienie tezy, że paliwa kopalne wciąż stanowią podstawę globalnego zaopatrzenia w energię, Autor powołuje się na dane z 2015 roku (strona 22). Czy nie należałoby uaktualnić tego odniesienia, biorąc pod uwagę, że obecnie mamy rok 2025 i w tym obszarze zaszły istotne zmiany zarówno w strukturze globalnego miksu energetycznego, jak i w politykach klimatyczno-energetycznych?
6. Autor używa sformułowania „redukcja emisji”; precyzyjniej należałoby wykorzystać sformułowanie „obniżenie emisji”
7. W zaprezentowanym układzie wariantów odniesienia przypadek B został oznaczony jako poziom referencyjny, podczas gdy – z punktu widzenia logiki i przejrzystości – takie oznaczenie bardziej odpowiadałoby wariantowi A.
8. W kontekście przedstawionych rozważań dotyczących roli wodoru w analizowanym systemie energetycznym, w jaki sposób – zdaniem Autora – należy racjonalnie wykorzystać wodór w warunkach polskich? Czy najbardziej uzasadnione zastosowania dotyczą sektora transportu (np. pojazdy wodorowe, infrastruktura tankowania), magazynowania energii (zbiorniki, instalacje lokalne), czy też jego integracji z sieciami przesyłowymi? Jakie perspektywy rozwoju tych kierunków Autor dostrzega, biorąc pod uwagę aktualne i prognozowane uwarunkowania prawne, formalno-techniczne oraz rynkowe?
9. Kto, w jaki sposób i gdzie mógłby wykorzystać ciepło odpadowe z elektrolizera?
10. W dużej części pracy Autor powieliła spis oznaczeń przygotowany na wstępie rozprawy z oznaczeniami zapisanymi pod kolejnymi wzorami.
11. Co to jest model HDKR, zgodnie z którym wyznaczono globalne promieniowanie?
12. Strona 81; wielkość „R: to indywidualna stała gazowa; jest stała gazowa

Podkreślić należy, że powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy i pozytywnej oceny pracy.

5. Zagadnienia do wyjaśnienia podczas obrony

1. Autor stwierdza, że w rozprawie nie prowadzono szczegółowej analizy uwarunkowań lokalizacyjnych poszczególnych komponentów systemu energetycznego analizowanej gminy. Jak, Pana zdaniem, brak takiej analizy wpływa na otrzymane wyniki oraz ich wiarygodność? Na ile elastyczne jest zaproponowane podejście – czy możliwe jest jego zastosowanie do dowolnie wybranej gminy, czy też wymagałoby ono każdorazowo szczegółowego dostosowania do lokalnych uwarunkowań? W jaki sposób fakt, że te uwarunkowania nie są obecnie uwzględniane, może komplikować stosowanie zaproponowanego podejścia oraz interpretację wyników?

2. Gdzie dokładnie umieszczona jest stacja meteorologiczna wykorzystana do pozyskania danych meteorologicznych?
3. Jaki rodzaj turbiny wodnej wykorzystuje się w proponowanej elektrowni wodnej?
4. W tabeli 7.1 przedstawiono parametry kosztowe i eksploatacyjne poszczególnych komponentów analizowanego systemu energetycznego, przy czym wszystkie dane zaczerpnięto z publikacji autorów zagranicznych, odnoszących się do warunków innych niż polskie. Jak, Pana zdaniem, wykorzystanie takich danych wpływa na uzyskane wyniki, w szczególności w kontekście różnic nie tylko klimatycznych, lecz także ekonomicznych, regulacyjnych, technicznych oraz związanych ze strukturą rynku energii? Czy, i w jaki sposób, uwzględniono w pracy konieczność adaptacji lub kalibracji tych parametrów do realiów krajowych, aby zwiększyć wiarygodność i użyteczność uzyskanych rezultatów dla warunków polskich?
5. Czy w pracy przeprowadzono analizę wrażliwości przyjętego modelu na zmiany cen sprzedaży ciepła oraz energii elektrycznej? Jeśli tak, proszę o przedstawienie, w jakim zakresie uwzględniono zmienność tych parametrów oraz jaki wpływ mają one na stabilność i wiarygodność wniosków ekonomicznych sformułowanych w rozprawie. Jeśli nie – proszę uzasadnić rezygnację z takiej analizy w kontekście praktycznej przydatności wyników.
6. W analizie kosztów i rentowności wariantów systemu energetycznego z grup A i B przedstawiono wartości prostego okresu zwrotu (PBP), które w wielu przypadkach mogą przekraczać czas żywotności niektórych elementów zakładanego systemu. Jak Autor interpretuje takie wyniki oraz czy – i w jaki sposób – uwzględniono w obliczeniach konieczność wymiany lub odtworzenia tych elementów w trakcie okresu analizy ekonomicznej?

6. Wnioski końcowe

W podsumowaniu chciałbym zaznaczyć, że wszelkie uwagi o charakterze krytycznym nie wpływają na ogólną ocenę rozprawy, która jest jednoznacznie pozytywna i bardzo wysoka. Przedstawiona praca doktorska mgr. Przemysława Ogarka stanowi oryginalne i aplikacyjnie zorientowane podejście do rozwiązania konkretnego problemu inżynierskiego z zakresu planowania i optymalizacji lokalnych systemów energetycznych, z uwzględnieniem źródeł odnawialnych oraz technologii wodorowych jako elementu przyszłej transformacji energetycznej.

Autor, opierając się na zaawansowanych metodach modelowania i analizie wariantowej, przedstawia zestaw praktycznych rozwiązań, możliwych do bezpośredniego wykorzystania przez jednostki samorządu terytorialnego oraz podmioty

odpowiedzialne za rozwój lokalnej infrastruktury energetycznej, co zdecydowanie wzmacnia aplikacyjny i wdrożeniowy charakter rozprawy.

Autor skutecznie zrealizował wyznaczone cele badawcze, a zakres przeprowadzonych analiz należy uznać za szeroki i pogłębiony. Na szczególne podkreślenie zasługuje wysoka ranga podjętej tematyki, która pozostaje w pełni aktualna z perspektywy wyzwań transformacji energetycznej, a także bogactwo oraz kompleksowość analizowanego materiału, obejmującego zarówno ujęcie teoretyczne, jak i praktyczne implikacje. Warto również zwrócić uwagę na klarowność i przejrzystość formułowanych wniosków, świadcząca o dojrzałości naukowej Autora oraz jego umiejętności syntetycznego przedstawiania złożonych zagadnień. Praca odznacza się ponadto wysoką dyscypliną metodologiczną i starannością edytorską, co czyni ją spójnym, kompletnym i wartościowym opracowaniem naukowym.

Mgr Przemysław Ogarek wykazał się znajomością aktualnego stanu wiedzy w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, umiejętnością formułowania problemów badawczych, samodzielnością w prowadzeniu badań oraz rzetelnością w prezentowaniu wyników.

Na podstawie przedłożonej rozprawy pt. *„Autonomiczny system energetyczny zasilany źródłami odnawialnymi z hybrydowym magazynowaniem energii”*, stwierdzam, że spełnia ona wymogi określone w art. 219 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2022, poz. 574 z późn. zm.).

Wnoszę o dopuszczenie mgr. Przemysława Ogarka do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Jednocześnie, mając na uwadze wyjątkowo wysoki poziom merytoryczny i formalny ocenianej rozprawy – bogactwo analizowanego materiału, niezwykłą dokładność prowadzonych badań i prezentacji wyników, niemal bezbłędne przygotowanie redakcyjne, a także aktualność i dużą interdyscyplinarność podjętej problematyki – wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

01/12/2025

gme