

Dr hab. inż. Paweł Niegodajew, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
e-mail: pawel.niegodajew@pcz.pl

Częstochowa, dnia 9.05.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Rafała Goraja zatytułowanej:
„Analiza wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych w aspekcie współpracy z
sieciami gazowymi”**

Wprowadzenie

Niniejsza rozprawa doktorska przygotowana została w sposób klasyczny jako monograficzne opracowanie liczące 137 strony, 104 rysunki i 30 tabel. Podzielona została na 6 rozdziałów obejmujących przegląd literatury (rozdział 1), cel pracy (rozdział 2), tezę pracy (rozdział 3), metodykę badań (rozdział 4), wyniki (rozdział 5) oraz wnioski (rozdział 6). Praca zawiera również spis oznaczeń a na jej końcu zamieszczono bibliografię zawierającą 124 pozycje. Struktura pracy jest generalnie przejrzysta z logicznym podziałem na rozdziały i podrozdziały, co czyni z niej dość lekką lekturę.

Cel rozprawy

Celem recenzowanej rozprawy było opracowanie modelu decyzyjnego pozwalającego na określenie lokalizacji miejsca pod budowę lądowych farm wiatrowych przy uwzględnieniu szerokiej gamy parametrów decyzyjnych. Istotnym kryterium w przedstawionym modelu była dostępność infrastruktury gazowej celem umożliwienia globalnego transportu wyprodukowanego z nadwyżek energetycznych wodoru/metanu – technologia power-to-gas (P2G).

Treść rozprawy

Pracę rozpoczyna wyjątkowo obszerny przegląd literatury (stanowiący około 50% całej rozprawy), który stanowi zarazem motywację do podjętej w treści rozprawy tematyki. W części tej w sposób racjonalny uzasadniona została konieczność rozbudowy zdecentralizowanej infrastruktury farm wiatrowych. Nadwyżka energii w nich produkowana mogłaby zostać wykorzystana do produkcji wodoru co z kolei w naturalny sposób powinno zainicjować działania nakierowane na rozbudowę infrastruktury ładowania pojazdów i tankowania tego paliwa. Niemniej, analiza literaturowa przeprowadzona została głównie w oparciu o krajowe dane statystyczne z całkowitym pominięciem ‘historii’ rozwoju technologii P2G w innych krajach – zwłaszcza w tych bardziej rozwiniętych energetycznie. Uwzględnienie innych scenariuszy kształtowania się technologii P2G, np. u ‘sąsiadów’, mogłoby zmienić spojrzenie Doktoranta na analizowany problem i w konsekwencji przełożyć się na nieco inne wnioski.

Rozdziały 2 nakreśla wspomniany już wyżej cel pracy a w rozdziale 3 Doktorant formułuje tezę rozprawy, która zakłada, że opracowana w pracy metoda „...umożliwia ustalenie hierarchii lokalizacji elektrowni wiatrowych we współpracy z sieciami elektroenergetycznymi oraz sieciami gazu ziemnego przy uwzględnieniu różnorodnych kryteriów (technicznych,

ekonomicznych, środowiskowych, prawnych i społecznych), a poprzez połączenie różnych metod wspomagania decyzji jest możliwe wskazanie optymalnej lokalizacji dla źródła produkcji energii elektrycznej.”

W rozdziale 4 przedstawiony został opis metodyki, która została wykorzystana w dalszej części pracy do wskazania potencjalnie dostępnych lokalizacji dla pod budowę farm wiatrowych. Mowa tu o takich narzędziach jak GIS (Geographic Information System), a konkretnie QGIS – czyli wersja GIS o otwartym dostępie, oraz AHP (analityczny proces hierarchiczny). Pierwsza z metod pozwala na przeglądanie, edytowanie oraz analizowanie danych przestrzennych oraz tworzenie map. Poprzez wprowadzanie odpowiednich warstw oraz nakładanie ich na siebie, możliwe jest dokonanie oceny dostępności terenu pod konkretną inwestycję. Drugą metodę AHP wykorzystuje się w celu określenia istotności poszczególnych kryteriów zastosowanych w analizie GIS. Warty nadmienia jest, iż Doktorant trafnie zidentyfikował najistotniejsze kryteria niezbędne do przeprowadzenia analizy GIS.

Kolejny rozdział 5 przedstawia wykorzystanie opisanej wcześniej metodyki w praktyce. Jako obiekt badań wybrano woj. wielkopolskie a celem analizy było wyodrębnienie obszarów, które nadawałyby się pod budowę farm wiatrowych kompatybilnych z technologią P2G. Wyniki analizy pozwoliły wyodrębnić trzy takie obszary w całym województwie, wśród których gmina Złotów okazała się cechować dostępnością terenu o największej powierzchni.

W ostatnim rozdziale 6 Doktorant podsumował przeprowadzone w ramach rozprawy badania wskazując przy tym najistotniejsze wnioski związane głównie z oceną przydatności zastosowanego modelu.

Krytyczne uwagi

1. Przegląd literatury w sposób wyczerpujący przedstawia stan rynku energii w Polsce. W oparciu o przedstawione dane statystyczne sformułowane zostały następujące konkluzje:

str. 17: „W opinii autora niniejszej rozprawy, w przyszłości sektory gazownictwa oraz elektroenergetyki będą silnie zintegrowane. Przemysł gazowniczy będzie równoważyło niestabilność odnawialnych źródeł oraz będzie pełniło rolę magazynu buforowego. Elektroenergetyka zmieni swój charakter wytwarzania energii elektrycznej z skoncentrowanej na rozproszonej.”

str. 26: „W opinii autora niniejszej rozprawy w przyszłości sektory gazownictwa oraz elektroenergetyki będą silnie zintegrowane. Przemysł gazowniczy będzie równoważył niestabilność odnawialnych źródeł, będzie pełniło rolę magazynu buforowego oraz transportowało energię odnawialną do miejsc jej dalszego wykorzystania.”

str. 30: „Z pewnością w przyszłości dzisiejsze prognozy będą ulegały dużym zmianom, jednak osiągnięcie mocy produkcyjnych zapewniającą pełną dzisiejszą zastępowalność gazu ziemnego wydają się mało prawdopodobne. Paliwo to produkowane będzie w miejscach powstawania substratów (oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów segregowanych zielonych, przedsiębiorstwa rolnicze). Dobór miejsc będzie również wysoce zależny od miejscowego zapotrzebowania, a także dostępności do chłonnej sieci gazowej oraz elektroenergetycznej. Brak dostępności tych obiektów będzie znacząco

obniżał efektywność produkcji biogazu (biometanu) oraz pochodnych tego paliwa (energii elektrycznej i ciepłej).”

str. 32: *„Przewiduje się, że znaczny udział w zużyciu paliw płynnych zostanie zastąpiony produkcją energii elektrycznej na potrzeby mobilności. ... Dzisiejszy system elektroenergetyczny nie zapewnia zastępowalności paliw płynnych energią elektryczną.”*

O ile w świetle nakreślonej przez Doktoranta sytuacji energetycznej w Polsce scenariusz przedstawiony powyżej wydawać by się mógł prawdopodobnym, analiza ograniczona wyłącznie do jednego kraju wydaje się być niewystarczająca do sformułowania ww. konkluzji. Powyższe stwierdzenia powinny być tutaj podparte doświadczeniami zaczerpniętymi z innych krajów, w szczególności tych, w których sektor energetyczny jest znacznie bardziej rozwinięty niż w Polsce, w literaturze można znaleźć wiele artykułów przeglądowych na ten temat - polecam zapoznać się np. z pracą: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 171, January 2023, 113002, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113002>.

2. Na stronie 59 Doktorant wskazuje, że:

„Badania w zakresie planowania nowych systemów energetycznych i nowych scenariuszy wykorzystania energii często opierają się na metodach wielokryterialnego podejmowania decyzji”.

Tutaj należałoby doprecyzować jak należy rozumieć fragment *”planowanie nowych systemów energetycznych”*. Następnie, wymienione są pewne metody, które służą do tego celu, takie jak: analityczny proces hierarchiczny (AHP), SMART, analityczny proces sieciowy (ANP), rodzina ELECTRE czy PROMETHEE. W kolejnym zdaniu wskazane jest, że:

„Jedną z najbardziej preferowanych przez użytkowników technik wielokryterialnych w projektach planowania energetycznego jest analityczny proces hierarchiczny (AHP). AHP jest stosunkowo prosty w zrozumieniu i ma zastosowanie do złożonych zagadnień gdzie w procesie oceny wprowadza się porównanie kryteriów, wykazując najbardziej wiarygodne rozwiązanie celu decyzyjnego.”

Z powyższego fragmentu wynika, że jedynymi kryteriami jakimi kierował się Doktorant przy wyborze jednej z metod były (i) preferencje użytkowników; (ii) prostota metody; (iii) zastosowanie do złożonych zagadnień. Wybór metody, narzędzia do przeprowadzenia analizy o docelowo istotnej wadze, jest tutaj kluczowy i wymaga szerszej uwagi w rozprawie.

3. Na stronie 69 znajdujemy fragment odnoszący się ponownie do metody AHP:

„Takie podejście ułatwia porównywanie poszczególnych kryteriów i wariantów bez konieczności szczegółowej znajomości metodyki. Jest to niezwykle ważna cecha, gdyż od ekspertów nie jest wymagana szczegółowa znajomość samej metodyki badania. Eksperci biorący udział w badaniu są specjalistami w danej dziedzinie ale nie muszą posiadać dużego doświadczenia w stosowaniu tej metody.”

Nie mogę zgodzić się z Doktorantem, że przy tak wielkich inwestycjach jakimi są instalacje P2G nie wymaga się od ekspertów znajomości narzędzi jakich używają na etapie planowania.

4. Na stronie 72 pojawia się fragment: „Przypisanie wagi do danej warstwy określa stopień, w jakim dane kryterium oddziałuje nad innym kryterium”. Na tym etapie pracy nie jest jasnym jak dobierane były wagi. Dopiero dalej dowiadujemy się, że wagi określone zostały przy użyciu ankietowej metody AHP. Na stronie 73 z kolei dowiadujemy się, że „Wagi każdego kryterium wyboru lokalizacji zostały obliczone na podstawie opinii ekspertów w oparciu o zebrane ankiety”. Ze strony 98 natomiast wynika, że eksperci związani byli z branżą energetyczną. Z wniosków natomiast (strona 110) dowiadujemy się, że:

„Badania ankietowe do analizy wielokryterialnej AHP zostały przeprowadzone wśród ekspertów. Z uwagi na rozpatrywany przedmiot jakim jest transformacja energetyczna, czyli dziedzina stosunkowo młoda, liczba dostępnych osób jest ograniczona. Powoduje to pewne trudności w przeprowadzaniu badań ankietowych.”

W jaki sposób byli wybierani eksperci? Czy zastosowano jakieś kryteria wyboru? Jeśli nie to czy docelowo powinno się jakieś kryteria zastosować? Ponadto, stwierdzenie, że transformacja energetyczna jest zagadnieniem stosunkowo młodym jest mocno względne i wymaga doprecyzowania.

5. Na stronie 74 Doktorant pisze:

„Z punktu widzenia praktycznego posiadanie tego typu modelu prowadzi do dużych oszczędności finansowych, jakie mogą być osiągnięte na etapie przygotowania projektów do realizacji.”

W pracy nie przedstawiono żadnej analizy ekonomicznej, która mogłaby potwierdzić powyższe stwierdzenie. Czy Doktorant jest w stanie przedstawić jakieś argumenty, które mogłyby wesprzeć powyższy fragment?

6. Przeprowadzona analiza wykazała, że w gminie Złotów (woj. wielkopolskie) możliwym jest wyodrębnienie obszaru o powierzchni od 1,54 do 18,9 km² (najbardziej atrakcyjne rozwiązanie). Zakładając najgorszy scenariusz, czyli 1,54 km² wydaje się, że powierzchnia taka jest zbyt mała na inwestycję P2G. Biorąc pod uwagę, że odległość pomiędzy wiatrakami nie powinna być mniejsza niż 10 wysokości pojedynczej konstrukcji, na obszarze tym może pojawić się zaledwie kilka sztuk. Dlatego też wybór woj. wielkopolskiego jako obiektu badań wydaje się być dość niefortunny.

W pracy brak jest omówienia otrzymanych wyników pod kontem ich faktycznej użyteczności pod budowę instalacji P2G. Dlatego też fragment, który pojawia się we wnioskach:

„W oparciu o model postępowania ustalono hierarchię kryteriów wyboru miejsca inwestycji, a przeprowadzone badania z wykorzystaniem połączonych metod wielokryterialnego wyboru i analizy geoprzestrzennej pozwoliły na wybór optymalnej lokalizacji elektrowni wiatrowych dla współpracy systemami technologii Power to Gas, co potwierdziło słuszność tezy postawionej przez autora dysertacji.”

wydaje się być niewystarczająco uargumentowany. Bardzo pomocna byłaby tu analiza ekonomiczna, która niestety przewidziana jest do przeprowadzenia w przyszłości.

7. Biorąc pod uwagę fakt, że metody GIS oraz AHP są dobrze znane a kryteria wyboru wykorzystane w analizie są powszechnie stosowane przy poszukiwaniu lokalizacji pod farmy wiatrowe, Doktorant powinien lepiej wyeksponować nowatorskie elementy pracy.

Uwagi szczegółowe

1. Na stronie 12 w opisie do Rys. 5 pojawia się następujący fragment: „... *W przyszłości trend ten będzie utrzymany. ...*”. Skąd ta pewność?
2. Str. 25: „*Sieci gazowe zgodnie z przyjętą polityką klimatyczną mają stopniowo być wykorzystywane do transportu wodoru oraz mieszanin gazu - początkowo z gazem ziemnym a ostatecznie z gazami zdekarbonizowanymi jak: biometan, wodór czy biogaz*”. Czym podparte jest to stwierdzenie – czy Doktorant jest w stanie wskazać tutaj adekwatne podparcie literaturowe.
3. Tabela 1: Zakładam, że 2 ostatnie kolumny w tabeli przedstawiają 2 różne scenariusze na 2050 r. Jednakże, nie zostały one w sposób wyczerpujący skomentowane.
4. Str. 27: „*Jednak biorąc pod uwagę środki jakie będą przygotowywane zgodnie z Europejskim Zielonym Ładem [1], wartości te mogą być realne do osiągnięcia.*” O jakich środkach tutaj jest mowa?
5. Str. 38: „*Wodór jest wykorzystywany przede wszystkim w procesach przemysłowych, głównie do produkcji nawozów. Technologie te wykluczają go do wykorzystania w drodze do neutralności klimatycznej. Ostatecznie przyszłość tego paliwa opierać się będzie w głównej mierze o technologie wykorzystujące proces elektrolizy.*” Skąd ta pewność, że elektroliza będzie wiodącą technologią służącą do pozyskiwania wodoru? Fragment ten nie jest podparty odpowiednią literaturą.
6. Str. 45: „*W Polsce możliwości wykorzystania energii słonecznej na tle innych lokalizacji światowych są średnie.*” Stwierdzenie takie jest mocno nieprecyzyjne. Jakie „światowe” lokalizacje stanowią tutaj punkt odniesienia?
7. Str. 48: „*Odbicie widać dopiero w 2021 r. lecz i ono nie odzwierciedla rzeczywistego krajowego potencjału, które w najbliższych latach będzie wzrastać dynamicznie.*” Skąd ta pewność?
8. Str. 52: „*Przy długości łopat rzędu 70-75 m prędkość końcowa może wynosić nawet 75-90 m/s.*” Domyślam się, że chodzi tutaj o prędkość końcówki łopatki turbiny wiatrowej, czy tak?
9. Na stronie 53 pojawia się następujący fragment:

„*W ramach transportu wodoru sieciami gazowymi będą istniały dwa rodzaje sieci:*

- *sieć transportująca czysty wodór,*
- *sieć gazowa transportująca paliwa metanowo-wodorowe (z domieszką wodoru).*

O ile w przypadku pierwszego rozwiązania wystarczy odpowiednio dostosować sieć gazową do transportu wodoru to w drugim przypadku wymagane będą szersze analizy

i badania w zakresie określenia dopuszczalnych ilości wodoru w gazie transportowanym siecią gazową.”

który wprowadza czytelnika w błąd. Transport czystego wodoru (rozwiązanie 1) wydaje się być znacznie większym wyzwaniem niż rozwiązanie 2. Chociażby z uwagi na konieczność zastosowania do produkcji rurociągów stali o wysokiej czystości domieszkowanej chromem, molibdenem i niklem. Konieczne jest tutaj doprecyzowanie.

10. Rozdział 4 rozpoczyna fragment:

„Przyszłość rynku energii będzie polegała na współpracy wielu systemów połączonych i współdziałających ze sobą. Różne nośniki energii jak: energia elektryczna, gaz zdekarbonizowany czy wodór powinny tworzyć jeden spójny system energetyczny. Polska jak i cały świat nie ma obecnie doświadczenia w tym obszarze.”

Ostatnie zdanie w tym fragmencie jest niewystarczająco uargumentowane. W pracy, jak już wcześniej wskazano, brak jest analizy literaturowej na temat systemów energetycznych w innych krajach niż Polska, która byłaby wsparciem dla wskazanego fragmentu. Czy Doktorant jest w stanie wypowiedzieć się w tej kwestii?

11. Na stronie 58 Doktorant pisze *„W tak szerokich zagadnieniach zastosowanie metod klasycznych do oceny projektów technicznych jest niewystarczające.”* Niejasnym jest o jakich metodach tutaj mowa? Poniżej pojawia się tylko informacja, że *„Metody te badają głównie czynnik ekonomiczny i jego opłacalność.”*, która jest niewystarczająca.
12. Str. 62: *„Wiedza w krajach UE o transformacji energetycznej i wykorzystaniu technologii P2G jest obecnie w fazie rozwoju.”* Stwierdzenie to nie zostało podparte żadnymi danymi literaturowymi i powinno być sprostowane.
13. Str. 66: *„Dynamicznie rozwijane są źródła geoinformacyjne co umożliwia dokonywanie skomplikowanych obliczeń analitycznych, które wiążą różne obszary.”* O jakich obliczeniach jest tutaj mowa?
14. Na stronie 81 opisane są kryteria wyboru. Z tekstu jasno wynika jak definiowane są kryteria C1, C3, C4 i C5 jednakże nie jestem w stanie znaleźć informacji jak definiowane (mieralne) jest kryterium C2.
15. W pracy pojawiają się również niepotrzebne powtórzenia treści, np.:
 - o Rys. 21 jest powtórzony na Rys. 51.
 - o Str. 36: fragment: *„Problemem w przesyłce wodoru sieciami gazowymi jest jego wpływ na materiał sieci gazowych szczególnie tych wykonanych ze stali. Wodór wpływa na kruchość stali (tzw. kruchość wodorowa) i może prowadzić do rozprzestrzeniania się pęknięć w rurociągach [33][34]. Aktualnie nie ma spójności co do dopuszczalnych ilości wodoru jakie można wprowadzić bez konsekwencji uszkodzenia elementów sieci gazowej. Przyjmuje się, zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, że wodór może być wprowadzany do sieci gazowej jako mieszanina do 15-20% objętości [34].”* jest powtórzony na str. 43.

- W rozdziale 5.7, rysunki 90, 94 i 98 są zbędne – te same wyniki pokazano w postaci zbiorczej na Rys. 102. To samo tyczy się tabel w tym rozdziale, tabele 29 i 30 zawierają wszystkie niezbędne informacje – trzy wcześniejsze tabele są zbędne.
16. Doktorant nie ustrzegł się również drobnych błędów edytorskich, interpunkcyjnych, stylistycznych oraz innych, z których wybrane przytoczono poniżej.
- Str. 10: „... Wymóg ten z całą pewnością będzie rozszerzał i obejmować kolejne instalacje ...”
 - Str. 16: „...Istnieje wiele równych wariantów wykorzystania nadmiarowej energii...”
 - str. 27: „Biogaz w sposób bezpośredni może zostać wykorzystany do produkcji energii elektrycznej. Jest to układ, który wymaga poza odbiorem energii elektrycznej zapewnienie odbioru energii cieplnej.”
 - Str. 36: „transport sieciami wysokiego ciśnienia odbywa przy ciśnieniu rzędu 50 bar, a nawet wyższych”
 - Str. 37: „Wodór traktowany jest jako potencjalne paliwo transformacji energetycznej. Jest pierwiastkiem, który powszechnie występuje we wszechświecie”.
 - Str. 48: „Ustawa tzw. „odległościowa” [57] mocno ograniczyła inwestycje.”
 - Str. 49: „obszar ten nie charakteryzuje dużym wykorzystaniem mocy zainstalowanej”
 - Str. 49: „Zwiększenie to można dokonać poprzez integrację produkcji energii elektrycznej...”
 - Str. 55: „Zmiany te wymagać będą bardzo wysokich kosztów finansowych”
 - Str. 73: „W pierwszym przypadku wyższa wartość przyjmuje wyższą wartość standaryzowane”
 - Str. 83 – komentarz pod Tab. 11: „... Z uwagi na brak zgody na udostępnienie danych lokalizacyjnych sieci gazowych sieci gazowe sieci gazowe zobrażowane są przykładowo”.

Wnioski końcowe

Pomimo dość licznej listy uwag, praca Pana mgr. inż. Rafała Goraja stanowi samodzielne i oryginalne dzieło naukowe potwierdzające wiedzę teoretyczną Autora oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Stwierdzam zatem, że spełnia ona wszystkie zarówno zwyczajowe, jak i ustawowe [art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742)] wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie pracy Autora do publicznej obrony.

Niepodofew

