

Prof. dr hab. inż. Dariusz Nowak
Eastern University of Applied Sciences
Szwajcaria

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Goraja
pt. "Analiza wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych w aspekcie współpracy z sieciami gazowymi"**

I. Podstawy formalne sporządzenia recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Goraja pt. "Analiza wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych w aspekcie współpracy z sieciami gazowymi" przygotowana została na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, Politechniki Poznańskiej, Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego (pismo WISIE.63.16.2024 z dnia 22 marca 2024).

II. Wprowadzenie

Rynek energii w aspekcie transformacji energetycznej ulega ciągłej zmianie. Odejście od systemów zcentralizowanych, opartych na paliwach kopalnych, do układów rozproszonych produkcji energii elektrycznej bazujących na odnawialnych źródłach energii musi uwzględniać wiele nowych wyzwań, na przykład rozwój systemów magazynowania energii czy przebudowa sieci elektroenergetycznych. Do rozwiązania kwestii transformacji energetycznej niezbędna będzie też analiza możliwości współpracy odnawialnych źródeł energii elektrycznej z sieciami energetycznymi i gazowymi. Uwzględniając powyższą problematykę, tematykę pracy mgr. inż. Rafała Goraja należy uznać za bardzo ważną zarówno z perspektywy poznawczej, jak i pod kątem użytkowym. Utylitarny charakter pracy podkreśla też opracowana praktyczna metoda ustalania hierarchii lokalizacji elektrowni wiatrowych we współpracy z sieciami elektroenergetycznymi, systemami Power to Gas oraz sieciami przesyłu gazu ziemnego.

III. Struktura i zawartość rozprawy

Praca doktorska mgr. inż. Rafała Goraja zawiera łącznie 137 stron, na które składa się 6 rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz symboli i oznaczeń, bibliografia zawierająca 124 pozycje, spis rysunków, spis tabel, załącznik 1, który zawiera analizę prawną, załącznik 2 – Ankieta, załącznik 3 – wyniki badania ankietowego i załącznik 4, który zawiera wyniki analizy.

W recenzowanej rozprawie zasadniczo można wyróżnić trzy części.

W pierwszej części, obejmującej rozdział 1., Autor scharakteryzował polski rynek energii w aspekcie nadchodzącej transformacji energetycznej oraz zagrożenia jakie mogą tą transformację opóźnić. Polski rynek energii został podzielony przez Autora na 5 części. Pierwsza część opisuje rynek energii elektrycznej, który w Polsce kontrolowany jest przez cztery duże przedsiębiorstwa: Polską Grupę Energetyczną (PGE), Tauron Polska Energia, Energa oraz Enea. Sieci przesyłowe są kontrolowane i obsługiwane przez Polskie Sieci Energetyczne. Autor przedstawił podstawowe założenia rozwoju polskiej sieci energetycznej i omówił założenia obniżenia emisyjności polskich elektrowni. Zwrócił też uwagę na to, że wysoka emisyjność polskich elektrowni nie wynika wyłącznie z oparcia sektora wytwarzania energii elektrycznej na dostępnych paliwach kopalnych (węgiel kamienny i brunatny), ale

jest również pochodną niskiej sprawności przestarzałych bloków energetycznych. W dalszej części Autor przedstawił prognozy wzrostu cen energii, które uwzględniają zarówno czynniki wewnętrzne (przestarzała infrastruktura bloków energetycznych) jak i zewnętrzne (wojna w Ukrainie). Autor przedstawił również prognozy dotyczące rynku energii odnawialnej na tle istniejącego zapotrzebowania energetycznego Polski. Druga część rozprawy przedstawia rynek gazu ziemnego, który w trakcie pisania rozprawy ulegał dramatycznym przemianom. Przemiany te wywołane były wojną w Ukrainie i brakiem dostępu do gazu płynącego gazociągami z Rosji. W Polsce obszar przesyłu gazu ziemnego realizowany jest przez Operatora Gazociągów Przesyłowych OGP Gaz-System S.A. Firma ta transportuje gaz sieciami wysokiego ciśnienia (gazociągi przesyłowe). Rozwinięciem gazociągów przesyłowych są gazociągi dystrybucyjne, które pełnią funkcję bezpośrednich dostaw energii do odbiorców końcowych. Największym operatorem systemu dystrybucyjnego w Polsce jest Polska Spółka Gazownictwa, która pełni rolę Narodowego Operatora Systemu Gazowego. Autor scharakteryzował system magazynowania, transportu i dywersyfikacji dostaw gazu. Bardzo ważną uwagą Autora jest zwrócenie uwagi na fakt, że jeszcze kilka lat temu gaz ziemny postrzegany był jako paliwo ekologiczne redukujące emisję gazów cieplarnianych przede wszystkim z węgla. Obecnie ze względu na pochodzenie kopalne gaz ziemny przedstawiany jest jako paliwo nie ekologiczne. Dalej Autor zajął się analizą rynku biogazu, który w nadchodzącej transformacji energetycznej może pełnić bardzo ważną rolę. W nadchodzących latach otrzymując dokładniejsze dane oraz zdobywając doświadczenie w projektach biogazowych i biometanowych będzie można dokładniej opisać możliwości produkcji i zastosowania tego paliwa w Polskiej sieci energetycznej. Biogaz w sposób bezpośredni może zostać wykorzystany do produkcji energii elektrycznej. Jest to układ, który wymaga poza odbiorem energii elektrycznej zapewnienie odbioru energii cieplnej i daje możliwość inwestorowi odpowiednio zaprojektować rozwiązania dla określonych warunków: prawnych, środowiskowych, terenowych i technicznych. W ramach kolejnych kroków transformacyjnych biogaz może stać się paliwem, który w pewnym ograniczonym stopniu zastąpi gaz ziemny. Pewne ograniczenia wynikają również z konieczności oczyszczania go do parametrów gazu ziemnego, który w przypadku gazu wysokometanowego stanowi prawie czysty metan. Autor przyjął trafne założenie, że z punktu widzenia zagadnień poruszanych w rozprawie doktorskiej, rynek biogazu jest najbardziej naturalnym i łatwym do zintegrowania z systemem gazu ziemnego. W przyszłości może on stanowić ogniwo pośrednie przy produkcji wodoru i dalszej jego metanizacji. W kolejnej części Autor opisuje rynek paliw płynnych, który charakteryzuje się dużym zapotrzebowaniem na energię. Większość tego surowca Polska sprowadza z zagranicy. Z punktu widzenia niniejszej pracy rynek paliw płynnych stanowi podstawę do prognozowania przyszłych ilości energii elektrycznej, która będzie musiała zostać wyprodukowana na potrzeby mobilności. Paliwa kopalne powinny zostać zastąpione ich syntetycznymi odpowiednikami wyprodukowanymi z zerowym śladem węglowym lub energią elektryczną. Dzisiejszy system elektroenergetyczny nie zapewnia zastępowalności paliw płynnych energią elektryczną. Przyszłe projekty jakie będą realizowane będą musiały uwzględniać zwiększenie mocy wytwórczych OZE tak aby zapewnić wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną do celów transportowych. Ostatni element rynku energii w Polsce scharakteryzowany przez Autora to Power to Gas (produkcja metanu z ekologicznego wodoru i dwutlenku węgla). Technologie P2G tworzą łącznik pomiędzy systemami elektroenergetycznymi, a systemami gazu ziemnego. Jest to stosunkowo młoda „idea” technologiczna. Jej obecny rozwój na skalę użytkową dopiero się rozpoczyna, a tempo wdrażania oraz jej dalszy rozwój podyktowany jest przede wszystkim transformacją energetyczną jaka jest realizowana na całym świecie. Autor bardzo rzeczowo przedstawił istniejące aktualnie na świecie sposoby produkcji wodoru i związane z tym nazewnictwo. Wodór szary to wodór, który powstaje w procesie reformingu metanu, wodór czarny powstaje na skutek zgazowania węgla, wodór zielony to stan pożądaný w transformacji energetycznej, w którym

paliwo to w całości pozyskiwane będzie ze źródeł odnawialnych. Pozostałe sposoby otrzymywania wodoru i jego nazewnictwo pokazane jest na rys. 28. Dalej Autor przedstawił prognozy związane z zapotrzebowaniem na wodór zielony i sposoby jego wytwarzania, skupiając się na potrzebie pozyskiwania zielonej energii ze słońca bądź z wiatru. Ostatnim elementem pierwszej części rozprawy jest dyskusja i charakterystyka zagrożenia transformacji energetycznej w aspekcie integracji sektora gazowego z sektorem energetycznym. Wszystkie dotychczasowe rozważania Autora poparte są przeglądem literatury dotyczącej polskiego rynku energii. Na zakończenie Autor określił główny cel pracy: "opracowanie modelu decyzyjnego pozwalającego na wybór miejsca lokalizacji elektrowni wiatrowych dla systemów technologii Power to Gas bazując na energii pochodzącej z lądowych farm wiatrowych, przy uwzględnieniu szerokiej gamy parametrów decyzyjnych". Autor postawił również tezę, że przedstawiona w rozprawie metoda umożliwi 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 wspomaganie decyzji jest możliwe wskazanie optymalnej lokalizacji dla źródła produkcji energii elektrycznej.

W drugiej części pracy (rozdział 4.) Autor przedstawia metodykę oraz schemat postępowania przy wyborze lokalizacji farm wiatrowych w korelacji z sieciami gazowymi i elektroenergetycznymi. Dokładnie przeanalizowane są dwie metody, system informacji geograficznej (GIS) i metoda hierarchicznej analizy zagadnień decyzyjnych (AHP), które umożliwiają wykonanie analiz w powiązaniu z lokalizacją farmy wiatrowej. Autor proponuje połączenie metody GIS z AHP i przedstawia dokładny sposób postępowania przy wyborze optymalnej lokalizacji farm wiatrowych. W procesie scalania metody AHP z GIS jako narzędzia przetwarzania danych geoprzestrzennych. Autor zastosował system program QGIS. Głównym celem tego podejścia była ocena wag dla map, które reprezentują różne kryteria. Wynikiem tej analizy były mapy, które przedstawiają rozkład wag w kontekście przestrzennym. Takie podejście jest bardzo uniwersalne i umożliwia wykorzystanie dużej ilości kryteriów w procesie decyzyjnym. Ten fragment pracy zawiera ponadto obszerny przegląd literatury dotyczącej omawianych metod. Autor analizuje poszczególne etapy tworzenia modelu prognozy lokalizacji farm wiatrowych. Trzecią część rozprawy stanowi rozdział 5., w którym Autor przedstawia analizę wyboru optymalnej lokalizacji farm wiatrowych na przykładzie województwa wielkopolskiego. W pierwszym etapie Autor dokonał analizę wykluczeń przy pomocy metody GIS, następnie wykonał analizę wielokryterialną AHP wraz z wyznaczeniem wag wskazanych kryteriów. Trzeci etap to analiza GIS z wykorzystaniem wag kryteriów. Kolejny etap to analiza wyznaczonych obszarów i wytypowanie potencjalnych lokalizacji. Dalej Autor przedstawił dogłębną analizę lokalizacji farm wiatrowych w województwie wielkopolskim. Pracę kończy rozdział 6., w którym syntetycznie podsumowano przeprowadzone badania, podano informację na temat potencjalnego wdrożenia modeli w systemie wspierającym decyzje wyboru potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych, jak również wskazano kierunki przyszłych badań.

IV. Ocena rozprawy

1. Praca podejmuje interesujący problem wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych w aspekcie współpracy z sieciami gazowymi i systemami Power to Gas. Mgr inż. Rafał Goraj opracował model wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowej oraz instalacji Power to Gas i zaimplementował go do przypadku województwa wielkopolskiego. Uzyskane wyniki badań, pokazują, że zdecydowana część obszaru Wielkopolski jest trudno dostępna dla realizacji projektów Power to Gas. Niemniej jednak, pomimo ograniczonych możliwości lokalizacyjnych projektów Power to Gas, istnieją miejsca, które umożliwiają rozwój tej technologii.

2. Doktorant przeprowadził badania w oparciu o metodę bazującą na połączeniu analizy wielokryterialnej AHP z metodą geoprzestzenną GIS. Jest to uniwersalne i nowatorskie podejście, które umożliwia wykorzystanie dużej ilości kryteriów w procesie decyzyjnym. Opracowana metoda stanowi praktyczny sposób wspomagania decyzji wyboru lokalizacji farm wiatrowych w korelacji z systemami gazowymi i elektroenergetycznymi. Zaproponowany model może być łatwo modyfikowany i rozbudowywany, co umożliwia jego dostosowanie do różnych źródeł wytwórczych.
3. Koncepcja zaprezentowana w pracy opiera się na sformułowaniu modelu przestrzennego, który daje realny obraz możliwości i celowości połączenia technologii Power to Gas z systemami gazowymi i elektroenergetycznymi.
4. Doktorant przewiduje dalsze prace rozwojowe nad opracowanym modelem, które będą ukierunkowane na analizę efektywności ekonomicznej wybranej lokalizacji elektrowni wiatrowej oraz instalacji Power to Gas.

V. Elementy dyskusyjne i uwagi krytyczne

Rysunki zamieszczone w pracy, które przedstawiają różnego rodzaju mapy, są nieczytelne np. Rys.2 str. 10, rys.13 str. 19. W pracy znajduje się też wiele błędów stylistycznych, które jednak nie mają wpływu na pozytywną ocenę rozprawy.

Str. 11. " Wysoka emisyjność polskiej energetyki nie wynika wyłącznie z „oparcia” sektora wytwarzania energii elektrycznej na dostępnych paliwach kopalnych (węgiel kamienny i brunatny). Jest ona również pochodną niskiej sprawności przestarzałych bloków energetycznych”, Podniesienie sprawności bloków energetycznych nie obniży emisyjności polskiej gospodarki

Str. 27. " Jest to układ, który wymaga poza odbiorem energii elektrycznej zapewnienie odbioru energii cieplnej. Jeżeli nie będziemy mieli odbiorcy energii cieplnej, będzie ona stanowiła stratę i mocno obniży efektywność całego procesu.....". Warto tutaj rozważyć użycie elektrolizatora wysokotemperaturowego, który całkowicie zmieni podejście do efektywności procesu Power to Gas.

Str.35. " Konieczność przejścia na źródła odnawialne pracujące w sposób nieregularny wymusi konieczność stworzenia technologii, które niwelować będą nierówną pracę OZE. Możliwe relacje współpracy systemów energetycznych przedstawia Rys. 26.....". Brak informacji na temat innych nośników energii jak metanol, amoniak. Autor zakłada, że w przyszłości nośnikiem energii będzie tylko metan.

Str. 36. "Sieć gazowa wydaje się najlepszym rozwiązaniem, gdyż umożliwia ona transport z miejsca wytwarzania do miejsca wykorzystania paliwa. Wraz postępującą transformacją istniejąca sieć gazowa będzie przysyłać mniejsze ilości gazu ziemnego a zwiększać się będzie udział gazów zdekarbonizowanych (przede wszystkim biometanu i metanu syntetycznego).....". Założenie bardzo ryzykowne, które nie uwzględnia produkcji paliw syntetycznych.

Str. 39. " Stopniowe odchodzenie od wytwarzania wodoru szarego będzie spowodowane rosnącymi kosztami opłat środowiskowych i gazu ziemnego.....". Raczej będzie to proces wymuszony przez ogromne inwestycje w produkcji zielonego wodoru, co już ma miejsce w Azji. Zastosowanie alternatywnego zielonego paliwa (opartego o zielony wodór) w statkach oceanicznych drastycznie obniży cenę zielonego wodoru.

Str. 47. Co oznaczają kolory na nieczytelnym rys. 42 ?

Str. 47. " Produkcja energii elektrycznej ze słońca w ostatnich latach wzrasta dynamicznie. Jej dalsze wykorzystanie będzie uzależnione od chłonności sieci elektroenergetycznej jak również od możliwości wykorzystania energii na potrzeby własne.....". Założenie wymaga wyjaśnienia. Obecnie, w praktyce rozwijane są technologie magazynowania energii w paliwach syntetycznych, które w przyszłości mogą odciążać sieci elektroenergetyczne.

Str. 47. "Wzrastający rynek pojazdów elektrycznych można wykorzystać jako mobilne magazyny energii i zamiast do sieci elektroenergetycznej bezpośrednio dostarczać energię do odbiorcy (w tym przypadku pojazdu elektrycznego)....". Czysta teoria, która przy obecnej technologii wykorzystywanej w bateriach raczej się nie sprawdzi.

Str. 65. " System Informacji Geograficznej (Geographic Information System – GIS) jest to system, który umożliwia wykonywanie analiz w powiązaniu z lokalizacją...". Warto byłoby krótko opisać jakich analiz.

Str. 75. Dlaczego nachylenie terenu przyjęto jako jeden z czynników wykluczeń?

Str. 81. " Nachylenie Terenu – jest to kryterium ekonomiczno-techniczne, które związane jest głównie z utrudnieniami w budowie i eksploatacji obiektów na terenach, gdzie występuje znaczne nachylenie terenu. Kryterium liczone jest w %. Na bazie analizy literaturowej (patrz podrozdział 4.2.3) obszar ten został ograniczony do nachylenia 15%. Kryterium to jest minimalizowane.....". Dlaczego przyjmowane jest kryterium, które automatycznie jest minimalizowane?

Str. 110. "Badania ankietowe do analizy wielokryterialnej AHP zostały przeprowadzone wśród ekspertów....". Jest to najbardziej problematyczny punkt przedstawionej metody. Może w przyszłości metoda przedstawiona w rozprawie będzie poszerzona o sztuczną inteligencję.

VI. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Rafała Goraja pt. „Analiza wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych w aspekcie współpracy z sieciami gazowymi” zawiera sformułowanie ważnego problemu naukowego w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, oryginalne jego rozwiązanie oraz dyskusję wyników. Ponadto Doktorant przedstawił własne rozwiązania, które mogą mieć szerokie zastosowanie w sferze gospodarczej. Uważam, że opiniowana praca w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Zurich, 06.05.2024



Prof. dr hab. Inż. Dariusz Nowak