

Lublin, dn. 18.11.2025 r.

dr hab. inż. Tomasz Cholewa, prof. uczelni
Politechnika Lubelska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Jakości Powietrza Wewnętrznego i Zewnętrznego
ul. Nadbystrzycka 40B
20-618 Lublin
e-mail: t.cholewa@pollub.pl
tel.: +48 81 538 4424

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr inż. Dawida Czajora
pt. „Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie
ciepłowniczym”
przygotowanej pod kierunkiem naukowym
Promotora dr hab. inż. Łukasza Amanowicza, profesora PP
oraz Promotora pomocniczego dr inż. Karola Bandurskiego

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą formalną przygotowania przedmiotowej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 16 września 2025 roku dotycząca powołania mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Dawida Czajora.

2. Aktualność wyboru tematu i umiejscowienie tematyki badawczej

Obecnie w systemach elektroenergetycznych stosuje się coraz powszechniej odnawialne źródła energii (które w połączeniu z magazynowaniem energii sprawiają, że zapotrzebowanie odbiorców na energię jest bardziej elastyczne, do czego muszą dostosowywać się producenci)

oraz sterowanie prognozowe w zakresie wytwarzania ciepła jak i energii elektrycznej. Sterowanie prognozowe może przynieść wymierne korzyści energetyczne oraz ekonomiczne, ponieważ wykorzystuje się uczenie maszynowe w procesie optymalizacji funkcjonowania

systemu elektroenergetycznego. Na podstawie wykonanego przeglądu literatury Doktorant słusznie zauważył, że brakuje badań prezentujących przekrój opracowanych modeli prognostycznych na szeroką skalę wraz z oceną ich dokładności oraz kryterium ich kwalifikacji do zastosowania w funkcjonującym systemie ciepłowniczym. Dlatego też Doktorant postanowił opracować nowe metody w zakresie sterowania pracą źródeł wytwórczych, które na bieżąco analizują warunki techniczne i ekonomiczne pracy całego systemu i na tej podstawie podejmują decyzję. Podjęty temat ma znaczenie nie tylko poznawcze, ale również użyteczne, ponieważ może zostać wykorzystany jako skuteczne narzędzie w procesie optymalnego sterowania wytwarzaniem ciepła i energii elektrycznej w źródłach energii zasilających systemy ciepłownicze.

3. Ocena merytoryczna pracy

Oceniana rozprawa doktorska liczy 167 stron, zawiera 128 pozycji cytowanego piśmiennictwa (głównie artykuły anglojęzyczne) i napisana jest w języku polskim. W rozprawie znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim. Pomocnym elementem rozprawy jest zamieszczony „Wykaz skrótów”.

Praca składa się z 13 głównych rozdziałów. Generalnie strukturę prac uważam za właściwą, zaś podział na poszczególne rozdziały jest logiczny i przemyślany przez Doktoranta.

W rozdziale 1 (*Wprowadzenie*) Doktorant odpowiednio uzasadnił podjęcie tematu przedmiotowej rozprawy doktorskiej pokazując istotne aspekty z zakresu problematyki wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym oraz aktualne wymagania zarządców systemów ciepłowniczych (między innymi: wysoka elastyczność systemu, wykorzystanie odnawialnych źródeł energii oraz ciepła odpadowego, zmienna cena ciepła sieciowego).

Na tej podstawie Doktorant sformułował tezę pracy *„Istnieje możliwość wykorzystania sztucznych sieci neuronowych na cele prognozy: zapotrzebowania na ciepło, ceny energii elektrycznej oraz ceny paliwa gazowego, z akceptowalną dokładnością, dla istniejącego systemu ciepłowniczego zasilanego z kogeneracyjnej elektrociepłowni gazowej”* oraz przedstawił cele szczegółowe oraz zakres pracy.

Szczególną uwagę zwrócono na opracowanie modeli prognostycznych w zakresie: godzinowego zapotrzebowania na moc cieplną na cele centralnego ogrzewania oraz ciepłej wody użytkowej dla każdego budynku przyłączonego do sieci cieplnej; dobowego

zapotrzebowania na moc cieplną i paliwo gazowe dla źródła, parametrów meteorologicznych oraz ceny energii elektrycznej na Rynku Bilansującym w ujęciu godzinowym. Proponowane metody przedstawiono na trzech przejrzystych schematach blokowych.

Nie przedstawiono jednak szczegółowego uzasadnienia dlaczego poszczególne prognozy są istotne dla całego procesu oraz nie pokazano algorytmów/zależności stosowanych na potrzeby sterowania predykcyjnego elektrociepłownią.

W rozdziale 2 (*Przegląd stanu wiedzy*) Doktorant przedstawił w pierwszej kolejności (rozdział 2.1) ważniejszą literaturę z zakresu wykorzystania uczenia maszynowego w systemach ciepłowniczych i elektroenergetycznych. W tej części pracy można było pokazać porównanie analizowanej literatury przedmiotu (np. w tabeli), co byłoby działaniem systematyzującym wiedzę (również w zakresie dokładności opracowanych już metod prognostycznych). Następnie (rozdział 2.2) w bardzo przystępny sposób zaprezentowano podstawowe informacje z zakresu uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych.

Z kolei na końcu tego rozdziału zamieszczone jest odpowiednie i szczegółowe uzasadnienie Doktoranta w zakresie oryginalność podjętej tematyki w kontekście przeglądu aktualnego stanu wiedzy.

Rozdział 3 zawiera dane na temat analizowanego systemu elektroenergetycznego i ciepłowniczego. System składa się z gazowej elektrociepłowni (moc cieplna około 15 MW, moc elektryczna 3,6 MW), preizolowanej sieci ciepłowniczej (długość około 17 km), która zasila ponad 107 budynków. Podkreślono obecną tendencję do zwiększonej generacji energii przez odnawialne źródła energii co wiąże się z dekarbonizacją przemysłu i planem przejścia od 2050 roku wyłącznie na odnawialne źródła energii. Przedstawiono również ceny energii elektrycznej oraz paliwa gazowego. W tym rozdziale jest dość dużo informacji, które mają charakter ogólny (nie związany bezpośrednio z analizowanym systemem elektroenergetycznym i ciepłowniczym) i brakuje bardziej szczegółowych opisów (czy też odwołania do kolejnych rozdziałów) w zakresie analizowanego systemu.

W rozdziale 4 szczegółowo przedstawiono algorytmy zbierania danych na potrzeby zbudowania i walidacji modeli. Przedstawiono narzędzia programistyczne wykorzystane w tym celu. W szczególności dane źródłowe stanowiły: dane z liczników ciepła zainstalowanych w węzłach cieplnych rejestrowane z interwałem 5–cio minutowym od grudnia 2020 r.; dane z elektrociepłowni rejestrowane z interwałem 15–to minutowym od marca 2022 r.; dane meteorologiczne dla Białogardu rejestrowane z interwałem godzinowym od listopada 2019 r.; informacje o zapotrzebowaniu i generacji energii elektrycznej w Polsce

z interwałem 15-to minutowym od grudnia 2021 r.; ceny energii elektrycznej na Rynku Bilansującym z interwałem godzinowym od stycznia 2015 r.; ceny paliwa gazowego na Towarowej Giełdzie Energii rejestrowane od czerwca 2019 r. z interwałem dobowym.

W zakresie rozdziału 4.3 (dane z liczników ciepła) wymieniono szereg parametrów, które pochodzą nie tylko z liczników ciepła ale też z regulatorów pogodowych. Nie przedstawiono jednak szczegółowych informacji czy był to licznik główny czy zainstalowany w obiegu centralnego ogrzewania czy też przygotowania ciepłej wody użytkowej.

W zakresie danych meteo pominięto (bez dodatkowej dyskusji w tym zakresie) wartość natężenia promieniowania słonecznego, które może w znaczącym stopniu wpływać na dostawę ciepła na potrzeby ogrzewania w budynkach.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono wykorzystane sposoby generowania modeli w zakresie: prognozowania zapotrzebowania na ciepło u odbiorcy końcowego (rozdział 5); prognozowania zapotrzebowania na ciepło w źródle (rozdział 6); prognozowania zapotrzebowania na paliwo gazowe dla źródła (rozdział 7), rozszerzonej prognozy pogody (rozdział 8); prognozy ceny energii elektrycznej na Rynku Bilansującym (rozdział 9); prognozy ceny paliwa gazowego (rozdział 10).

Dla każdego z opracowanych modeli prognostycznych przedstawiono indywidualnie dane wejściowe, akceptowalną niedokładność, walidację modelu, szczegółową dyskusję otrzymanych wyników oraz sposób wdrożenia. Te części pracy oceniam bardzo pozytywnie. Zaprezentowana tam dyskusja otrzymanych wyników świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w zakresie opisywanych zagadnień. Doktorant przedstawił też odpowiednią argumentację w przypadku obiektów, w których podczas procesu walidacji przekroczony został zakładany poziom niedokładności.

W zakresie dyskusji wyników można było odnieść się w bardziej klarowny sposób do istotności poszczególnych danych wejściowych, innych danych wejściowych (które są ważne np. z punktu widzenia fizyki budowli a nie zostały uwzględnione w niniejszej pracy), innego (niż sieci neuronowe) podejścia do określania prognozy pogody, prognozy ceny energii elektrycznej na Rynku Bilansującym oraz prognozy ceny paliwa gazowego np. za pomocą już istniejących modeli w tym zakresie czy też danych publikowanych z wyprzedzeniem. W zakresie proporcji danych do budowy (trenowania) modeli prognostycznych (80% liczby danych) a następnie ich walidacji (20% liczby danych) nie podano szczegółów czy ten wybór danych był robiony losowo czy w pierwszej kolejności zbudowano model a następnie kolejne dane były wykorzystywane do jego walidacji.

W rozdziale 11 Doktorant szczegółowo opisał wdrożenia algorytmów uczenia maszynowego z wykorzystaniem sieci neuronowych w analizowanym systemie ciepłowniczym. Podkreślił również, że aktualnie nie jest możliwa ingerencja w algorytmy sterujące procesami technologicznymi mająca na celu zdalne załączanie silników kogeneracyjnych oraz kotłów gazowych wraz z regulacją ich mocy. Dlatego obecnie została uruchomiona aplikacja na zewnętrznym serwerze WWW, która publikuje wymagane parametry pracy źródła wygenerowane z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, tak aby operator mógł na tej podstawie realizować sterowanie. Przy uwzględnieniu opracowanych modeli prognostycznych opracowano również mechanizmy, które mają na celu automatyzować proces zarządzania elektrociepłownią kogeneracyjną oraz wykonano analizę działania dla pierwszego kwartału 2025 roku. Proponowany algorytm (przy wykorzystaniu prognozowanej ceny energii elektrycznej w stosunku do prognozowanej ceny paliwa gazowego) określił godziny w których powinien pracować układ kogeneracyjny i dzięki jego zastosowaniu można było uzyskać lepszy wynik finansowy o 620 tysięcy złotych.

W opisie wdrożenia algorytmów uczenia maszynowego z wykorzystaniem sieci neuronowych w analizowanym systemie ciepłowniczym Doktorant nie podał jednoznacznie funkcji celu (lub kilku celów (wariantów) –np. do wyboru przez ostatecznego użytkownika systemu) w zakresie którego mają pracować poszczególne modele predykcyjne. Dodatkowo dyskusja odnośnie bezwładności cieplnej systemu jak i samych urządzeń wytwórczych nie jest szczegółowo opisana.

W rozdziale 12 (*Podsumowanie, wnioski i uwagi końcowe*) Doktorant jednoznacznie udowodnił przyjętą wcześniej tezę pracy i potwierdził odpowiednie zrealizowanie postawionych wcześniej celów pracy. Doktorant udowodnił między innymi, że można wykorzystywać z powodzeniem sieci neuronowe w wielu aspektach (w tym sterowaniu prognozowym) w systemie ciepłowniczym. Przedstawione wnioski mają mierzalny charakter i mogą być wykorzystane w praktyce.

4. Uwagi do pracy

Uwagi o charakterze ogólnym:

Doktorant powinna w bardziej jasny sposób podkreślać uniwersalny charakter oraz możliwości szerokiego wykorzystania wyników badań w innych przedsiębiorstwa tego typu.

Uwagi o charakterze redakcyjnym:

Po tytule pracy oraz rozdziałów nie stosuje się kropki.

5. Wnioski końcowe

Pan mgr inż. Dawid Czajor przedstawił do oceny rozprawę, którą oceniam bardzo pozytywnie. Układ i zawartość pracy jest prawidłowy. Przedstawione uwagi i sugestie w ramach rozdziału 3 oraz rozdziału 4 recenzji nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy oraz na pozytywny odbiór całokształtu rozprawy.

Pan mgr inż. Dawid Czajor wykazał się znajomością wiedzy teoretycznej i umiejętnościami praktycznymi w zakresie prowadzonych badań. Pokazał, że umie samodzielnie prowadzić prace naukowe.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Czajora p.t. „Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym” spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.) stawiane rozprawom doktorskim.

Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr inż. Dawida Czajora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lublin, dn. 18.11.2025 r.



.....

dr hab. inż. Tomasz Cholewa