

Kielce, 21.09.2022r.

Dr hab. inż. Hanna Koshlak, prof. PŚk
Katedra Fizyki Budowli i Energii Odnawialnej
Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki
Politechnika Świętokrzyska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Jaworskiego na temat:
„Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych
w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowie”**

Podstawa opracowania

Podstawę formalną do opracowania niniejszej recenzji stanowią:

- Pismo Pani Rektor Politechniki Koszalińskiej dr hab. Danuty Zawadskiej, Prof. Politechniki Koszalińskiej z dnia 09.09.2022r. o powierzeniu obowiązków recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Jaworskiego oraz umowa o dzieło nr DK 42 z dnia 12.09.2022 r.;
- Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego pt.: „Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowie”, załączonej do ww. pisma;

Promotorom rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego pt.: „Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowie” są Prof. dr hab. inż. Alexander Shkarovskiy, promotor pomocniczy - Pani dr inż. Magdalena Orłowska.

1. Ocena zasadności podjęcia tematu

Optymalna eksploatacja systemów ciepłowniczych i opracowanie efektywnych strategii w celu zaspokojenia potrzeb ciepłowniczych, a także zwiększona integracja technologii niskoemisyjnych i lokalnych odnawialnych źródeł energii mają kluczowe znaczenie dla zmniejszenia zużycia energii oraz emisje dwutlenku węgla. Poszukiwanie coraz sprawniejszych i bardziej wydajnych układów ciepłych do zastosowania w budynkach o

 1

różnym przeznaczeniu, stymuluje ciągły rozwój branży ciepłowniczej, jednak nawet nowoczesne instalacje grzewcze z zaawansowanym systemem sterowania i regulacji nie zawsze zapewniają wymagany komfort cieplny w pomieszczeniach. W tym w wielu przypadkach problem ten jest związany z wielkością przepływu czynnika w instalacji w kotłowniach hybrydowych z obiegami grzewczymi o różnych parametrach pracy. Dlatego kluczowym zagadnieniem przy projektowaniu takich systemów ciepłowniczych jest osiągnięcie niezależności hydraulicznej podłączonych obiegów przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganego natężenia przepływu w temperaturze projektowej przy różnych obciążeniach eksploatacyjnych. Kluczową ideą w tym podejściu jest oddzielenie obiegów grzewczych od obiegów pierwotnych poprzez rozdzielacze hydrauliczne bądź sprzęgła hydrauliczne. Pod tym względem separatory termiczno-hydrauliczne stanowią ważną alternatywę w stosunku do innych urządzeń. W ten właśnie obszar wpisuje się recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego pt.: „Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowo”.

Wprawdzie wykorzystanie takich rozwiązań układów hydraulicznych w kotłowni hybrydowej z szeregowym połączeniem obiegów grzewczych i zasilających już istnieje w praktyce inżynierskiej, jednak dostępna literatura na ten temat wciąż jest niewystarczająca. **Uważam, że temat dysertacji Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego jest jak najbardziej aktualny i dobrze wpisujący się w ogólnoswiatową tendencję do poszukiwania efektywnych sposobów stworzenia systemów grzewczych opartych na ekonomizacji procesu przygotowania oraz dostawy ciepła do odbiorców, minimalizacji strat, jak zarówno kosztów zużycia energii cieplnej.**

2. Przegląd rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego w istocie rzeczy ma charakter eksperymentalny z zastosowaniem oryginalnych algorytmów obliczeniowych (modelu matematycznego). Istotnym fragmentem pracy jest opracowanie nowatorskiego sprzęgła termo-hydraulicznego oraz modelu matematycznego, które pozwala na precyzyjne określenie parametrów w obiegach grzewczych, przy zróżnicowanym i zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na ciepło.

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego została opracowana w Politechnice Koszalińskiej, na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezjina i liczy łącznie 164 strony. Przedstawiona do recenzji praca jest prawidłowo skonstruowana. Składa się z 7 rozdziałów numerowanych, zestawienia stosowanych symboli, krótkich streszczeń w języku angielskim i polskim, słowa wstępnego oraz spisu treści umieszczonych na początku rozprawy. Na końcu pracy umieszczono spis tabel, rysunków i literatury. Bibliografia zawiera 63 pozycji literaturowych. W pracy zamieszczono 73 rysunki oraz 27 tabel. Należy stwierdzić, że treść pracy jest zgodna z jej tytułem. Układ pracy jest czytelny i poprawny oraz w zasadzie spełnia standardy pracy doktorskiej. Podział pracy na rozdziały jest właściwy i tworzy logicznie uporządkowany materiał. Niektóre fragmenty pracy wymagają jednak uzupełnienia, a niekiedy nieznacznej korekty.

Analiza i ocena pracy

Rozdział 1 „CZĘŚĆ TEORETYCZNA - STUDIUM”

W rozdziale 1 zatytułowanym „Część teoretyczna - studium” Doktorant scharakteryzował obszar tematyczny pracy oraz przedstawił uzasadnienie podjęcia tematu. Jako obiekt badań Doktorant wybrał hybrydowy system centralnego ogrzewania z obiegami grzewczymi o zróżnicowanym i zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na ciepło. Uzasadniając potrzebę

 2

prowadzenia badań Doktorant określił, że wprowadzenie efektywnego sposobu planowania i eksploatacji systemów ciepłowniczych w układach hybrydowych z obiegami grzewczymi o zróżnicowanym i zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na ciepło wiąże się z wyzwaniem dotyczącym zapewnienia prawidłowego zrównoważenia tych obiegów pod względem hydraulicznym i termodynamicznym, w tym dostarczania ciepła zgodnie z oczekiwaniami indywidualnych odbiorców, przy jednoczesnej minimalizacji strat w trakcie eksploatacji instalacji. Zwięźle omówione zostało teoretyczne zagadnienie układu cieplnego ze sprzęgłem hydraulicznym oraz przegląd literaturowy stosowanych rozdzielaczy hydraulicznych w układach instalacji grzewczej. W tym rozdziale przedstawione zostały także podstawy teoretyczne doboru rozwiązań prawidłowego funkcjonowania instalacji centralnego ogrzewania pod względem hydraulicznym i termodynamicznym. Najistotniejsza w tym zakresie jest Przegląd stosowanych rozdzielaczy hydraulicznych (podpunkt 1.6). Przegląd literaturowy stosowanych rozdzielaczy hydraulicznych kończą wnioski głównie dotyczące braku w literaturze kompleksowości badań układów technologicznych c.o. z szeregowym połączeniem obiegów grzewczych i zasilających za pomocą rozdzielacza, co potwierdza zasadność tematyki badań podjętych przez Autora rozprawy. W oparciu o przedstawioną analizę danych literaturowych Doktorant przedstawił własną autorską propozycję opracowania rzetelnego zagadnienia równoważenia hydraulicznego w układach technologicznych systemu ogrzewania z szeregowym połączeniem obiegów grzewczych. W podpunkcie 1.5 Doktorant zamieścił ogólne informacje odnoszące się do podstaw teoretycznych układu cieplnego ze sprzęgłem hydraulicznym – model matematyczny. Na zakończenie tego rozdziału Doktorant sformułował tezę pracy. Teza rozprawy brzmi (cytuje): „*Skuteczne równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne w kotłowniach hybrydowych z obiegami grzewczymi o różnych parametrach pracy może być realizowane za pomocą szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego*”. Teza ta kształtuje sposób prowadzenia pracy, ma wpływ na jej treści oraz postać formułowanych zadań cząstkowych.

Sformułowaniu celu pracy i zakresu pracy poświęcono **rozdział 2**. Doktorant sformułował cel na tle komentarzy dotyczących zakresu pracy. Główny cel badania w warunkach laboratoryjnych Autor przedstawił na stronie 42: „określenie minimalnej powierzchni wolnej w przekroju poprzecznym urządzenia między strefą mieszania a strefą przepływów, aby z jednej strony umożliwić prawidłowy proces wymieszania strumieni, a drugiej, nie doprowadzić do dodatkowych oporów hydraulicznych w samym sprzęgle, co mogłoby wykluczyć ideę działania urządzenia.” Określenie celu nie jest, zdaniem Recenzenta, jasne i adekwatne do przedmiotu rozprawy. Dla osiągnięcia tego celu Doktorant ustalił zakres badań, który został dokonany w dwóch etapach; w warunkach laboratoryjnych zrealizowanych na Politechnice Koszalińskiej, na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji przy ulicy Śniadeckich 2 oraz w warunkach rzeczywistych przeprowadzonych w hotelu Services&Bistro zlokalizowanym w Koszalinie przy ulicy Dworcowej 5A. W opinii recenzenta zabrakło w rozdziale 2 Autorowi wyodrębnić cel i zakres pracy. Miałoby to walor porządkujący i uzupełniający.

W rozdziale 3 pt. „Metody prowadzenia badań” Autor przedstawił szczegółowy opis badania eksperymentalnego wizualizacji przepływów czynnika grzewczego w warunkach laboratoryjnych zrealizowanych na Politechnice Koszalińskiej oraz w warunkach rzeczywistych przeprowadzonych w hotelu Services&Bistro zlokalizowanym w Koszalinie przy ulicy Dworcowej 5A.

W podpunkcie 3.1 Doktorant przedstawił metodykę prowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych. Próby wizualnych przepływów przeprowadzono w autorskim sprzęgle termo-hydraulicznym w warunkach ustalonych. Badania zostały przeprowadzone przy udziale wody wodociągowej oraz barwników. Doktorant szczegółowo opisał stanowisko badawcze oraz

dokonał merytorycznego uzasadnienia doboru poszczególnych elementów istotnych dla wizualizacji przepływów w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko badawcze składało się głównie ze stalowego prototypu sprzęgła termo-hydraulicznego z szybą ciśnieniową PN10 od frontu, z włazem otwieralnym po przeciwnej stronie i króćcami gwintowanymi, pięciu pomp obiegowych cyrkulacyjnych typu 25/40-180 firmy CIRCULA o trzech trybach pracy ($Q_{nom1} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{nom1} = 3 \text{ mH}_2\text{O}$, $Q_{nom2} = 2.2 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{nom2} = 4.0 \text{ mH}_2\text{O}$, $Q_{nom3} = 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{nom3} = 4.5 \text{ mH}_2\text{O}$), czterech rotametrów tworzywowych ciśnieniowych dla każdego obiegu typu PT PS31 BSP o zakresie 400-4000 dm^3/h PN10 firmy AEA TECHNIQUE (klasa dokładności 1.6), zaworów kulowych gwintowanych odcinających i czerpalnych o PN30 firmy CALIDO, odpowietrzników automatycznych firmy AFRISO, manometru tarczowego o zakresie 0÷4 bar, o średnicy tarczy 63 mm, serii III.1 firmy WIKA (klasa dokładności 1.6), lejków tworzywowych, złączek, kształtek, rur miedzianych twardych 35 i 15 oraz węży elastycznych ogrodowych. Autor zrealizował kilka serii doświadczeń, które pozwoliły scharakteryzować jakościowo i ilościowo procesy mieszania barwionych strumieni przy zmieniających natężeniach przepływu. **Stanowisko badawcze stanowiące oryginalny wkład pracy własnej Doktoranta, ze względu na swoją przemyślaną konstrukcję, metodykę pomiaru, wykorzystane materiały, aparaturę pomiarową, osprzęt itp. zapewniało dobrą jakość pomiarów i wiarygodność uzyskanych wyników.** W podpunkcie 3.1.1 Doktorant przedstawił obliczenia konstrukcyjne sprzęgła termo-hydraulicznego. W dalszej części rozdziału (podpunkt 3.1.2) Autor opisał budowę oraz zasadę działania sprzęgła termo-hydraulicznego. **Doktorant udowodnił, że w autorskim sprzęgle termo-hydraulicznym istnieją zależności parametrów mieszających się mas wody, które można określić za pomocą równań matematycznych.** Wskazuje przy czym na ważność uwzględnienia w modelach aby mieszanie czynników zachodziło wyłącznie w strefie mieszania Zi, w których procesy fizyko-chemiczne zachodzą w warunkach izobarycznych. Następnie został opracowany model matematyczny pozwalający na określenie parametrów konstrukcyjnych sprzęgieł dla konkretnych warunków projektowania.

W podpunkcie 3.2 Autor przedstawił krótką charakterystykę istniejącego układu kotłowni hybrydowej w Hotelu Services & Bistro oraz zamieścił na str. 57 schemat technologiczny kotłowni hybrydowej w hotelu Services & Bistro (rys. 22). Doktorant wskazuje przy czym na wady tego układu w trakcie pracy. W opinii Autora główną wadą jest niekontrolowany przyrost temperatury czynnika grzewczego na wlocie do każdego obiegu grzewczego; oraz w układzie kocioł – sprzęgło – bufor – kocioł.

Doktorant zdecydował się na długotrwałe monitorowanie zmian i odczyt wybranych parametrów czynnika grzewczego w sezonie grzewczym (04.10.2021r. - 21.04.2022r.) w kotłowni hybrydowej w warunkach rzeczywistych. W podpunkcie 3.2.2 **Autor zaproponował „docelowy” schemat technologiczny kotłowni hybrydowej w hotelu Services & Bistro wraz z urządzeniami pomiarowymi** (rys. 25). Do badań w warunkach rzeczywistych zostały zamontowane ciepłomierze ultradźwiękowe ULTRAHEAT T550 (UH50) firmy ANTAP. Oprócz ciepłomierzy jako dodatkowe źródło ciepła służące wyłącznie do przygotowania ciepłej wody zamontowano kocioł kondensacyjny typu EXCLUSIVE GREEN 25 o zakresie mocy 5-20 kW firmy BERETTA wyposażony w pompę z synchroniczną modulacją PWM (GRUNDFOS UMP 3 FLEX AS 15-70. W celu pomiaru temperatury na zasilaniu i powrocie oraz przepływów dla czterech obiegów grzewczych Doktorant skoncentrował się na stworzeniu systemu zdalnego odczytu danych. **Należy zaznaczyć, że stworzony przez Autora, we współpracy z firmą ANTAP Grupa Sp. z o.o. system umożliwiał pobieranie danych poprzez modul telemetryczny MBUS MoT oraz komunikację za pośrednictwem sieci Ethernet z ciepłomierzami.**

Rozdział 4 „Wyniki badań” stanowi istotną część rozprawy, w którym Doktorant udawał postawioną tezę. W podpunkcie 4.1 Doktorant przedstawił wyniki badań wizualizacji przepływów z wykorzystaniem sprzęgła termo-hydraulicznego w warunkach laboratoryjnych.

 4

Otrzymane wyniki natężeń przepływów z czterech obiegów przy równoległej pracy pomp zostały przedstawione w tab. 4. Na podstawie uzyskanych danych. Doktorant stwierdził, że sprzęgło termo-hydrauliczne, tak jak standardowe PRH, nie stwarza dodatkowych oporów hydraulicznych, ponieważ wartości przepływów z każdego obiegu są takie same. W celu wizualizacji przepływów Autor zrealizował cztery serie doświadczalne za pomocą których określono procesy mieszania barwionych przepływów przy zmiennych natężeniach za pomocą pomp. Wyniki badań zostały zamieszczone na rys. 28-49. Doktorant wskazuje przy czym na ważność uwzględnienia w procesach mieszania strumieni mas wodnych temperatury mieszanin, które można wyliczyć w oparciu o znane natężenia przepływów i ich przyjęte temperatury.

W tab. 5-7 Doktorant przedstawił przykładowe temperatury mieszanin przy prawidłowym mieszanii. W omówieniu wyników brakuje komentarza Autora odnoszącego się do stosowanej metody obliczeniowej.

Podpunkt 4.2 zawiera wyniki badań w warunkach rzeczywistych przeprowadzonych w hotelu Services&Bistro zlokalizowanym w Koszalinie przy ulicy Dworcowej 5A. Wyniki pomiarów przepływu chwilowego oraz temperatury zasilania i powrotu z czterech obiegów grzewczych Autor zamieścił w tabeli 8.

W rozdziale 5 „Analiza wyników badań” Doktorant przedstawił analizę wyników badań na podstawie danych rzeczywistych i modelowych. W tabeli 9 na stronie 100 Autor zamieścił wyniki badań modelowych przy istniejącej konfiguracji sterowania i funkcję pracy głównego kotła gazowego kondensacyjnego. W rozdziale tym zamieszczona została również analiza danych w programie Statistica 13.3 (TIBCO Software Inc. 2017). Do odpowiedzi na postawioną tezę badawczą Autor zastosował analizę różnic średnich oraz ocenę moderacji. W podpunktach 5.1-5.3 pokazane zostały wyniki analizy danych w zestawieniu tabelarycznym i w formie wykresów. Na końcu rozdziału Autor przeanalizował poprawność otrzymanych wyników. W tabeli 27 Autor zaprezentował zbiorcze zestawienie wartości odchylenia standardowego pomiarów i średniej w trakcie i po zakończeniu pracy obiegu pierwszego.

Rozdział 6 obejmuje „Podsumowanie” w którym podano informacje zamieszczone w poszczególnych punktach niniejszej pracy. **Należy zwrócić uwagę na to, że nowatorskie sprzęgło termo-hydrauliczne zostało zgłoszone w charakterze wynalazku w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej, w dniu 3 listopada 2021r, o numerze zgłoszeniowym P.439412 przy współpracy z Rzecznikiem Patentowym „Kulikowska & Kulikowski Sp. K..**

Część badawczą recenzowanej rozprawy kończy **Rozdział 7 „Wnioski”**, w którym w punktach podano najważniejsze wyniki części teoretycznej i eksperymentalnej.

W opinii recenzenta we wnioskach powinien znaleźć się akapit uzasadniający udowodnienie tezy. Recenzent analizując przedstawione rezultaty badania układów cieplnych z obiegami grzewczymi i zasilającymi połączonych szeregowo uznaje, że teza została udowodniona. W czasie obrony, dążąc do potwierdzenia własnych opinii dotyczących udowodnienia tezy, recenzent oczekuje, że Autor jasno przedstawi przesłanki wskazujące na udowodnienie tezy.

Pracę doktorską kończy **Spis tabel**, obejmujący 27 pozycji, **Spis rysunków** oraz **Literatura**, obejmująca 63 pozycji.



Uwagi merytoryczne ogólne i szczegółowe do treści rozprawy

Wnikliwa lektura recenzowanej rozprawy prowadzi do kilku zasadniczych spostrzeżeń i uwag.

- W rozdziale „Słowo wstępne” Autor wskazuje, że wykonanie równoważenia hydraulicznego poprzez montaż w instalacji, tzw. armatury równoważącej nie jest skuteczne w tym Autor odwołuje się do źródła literaturowego [4]. Nie jest jasne, na jakiej podstawie Doktorant dostrzega wady rozwiązania przedstawionego w niniejszej pracy.
- W podpunkcie 1.1 Doktorant przedstawił ogólną informację o przyczynach powodujących konieczność oddzielenia obiegów grzewczych i zasilających o zróżnicowanych parametrach pracy w czasie. Autor pisze, że „*największym problemem eksploatacyjnym każdej nowej bądź przebudowywanej instalacji jest zapewnienie prawidłowego funkcjonowania wszystkich składowych jej elementów pod względem hydraulicznym i termodynamicznym*” - co Autor uważa za prawidłowe funkcjonowanie instalacji pod względem termodynamicznym?
- W rozdziale 2 w oparciu o treści zawarte w rozdziale 1, Autor przedstawił cel i zakres pracy. Należy jednak zauważyć, że cel pracy został postawiony bardzo szeroko, a z jego sformułowania nie wynika wprost (i nie stanowi on bezpośredniego przeniesienia do tezy pracy), że badane będą obiegi grzewcze i zasilające charakteryzujące się szeregowym połączeniem o różnych parametrach pracy za pomocą sprzęgła termo-hydraulicznego w celu realizacji ich poprawnego równoważenia pod względem hydraulicznym i termodynamicznym. Mankamentem tego rozdziału rozprawy doktorskiej również jest brak schematu planu badań i analiz.
- Niestety Doktorant nie sformułował hipotez badawczych, co jest wymagane w pracach naukowych, a taką jest rozprawa doktorska. Korzystne byłoby ich przedstawienie na etapie obrony pracy doktorskiej.
- W komentarzach odnoszących się do metodyki badań w warunkach rzeczywistych (podpunkt 3.2), Doktorant nie wskazał, który z dwóch układów kotłowni hybrydowej w Hotelu Services & Bistro (istniejący czy docelowy) został wykorzystany w badaniach rzeczywistych. W tym na str. 61-62 trudno jest się dopatrzeć idei przewodniej i pewnego porządku metodycznego w konstruowaniu podrozdziału 3.2. Z opisu nie jest jasne jaki ze schematów kotłowni hybrydowej w Hotelu Services & Bistro istniejący (rys. 22) czy docelowy (rys. 25) został wykorzystany dla przeprowadzenia badań „rzeczywistych”? Zdaniem recenzenta na etapie obrony pracy doktorskiej wskazane byłoby dokładnie wyjaśnienie przeprowadzenia badań w warunkach rzeczywistych.
- W podpunkcie 1.5 tytuł brzmi „Teoretyczne zagadnienie układu cieplnego ze sprzęgłem hydraulicznym – model matematyczny”. Autor cytuje kilka prac, które nie zostały omówione ani przeanalizowane oraz podaje trzy przypadki rozkładu strumienia objętości czynnika grzewczego w PRH, które opisują wzorami 4-18. Uważam, że tytuł podpunktu 1.5 jest niepoprawny. Wskazane byłoby zamieszczenie szczegółowego opisu modelu matematycznego układu cieplnego ze sprzęgłem hydraulicznym i końcowych równań opisujących stan rozważanego elementu modelu. W opinii recenzenta zabrakło tu przykładów literaturowych do uzasadnienia stosowanego w pracę modelu matematycznego.
- W podpisie do rysunków 50-55 brakują jednostek wymiaru temperatury i przepływu wody wybranych obiegów grzewczych.
- Biorąc pod uwagę ogromny materiał doświadczalny zebrany w ramach niniejszej rozprawy oraz uzyskane wyniki obliczeń zdecydowanie korzystniejsze byłoby w

 6

rozdziale 7 wnioski przedstawić ze wskazaniem konsekwencji inżynierskiej w komentarzach tj. operować wartościami liczbowymi.

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej

Zapewnienie komfortowego i zdrowego środowiska wewnętrznego w budynkach jest jednym z głównych wymagań stawianych systemom energetycznym. Warunki eksploatacji systemów grzewczych muszą sprostać wielu wyzwaniom, w tym restrykcyjnym wymaganiom UE, dotyczącym polityki zrównoważonego rozwoju, ograniczenia emisji zanieczyszczeń, zmniejszenia zużycia energii. Wśród licznych metod stosowanych dla poprawy efektywności energetycznej budynków istotne znaczenie ma technologia centralnego ogrzewania w budynkach. W szczególności jednym z głównych warunków prawidłowego funkcjonowania pod względem hydraulicznym kotłowni hybrydowej z obiegami grzewczymi i zasilającymi, charakteryzującymi się często zróżnicowanymi parametrami pracy, jest wyeliminowanie wzajemnego wpływu na siebie strumieni wody wywoływane głównie pracą pomp. Skuteczne równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne obiegów o zróżnicowanym i zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na ciepło może być realizowane poprzez oddzielenie obiegów grzewczych od obiegów pierwotnych przy zastosowaniu rozdzielacze hydrauliczne bądź sprzęgła hydrauliczne. W tym kontekście podjęte w recenzowanej rozprawie badania dotyczące opracowania rzetelnego zagadnienia równoważenia hydraulicznego i termodynamicznego w układach technologicznych systemu ogrzewania z szeregowym połączeniem obiegów grzewczych są aktualne i ważne zarówno pod względem naukowym jak i aplikacyjnym i wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Pomimo uwag krytycznych przedstawionych powyżej, które należy raczej traktować jako głos w dyskusji, uważam, że recenzowana praca wnosi istotne nowe wartości naukowe i użyteczne.

Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- opracowanie nowatorskiego sprzęgła termo-hydraulicznego o szeregowym połączeniu obiegów odbiorczych (grzewczych) i zasilających (kotłowych) pozwalające na skuteczne równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne obiegów o zróżnicowanym i zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na ciepło,
- stworzenie modelu matematycznego, który pozwala na precyzyjne określenie parametrów odbiorczych i zasilających, przy zmieniających się przepływach w trakcie eksploatacji,
- ogólne założenia stworzonego modelu matematycznego udowodniły wyniki badań eksperymentalnych i rzeczywistych.

Biorąc pod uwagę złożoność oraz zakres wykonanych prac należy docenić pracowitość i zaangażowanie Doktoranta w realizację badań. Stanowisko badawcze stanowi oryginalny wkład pracy własnej Doktoranta. Dobrą jakość pomiarów oraz wiarygodność uzyskanych wyników świadczy o dobrym przygotowaniu do realizacji badań dotyczących wizualizacji przepływów w warunkach laboratoryjnych. Doktorant zaproponował schemat technologiczny



7

kotłowni hybrydowej w hotelu Services & Bistro wraz z urządzeniami pomiarowymi dla prowadzenia badań w warunkach rzeczywistych.

Uwagi krytyczne przedstawione w pracy dotyczą poprawności i prawidłowości prezentacji wyników i nie zmienia to faktu, że badania zostały przeprowadzone samodzielnie, prawidłowo i rzetelnie. Należy podkreślić, że Doktorant jest współautorem kilku publikacji, co świadczy o dojrzałości naukowej.

- *Jaworski L., Shkarovskiy A., Chernykh A., An improved method of serial balancing of hybrid boiler station systems, w: Rocznik Ochrony Środowiska, t. 23, Wydawnictwo Środkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego Ochrony Środowiska, Koszalin 2021, s. 214-223*
- *Szkarowski Aleksander, Jaworski Lukasz, Mamedov Shirali., Utilization of Process Wastewater Heat, Rocznik Ochrona Środowiska, 2020, Tom 22, cz. 2 1074--1083*

Wniosek końcowy

W podsumowaniu niniejszej recenzji stwierdzam, że treść rozprawy jest zgodna z tytułem, a cel pracy został zrealizowany. Podjęta w rozprawie tematyka badań dotycząca opracowania skutecznego równoważenia hydraulicznego i termodynamicznego w kotłowniach hybrydowych z obiegami grzewczymi o zróżnicowanych i zmiennych parametrach pracy za pomocą nowatorskiego szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego wpisuje się w ogólnoswiatową tendencję do poszukiwania efektywnych sposobów stworzenia systemów grzewczych opartych na ekonomizacji procesu przygotowania oraz dostawy ciepła do odbiorców.

Pomimo uwag krytycznych przedstawione wyniki badań mają znaczenie naukowe i użytkowe. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań i znajomością nowoczesnych metod badawczych. W mojej opinii, rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Łukasza Jaworskiego pt.: „Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowo”, odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Art. 187 (Dz. U. 2022, poz. 574 ze zm.) i wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Koszalińskiej propozycję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



8