

prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ciepłownictwa
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
70-310 Szczecin, Al. Piastów 50
e-mail: wladyslaw.szaflik@zut.edu.pl

Szczecin, dn. 29 września 2022 r.

RECENZJA

Pracy doktorskiej **mgr inż. Łukasza Jaworskiego**

pt. **„Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowie”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na zlecenie Rektora Politechniki Koszalińskiej w Koszalinie dr hab. Danuty Zawadzkiej, prof. PK (pismo z dnia 9 września 2022 r.). Podstawą zlecenia była uchwała Komisji do przeprowadzenia czynności w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 6 września 2022 roku w sprawie wyznaczenia prof. dr hab. inż. Władysława Szaflika w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Łukaszowi Jaworskiemu. Podstawą opracowania jest egzemplarz pracy doktorskiej, literatura naukowa dotycząca zakresu pracy oraz wyniki badań własnych.

2. Tematyka rozprawy

Tytuł rozprawy ma postać: *„Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowie”*. W rozprawie przedstawiono i przeanalizowano zagadnienie równoważenia hydraulicznego i termodynamicznego w kotłowni hybrydowej z obiegami grzewczymi o zróżnicowanym i zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na ciepło poprzez szeregowie sprzęgło hydrauliczne. Omówiono dostępne na rynku polskim sprzęgła (rozdzielacze) hydrauliczne oraz zaprezentowano opracowany przez Doktoranta i Jego Promotora szeregowie „sprzęgło termohydrauliczne”. Przeprowadzono badania tego sprzęgła, w laboratorium i w warunkach rzeczywistych. Badania laboratoryjne przeprowadzono na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej przy ulicy Śniadeckich 2, a w warunkach rzeczywistych, w hotelu Services&Bistro zlokalizowanym w Koszalinie przy ulicy Dworcowej 5A.

Uważam, że tematyka rozprawy jest interesująca oraz ważna i ma duże znaczenie w praktyce inżynierskiej ze względu na przeanalizowanie, stosunkowo rzadko stosowanego w Polsce, rozwiązania hydraulicznego współpracy źródła ciepła i instalacji.

3. Opis rozprawy

Rozprawa ogółem liczy 164 strony, nie wydzielono z niej załączników. W pracy umieszczono 73 rysunki i 27 tabel, w tym Tabelę 8 liczącą 16 stron i Tabelę 9 liczącą 18 stron. W spisie literatury wykazano 63 pozycje, w tym 9 stron internetowych.

Na początku rozprawy Autor umieścił zestawienie stosowanych symboli, następnie streszczenie pracy oraz słowa kluczowe w języku polskim i angielskim, słowo wstępne, siedem rozdziałów samej pracy oraz spisy tabel, rysunków i cytowanej literatury.

Rozprawa napisana jest poprawną polszczyzną, styl pracy nie budzi większych zastrzeżeń, struktura pracy poprawna, kolejność rozdziałów właściwa, rozprawa opracowana starannie, strona edytorska na dobrym poziomie. Podczas czytania pracy zauważyłem niewielką liczbę błędów literowych i stylistycznych.

4. Charakterystyka rozprawy

Tytuł pierwszego rozdziału nosi nazwę „*Część teoretyczna – studium*”. W pierwszym jego podrozdziale Doktorant uzasadnia konieczność oddzielenia hydraulicznego źródła ciepła od odbiorników. W drugim syntetycznie omawia układ technologiczny kotłowni. W trzecim zwraca uwagę na wpływ temperatury zasilania czynnika grzejącego na wydajność cieplną grzejników. W czwartym podrozdziale przedstawia sposoby rozdzielania hydraulicznego obiegu pierwotnego (źródła ciepła) od wtórnego (odbiorników ciepła) ze szczególnym zwróceniem uwagi na sprzęgła hydrauliczne. Podrozdział piąty poświęcony jest teoretycznym kwestiom dotyczącym zagadnień cieplno-hydraulicznych układów ze sprzęgłami hydraulicznymi. Omawia w nim możliwe stany pracy sprzęgła hydraulicznego i związane z nimi relacje pomiędzy strumieniami i temperaturą w poszczególnych obiegach czynnika. W podrozdziale szóstym omawia stosowane rozdzielacze hydrauliczne. Doktorant po kolei przedstawia poszczególne rodzaje sprzęgieł hydraulicznych i odpowiadających im producentów, na końcu omawia „rozwiązanie eksperymentalne szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego” będącego przedmiotem rozprawy.

Podrozdział siódmy stanowi podsumowanie części studialnej. W podsumowaniu tym Doktorant stwierdza, że z omawianych urządzeń „*Jedynie wielosekcyjne urządzenia „ZORT-Multi” i „ZORT-Stacja pośrednia” pozwalają łączyć zróżnicowane pod względem termicznym*

obiegi, jednak zmienność zapotrzebowania ciepła powoduje stosowanie dodatkowych urządzeń regulacyjnych”. Szkoda, że tego zagadnienia nie wyjaśnił bliżej i nie podał, jakie zalety ma „rozwiązanie eksperymentalne” w stosunku do rozwiązań ZORT.

Na podstawie części studialnej sformułował tezę rozprawy. Brzmi ona: „Skuteczne równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne w kotłowniach hybrydowych z obiegami grzewczymi o różnych parametrach pracy może być realizowane za pomocą szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego”.

W rozdziale 2 o tytule „Cel i zakres pracy” Doktorant w rozdziale tym przedstawił jedynie zakres projektowanych badań prowadzonych w laboratorium i na rzeczywistym obiekcie. Natomiast nie podał celu rozprawy oraz pozostałego zakresu prac.

W rozdziale 3 o nazwie „Metody badań” Doktorant opisuje przeprowadzone badania. Jedne to były eksperymentalne badania wizualizacji przepływów czynnika w opracowanym przez Promotora i Doktoranta „szeregowym sprzęgle termo-hydraulicznym” w warunkach laboratoryjnych. W drugich zajęto się badaniem parametrów czynnika grzewczego w tymże sprzęgle w hybrydowym źródle ciepła w hotelu Services&Bistro zlokalizowanym w Koszalinie przy ulicy Dworcowej 5A.

Badania wizualizacji zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym, specjalnie zaprojektowanym i wybudowanym, przystosowanym do tego celu modelu sprzęgła hydraulicznego z czterema odnogami dla obiegów wtórnych. Wizualizację przeprowadzono dla wszystkich możliwych wariantów mieszania się strumieni w pierwszym segmencie sprzęgła. Barwnikiem koloru niebieskiego zabarwiono czynnik obiegu pierwotnego na wlocie do sprzęgła i czerwonym na wylocie z pierwszego obiegu wtórnego, barwniki te po wymieszaniu w proporcji 1:1 tworzą mieszaninę koloru fioletowego. Przepływ zabarwionych strumieni realizowano za pomocą pomp o zmiennych charakterystykach. W punkcie tym przedstawiono:

1. obliczenia konstrukcyjne sprzęgła termo-hydraulicznego (punkt 3.1.1),
2. budowa oraz zasada działania sprzęgła hydraulicznego (punkt 3.1.2),
3. tok postępowania przeprowadzania prób wizualnych na stanowisku badawczym (punkt 3.1.3),
4. równania bilansu masy i energii dla poszczególnych obiegów sprzęgła pozwalające na określenie temperatury czynnika po opuszczeniu poszczególnych segmentów sprzęgła (punkt 3.1.4) – model matematyczny.

Uważam, że z tego rozdziału należało wydzielić i umieścić przed nim rozdział opisujący podrozdziały nie dotyczące bezpośrednio badań wizualizacyjnych, zawierający obecne punkty 3.1.1., 3.1.2. i 3.1.4. Punkty te nie dotyczą badań wizualizacyjnych.

Pomiary strumieni i temperatury czynnika grzejnego na zasileniu i powrocie dla czterech obiegów grzewczych przeprowadzono w kotłowni hotelu Services&Bistro w Koszalinie. Obiekt posiada czteroobiegowy wtórny układ cieplny, w którym każdy obieg wymagał czynnika grzewczego o różnych parametrach. Podstawowym źródłem ciepła jest kocioł POWER PLUS 100M, dodatkowym źródłem osiem kolektorów słonecznych. W kotłowni jest zamontowane „szeregowe sprzęgło termo-hydrauliczne”.

I obieg, zasilający podgrzewacz ciepłej wody użytkowej, pracuje w priorytecie jej przygotowywania. W czasie podgrzewania ciepłej wody obieg grzejnikowy centralnego ogrzewania (obieg II) jest wyłączany. Regulację przepływów w II, III i IV obiegu powodują zamontowane na pionach głównych trójdrogowe zawory mieszające z siłownikami podłączonymi pod główny system sterowania. Grzejniki dodatkowo wyposażone są w ręczne oraz automatyczne zawory termostatyczne. System automatyki kotłowni zakłada równoległą pracę trzech obiegów grzewczych, tj. wentylacji mechanicznej, CO grzejnikowego i CO podłogowego.

Pomiar wybranych parametrów czynnika grzewczego dla czterech obiegów, między innymi temperatury na zasileniu i powrocie oraz strumieni czynnika przeprowadzono za pomocą ciepłomierzy ultradźwiękowych UH50. Do odczytu i rejestracji danych z ciepłomierzy na komputerze wykorzystano oprogramowanie o nazwie PK – HM. Pobieranie plików na komputer domowy odbywało się przez oprogramowanie narzędziowe AnyDesk umożliwiające również zdalne sterowanie systemem operacyjnym w dogodnym czasie.

Kolejny 4 rozdział nosi tytuł „Wyniki badań”. Jako pierwsze omówiono wyniki badań eksperymentalnych, następnie wyniki uzyskane na obiekcie rzeczywistym.

Wyniki badań eksperymentalnych dla czterech serii pomiarowych przedstawiono na zdjęciach fotograficznych. Czynniki zasilający zabarwiono na niebiesko, zaś czynniki płynące z obiegu grzejnego na czerwono. Pierwsza i druga seria dotyczyły przypadku, w którym strumień czynnika obiegu grzejnego odpowiadał strumieniowi czynnika ze źródła ciepła, zaś w trzeciej serii strumień obiegu grzejnego był mniejszy od strumienia czynnika ze źródła, z kolei w czwartej serii strumień obiegu grzejnego był większy od dopływu czynnika ze źródła.

Proces wizualizacji przepływów przedstawiono w czasie dziesięciu sekund, w odstępach co jedną sekundę. Na podstawie wykonanych fotografii Doktorant stwierdził, że w pierwszej serii mieszanie zachodzi prawidłowo, ponieważ odbywało się w całej komorze

mieszania, czego efektem jest uzyskanie przeważającego fioletowego odcienia mieszaniny wpływającej do kolejnego segmentu. W drugiej serii mieszanie jest nieprawidłowe, ponieważ zachodziło tylko w dolnej części sprzęgła. Zauważyć można dwa odrębne strumienie, jeden koloru niebieskiego, a drugi koloru czerwono-fioletowego. Przepływ taki, w tym przypadku wynikał z braku przegrody zawirującej i płyty sitowej. W trzeciej serii strumień czynnika obiegu pierwotnego był większy niż w obiegu wtórnym, na końcowych fotografiach dominował kolor niebieski, a w czwartej strumień czynnika obiegu pierwotnego był mniejszy niż w obiegu wtórnym i dominował kolor czerwony, pokazane fotografie przedstawiają prawidłowe mieszanie się strumieni czynnika grzejnego przy różnych wartościach strumieni w obiegach.

Wybrane wyniki pomiarów, przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym, przedstawiono w formie tabelarycznej. Zamieszczono w niej wyniki pomiarów chwilowego strumienia objętości, temperatury na zasileniu i temperatury na powrocie, dla czterech obiegów czynnika grzejnego. Jest to wystarczająca liczba mierzonych parametrów danych by można było przeanalizować pracę tych obiegów. Dobrze by było gdyby Doktorant te parametry pomierzył również dla czynnika grzejnego po stronie pierwotnej, pozwoliłoby to na weryfikację wyników przeprowadzonych pomiarów.

Rozdział 5 nosi tytuł „*Analiza wyników badań*”. Doktorant w tym rozdziale nie odnosi się do przeprowadzonych eksperymentalnych badań laboratoryjnych. Analiza dotyczy wyłącznie wyników badań przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym. Analizę wyników badań przeprowadzono porównując wartości wielkości uzyskane z pomiarów z wielkościami uzyskanych z równań bilansu ciepła dla poszczególnych stopni węzła. Doktorant powinien przedstawić cel tej analizy. Porównania ww. wyników dokonano statystycznie na podstawie analizy różnic i analizy interakcji (moderacji) dla dwóch stanów pracy, określając wpływ pracującego I obiegu na obiegi II (wentylacji) i IV (ogrzewania podłogowego) oraz wpływ braku pracy tego obiegu na obiegi: II (wentylacji), III (ogrzewania grzejnikowego) i IV (ogrzewania podłogowego) bezpośrednio po jego wyłączeniu, w okresie do 30 minut. Przyjęto w obliczeniach, że podczas pracy I obiegu grzejnego temperatura czynnika na zasilaniu wynosiła będzie maksymalnie 60°C, a w czasie pracy obiegu II, III i IV 45°C. Pomierzone wartości strumieni czynnika w poszczególnych obiegach przyjęto do obliczeń temperatury na zasilaniu i powrocie dla każdego z nich, obliczono również temperaturę za sprzęgłem hydraulicznym. Obliczenia zamieszczono w tabeli na 18 stronach rozprawy.

Analizując przedstawione w rozprawie wyniki, można zauważyć, że po wyłączeniu zasilania obiegu przygotowania ciepłej wody i przełączeniu źródła ciepła na temperaturę

zasilania wody grzejnej instalacji grzejnej, powolny spadek temperatury czynnika w czasie w poszczególnych obiegach wynikający z bezwładności instalacji grzejnej, przygrzejnikowych regulatorów temperatury i samych grzejników.

Mając na względzie, iż pomierzone temperatury po wyłączeniu obiegu przygotowania ciepłej wody są zmienne w czasie z tendencją malejącą, byłoby dobrze znaleźć w wynikach pomiarów stany ustalone i dla nich przeprowadzić analizę.

Znajdujące się w obiekcie obiegi grzejne zostały zaprojektowane na zaspakajanie określonych potrzeb cieplnych (obliczeniowego zapotrzebowania ciepła). Na podstawie przyjętych parametrów (temperatur) określono dla nich strumienie objętości czynnika grzejnego i dobrano pompy. Wartości temperatur wylotowych, w danym momencie, na poszczególnych stopniach sprzęgła zależą od wartości strumienia czynnika grzejnego w obiegu pierwotnym, jego temperatury na wlocie do sprzęgła i obciążeń cieplnych poszczególnych obiegów.

Doktorant przeprowadził dla obu wariantów pracy analizę statystyczną otrzymanych wyników. Analizował statystyczne związki pomiędzy strumieniami czynnika, temperaturami na zasilaniu i powrocie poszczególnych obiegów, uwzględniał również rodzaj danych (dane z pomiaru, dane z obliczeń). Powinien na końcu tego rozdziału przedstawić syntetyczne wnioski z analizy zawierające ustosunkowanie się do tezy pracy. Ze względu na to, że wartości badanych parametrów są praktycznie zdeterminowane, wnioski z tej szerokiej analizy statystycznej przeprowadzonej przez Doktoranta potwierdzają to, co wynika z fizyki zjawiska i niewiele wnoszą do rozprawy. Przy okazji, na rys. 50 zauważyłem złe opisy obiegów (powinno być obieg 1, 2 i 4). W ostatnim podrozdziale Doktorant przedstawił analizę błędów pomiarowych podając wartości średniej, odchylenia standardowego i błędu średniego, co znaczy, że przyjął, że różnice pomiędzy poszczególnymi pomierzonymi wartościami analizowanej wielkości wynikają z błędów pomiaru.

W rozdziale 6. noszącym tytuł „Podsumowanie” Doktorant uzasadnia potrzebę opracowania „szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego”, które uwzględnia zarazem aspekt hydrauliczny i termiczny. Powołując się przy tym na przykład rozbudowanej w pełni zautomatyzowanej kotłowni hybrydowej z obiegami grzewczymi charakteryzującymi się różnymi parametrami pracy połączonymi szeregowo ze sprzęgłem, które „*nie było w pełni skuteczne i nie spełniało pierwotnych założeń pracy układu*”. Następnie informuje, że ten fakt doprowadził do prac Promotora i Jego nad tym rozwiązaniem. Prace te zaowocowały opracowanym wspólnie z Promotorem wynalazkiem „szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego”, którego badania przedstawił w recenzowanej rozprawie. Wynalazek ten

został zgłoszony do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Na końcu rozdziału Doktorant potwierdził tezę rozprawy, iż „*skuteczne równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne w kotłowniach hybrydowych z obiegami grzewczymi o różnych parametrach pracy może być realizowane za pomocą szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego*”.

Rozdział 7. o tytule „*Wnioski*” stanowi dalszy ciąg podsumowania pracy. Sprecyzowano w nim szczegółowe wnioski dotyczące opisanego w pracy sprzęgła „*termo-hydraulicznego*”.

5. Ocena rozprawy

Rozprawa mgr inż. Łukasza Jaworskiego zawiera:

- studium literatury dotyczącej zagadnień związanych ze sprzęgłami hydraulicznymi,
- badania eksperymentalne wizualizacji przepływów w warunkach laboratoryjnych,
- badanie parametrów czynnika grzejnego w warunkach działalności świadczącej usługi hotelowe,
- statystyczną analizę wyników badań parametrów czynnika grzejnego,
- podsumowanie rozprawy i wnioski.

Uważam, że kolejność rozdziałów jest w zasadzie właściwa, zakres rozprawy obejmuje wszystkie niezbędne w rozprawie elementy. Tematyka jest interesująca, wyniki mogą być zastosowane bezpośrednio w praktyce inżynierskiej. Uwagi zapytania i sugestie do poszczególnych zagadnień przedstawionych w rozprawie zamieszczono w części recenzji rozprawy dotyczącej jej charakterystyki.

Doktorant wspólnie z promotorem rozwiązali i opracowali konstrukcję „*sprzęgła termo-hydraulicznego*”, Doktorant przeprowadził jego badania, na podstawie których stwierdził, że „*sprzęgło termo-hydrauliczne*” zapewnia skutecznie równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne w kotłowniach hybrydowych.

W ostatnich latach coraz szerzej analizowane są sposoby i stosowane rozwiązania źródeł ciepła w celu usprawnienia systemów ogrzewania budynków. Doktorant zbadał nowe rozwiązania szeregowego sprzęgła hydraulicznego w laboratorium poprzez wizualizację i na obiekcie rzeczywistym. Przeprowadzone przez Doktoranta badania i analiza ich wyników wykazała, że podjęte zadanie zostało pomyślnie zrealizowane. W ten sposób potwierdził przyjętą w rozprawie tezę.

6. Uwagi o charakterze redakcyjnym

Uwagi o charakterze redakcyjnym zaznaczono w sprawdzonym egzemplarzu pracy. Praca napisana poprawną polszczyzną, nie zauważyłem rzucających się w oczy błędów stylistycznych. Spostrzegłem drobne błędy maszynowe.

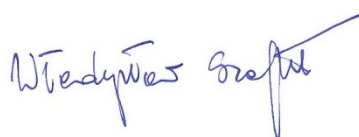
W przypadku dużej liczby danych pomiarowych i wyników obliczeń, moim zdaniem, powinien być dołączony do rozprawy Załącznik, w przypadku rozprawy Doktoranta powinny się w nim znajdować: fotografie *Wyników badań eksperymentalnych seria 1, 2, 3 i 4* przedstawione na 12 stronach rozprawy, *Tabela 8. Wyniki badań w warunkach rzeczywistych* przedstawiona na 16 stronach i *Tabela 9. Wyniki badań modelowych* zamieszczona na 18 stronach rozprawy.

7. Wniosek końcowy

Przedmiotem recenzowanej rozprawy mgr inż. Łukasza Jaworskiego pt. **„Rozwiązanie problemów hydraulicznych i termodynamicznych w kotłowniach hybrydowych przez połączenie szeregowe”** jest „szeregowe sprzęgło termo-hydrauliczne”. Doktorant przedstawił w niej studium literaturowe dotyczące sprzęgieł hydraulicznych, wyniki badań „szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego” oraz analizę tych wyników. Doktorant w rozprawie potwierdził postawioną tezę *„Skuteczne równoważenie hydrauliczne i termodynamiczne w kotłowniach hybrydowych z obiegami grzewczymi o różnych parametrach pracy może być realizowane za pomocą szeregowego sprzęgła termo-hydraulicznego”*.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania określone przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. z dnia 30 sierpnia 2018 r. Poz. 1668 z późniejszymi zmianami). Reprezentuje odpowiedni poziom naukowy, ponadto zostały przeprowadzone przez Doktoranta obszerne badania laboratoryjne i na obiektach, co dodatkowo podnosi wartość Jego rozprawy. Wyniki pracy mają aspekt praktyczny i mogą być wykorzystane w praktyce inżynierskiej.

Przedkładam Wysokiej Radzie Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Koszalińskiej w Koszalinie niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik