

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

Szczecin, dn. 11 czerwca 2022 r.

## RECENZJA

Pracy doktorskiej **mgra inż. Filipa PAWLAKA**

p.t. „**WPLYW DYNAMICZNYCH ODDZIAŁYWAŃ RADIACYJNYCH PODŁÓG  
CHŁODZĄCYCH NA ICH CHARAKTERYSTYKI UŻYTKOWE**”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzje opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej w Poznaniu (pismo: WISIE.63.37.2022 z dnia 26.05.2022 r.). Podstawą opracowania jest egzemplarz pracy doktorskiej, literatura naukowa dotycząca zakresu pracy oraz wyniki badań własnych.

### 2. Charakterystyka rozprawy

Tytuł dysertacji ma postać „*Wpływ dynamicznych oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących na ich charakterystyki użytkowe*”. Przedmiotem rozprawy jest analiza zmiennego oddziaływania cieplnego systemów wodnych radiacyjnych podłóg chłodzących o zmieniających się parametrach na pomieszczenie i badanie wpływu dynamiki procesu przepływu ciepła w pomieszczeniu z takimi systemami na jego charakterystyki użytkowe. Doktorant przez charakterystykę użytkową rozumie zmienność w czasie parametrów cieplnych charakteryzujących pomieszczenie i podłogę chłodzącą. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych te charakterystyki mogą istotnie odbiegać od charakterystyk wyznaczonych w warunkach statycznej wymiany ciepła. Autor w pracy zajmuje się dynamicznym oddziaływaniem cieplnym podłogi wyposażonej w wodny układ chłodzący znajdującej się w pomieszczeniu na warunki termiczne komfortu cieplnego pomieszczenia przy występowaniu zmiennych wewnętrznych i zewnętrznych zysków ciepła, w tym od nasłonecznienia.

Na początku rozprawy Doktorant umieścił jej streszczenie w języku polskim i angielskim, następnie spis treści, wykaz najważniejszych oznaczeń, sześć rozdziałów samej pracy i na końcu bogatą bibliografię. Bibliografia liczy łącznie 253 pozycje, obejmuje najważniejsze prace badawcze z przedmiotowej literatury (214 pozycji), normy i akty prawne (39 pozycji) oraz strony internetowe (13 pozycji). Praca jest obszerna, liczy 209 stron tekstu, zamieszczono w niej 22 tabele i 118 rysunków.

Doktorant w rozdziale 1 pt. „Wprowadzenie” na początku rozdziału charakteryzuje wykorzystywane na przestrzeni lat w budownictwie radiacyjne systemy płaszczyznowe zarówno grzewcze jak i chłodzące. Stwierdza On, że obecnie wykorzystywanie wodnych systemów, z przewodami wodnymi umieszczonymi w posadzce, do chłodzenia jest znacznie rzadziej stosowane niż do ogrzewania. Dalej Doktorant przedstawia podział wodnych, płaszczyznowych systemów grzewczo-chłodzących wg stosowanych kryteriów takich jak lokalizacja płaszczyzny grzewczo-chłodzącej w rodzaju przegrody pomieszczenia, na związanie z konstrukcją budynku i pojemność cieplną systemu. Następnie, po scharakteryzowaniu podłóg chłodzących i ich podziału przedstawia analizę literaturę dotyczącą technologii chłodzenia podłogowego. Przedstawia po kolei analizę przebadanej literatury na temat chłodzenia podłogowego z podziałem na artykuły techniczne i naukowe, normy i wydawnictwa książkowe, materiały techniczne producentów systemów chłodzących instalacji podłogowych oraz opublikowane analizy przypadków rozwiązań projektowych i raportów z eksploatacji. Dalej charakteryzuje metodykę projektowania podłóg chłodzących. Przedstawia i analizuje najważniejsze elementy procesu projektowania. Należą do nich wyznaczenie projektowego obciążenia chłodniczego, dobór i zwymiarowanie instalacji chłodniczej oraz wybór sposobu sterowania pracą instalacji. Dla każdego z tych elementów przedstawia przegląd literatury i przeprowadza analizę metod wyznaczania lub w przypadku sterowania pracą analizę strategii sterowania systemami podłóg chłodzących. Na podstawie tych przeglądów i analiz dokonuje sformułowania problemu badawczego.

W rozdziale 2 o tytule „Cel i tezy pracy” Doktorant omawia cel i przedstawia tezy rozprawy. Podstawowym celem Jego pracy jest zbadanie dynamicznych oddziaływań cieplnych, zachodzących pomiędzy radiacyjną podłogą chłodzącą i jej elementami a heterogenicznym, o zmiennym zapotrzebowaniu chłodu środowiskiem, jakim jest pomieszczenie i jego otoczenie, a następnie ocena wpływu tych oddziaływań na charakterystykę użytkową tego typu systemu chłodzenia, pozwalającą na sformułowanie praktycznych wniosków, możliwych do wykorzystania w procesie projektowania takiego systemu. Doktorant określa pięć zadań cząstkowych, których zrealizowanie umożliwi mu osiągnięcia postawionego powyżej podstawowego celu badawczego dysertacji. Dotyczą one:

scharakteryzowania wymiany ciepła oraz identyfikacji parametrów projektowych wpływających na charakterystykę systemu, stworzenie narzędzia obliczeniowego pozwalającego na analizę wymiany ciepła, przeprowadzenie badań doświadczalnych pozwalających na walidację opracowanego narzędzia, zbadania oddziaływania pomiędzy podłogą a środowiskiem i opracowanie wniosków oraz wskazówek projektowych i eksploatacyjnych do tego typu systemów. W pracy sformułował cztery tezy związane z pracą radiacyjnych podłóg chłodzących.

Rozdział 3 pt. „Analiza przepływu energii w pomieszczeniu z podłogą chłodzącą” poświęcony jest opisowi przepływu ciepła i sposobom rozwiązywania zagadnień przepływu ciepła w pomieszczeniu z podłogą chłodzącą. Na wstępie tego rozdziału Doktorant charakteryzuje występujące w nim sposoby wymiany ciepła tzn. przewodzenie ciepła, wymianę ciepła przez promieniowanie i konwekcję. Następnie dokonuje przeglądu literatury dotyczącej metod rozwiązywania zagadnień wymiany ciepła w pomieszczeniach i przeprowadza ich analizę. Doktorant analizuje przewodzenie ciepła w przegrodach budowlanych ograniczających pomieszczenie, promieniowanie długofalowe, promieniowanie słoneczne, konwekcję na powierzchni przegród w pomieszczeniu, przepływ powietrza w pomieszczeniu, przepływ ciepła w przegrodzie przezroczystej oraz przepływ ciepła w podłodze chłodzącej. Na końcu każdego analizowanego zagadnienia wymiany ciepła przedstawia jego podsumowanie pod kątem możliwości uwzględnienia we własnym modelu numerycznym.

W rozdziale 4 o tytule „Autorski model numeryczny do analiz wymiany ciepła w pomieszczeniu z podłogą chłodzącą”. Doktorant omawia opracowany przez siebie matematyczny model wymiany ciepła w badanym pomieszczeniu. Przyjął on, że ze względu na złożony charakter przepływu ciepła będzie to model numeryczny oparty o metodę różnic skończonych MRS. Spośród schematów rozwiązywania, wybrał schemat jawny. Opracowany przez Doktoranta model umożliwia analizę zmiennego przepływu ciepła w pomieszczeniu wyposażonym w chłodzenie podłogowe, uwzględnia on heterogeniczność cieplną pomieszczenia, przede wszystkim spowodowaną przez zmienne w czasie i na powierzchni podłogi zyski ciepła od promieniowania słonecznego. Na podstawie opracowanego modelu numerycznego opracował program komputerowy. Do jego opracowania Doktorant wybrał język programowania C++. Doktorant w rozprawie szczegółowo opisuje budowę poszczególnych modułów obliczeniowych programu i przedstawia użytą metodę weryfikacji niektórych z nich. Na końcu rozdziału przedstawia wyniki weryfikacji i walidacji opisanego w tym rozdziale modelu. Przeprowadzony proces walidacji potwierdził poprawność opracowanego modelu numerycznego w zakresie symulacji złożonej wymiany ciepła w

pomieszczeniach chłodzonych systemami wodnych radiacyjnych podłóg chłodzących typu A1 (z przewodami znajdującymi się w warstwie jastrychu) przy udziale zysków ciepła od promieniowania słonecznego, w tym bezpośredniego.

W rozdziale 5 o tytule „Analiza charakterystyk użytkowych radiacyjnych podłóg chłodzących” Doktorant przedstawia wyniki wykorzystania opracowanego modelu do przeanalizowania charakterystyk użytkowych radiacyjnych podłóg chłodzących. Symulacje przeprowadził dla jednego pomieszczenia o charakterze biurowym. Pomieszczenie to zlokalizował w budynku na terenie miejskim w Poznaniu, w otoczeniu budynków o podobnej wysokości. Dla analizowanego obiektu, przy modelowaniu, nie uwzględniał wpływu sąsiadujących obiektów na bezpośrednie promieniowanie słoneczne docierające do analizowanego pomieszczenia. Pomieszczenie posiada jedną ścianę zewnętrzną z oknem, zwróconą w kierunku południowym. Przyjął, że pozostałe ściany oraz podłoga i strop pomieszczenia są przegrodami wewnętrznymi. Przeprowadzał też symulację pracy chłodzącej instalacji wodnej z przewodami ułożonymi na umieszczonej na stropie warstwie termoizolacyjnej i zalanymi jastrychem. W pierwszym etapie badań w celu otrzymania wyników referencyjnych wyznaczył teoretyczną moc chłodniczą podłogi metodą analityczną wg *PN-EN ISO 1264-2* i *PN-EN ISO 1264-5*. Wyznaczona wg powyższej metody analitycznej moc chłodnicza podłogi jest relatywnie niska i przeważnie niewystarczająca w stosunku do występujących w typowych pomieszczeniach z systemami chłodzenia komfortu (np. biurowych) zysków ciepła, powoduje to ograniczone stosowanie systemów radiacyjnych podłóg chłodzących i wykorzystywanie ich jako systemy wspomagające, współpracujące z innymi systemami – najczęściej powietrznymi, zaprojektowanymi na pełne pokrycie obciążenia chłodniczego. Następnym etapem badań były badania symulacyjne umożliwiające ustalenie teoretycznych charakterystyk użytkowych radiacyjnych podłóg chłodzących w pomieszczeniach biurowych, właściwych dla ustalonej i nieustalonej wymiany ciepła. Pierwszy etap badań symulacyjnych dotyczył ustalonej wymiany ciepła. Doktorant przeprowadził je dla odizolowanego od otoczenia, pustego pomieszczenia z aktywnym systemem radiacyjnej podłogi chłodzącej o standardowych parametrach konstrukcyjnych i operacyjnych, dla którego występowały różne zyski ciepła. Celem tych badań było określenie teoretycznych charakterystyk użytkowych systemów radiacyjnych podłóg chłodzących w zależności od rodzaju zysków ciepła, przy zapewnieniu warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniu i określanych przez temperaturę powietrza lub temperaturę równoważną (operacyjną). Doktorant w rozprawie przedstawił wnioski, dotyczące teoretycznych charakterystyk użytkowych radiacyjnych podłóg chłodzących. Stwierdził, że wymagają one potwierdzenia badaniami w warunkach dynamicznej wymiany ciepła z uwzględnieniem

inercji układu oraz zmienności ilościowej i jakościowej zysków ciepła. Następnie Doktorant opisał drugi etap badań symulacyjnych poświęconych nieustalanej wymianie ciepła w analizowanym pomieszczeniu oraz uzyskane wyniki. W rozdziale tym, w dalszej kolejności, przedstawił analizę wyników symulacji wpływu wybranych czynników na charakterystykę użytkową badanego systemu. Symulacje przeprowadził przy założeniu, że w pomieszczeniu przebywa trzech użytkowników (na 1 osobę przypada 6 m<sup>2</sup> powierzchni pomieszczenia, co jest częstym wskaźnikiem dla tego typu pomieszczeń), realizujących pracę o charakterze biurowym w godzinach od 8:00 do 18:00, z wykorzystaniem komputerów, przy włączonym oświetleniu. Przeprowadzone badania pozwoliły Jemu na wyciągnięcie szczegółowych wniosków, odnoszących się do wpływu poszczególnych czynników, a zwłaszcza tych, które szczególnie wpływają na dynamikę pracy radiacyjnej podłogi chłodzącej. Należy do nich: pracujący w pomieszczeniu system wentylacyjny, promieniowanie słoneczne, natężenie przepływu wody chłodzącej oraz temperatura zasilania obiegów hydraulicznych, wykończenie i pojemność cieplna podłogi, umeblowanie pomieszczenia oraz dynamika wymiany ciepła i strategia sterowania. Należy zwrócić uwagę na to, że radiacyjna podłoga chłodząca, ma niewielką skuteczność w odprowadzaniu zysków ciepła o charakterze konwekcyjnym (potwierdzoną przez przeprowadzone badania w warunkach statycznych) i nie jest skutecznym systemem chłodzenia pomieszczeń biurowych bez wsparcia dodatkowego systemu wspomagającego w odprowadzaniu tych zysków ciepła. Wykorzystanie wentylacji, niezbędnej ze względu na zapewnienie powietrza świeżego oraz odprowadzenie zysków wilgoci do częściowego pokrycia konwekcyjnych zysków ciepła pozwala na znaczną poprawę warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniu bez dodatkowych nakładów energetycznych.

W rozdziale 6 o tytule „Podsumowanie wyników pracy” Doktorant sformułował i syntetycznie opisał wyniki przeprowadzonych badań. Na podstawie badań sformułował zalecenia oraz wytyczne do projektowania i użytkowania dla systemów radiacyjnych podłóg chłodzących.

### **3. Ocena rozprawy**

Celem recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa PAWLAKA było przeprowadzenie analizy wzajemnych oddziaływań cieplnych pomiędzy radiacyjnymi podłogami chłodzącymi w pomieszczeniu a otoczeniem i zbadaniem wpływu zmiennych strumieni ciepła przepływających pomiędzy pomieszczeniem a podłogowym systemem chłodzącym na charakterystyki użytkowe systemu, które w rzeczywistych warunkach pracy mogą znacząco się różnić od charakterystyk teoretycznych, wyznaczonych w warunkach

ustalanej wymiany ciepła. Doktorant zrealizował zaplanowane badania, cel rozprawy został w pełni przez Doktoranta zrealizowany.

Recenzowana rozprawa jest logiczna i przemyślana. Praca została wykonana rzetelnie, jest kompletna, zawiera rozległą analizę literatury, interesujące i szerokie badania eksperymentalne. Opracowana została bardzo starannie. Otrzymane wyniki mogą być wdrożone w praktyce inżynierskiej. Nieliczne błędy stylistyczne i literowe zaznaczyłem na sprawdzanym egzemplarzu pracy. Istotnych uwag i zastrzeżeń do przeprowadzonych badań oraz pokazanych wyników w pracy nie mam.

#### **4. Uwagi o charakterze redakcyjnym**

Uwagi o charakterze redakcyjnym zaznaczyłem w sprawdzonym egzemplarzu pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem, w sposób czytelny, nie zauważyłem rzucających się w oczy błędów stylistycznych. Kolejność rozdziałów i treści dysertacji jest przemyślana i logiczna, a układ pracy jest właściwy. Rozprawa pod względem edytorskim opracowana jest bardzo starannie.

#### **5. Podsumowanie oceny rozprawy**

Recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Pawlaka p.t. „*Wpływ dynamicznych oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących na ich charakterystyki użytkowe*” stoi na dobrym poziomie naukowym i jest oryginalnym oraz cennym osiągnięciem naukowym Doktoranta.

W ramach pracy Doktorant:

- 1) przedstawił wyniki przeprowadzonego szerokiego przeglądu literatury na temat stosowania i metod projektowania systemów radiacyjnych podłóg chłodzących oraz wymiany ciepła w pomieszczeniach wyposażonych w takie instalacje.
- 2) opracował własny model obliczeniowy, pozwalający na analizę zmiennego przepływu ciepła w pomieszczeniu wyposażonym w chłodzenie podłogowe, ze szczególnym uwzględnieniem heterogeniczności cieplnej środowiska wewnętrznego, wywołanej między innymi przez zmienność w czasie i przestrzeni zysków ciepła od promieniowania słonecznego padającego na podłogę. Dla przyjętego modelu Doktorant opracował algorytmy obliczeniowe i stworzył program komputerowy. Następnie dokonał weryfikacji poszczególnych modułów obliczeniowych programu. Na końcu przeprowadził walidację wyników otrzymanych z obliczeń komputerowych, wykorzystując wyniki badań

eksperymentalnych przeprowadzonych w skali 1 do 1 w zbudowanej w tym celu komorze doświadczalnej.

- 3) wykorzystując opracowany program komputerowy przeprowadził symulacje umożliwiające analizę wpływu wzajemnych oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących i czynników wpływających na ich charakterystyki użytkowe, z uwzględnieniem ich zmienności w czasie i przestrzeni.
- 4) na podstawie przeprowadzonych symulacji i analiz opracował wnioski oraz wynikające z nich zalecenia do projektowania i eksploatacji systemów radiacyjnych podłóg chłodzących.

Uważam, że oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego zaprezentowanym w rozprawie jest opracowany i zweryfikowany przez Doktoranta model matematyczny układu radiacyjnej podłogi grzejnej i pomieszczenia oraz opracowany na jego podstawie program komputerowy, umożliwiający przeprowadzanie analiz zmiennego przepływu ciepła w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą, uwzględniający, w sposób odpowiadający warunkom rzeczywistym, niejednorodne jakościowo i ilościowo zyski ciepła występujące w pomieszczeniu. Można go zastosować dla pomieszczeń o różnej kategorii i różnych warunków eksploatacji. Umożliwia on zbadanie charakterystyk użytkowych radiacyjnej podłogi chłodzącej w warunkach eksploatacyjnych zbliżonych do występujących w rzeczywistych pomieszczeniach biurowych.

Doktorant w ostatniej części rozprawy opisał dalsze, niezbadane dotychczas, zagadnienia związane z przedstawioną i analizowaną w rozprawie tematyką i na tej podstawie sprecyzował planowane kierunki dalszych badań wykorzystujące opracowany przez Niego model symulacyjny systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej.

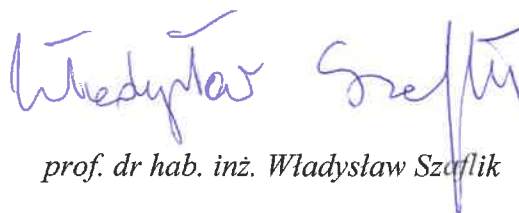
W ostatnich latach coraz bardziej zwraca się uwagę na to, aby w okresie letnim w pomieszczeniach biurowych występowały warunki komfortu cieplnego. Związane jest to z większą efektywnością pracy w tak wyposażonych pomieszczeniach. Coraz szerzej analizowane są sposoby i rozwiązania chłodzenia pomieszczeń w okresie wysokich temperatur zewnętrznych i w czasie występowania dużych zysków ciepła. Jednym ze sposobów obniżania temperatury w pomieszczeniu, coraz częściej stosowanym na świecie, jest projektowanie i wykonywanie w nich radiacyjnych podłóg chłodzących. Doktorant podjął się realizacji ciekawego zadania dotyczącego zbadania wpływu zmiennych w czasie i przestrzeni oddziaływań pomiędzy układem radiacyjnej podłogi chłodzącej a pomieszczeniem i źródłami zysków ciepła. Jak już stwierdziłem, przeprowadzone przez Doktoranta badania układu radiacyjnej podłogi chłodzącej i pomieszczenia oraz analiza ich wyników wykazała, że

podjęte zadanie zostało pomyślnie zrealizowane. W ten sposób zrealizował cel postawiony w rozprawie i potwierdził przyjęte w niej tezy.

## 6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgr inż. Filipa Pawlaka** p.t. *„Wpływ dynamicznych oddziaływań radiacyjnych podług chłodzących na ich charakterystyki użytkowe”* spełnia wszystkie wymagania stawiane doktorom w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz.1668, z późn. zm.). Reprezentuje ona dobry poziom naukowy, ponadto zostały przedstawione w niej wyniki przeprowadzonych przez Doktoranta obszernych badań symulacyjnych wykorzystujących napisany przez Niego program komputerowy, opracowany na podstawie algorytmów opartych na własnym modelu numerycznym i zweryfikowanym doświadczalnie w skali 1 do 1, podnosi to dodatkowo wartość rozprawy. Wyniki pracy mają aspekt praktyczny i mogą być wykorzystane w praktyce inżynierskiej przy projektowaniu takich systemów chłodzenia. Uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Filipa Pawlaka w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Przedkładam Radzie Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej w Poznaniu niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik