

Komfort cieplny, wymiana ciepła, zużycie energii oraz sterowanie systemami ogrzewania/chłodzenia płaszczyznowego – krytyczny przegląd literatury

Thermal comfort, heat transfer, energy consumption, and control of radiant heating/cooling systems: A critical literature review

ŁUKASZ GMURKOWSKI, TOMASZ CHOLEWA

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.08.01

Systemy ogrzewania i chłodzenia płaszczyznowego (RHC – Radiant Heating and Cooling) zyskują na popularności dzięki licznym zaletom, takim jak wysoki komfort cieplny, niskie zużycie energii, cicha praca, oszczędność miejsca i inne. W związku z tym przeprowadzono już wiele badań i analiz nad systemami RHC celem ich rozwoju i optymalizacji tak, aby mogły stanowić odpowiedź na ambitne cele Uni Europejskiej w zakresie efektywności energetycznej oraz zmieniające się uwarunkowania energetyczne. W niniejszym opracowaniu przeprowadzono kompleksowy przegląd literatury dotyczącej systemów RHC, pod kątem komfortu cieplnego i ich efektywności energetycznej z wielu punktów widzenia przy użyciu różnych strategii sterowania ich pracą. Wyniki wykazały, że systemy RHC są nieustannie rozwijane, modyfikowane i udoskonalane, a dobór odpowiedniej strategii sterowania może rozwiązać problem efektywności energetycznej, jednocześnie poprawiając komfort cieplny wewnątrz pomieszczeń. Jednakże powszechnie stosowane algorytmy i strategie sterowania często opierają się na parametrach pracy systemu w stanie ustalonym. Ponadto w systemach RHC wciąż stosuje się typowe rozwiązanie polegające na regulacji temperatury czynnika zasilającego (regulacja jakościowa) w ujęciu centralnym (w źródle) w połączeniu z regulacją przepływu czynnika (regulacja ilościowa) w ujęciu lokalnym (w obrębie poszczególnych pętli ogrzewania/chłodzenia podłogowego). W dobie rosnących kosztów energii i globalnych wyzwań związanych z jej dostępnością, właściwa metoda sterowania systemem RHC stała się kluczowym elementem dla wielu odbiorców i priorytetem dla użytkowników. Aby rozwiązać problemy związane ze zużyciem i oszczędzaniem energii, konieczne jest opracowanie i wdrożenie unikalnych, nowoczesnych technologii sterowania dla systemów RHC. Na podstawie przeglądu literatury zidentyfikowano luki badawcze, obejmujące m.in. brak analiz systemów RHC pod kątem efektywności energetycznej i komfortu cieplnego w kontekście zastosowania regulacji jakościowej zarówno w ujęciu centralnym, jak i lokalnym w połączeniu z różnymi rodzajami sterowania. Rozwiązanie to powinno pozwolić na przewyższenie ograniczeń systemów RHC i rozszerzenie zakresu ich stosowania na różne typy budynków oraz strefy klimatyczne. Słowa kluczowe: podłoga grzewcza; ogrzewanie płaszczyznowe, chłodzenie płaszczyznowe, strategie sterowania, efektywność energetyczna

Radiant heating and cooling (RHC – Radiant Heating and Cooling) systems are increasingly favored due to numerous benefits, including enhanced thermal comfort, low energy usage, quiet operation, efficient use of space and more. As a result, extensive research and analysis have been conducted to progress and optimize RHC systems, allowing them to align with the ambitious energy efficiency targets of the European Union and adapt to changing energy situations. This study presents a comprehensive literature review on RHC systems, examining thermal comfort and energy efficiency from multiple perspectives and across various operational control strategies. The results indicate that RHC systems are continuously being developed, modified, and refined, and that selecting an appropriate control strategy can address energy efficiency issues while simultaneously improving indoor thermal comfort. However, commonly used control algorithms and strategies often rely on steady-state system operating parameters. Furthermore, RHC systems frequently base on a standard approach combining centralized supply medium temperature control (qualitative control at the source) with local medium flow regulation (quantitative control within each underfloor heating/cooling circuit). In an era of rising energy costs and global challenges related to its availability, the proper control method for RHC systems has become a crucial factor for many consumers and a priority for users. To address energy consumption and energy-saving issues, unique and modern control technologies need to be developed and adopted for the RHC systems. Based on the literature review, research gaps have been identified, including lack of analysis regarding RHC systems in terms of energy efficiency and thermal comfort with qualitative control – applied both centrally and locally – in combination with various control strategies. This solution should enable overcoming the limitations of RHC systems and extending their application to diverse building types and climate zones.

Keywords: radiant floor, radiant heating, radiant cooling, control strategies, energy efficiency

Łukasz Gmurkowski ORCID: 0009-0002-2289-3025, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Lubelska, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, Polska; Autor korespondencyjny: e-mail: d627@pollub.edu.pl; Tomasz Cholewa ORCID: 0000-0002-5310-2508, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Lubelska, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, Polska, e-mail: t.cholewa@pollub.pl

Data zgłoszenia artykułu: 24.07.2026. Data przyjęcia: 03.08.2026. Data publikacji: 26.08.2026.

Wstęp

W dobie coraz wyższych kosztów energii i globalnych wyzwań związanych z jej dostępnością, wybór optymalnego systemu ogrzewania stał się kluczowy dla wielu odbiorców oraz priorytetem dla właścicieli mieszkań. Właściwy system ogrzewczy oprócz zapewnienia użytkownikom przede wszystkim poczucia komfortu cieplnego, czyli zadowolenia z warunków panujących wewnątrz pomieszczeń powinien charakteryzować się wysoką efektywnością energetyczną.

Wobec powyższego, w obecnych czasach coraz powszechniej na potrzeby ogrzewcze budynków, w miejsce systemów wysokotemperaturowych składających się z grzejników konwekcyjnych zasilanych kotłami na paliwo stałe lub płynne czy też z miejskiej sieci ciepłowniczej, stosuje się systemy niskotemperaturowe, zasilane z urządzeń wykorzystujących odnawialne źródła energii, takich jak pompa ciepła, co jednocześnie odgrywa kluczową rolę w osiągnięciu ambitnego celu UE, jakim jest neutralność węglowa do 2050 roku, określonego przez Komisję Europejską [1] oraz bezpośrednio wpływa na zwiększenie sprawności systemu ogrzewczego.

Ogrzewanie płaszczyznowe jest bardzo dobrym rozwiązaniem w przypadku stosowania systemów niskotemperaturowych. Dzięki równomiernemu rozprowadzaniu ciepła i pracy w oparciu o niższe temperatury czynnika zasilającego, doskonale wykorzystuje potencjał nowoczesnych źródeł energii, zapewniając efektywność i komfort cieplny. Oprócz powyższych głównych zalet, wśród korzyści płynących z zastosowania ogrzewania płaszczyznowego można wymienić także mniejsze turbulencje powietrza, a co za tym idzie mniej alergenów w powietrzu oraz swobodne możliwości w zakresie projektu aranżacji wnętrza pomieszczeń, ze względu na brak rozmieszczonych punktowo grzejników konwekcyjnych, co przytaczał w swojej pracy Rhee i in. [2].

Z drugiej strony wraz z rosnącym standardem życia oraz rosnącym globalnym ociepleniem coraz częściej zachodzi potrzeba stosowania chłodzenia pomieszczeń celem utrzymania właściwej temperatury wewnętrznej (na poziomie od 20°C do 26°C w zależności od rodzaju pomieszczenia) i poczucia komfortu użytkowników. Dlatego też coraz częściej stosowane są systemy niskotemperaturowego ogrzewania i wysokotemperaturowego chłodzenia, które w oparciu o pompę ciepła wykorzystują ogrzewanie płaszczyznowe jako emiter ciepła/chłodu, doprowadzając do układu czynnik grzewczy lub chłodzący w zależności od sezonu. Wobec powyż-

szego, według Olesen [3], kluczowe jest odpowiednie zaprojektowanie oraz późniejsza, efektywna energetycznie eksploatacja systemu ogrzewczego/chłodniczego, która zapewni równocześnie komfort cieplny użytkownikom.

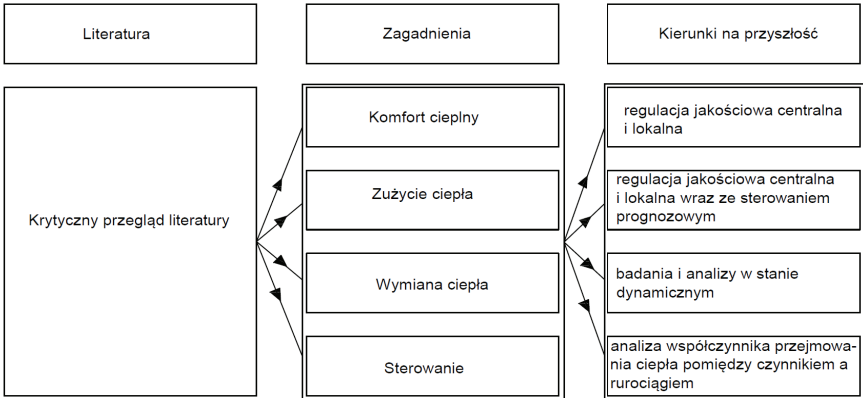
W ramach ogrzewania/chłodzenia płaszczyznowego Babiak i in. [4] wyszczególniają trzy warianty: układ podłogowy, ścienny i sufitowy. Najczęściej spotykanym typem, z uwagi na prostotę wykonania oraz stosunkowo niskie koszty inwestycyjne jest grzewczy układ podłogowy wykonany w technologii mokrej, w którym ciepło jest dostarczane przez cyrkulującą wodę. Jednocześnie to właśnie ten rodzaj układu charakteryzuje się pionowym rozkładem temperatury, który jest zbliżony w najbardziej możliwy sposób do idealnego, co niewątpliwie jest jego wielkim atutem w porównaniu do pozostałych wariantów.

U podstaw prawidłowego działania podłogowego systemu grzewczego/chłodzącego, leży prawidłowe jego zwymiarowanie dla którego podstawową wielkością przy określaniu wydajności ogrzewczej/chłodzącej jest współczynnik przejmowania ciepła/chłodu z powierzchni płaszczyzny promieniującej. Jednocześnie, powszechne stosowane metody określania gęstości strumienia ciepła opierają się na średniej wartości temperatury czynnika ogrzewczego/chłodzącego, obliczonej jako średnia arytmetyczna między zasilaniem i powrotem oraz przepływem czynnika ogrzewczego/chłodzącego. Nie bierze się jednak pod uwagę rodzaju przepływu czynnika ogrzewczego/chłodzącego, współczynnika przenikania ciepła/chłodu między czynnikiem grzewczym/chłodzącym a rurą grzewczą/chłodzącą. Stąd też, nadal brak jest opracowań określających wpływ rodzaju przepływu czynnika grzewczego/chłodzącego i współczynnika przenikania ciepła między czynnikiem grzewczym/chłodzącym a rurą grzewczą/chłodzącą na temperaturę zewnętrznej ściany

rury ogrzewania/chłodzenia podłogowego oraz jak to przekłada się następnie na efektywność układu.

Występuje również problem związany z użytkowaniem masywnego grzejnika podłogowego, który cechuje się znacznie dłuższym czasem reakcji systemu na zmiany w wymuszeniach cieplno-hydraulicznych, które są stosowane podczas procesu jego sterowania, w porównaniu do ogrzewania powietrznego bądź tradycyjnych grzejników konwekcyjnych. W związku z tym wiele badań jest realizowanych w celu optymalizacji funkcjonowania grzejników podłogowych, aby zwiększyć oszczędności energetyczne, jednocześnie zachowując standardy komfortu cieplnego.

Podsumowując, to właśnie wodne ogrzewanie/chłodzenie podłogowe jest zagadnieniem, które warto głębiej badać i poddać dalszej analizie, aby jeszcze bardziej efektywnie wykorzystać wytworzoną w źródle i dostarczoną do układu energię z zachowaniem komfortu cieplnego użytkowników. Na podstawie wybranych obszarów, przeprowadzonych badań i wyników, można wyszczególnić kilka najważniejszych punktów w ramach których warto dokonać głębszej analizy w zakresie dostępnej literatury przedmiotu, co też obrazuje rysunek 1. Pierwszą taką kwestią jest komfort cieplny, a także zagadnienie jakości powietrza w pomieszczeniach, ponieważ systemy płaszczyznowe współpracują zazwyczaj z systemami wentylacji, a emisja cząstek z materiałów wykończeniowych na powierzchniach płaszczyznowych może znacząco wpływać na jakość powietrza w pomieszczeniach. Kolejno, w następnym rozdziale pochyłono się nad kwestią wydajności cieplnej różnych systemów płaszczyznowych. Szerzej opisanym zagadnieniem są również strategie rozwoju konfiguracji oraz kontroli systemów do praktycznych zastosowań w systemach płaszczyznowych.



Rys. 1. Schemat pokazujący wybrane zagadnienia na bazie dostępnej literatury przedmiotu i kierunki na przyszłość

Fig. 1. A diagram illustrating selected topics based on available literature and future directions

Dlatego też, na podstawie wyżej wymienionych zagadnień opracowano wnikliwy przegląd literatury w tym zakresie, aby jednoznacznie wskazać na występujące luki badawcze, które pozwolą na dalszy rozwój oraz przezwyciężenie ograniczeń tych systemów i rozszerzenie zakresu ich stosowania na różne typy budynków oraz strefy klimatyczne.

Komfort cieplny w pomieszczeniach ogrzewanych/chłodzonych

Systemy ogrzewcze i chłodzące w budynkach mają na celu stworzenie zdrowego oraz komfortowego środowiska wewnętrznego w pomieszczeniach, co przyczynia się do zwiększenia wydajności osób, które w nich przebywają. Dlatego też głównym celem przy projektowaniu lub modernizacji obiektów budowlanych jest nieustanne utrzymywanie parametrów środowiska wewnętrznego w granicach określonych w wytycznych projektowych dla danego rodzaju budynku, a także przez Polski Komitet Normalizacyjny [5].

Podczas optymalizacji i projektowaniu ogrzewania płaszczyznowego istotne jest, aby mieć na uwadze, że podstawowym wymogiem komfortu cieplnego jest utrzymanie równowagi cieplnej organizmu, co jest kluczowe dla zachowania stabilnej temperatury ciała. Równowaga cieplna u człowieka to sytuacja, w której środowisko odbiera z organizmu człowieka taką ilość ciepła, jaką aktualnie produkuje dany człowiek. W warunkach komfortu cieplnego bilans ten wynosi zero, co oznacza, że temperatura ciała pozostaje stała. Należy jednak pamiętać, że na komfort cieplny wpływają również inne czynniki, które można podzielić na czynniki środowiskowe i indywidualne.

Z uwagi na niejednorodność środowiska wewnętrznego, jak i dużą liczbę czynników kształtujących to środowisko obecnie obowiązujące przepisy, takie jak ASHRAE [6] i Polski Komitet Normalizacyjny [7], celem oceny komfortu cieplnego wprowadzają następujące wskaźniki komfortu cieplnego: a) PMV – Predicted Mean Vote – Przewidywana średnia ocena, b) PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied – Przewidywany odsetek osób niezadowolonych, c) AMV – Actual Mean Vote – Rzeczywista średnia ocena, d) PD – Percentage of Dissatisfied – Odsetek osób niezadowolonych, e) DR – Draught Rate – Wskaźnik przeciągu, f) top – temperatura operatywna.

Zagadnienie komfortu cieplnego uzyskiwanego w oparciu o ogrzewanie

i chłodzenie płaszczyznowe zostało szeroko przeanalizowane i zbadane przez naukowców, co zostało przedstawione i opisane poniżej.

Komfort cieplny na skutek ogrzewania i chłodzenia płaszczyznowego

Uzyskanie komfortu cieplnego jest jednym z podstawowych zadań systemu ogrzewczego/chłodzącego. W miarę rozwoju płaszczyznowych systemów grzewczych i chłodzących prowadzono badania mające na celu wpływ tych rozwiązań na utrzymanie odpowiednich warunków odczuwanych przez użytkowników jako komfortowe. Jednocześnie analizowano aspekty komfortu cieplnego w porównaniu do innych rozwiązań np. powietrznych czy tradycyjnych.

Myhren and Holmberg [8] przeprowadzili analizę CFD (Computational Fluid Dynamics czyli Komputerowa Dynamika Płynów), aby zbadać chłodne ciągi, pionowy gradient temperatury oraz prędkości powietrza w związku z zastosowaniem różnych metod ogrzewania pomieszczeń, takich jak grzejniki o wysokiej i średniej temperaturze, ogrzewanie podłogowe oraz duże, niskotemperaturowe powierzchnie grzewcze na ścianach. Stwierdzono, że ogrzewanie o niskiej temperaturze powoduje mniejsze prędkości powietrza oraz mniejsze różnice temperatury w pionie, co skutkuje poprawą jakości środowiska wewnętrznego. Zaznaczono jednak, że umiejscowienie grzejników oraz konstrukcja systemu wentylacyjnego muszą być starannie zaprojektowane, aby skutecznie przeciwdziałać chłodnym przepływom powietrza z jednostek wentylacyjnych.

Z kolei Tian i Love [9] przeprowadzili badanie terenowe w istniejącym budynku celem zbadania komfortu cieplnego z wykorzystaniem z chłodzeniem płaszczyznowego w Kanadzie. Wartość zmierzonej średniej temperatury operacyjnej w badaniach wynosiła około $t = 22^{\circ}\text{C}$, wahając się od $20,3$ do $23,6^{\circ}\text{C}$, zarówno w okresie lata, jak i zimy, co mieściło się w kryteriach komfortu cieplnego. Jednocześnie średnia wskaźnika PMV wynosiła $\text{PMV} = -0,53$ latem i $\text{PMV} = -0,32$ zimą, co mieści się w zakresie komfortu i jest nieco niższe od poziomu neutralnego. Na podstawie pomiarów oraz kwestionariusza, rozbieżność między PMV i AMV wynosiła $-0,02$. Wobec powyższego autorzy doszli do wniosku, że model PMV nie ma poważnego błędu w przewidywaniu rzeczywistych odczuć termicznych z systemem chłodzenia płaszczyznowego. Jednocześnie wykazano, że płyta chłodząca działająca na zasadzie

promieniowania może redukować szybkość przeciągów o 4% przy przeciętnej prędkości powietrza $0,06\text{ m/s}$ zarówno w zimie, jak i w lecie. Jednak wielu obywateli wyraziło swoje oczekiwania odnośnie do wzrostu cyrkulacji powietrza, co jest związane z systemem wentylacyjnym oraz odświeżeniem powietrza. W tym kontekście zwrócono uwagę na konieczność zagwarantowania odpowiedniego przepływu powietrza lub efektywności wentylacji, przy jednoczesnym ograniczeniu zimnych przeciągów przez system chłodzenia radiacyjnego. Zastosowanie sufitu chłodzącego w połączeniu z systemem wentylacji wyporowej stanowi korzystne rozwiązanie w tej sytuacji.

An i in. [10] w oparciu o badania laboratoryjne odkryli, że poziom emisji formaldehydu w systemach ogrzewania podłogowego przewyższa emisję w systemach opartych na powietrzu, co może negatywnie wpływać na jakość powietrza w pomieszczeniach. Wysoka temperatura generowana przez systemy ogrzewania promiennikowego przyczynia się do wydzielania formaldehydu z podłóg wykonanych z materiałów inżynierskich.

Alternatywne spojrzenie na temperaturę podłogi jako kluczowy czynnik, który wpływa na opadające powietrze przedstawili Schellen i in. [11]. Analiza numeryczna pokazała, że wyższa temperatura podłogi ma możliwość zwiększenia ryzyka przeciągów przez nasilenie naturalnej konwekcji w pomieszczeniu oraz wzrost prędkości powietrza przy podłodze.

Z kolei Kang i in. [12] przeprowadzili badania w formie symulacji dotyczące emisji oraz charakterystyki sorpcji LZO (Lotne Związki Organiczne) z materiałów klejowych, często używanych do montażu wykładzin podłogowych w domach z ogrzewaniem podłogowym. Wyniki ich badań wskazały, że stosowane kleje emitują więcej LZO w warunkach ogrzewania podłogowego, co sugeruje, że należy wybierać kleje o niskiej zawartości LZO w materiałach podłogowych, aby poprawić jakość powietrza wewnątrz.

Badania numeryczne w dwóch wymiarach przeprowadzili Khorasanizadeh i in. [13], aby ocenić skuteczność ogrzewania podłogowego w porównaniu do ogrzewania grzejnikowego, analizując przede wszystkim cyrkulację powietrza oraz rozkład temperatury. Stwierdzono, że ogrzewanie podłogowe zapewnia lepszy i bardziej równomierny rozkład temperatury, a pionowy gradient temperatury w centralnej części pomieszczenia zbliża się do idealnych warunków w porównaniu z tradycyjnym systemem grzejnikowym.

Aspekt satysfakcji i zadowolenia z systemu grzewczego zbadali także Lin i in. [14],

analizując różne parametry fizyczne, które mogły wpływać na zadowolenie termiczne lokatorów, w tym średnią temperaturę promieniowania (MRT), wilgotność, ruch powietrza, poziom dźwięku A, wahania temperatury i pionową różnicę temperatur. Badania wykonano w pomieszczeniach biurowych budynku architektonicznego Uniwersytetu Tsinghua, wśród 97 uczestników badania, w trzech różnych wariantach temperaturowych w zależności od temperatury operacyjnej powietrza top: warunki ciepłe $t_o = 24,9^{\circ}\text{C}$, umiarkowane $t_o = 22,4^{\circ}\text{C}$ i chłodne $t_o = 19,8^{\circ}\text{C}$. Eksperyment uwzględniał trzy różne źródła ciepła: grzejnik konwekcyjny (Radiator), ogrzewanie podłogowe (FH) oraz powietrzną pompę ciepła (ASHP). Ogrzewanie podłogowe wykonane w technologii lekkiej (suchej), a wykorzystana strategia sterowania obejmowała kontrolę temperatury czynnika zasilającego. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 2. Badanie wykazało, iż systemy ogrzewania podłogowego skutkowały mniejszym ryzykiem przeciągów i mniejszym dyskomfortem miejscowym w okolicy stóp ze względu na mniej znaczące wahania temperatury i pionowe gradienty temperatury. Natomiast patrząc na aspekt ogólnego zadowolenia termicznego (stan „komfortowo”) w subiektywnym odczuciu osób biorących w badaniu, ogrzewanie podłogowe osiągnęło najwięcej głosów zadowolenia w ciepłych i umiarkowanych warunkach eksperymentalnych, podczas

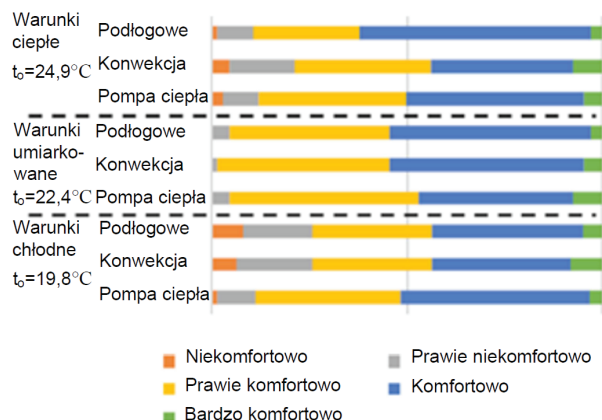
gdy pompa ciepła miała najwięcej głosów zadowolenia w chłodnych warunkach eksperymentalnych.

Obszerne opracowanie w zakresie komfortu cieplnego podjęli Zhang i in. [15]. W swoim artykule dokonali przeglądu i porównania płaszczyznowych systemów grzewczych i chłodzących z uwzględnieniem różnych wariantów instalacji wentylacji. W odniesieniu do systemów podłogowych autorzy wskazali, że w przypadku pracy systemu z wentylacją typu DV (Displacement Ventilation, czyli Wentylacja wyporowa) układ grzewczy tworzy środowiska termiczne z niskimi pionowymi różnicami temperatury powietrza, podczas gdy system wentylacji tworzy warunki silnie rozwarstwione, a głównym problemem przy łączeniu ogrzewania podłogowego z wentylacją typu DV są przeciwne efekty obu systemów.

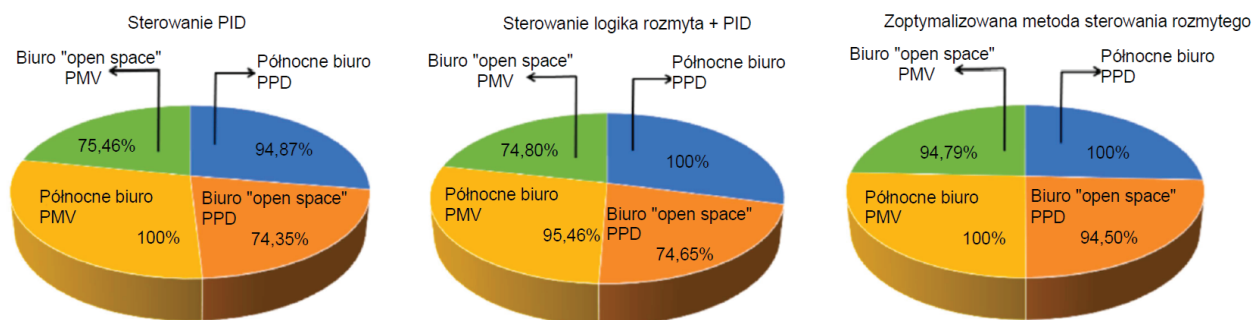
W konsekwencji sprawia to, że jeśli temperatura podłogi jest zbyt wysoka, powietrze nawiewane zostanie ogrzane i szybko się podniesie, co zmniejsza skuteczność wentylacji i powoduje mieszającą się rozkład przepływu w pomieszczeniu. Mimo wszystko, takie rozwiązanie często jest stosowane w budynkach o dużej powierzchni, takich jak atria, hole wejściowe, i centra kongresowe, ze względu na to, iż przestrzenie te mają duże wewnętrzne obciążenie cieplne, ponieważ w obudowach dominują duże przeszklone fasady, a środowisko wewnętrzne charakteryzuje się intensywnym

zyskiem słonecznym. Z kolei, w połączeniu z systemem wentylacji UFAD (Underfloor Air Distribution czyli Podpodłogowy system dystrybucji powietrza) tego typu system grzewczo-wentylacyjny nadaje się do budynków biurowych, szczególnie w biurach typu „open space”, w których użytkownicy mogą mieć indywidualną kontrolę nad lokalnym środowiskiem wewnętrznym poprzez regulację dyfuzorów UFAD. Natomiast, efekt łączenia systemu podłogowego z wentylacją typu MV (Mixed Ventilation czyli Wentylacja mieszana) może być z powodzeniem stosowany zarówno w budynkach mieszkalnych, jak i komercyjnych, takich jak biura, muzea itp. Zimne powietrze nawiewane dobrze miesza się z powietrzem w pomieszczeniu i tworzy warunki zbliżone do idealnego mieszania. Prędkość powietrza na poziomie podłogi jest nieco wyższa niż w samodzielnym systemie MV, ponieważ zimne powietrze nawiewane wchodzi w interakcję z ciepłą podłogą i zaczyna się unosić od poziomu kostek.

Natomiast Qi i in. [16] skoncentrowali się na problemie powolnej reakcji termicznej masywnego grzejnika podłogowego i nierównomiernego środowiska termicznego. W badaniach, które prowadzono w budynku biurowym w Japonii, porównali reakcję termiczną układu i komfort cieplny w oparciu o wskaźniki PPD i PMV z wykorzystaniem sterowania PID (Proportional–integral–derivative controller), sterowania logiką rozmytą FLS (Fuzzy logic system) i zoptymalizowanej metody sterowania rozmytego opracowanej na potrzeby badania – indywidualnie dla badanego budynku. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3. Badania wykazały, iż w porównaniu ze sterowaniem PID, zoptymalizowane sterowanie rozmyte skróciło czas odpowiedzi termicznej wymagany do osiągnięcia przez temperaturę wody zasilającej zadanej temperatury o 64,60%, a wskaźnik PPD wzrósł do 94,5% dla przestrzeni „open office” oraz do 100% dla biura zlokalizowanego w północnej części budynku.



Rys. 2. Wyniki badań satysfakcji i zadowolenia z użytkowania różnych systemów grzewczych według Lin i in. [14]
Fig. 2. Results of a study on satisfaction with the use of various heating systems according to Lin et al. [14]



Rys. 3. Wyniki badań w zakresie wskaźników PPD, PMV uzyskane w zależności od rodzaju sterowania, według Qi i in. [16]
Fig. 3. Test results for PPD and PMV indices obtained based on the control method, according to Qi et al. [16]

Podsumowanie

Przy dostosowywaniu systemów ogrzewania płaszczyznowego ważne jest, by pamiętać, że kluczowym aspektem komfortu cieplnego jest zachowanie równowagi cieplnej organizmu, która jest niezbędna do utrzymania stabilnej temperatury ciała.

W przypadku ogrzewania promieniującego należy unikać sytuacji, w których najbliższe ciału obszary zostaną zbyt mocno przegrzane, ponieważ są one najbardziej narażone na intensywne promieniowanie. Dlatego temperatura powierzchni emitujących ciepło nie powinna przekraczać ustalonej, maksymalnej wartości.

Gdy stosowane jest ogrzewanie podłogowe, człowiek ma stały kontakt z powierzchnią grzejącą, która jest cieplejsza niż powietrze i inne elementy pomieszczenia. Ponieważ stopy są szczególnie wrażliwe na przegrzanie, temperatura podłogi musi być odpowiednio niska, co znacząco ogranicza maksymalną efektywność cieplną ogrzewania podłogowego, dlatego też temperatura podłogi to istotny parametr dla systemów płaszczyznowych. Obowiązujące normy i wytyczne, czyli ASHRAE [6] i PKN [7] sugerują, że optymalna temperatura powierzchni podłogi powinna mieścić się w przedziale od 17°C do 29°C. Warto jednak podkreślić, że odpowiednia temperatura powierzchni podłogi może różnić się w zależności stylu życia, jakości budynku i innych czynników. W związku z tym wymagane są dodatkowe badania, by uwzględnić temperaturę podłogi w projektowaniu, co pomoże w osiągnięciu komfortowych warunków fizjologicznych i zminimalizuje ryzyko lokalnego dyskomfortu wynikającego z przeciągów.

Podsumowując, można stwierdzić, że ogrzewanie podłogowe oferuje lepszy komfort cieplny w porównaniu do systemów konwekcyjnych w pomieszczeniach, które są ogrzewane lub chłodzone. Mimo to, większość analiz dotyczących systemów ogrzewania i chłodzenia podłogowego była realizowana przez symulacje oraz obliczenia komputerowe, zamiast przez badania praktyczne. Najczęściej prezentowane są również wyniki uzyskane w warunkach ustalonych. Brakuje jednak badań eksperymentalnych przeprowadzonych w warunkach dynamicznych pracy grzejnika, zwłaszcza po wystąpieniu zmian cieplnych i/lub hydraulicznych w trakcie regulacji systemu ogrzewczego/chłodzącego, w oparciu o różne opcje sterowania dostawą ciepła/chłodu takich jak sterowanie ciągłe, pulsacyjne oraz prognozowe.

Badania przepływu ciepła/chłodu w systemach ogrzewania/chłodzenia podłogowego

Badania dotyczące analizy cieplnej w systemach ogrzewczych koncentrują się na zrozumieniu oraz ulepszaniu procesów wymiany ciepła w instalacjach ogrzewczych. Obejmują one między innymi ocenę strat ciepła, wydajności energetycznej urządzeń grzewczych oraz reakcję materiałów budowlanych na zmiany temperatury powietrza na bazie charakterystycznych parametrów pracy płaszczyzny grzewczej/chłodzącej. Jej celem jest zwiększenie bądź utrzymanie komfortu cieplnego w budynkach, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii i kosztów związanych z ogrzewaniem.

Ważnym aspektem w tym zakresie jest ustalenie specyficznych parametrów działania grzejnika w warunkach statycznych i dynamicznych, a także ich wpływu na temperaturę płyty grzewczej i efektywność cieplną grzejnika. Określenie parametrów charakterystycznych grzejnika dla warunków ustalonych umożliwia weryfikację oraz prawidłowe ustalenie warunków początkowych dla metod zajmujących się wymianą ciepła. Jest to związane z tym, że w początkowym etapie w chwili τ_0 , po zastosowaniu różnych wymuszeń o charakterze cieplnym i/lub hydraulicznym, zakładając, że czas dąży do nieskończoności, parametry robocze grzejnika podłogowego osiągną stan ustalony. Z drugiej strony znajomość charakterystyk pracy grzejnika podłogowego w warunkach nieustalonych umożliwia ocenę efektywności procesu regulacji oraz selekcję odpowiedniego algorytmu do kontrolowania systemu.

Systemy płaszczyznowe działają w trzech trybach wymiany ciepła jakimi są: przewodzenie – przenoszenie ciepła między rurą osadzoną w przegrodzie a wylewką; konwekcja – przenoszenie ciepła między powierzchnią chłodzoną/ogrzewaną a powietrzem w pomieszczeniu oraz przenoszenie ciepła promieniującego między powierzchniami promieniującymi a użytkownikami pomieszczeń. Dlatego też istotne stało się wypracowanie odpowiednich modeli numerycznych, które mogłyby z odpowiednią dokładnością i prostotą dokonywać analizy tego typu systemów ogrzewania/chłodzenia płaszczyznowego zarówno w warunkach ustalonych (statycznych) jak i nieustalonych (dynamicznych) wymiany ciepła.

W zakresie warunków statycznych do najczęściej wykorzystywanych metod wyznaczania parametrów charakterystycznych grzewczej płaszczyzny podłogowej można zaliczyć:

- metodę żebra,
- metodę trapezów,
- metodę Kalousa-Kollmara,
- metodę Missenarda,
- metodę źródeł i upustów (według S. N. Szorina),
- metodę źródeł i upustów (według O. H. Faxena),
- metodę według Polski Komitet Normalizacyjny [17].

Z kolei, w zakresie modelowania wymiany ciepła w warunkach dynamicznych przeprowadzono badania nad metodami numerycznymi, które najczęściej wykorzystują następujące techniki:

- różnic skończonych,
- objętości skończonych,
- elementów skończonych,
- bilansów elementarnych.

Powyższe metody w ciągu wielu lat badań, w ramach ich rozwoju były stale analizowane i udoskonalane celem poprawy ich precyzji.

Moc grzewcza i chłodnicza przejmowana z powierzchni płaszczyzny ogrzewczej/chłodzącej

Wydajność systemu płaszczyznowego w zakresie ogrzewania i chłodzenia stanowi kluczowy parametr w projektowaniu, ocenie efektywności oraz funkcjonowaniu systemu. Istotnymi elementami wpływającymi na efektywność grzewczą i chłodniczą jest współczynnik przejmowania ciepła.

W większości technik określania gęstości strumienia ciepła lub chłodu stosowane są współczynniki przejmowania ciepła/chłodu z powierzchni, w szczególności:

- α_C – całkowity współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni grzejnika, $[W/(m^2 \cdot K)]$,
- α_K – współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni grzejnika przez konwekcję, $[W/(m^2 \cdot K)]$,
- α_R – współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni grzejnika przez promieniowanie, $[W/(m^2 \cdot K)]$.

Ustalenie współczynników przejmowania ciepła na drodze konwekcji i radiacji na emitujących powierzchniach jest kluczowe dla precyzyjnej analizy efektywności grzewczej i chłodniczej, jak również komfortu cieplnego oraz oszczędności energetycznej w systemach płaszczyznowych. Akceptowanie tych wartości na podstawie obowiązujących norm oraz innych założeń, które upraszczają proces obliczeń dotyczących wyznaczania efektywności grzewczej lub chłodniczej grzejnika podłogowego, może prowadzić do nieścisłości w badaniach naukowych oraz podczas projektowania tego rodzaju systemów, ponieważ współczynniki te opracowano

na podstawie ilości ciepła dostarczanego do grzejnika w komorze testowej, chociaż powinny być obliczane na podstawie ilości ciepła emitowanego (przejmowanego) z płaszczyzny podłogi grzewczej/chłodzącej, co podnosi w swojej pracy Cholewa i in. [18].

Informacje dotyczące wartości całkowitego współczynnika przejmowania ciepła z płyty grzewczej (α_C) unormowane np. PKN (2021) [17] podaje, że całkowity współczynnik przejmowania ciepła jest stały i wynosi $\alpha_C = 10,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ dla ogrzewania podłogowego oraz $\alpha_C = 6,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ dla chłodzenia podłogowego i są najbardziej poszukiwane w trakcie projektowania systemu ogrzewania płaszczyznowego ponieważ w ten sposób ułatwia się proces obliczeń. Natomiast w przypadkach bardziej szczegółowych obliczeń, aby przeprowadzić dokładne analizy cieplne, konieczne są wartości współczynników przejmowania ciepła: z powierzchni płyty grzewczej poprzez konwekcję (α_K), jak również przez promieniowanie (α_R), nad czym pochyliło się wielu naukowców, a wyniki ich badań i rekomendacje zostały zebrane w tabeli 1.

Zużycie energii w systemach ogrzewania/chłodzenia płaszczyznowego

Tematyka zużycia energii w systemach ogrzewania/chłodzenia podłogowego związana jest przede wszystkim z kwestią efektywności układu i pozwala oszacować zapotrzebowanie na ciepło i koszty eksploatacji układu. Przeprowadzono wiele badań w tym zakresie, które wykazały iż systemy ogrzewania i chłodzenia płaszczyznowego mogą osiągnąć oszczędności energii. W tym rozdziale omówiono badania dotyczące oceny efektywności energetycznej systemów płaszczyznowych.

Chiang i in. [20] zbadali wydajność energetyczną sufitów chłodzących uzupełnionych o system wentylacji mechanicznej dla biura w klimacie subtropikalnym (Tajpej, Tajwan). Badanie położyło nacisk na potencjał oszczędzania energii przez system sufitu chłodzącego przy zwiększaniu temperatury powietrza nawiewanego dla dodatkowej wentylacji mechanicznej. Wyniki symulacji wykazały, że podniesienie temperatury powietrza nawiewanego z 18°C do 24°C przyniosłoby oszczędność energii na poziomie 13,2% dla agregatu chłodniczego i 8,0% dla całego systemu.

Inne badania w oparciu o system TABS (Thermally Activated Building Systems czyli Systemy Aktywowane Termicznie) przeprowadzili Park i in. [21] analizując zużycie energii w budynku mieszkalnym, w którym

Tabela 1. Zestawienie wyników badań w zakresie współczynników przejmowania (na podstawie Rhee i Kim [19])
Table 1. Comparison of heat transfer coefficient results (based on Rhee and Kim [19])

Lp.	Odniesienie/autor	α_C – całkowity współczynnik przejmowania z powierzchni grzejnika [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]	α_R – współczynnik przejmowania z powierzchni grzejnika przez promieniowanie [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]	α_K – współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni grzejnika przez konwekcję [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
1	Jan Babiak i in. (2007)	11,0 (ogrzewanie podłogowe)	-	-
		7,0 (chłodzenie podłogowe)	-	-
2	PN-EN 1264-2: 2021-10	10,8 (ogrzewanie podłogowe)	-	-
		6,5 (chłodzenie podłogowe)	-	-
3	Helmut E. Feustel i Corina Stetiu (1995)	od 9,0 do 12,0	5,5	od 3,5 do 6,5
4	Bjarne W. Olesen (2008)	od 9 do 11 (ogrzewanie podłogowe)	5,5	-
		7,0 (chłodzenie podłogowe)	-	-
5	Simon J. Rees and Philip Haves (2013)	-	-	5,9 (chłodzenie sufitowe wraz z rozproszoną wentylacją)
6	J. Mirel i in. (2002)	-	-	3,0 (chłodzenie sufitowe)
		-	-	1,2 (ogrzewanie sufitowe)
7	Francesco Causone i in. (2009)	13,2 (chłodzenie sufitowe)	5,6	ok. 4,4 (chłodzenie sufitowe)
		5,8 (ogrzewanie sufitowe)	-	ok. 0,3 (ogrzewanie sufitowe)
8	Shigeru Okamoto i in. (2010)	-	5,65	2,54 (chłodzenie sufitowe)
		-	-	1,69 (ogrzewanie sufitowe)
9	Tomasz Cholewa i in. (2013)	$\alpha_C = 8,21 \cdot (T_s - T_{p0,6}) \cdot 0,1$	5,6 (ogrzewanie podłogowe)	od 2,2 do 3,5 (ogrzewanie podłogowe)
		5,7 – 7,0	5,0 (chłodzenie podłogowe)	0,1 (chłodzenie podłogowe)
10	Lun Zhang i in. (2013)	-	5,5	0,8 (ogrzewanie sufitowe)
		-	-	2,3 (chłodzenie sufitowe)
11	Alihsan Koca i in. (2014)	8,4 (ogrzewanie ścienne)	5,7	2,7 (ogrzewanie ścienne)

zainstalowano system ogrzewania podłogowego i system klimatyzacji precyzyjnej. Stwierdzono, że tego typu rozwiązanie jest dobrą strategią dla budynków o niskim obciążeniu cieplnym, ponieważ może zmniejszyć współczynnik zużycie ciepła o 37% (w przypadku chłodzenia) i o 27% (w przypadku ogrzewania) w porównaniu z konwencjonalnymi budynkami mieszkalnymi.

Biorąc pod uwagę, że zużycie energii może być zależne od rodzaju źródeł ciepła, Bojić i in. [22] zbadali wydajność ogrzewania podłogowego, ściennego, sufitowego i ściennie-sufitowego przy pracy z trzema różnymi źródłami ciepła: kotłem gazowym, gruntową pompą ciepła i w trzecim wariantcie, gruntowa pompa ciepła we współpracy z systemem fotowoltaicznym. Wyniki symulacji pokazały, że system pracujący w oparciu o gruntową pompę ciepła spowodował większe zużycie energii pierwotnej niż system pracujący z kotłem gazowym, ze względu na stosunkowo wyższy koszt energii elektrycznej niż gazu ziemnego w Serbii. Z kolei, przypadek pracy gruntowej pompy ciepła z instalacją fotowoltaiczną pokazał, że aby zminimalizować końcowe zużycie energii źródła ciepła muszą być starannie dobierane, biorąc pod uwagę kontekst energetyczny każdego kraju.

Osobno Jeong i Mumma [23], zaproponowali praktyczny model szacowania wydajności chłodniczej dla podwieszanego metalowego sufitu panelu chłodzącego.

Wykazano, że wydajność panelu można zwiększyć dzięki mieszanej konwekcji (tj. konwekcji naturalnej i konwekcji wymuszonej) w przestrzeni wentylowanej mechanicznie, a potencjał zwiększenia wydajności oszacowano na ponad 17% przy normalnej pracy. Twierdzono, że niepotrzebnej inwestycji i kosztów operacyjnych systemu chłodzenia panelu można uniknąć, biorąc pod uwagę tę zwiększoną wydajność chłodzenia panelu od początkowej fazy projektowania.

Natomiast Zhao i in. [24], opracowali prostą metodę obliczania chłodniczej wydajności podłogi promieniującej w stanie ustalonym, w której uwzględnia się wpływ promieniowania słonecznego. Wykazano, że chłodnicza wydajność podłogi promieniującej znacznie wzrasta wraz z intensywnym promieniowaniem słonecznym i powierzchniami osłony o wysokiej temperaturze w dużych budynkach.

Zhao i in. [25] również zbadali wpływ emisyjności materiału na wewnętrzne promieniowanie długofalowe i wpływ przejściowego promieniowania słonecznego na wydajność chłodniczą chłodzenia podłogi promieniującej w dużych halach na lotnisku. Wyniki wykazały, że współczynnik przenikania ciepła promieniowania można zmniejszyć przy niższej emisyjności powierzchni wewnętrznej, na przykład może on zmniejszyć się z wartości bazowej $5,2\text{--}5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ do $3,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, gdy emisyjność sufitu wynosi 0,4 (np. panel metalowy, szkło odbijające ciepło).

Wykazano również, że przejściowe incydenty promieniowania słonecznego mogą skutkować znacznym zwiększeniem wydajności chłodzenia, np. z $q = 30 \text{ W/m}^2$ do $q = 155 \text{ W/m}^2$.

Z kolei Kim i Olesen [26] na podstawie badań wynioskowali, że najbardziej optymalne wydajności są następujące: sufit ma wydajność do $q = 100 \text{ W/m}^2$ dla chłodzenia jawnego i $q = 40\text{-}50 \text{ W/m}^2$ dla ogrzewania. Podłoga ma wydajność do $q = 100 \text{ W/m}^2$ dla grzania i $q = 40 \text{ W/m}^2$ dla chłodzenia jawnego.

Podsumowanie

Szerokie badania pokazują, że system ogrzewania i chłodzenia płaszczyznowego może osiągnąć oszczędności energii poprzez zmniejszenie obciążenia ogrzewania/chłodzenia, zmniejszenie energii dostarczanej do wentylatora, zwiększenie wydajności źródła chłodu wraz z odpowiednią konfiguracją systemu wentylacji z układem grzewczym/chłodzącym. Jednak, według najlepszej posiadanej wiedzy, można stwierdzić, że nadal brak jest szczegółowych opracowań uwzględniających wpływ współczynnika przejmowania ciepła/chłodu między czynnikiem grzewczym/chłodzącym a rurą grzewczą/chłodzącą na temperaturę zewnętrznej ściany rury ogrzewania/chłodzenia podłogowego z jednoczesnym określeniem jak ten parametr determinuje efektywność układu. Jednocześnie, powszechnie stosowane techniki ustalania gęstości strumienia ciepła opierają się na średniej wartości temperatury czynnika grzewczego lub chłodzącego, obliczonej jako średnia arytmetyczna między temperaturą zasilania a temperaturą powrotu oraz przepływem czynnika grzewczego lub chłodzącego. W tym zakresie jednak nie uwzględnia się rodzaju przepływu medium grzewczego lub chłodzącego oraz współczynnika przejmowania ciepła lub chłodu pomiędzy czynnikiem grzewczym lub chłodzącym a rurą grzewczą/chłodzącą.

Sterowanie systemami ogrzewania/chłodzenia płaszczyznowego

Zarządzanie systemem ogrzewania i chłodzenia powinno zapewnić możliwość osiągnięcia oraz utrzymania na odpowiednim poziomie temperatury wewnętrznej w przestrzeniach, które są ogrzewane lub chłodzone, biorąc pod uwagę zmienne zyski ciepła oraz różne parametry środowiska zewnętrznego.

Jednocześnie, zarządzanie systemem ogrzewania i chłodzenia powinno zapewnić racjonalne wykorzystanie ciepła dostar-

zanego do budynku, między innymi poprzez unikanie ogrzewania budynku do warunków projektowych, kiedy to nie jest konieczne. Dlatego aby zapewnić komfortowe warunki wewnątrz budynków, system zarządzania powinien dbać o równowagę pomiędzy ilością ciepła lub chłodu wprowadzanym do wnętrza a zyskami oraz stratami ciepła występującymi w pomieszczeniu.

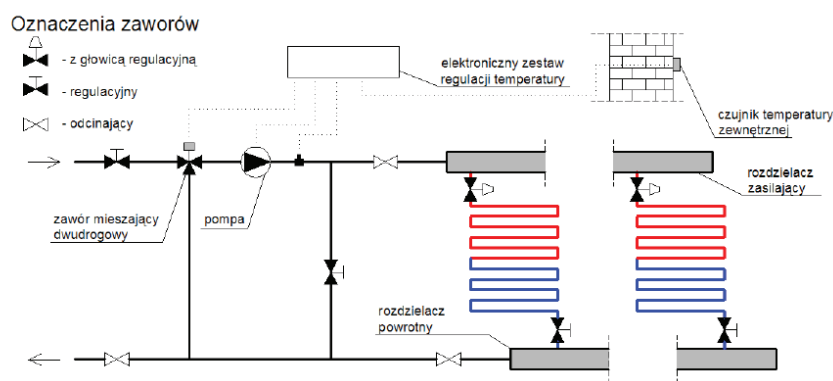
Z tego miejsca ogólnie systemy sterowania ogrzewaniem/chłodzeniem można klasyfikować w zależności od:

- 1) Miejsca, w których zarządza się systemem:
 - Lokalne (miejscowe), w których ustala się wielkość ciepła przekazywanego do określonego pomieszczenia.
 - Strefy, w których kontroluje się ilość ciepła dostarczanego do danej sekcji w budynku (zazwyczaj obejmuje to kilka pomieszczeń lub mieszkanie w budynku wielorodzinnym).
 - System centralny, w którym ciepło dostarczane do całego budynku jest kontrolowane.
- 2) Stopień rozwinięcia układu regulacji:
 - Regulacja ręczna, w której temperatura w pomieszczeniu jest kontrolowana przy użyciu ręcznie ustawianych urządzeń.
 - Regulacja automatyczna oparta na właściwym systemie lub urządzeniu, które samoczynnie modyfikuje ilość ciepła dostarczanego do określonego pomieszczenia w celu zapewnienia odpowiednich warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach.
 - Automatyczna regulacja wyposażona w funkcję czasową, która wyłącza lub zmniejsza ilość ciepła dostarczanego do pomieszczenia w ustalonych przez użytkownika interwałach czasowych (na przykład nocne obniżenie temperatury w pomieszczeniu). Dostępna jest również jednostka ster-

rująca o jeszcze wyższym poziomie zaawansowania technologicznego. Jednostka ta weźmie pod uwagę różne algorytmy sterowania, których celem jest automatyczna optymalizacja procesu zarządzania układem, aby racjonalizować zużycie energii oraz obniżyć koszty ogrzewania (na przykład poprzez wyłączenie systemu lub redukcję jego mocy podczas droższej taryfy energii elektrycznej).

Najczęściej używany jest system regulacji ogrzewaniem podłogowym, który został przedstawiony na rysunku 4. System ten posiada automatyczne urządzenie regulujące zarówno centralnie, jak i lokalnie (w każdym pomieszczeniu). System centralnej regulacji będzie kontrolować temperaturę czynnika ogrzewczego dostarczanego do instalacji w oparciu o warunki otoczenia, zgodnie z krzywą grzewczą, której kształt jest determinowany przez pojemność cieplną budynku, straty ciepła oraz różnice w zapotrzebowaniu na ciepło w różnych pomieszczeniach budynku. Automatyczna regulacja miejscowa (pokojowa) będzie kontrolować przepływ czynnika lub jego temperaturę, indywidualnie dla każdego pomieszczenia, w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego ustawionej przez użytkownika w danym pomieszczeniu.

Automatyczna regulacja miejscowa w różnych pomieszczeniach jest zalecana w systemach ogrzewania lub chłodzenia podłogowego. Oprócz korzyści związanych z oszczędnością energii, umożliwia ona utrzymanie komfortowej temperatury dla osób przebywających w tych pomieszczeniach oraz dostosowanie odpowiedniej temperatury wewnętrznej według indywidualnych potrzeb każdego pomieszczenia. W niemieckiej normie technicznej VDI [28] stwierdza się, że wprowadzenie dodatkowej regulacji indywidualnej w każdym pomieszczeniu prowadzi do oszczędności



Rys. 4. Schemat systemu regulacji ogrzewania podłogowego z układem mieszkającym, centralną regulacją pogodową oraz indywidualną regulacją każdej pętli grzejnej (na podstawie Żukowski [27])
Fig. 4. Schema of an underfloor heating control system with a mixing unit, featuring central weather-compensated control and individual control of each heating loop (based on Żukowski [27])

energii na poziomie od 15% do 30% w porównaniu do systemu sterowanego wyłącznie przez centralny układ regulacji.

Podczas analizy systemów regulacji ogrzewania podłogowego nie można pominąć zjawiska samoregulacji, które występuje w ramach ogrzewania/chłodzenia podłogowego. Obejmuje to fakt, że moc grzewcza podłogowego systemu grzewczego jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy średnią temperaturą powierzchni wykładziny podłogowej, a średnią temperaturą powietrza w pomieszczeniu na odpowiedniej wysokości. W związku z tym, podczas sezonu grzewczego, w wyniku ciepła pozyskanego z nasłonecznienia, temperatura powietrza w pomieszczeniu wzrasta, co prowadzi do automatycznego zmniejszenia przepływu ciepła przekazywanego z powierzchni grzejnika podłogowego. Istotne jest, aby zjawisko samoregulacji grzejnika podłogowego było analizowane w aspekcie dynamicznym, a nie statycznym, ponieważ w przeciwnym razie może to prowadzić do znaczących błędów w procesie regulacji tego systemu.

Bardzo istotnym składnikiem systemu regulacji jest samo urządzenie regulatora, w którym stosowane są różne algorytmy regulacyjne. Obecnie wśród powszechnie znanych sterowników można wymienić:

- Sterowniki dwustanowe – urządzenia, które kontrolują temperaturę na zasadzie dwóch stanów pracy: włączony lub wyłączony, np. gdy temperatura w pomieszczeniu spada poniżej ustawionej wartości, sterownik wysyła sygnał do kotła lub pompy ciepła, aby te rozpoczęły grzanie. Po osiągnięciu żądanej temperatury, urządzenie grzewcze zostaje całkowicie wyłączone.
- Sterowniki z algorytmem PWM (Pulse Width Modulation czyli Modulacja Szerokości Impulsów) – zamiast ciągłego ogrzewania do momentu osiągnięcia temperatury, sterownik dawkuje ciepło impulsowo. Algorytm oblicza czas otwarcia i zamknięcia siłownika zaworu w stałym cyklu czasowym (np. godzinny). Im temperatura w pokoju jest bliższa temperaturze zadanej, tym impulsy otwarcia zaworu są krótsze.
- Sterowniki z algorytmem TPI (Time Proportional and Integral czyli czasowo-proporcjonalno-całkującego)/ITLC (Internal Temperature Load Compensation, czyli Wewnętrzna Kompensacja Obciążenia Temperaturą) – jest to rozwinięcie

idei PWM. Sterownik nie działa według sztywnego wzoru, lecz analizuje zachowanie cieplne konkretnego pokoju na przykład jak szybko wylewka pochłania ciepło i jak długo je oddaje.

- Sterowniki z algorytmem PID (Proportional-Integral-Derivative czyli Proporcjonalno-Całkująco-Różniczkującym) – posiada zastosowanie przy dostosowywaniu temperatury w pomieszczeniach ogrzewanych lub chłodzonych przez grzejniki podłogowe.
- Sterowniki, które bazują na algorytmach logiki rozmytej (fuzzy logic) oraz posiadają zdolność do samouczenia się w czasie rzeczywistym w celu optymalizacji oraz poprawy efektywności procesu regulacji systemu. Często wykorzystuje się połączenie regulatora PID ze sterownikiem opartym na fuzzy logic, który służy do samonastawiania algorytmów regulatora PID.
- Sterowniki Model Predictive Control (MPC), czyli sterowanie predykcyjne, to zaawansowana metoda automatyzacji, która wykorzystuje model matematyczny obiektu do prognozowania jego przyszłego zachowania i optymalizacji decyzji sterujących w czasie rzeczywistym. W przeciwieństwie do regulatorów PID, które reagują dopiero na powstały błąd, MPC działa z wyprzedzeniem.
- Sterowniki, które bazują na algorytmach ANNs (Artificial neural networks czyli Sztucznych sieci neuronowych) – na podstawie zmiennych wejściowych (np. temperatura wody zasilającej, rozstaw rur, grubość wylewki, natężenie przepływu) sieć potrafi z wysoką precyzją przewidzieć rozkład temperatur na powierzchni podłogi. Pozwala to projektować bardziej efektywne instalacje bez konieczności przeprowadzania drogich i czasochłonnych testów laboratoryjnych.

Oszczędności energii

W literaturze można znaleźć ciekawe prace skoncentrowane na analizie procesów cieplnych, które zachodzą w trakcie fazy regulacji i mających bezpośredni lub pośredni wpływ na procedurę regulacji systemu ogrzewania oraz chłodzenia podłogowego oraz na oszczędności energii wynikające z użycia ogrzewania i chłodzenia podłogowego, co zostało przedstawione poniżej.

Sattari i Farhanieh [29] wskazali, że system ogrzewania podłogowego może być bardziej efektywny pod względem zużycia energii, jeśli parametry charakterystyczne dla tego systemu uwzględni się już na etapie projektowania. W związku z tym przeprowadzili badania symulacyjne, podczas których zbadali istotne parametry, a w szczególności: średnicę, rodzaj materiału oraz rozstaw rur grzewczych, a także rodzaj materiału i grubość powłoki wykończeniowej. Zauważono, że rodzaj oraz średnica rur mają minimalny wpływ na efektywność cieplną podłogowej płyty grzewczej. Rozstaw przewodów grzewczych w podłodze ma większe znaczenie. Najważniejszym aspektem jest typ oraz grubość materiału wykończeniowego podłogi, który nie powinien zakłócać transferu ciepła poprzez promieniowanie.

Oszczędności energii wynikające z użycia wodnego ogrzewania podłogowego dostrzegli także Hasan i in. [30] przeprowadzono badania symulacyjne, które obejmowały cztery różne typy systemów grzewczych. Ustalono, że zarządzanie ogrzewaniem podłogowym, oparte na wewnętrznej temperaturze powietrza, umożliwia redukcję zużycia energii w porównaniu z systemem, który jest kontrolowany na podstawie ustawionej temperatury powierzchni płyty grzewczej. Z kolei Fonseca Díaz i Cuevasi [31] wykazali, że ilość przepływu masowego czynnika w rurach ogrzewania płaszczyznowego ma niewielki wpływ na efektywność grzewczą lub chłodniczą. W związku z tym sugerują również ograniczenie ilości transportowanego medium, aby zredukować zużycie energii elektrycznej przez pompy.

Analizy, które prowadzili Rastegarpour i in. [32] miały na celu ocenę zalet i wad różnych metod sterowania predykcyjnego (MCP). Badania obejmowały trzy różne techniki sterowania predykcyjnego: liniowe MPC (SMPC), liniowe zmienne w czasie MPC (LTV-MPC) i nieliniowe MPC (NMPC). Pomiaru uwzględniały ogrzewanie w trybie ciągłym wraz z regulacją jakościową czynnika grzewczego. Badania ustaliły, że nieliniowy wariant sterowania NMPC może zaoszczędzić do 6% energii (EC – Energy Consumption) i poprawić komfort (CL – Comfort Level) o 4% w porównaniu ze standardowym MPC, natomiast nieliniowe MPC (NMPC) może zaoszczędzić do 4% energii i poprawić komfort o 7% w porównaniu ze standardowym MPC, co pokazano w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie liczbowe trzech technik sterowania w zakresie zużycia energii EC i poziomu komfortu CL (na podstawie Rastegarpour i in. [32])
Table 2. Quantitative comparison of three control techniques in terms of energy consumption (EC) and comfort level (CL) (based on Rastegarpour et al. [32])

Indeks	Warunki stałe (czas trwania 2 dni)			Porównanie		
	NMPC	LTV-MPC	SMPC	NMPC vs. LTV-MPC	NMPC vs. SMPC	LTV-MPC vs. SMPC
Poziom komfortu	88%	82%	84%	7%	4%	-2%
Zużycie energii	9.4kWh	9.8kWh	10kWh	4%	6%	2%

Inne badania przeprowadzili Joe i Karava [33] prowadząc je w budynku rzeczywistym, w którym zaimplementowali inteligentną strategię operacyjną opartą na sterowaniu predykcyjnym modelu (MPC) w miejsce tradycyjnej metody opartej na sprzężeniu zwrotnym (Feedback control) celem optymalizacji wydajności systemów ogrzewania i chłodzenia podłogowego. Działanie systemu opierało się na ciągłym ogrzewaniu niskotemperaturowym wraz z kontrolą przepływu. W wyniku badań otrzymano znaczące redukcję zużycia energii i kosztów systemu HVAC, a wyniki wykazały, że system ogrzewania podłogowego z MPC ma lepszą wydajność w porównaniu z konwencjonalnym podejściem i bazowymi systemami kontroli HVAC opartymi na temperaturze powietrza zewnętrznego. Wyniki z wykorzystaniem metody MPC pokazały 34% oszczędności kosztów w porównaniu z bazowym sterowaniem sprzężeniem zwrotnym w sezonie chłodzenia i 16% redukcję zużycia energii w sezonie grzewczym. Ponadto system ogrzewania podłogowego z regulatorem predykcyjnym wykazał 29-50% oszczędności energii w porównaniu z bazowym systemem sterowania opartym na temperaturze powietrza zewnętrznego.

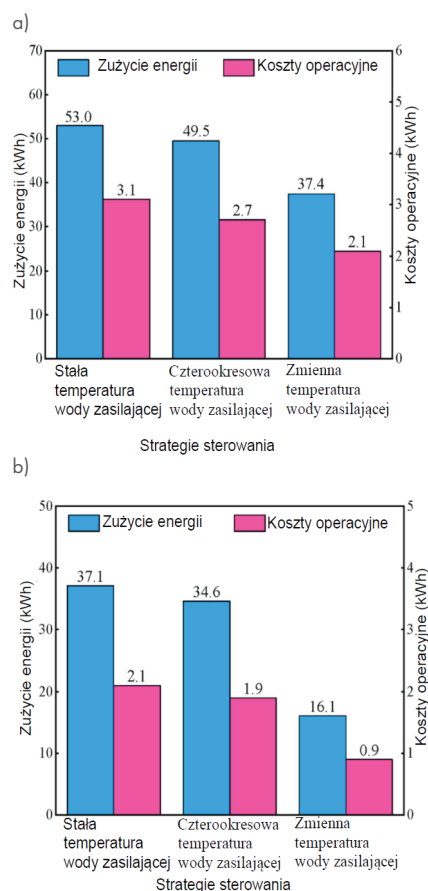
W zakresie badań z użyciem metod sterowania predykcyjnego (MPC) Hu i in. [34] przeprowadzili badania laboratoryjne w zakresie których opracowano współsymulacyjne stanowisko testowe w celu przetestowania i porównania różnych metod sterowania w różnych warunkach pracy pod względem zużycia energii, komfortu cieplnego i kosztów eksploatacji. Działanie systemu opierało się na przerywanym ogrzewaniu niskotemperaturowym wraz z kontrolą przepływu. Wyniki testów pokazują, że w porównaniu do konwencjonalnego sterownika włącz-wyłącz, sterownik MPC jest w stanie wykorzystać masę ciepłą budynku do optymalnego przesunięcia zużycia energii na okresy niskich cen, poprawić komfort cieplny na początku użytkowania, zmniejszyć zapotrzebowanie na energię w okresach szczytowych i zapewnić elastyczność energetyczną oraz zaoszczędzić koszty energii elektrycznej dla użytkowników końcowych w budynkach mieszkalnych. Z testów wynika także, że w porównaniu z konwencjonalnym sterowaniem włącz-wyłącz, regulator MPC dla systemów ogrzewania podłogowego jest w stanie wdrożyć automatyczne i optymalne podgrzewanie wstępne. Pomaga to poprawić komfort cieplny na początku zajmowania, zmniejszyć zużycie energii w okresach szczytowych i zmniejszyć dzienne koszty energii elektrycznej o 1,82-18,65% dla użytkowników końcowych w budynkach mieszkalnych.

Chen i in. [35] do układu ogrzewania podłogowego w trybie ciągłym z wykorzystaniem sterowania PID również zastosowali metodę sterowania predykcyjnego modelu MPC do optymalizacji sterowania. W wyniku badań ustalono, że czas reakcji temperatury powietrza w strefie przy włączonym regulatorze MPC został skrócony o około 90 min w porównaniu z regulatorem PID, co stanowi redukcję o około 56%. Jednocześnie regulator MPC może skutecznie zmniejszyć zużycie energii o 14,9% i poprawić współczynnik COP pompy ciepła powietrznego o 24,5% w porównaniu z regulatorem PID, dzięki lepszej adaptacyjnej wydajności regulatora MPC przy obciążeniu cieplnym budynku.

Z kolei Liang i in. [36] wykonali badania w istniejącym budynku używanym okresowo w Ansan w Korei. Poprzez zastosowanie autorskiej zoptymalizowanej metody sterowania On-Off zintegrowanej z modelem predykcyjnym opartej na uczeniu się maszynowym ML (Machine Learning). Ich analiza wykazuje, iż proponowany przez nich model skutecznie zmniejszył zużycie energii operacyjnej z 122 tys. MJ do 86 tys. MJ (29,67%) i zapewnił wzrost komfortu cieplnego z 60% do ponad 86% w porównaniu z systemami regulowanymi ręcznie. Ponadto, przeprowadzona validacja przy użyciu połączonej platformy symulacyjnej TRNSYS i Python wyraźnie potwierdziła adaptowalność i skuteczność proponowanego przez nich modelu.

Wpływ sterowania ze zmienną temperaturą czynnika zasilającego na efektywność przeprowadzili Liu i in. [37] w jednym z mieszkań w Xianyang City w Chinach, które było wyposażone w powietrzną pompę ciepła i niskotemperaturowe ogrzewanie podłogowe. Aby obniżyć koszty operacyjne, w swoim badaniu autorzy badali i porównali trzy strategie sterowania: stałą temperaturę wody zasilającej (35°C), czterookresową temperaturę wody zasilającej uzależnioną do ustalonych przedziałów godzin w trakcie doby (8:00-11:00: 30°C; 11:00-14:00: 35°C; 14:00-17:00: 30°C; 17:00-8:00 następnego dnia: 35°C) i zmienną temperaturę wody zasilającej (na podstawie godzinnych zmian temperatury zewnętrznej). Badania były prowadzone dla dwóch wybranych okresów: w listopadzie (a) i w styczniu (b). Wyniki wykazały, że strategia zmiennej temperatury wody zasilającej w porównaniu do pracy przy stałej temperaturze wody zasilającej wynoszącej 35°C, dzienne zużycie energii przez system zmniejszyło się odpowiednio o 56,7% i 29,5% w typowych warunkach wysokiej i niskiej temperatury otoczenia. W porównaniu do pracy przy czterookresowej korekcie temperatury wody zasilającej, zużycie energii przez system zmniejszy-

ło się odpowiednio o 53,6% i 24,6% co zostało pokazane na rysunku 5.



Rys. 5 Porównanie zużycia energii i kosztów eksploatacji przy różnych strategiach sterowania a) od godziny 8:00 dnia 15 listopada do godziny 8:00 dnia 16 listopada; b) od godziny 8:00 dnia 23 stycznia do godziny 8:00 dnia 24 stycznia (na podstawie Liu i in. [37])

Fig. 5. Comparison of energy consumption and operating costs under different control strategies a) from 8:00 on November 15 to 8:00 on November 16; b) from 8:00 on January 23 to 8:00 on January 24 (based on Liu et al. [37])

Z kolei Shin i in. [38] uzyskali oszczędności energii na poziomie około 3%, stosując odpowiednio zaplanowaną metodę sterowania dwustanowego (On-Off) w odniesieniu do ogrzewania podłogowego oraz uwzględniając obecność użytkowników w ogrzewanych lub chłodzonych pomieszczeniach.

Zhang i in. [39] osiągnęli oszczędności energii rzędu 17,5% dzięki zastosowaniu sterowania predykcyjnego opartego na modelu MPC w instalacjach ogrzewania podłogowego, w porównaniu do sterowania PID.

Natomiast Cesari i in. [40] uwzględnili w swoim systemie MPC również prognozy pogody, co umożliwiło uzyskanie oszczędności energii zarówno w procesie ogrzewania (4%), jak i chłodzenia (8%) przy użyciu instalacji płaszczyznowej.

Podsumowanie

Ogrzewanie lub chłodzenie podłogowe może prowadzić do zmniejszenia zużycia energii w porównaniu z typowymi systemami, jednocześnie zapewniając komfort cieplny. Jednakże, aby to osiągnąć, konieczne jest zastosowanie właściwej metody sterowania tym systemem, poprzedzonej identyfikacją obiektu/systemu, który ma być sterowany.

Istnieje wiele metod regulacji układów podłogowych, które przy dostosowywaniu wydajności grzewczej lub chłodniczej zazwyczaj opierają się na wymogach cieplnych i hydraulicznych, realizowanych poprzez elementy wykonawcze systemów sterowania. Analizując literaturę, można dostrzec, że większość dotychczasowych badań bazuje na danych uzyskanych z programów komputerowych symulacyjnych. Występują różnice opinii na temat tego, który rodzaj wymuszenia (hydrauliczne czy cieplne) jest bardziej korzystny z punktu widzenia energetyki oraz osiągnięcia zamierzonego efektu. Wiele autorów zaleca istotne ograniczenie przepływu w rurkach umieszczonych w systemie ogrzewania podłogowego, nie uwzględniając wpływu typu przepływu (laminarnego, przejściowego, turbulentnego) na ilość ciepła przekazywanego z medium grzewczego do powierzchni podłogi. Jednak wciąż brakuje badań i analiz uwzględniających regulację jakościową zarówno w ujęciu miejscowym jak i centralnym w oparciu o różne opcje sterowania dostawą ciepła/chłodu takich jak sterowanie ciągłe, pulsacyjne czy prognozowe.

Wnioski

W niniejszym opracowaniu przeprowadzono kompleksowy przegląd literatury dotyczącej systemów ogrzewania/chłodzenia płaszczyznowego (RHC), pod kątem komfortu cieplnego i ich efektywności energetycznej z wielu punktów widzenia przy użyciu różnych strategii sterowania. Wyniki wykazały, że systemy RHC są nieustannie rozwijane, modyfikowane i udoskonalane, a dobór odpowiedniej strategii sterowania może rozwiązać problem efektywności energetycznej, jednocześnie poprawiając komfort cieplny wewnątrz pomieszczeń. Na podstawie przeglądu literatury zidentyfikowano luki badawcze, obejmujące brak analiz systemów RHC pod kątem efektywności energetycznej i komfortu cieplnego w kontekście zastosowania regulacji jakościowej zarówno w ujęciu centralnym, jak i lokalnym w połączeniu ze sterowaniem prognozowym. Brakuje także badań eksperymentalnych przeprowadzonych w warunkach dyna-

micznych pracy grzejnika podłogowego, zwłaszcza po wystąpieniu zmian cieplnych i/lub hydraulicznych w trakcie regulacji systemu grzewczego w oparciu o różne opcje sterowania dostawą ciepła/chłodu takich jak sterowanie ciągłe, pulsacyjne czy prognozowe. Według najlepszej wiedzy autorów, brakuje także badań określających, jak rodzaj przepływu czynnika grzewczego lub chłodzącego oraz współczynnik przemian ciepła pomiędzy tym czynnikiem a rurą grzewczą lub chłodzącą wpływają na temperaturę zewnętrznej powierzchni rurociągu systemu ogrzewania lub chłodzenia podłogowego w kontekście jego efektywności energetycznej, przy jednoczesnym zapewnieniu komfortowych warunków termicznych w ogrzewanych lub chłodzonych wnętrzach. Analiza i badania w wyżej wymienionym zakresie, może otworzyć nowe kierunki rozwoju płaszczyznowych systemów grzewczych i chłodzących oraz pozwolić na przewyższenie ograniczeń tych systemów i rozszerzenie zakresu ich stosowania na różne typy budynków oraz strefy klimatyczne.

Literatura:

- [1] Komisja Europejska. (2019). Europejski Zielony Ład (Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, COM(2019) 640 final).
- [2] Rhee, K.-N., Olesen, B. W., & Kim, K. W. (2017). Ten questions about radiant heating and cooling systems. *Building and Environment*, 112, 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.030>
- [3] Olesen, B. W. (2008). Radiant floor cooling systems. *ASHRAE Journal*, 50(9), 16–22.
- [4] Babiak, J., Olesen, B. W., & Petras, D. (2007). Low temperature heating and high temperature cooling systems (REHVA Guidebook No. 7). Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations..
- [5] Polski Komitet Normalizacyjny. (2019). Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki – Moduł M1-6 (Norma Nr PN-EN 16798-1:2019-06).
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy (ASHRAE Standard 55-2004).
- [7] Polski Komitet Normalizacyjny. (2006). Ergonomia środowiska termicznego - Analizy i wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego (Norma Nr PN-EN ISO 7730:2006).
- [8] Myhren, J. A., & Holmberg, S. (2008). Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating. *Energy and Buildings*, 40(4), 524–536. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.011>
- [9] Tian, Z., & Love, J. A. (2009). Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements. *Energy and Buildings*, 41(3), 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.002>

- [10] An, J.-Y., Kim, S., Kim, H.-J., & Seo, J. (2010). Emission behavior of formaldehyde and TVOC from engineered flooring in under heating and air circulation systems. *Building and Environment*, 45(8), 1826–1833. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.012>
- [11] Schellen, L., Timmers, S., Loomans, M., Nelissen, E., Hensen, J. L. M., & van Marken Lichtenbelt, W. (2012). Draught assessment during design: Experimental and numerical evaluation of a rule of thumb. *Building and Environment*, 57, 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.011>
- [12] Kang, D. H., Choi, D. H., Seong, Y.-B., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2013). A numerical simulation of VOC emission and sorption behaviors of adhesive bonded materials under floor heating condition. *Building and Environment*, 68, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.013>
- [13] Khorasanizadeh, H., Sheikhzadeh, G. A., Azemati, A. A., & Shirkavand Hadavand, B. (2014). Numerical study of air flow and heat transfer in a two-dimensional enclosure with floor heating. *Energy and Buildings*, 78, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.007>
- [14] Lin, B., Wang, Z., Sun, H., Zhu, Y., & Ouyang, Q. (2016). Evaluation and comparison of thermal comfort of convective and radiant heating terminals in office buildings. *Building and Environment*, 106, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.015>
- [15] Zhang, C., Pomianowski, M., Heiselberg, P. K., & Yu, T. (2020). A review of integrated radiant heating/cooling with ventilation systems- Thermal comfort and indoor air quality. *Energy and Buildings*, 223, artykuł 110094. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110094>
- [16] Qi, D., Liu, Y., Zhao, C., Dong, Y., Song, B., & Li, A. (2024). Thermal response and performance evaluation of floor radiant heating system based on fuzzy logic control. *Energy and Buildings*, 313, artykuł 114232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114232>
- [17] Polski Komitet Normalizacyjny. (2021). Wbudowane płaszczyznowe wodne systemy ogrzewania i chłodzenia - Część 2: Wodne wbudowane systemy ogrzewania i chłodzenia płaszczyznowego – Część 2: Ogrzewanie podłogowe: Metody określania mocy cieplnej z zastosowaniem obliczeń i badań eksperymentalnych (Norma Nr PN-EN 1264-2:2021-10)
- [18] Cholewa, T., Rosiński, M., Spik, Z., Dudzińska, M. R., & Siuta-Olcha, A. (2013). On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room. *Energy and Buildings*, 66, 599–606. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.065>
- [19] Rhee, K.-N., & Kim, K. W. (2015). A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Building and Environment*, 91, 166–190. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.040>
- [20] Chiang, W.-H., Wang, C.-Y., & Huang, J.-S. (2012). Evaluation of cooling ceiling and mechanical ventilation systems on thermal comfort using CFD study in an office for subtropical region. *Building and Environment*, 48, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.002>
- [21] Park, S. H., Chung, W. J., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2014). Evaluation of the thermal performance of a Thermally Activated Building System (TABS) according to the thermal load in a residential building. *Energy and Buildings*, 73, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.008>
- [22] Bojić, M., Cvetković, D., & Bojić, L. (2015). Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources. *Applied Energy*, 138, 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.063>
- [23] Jeong, J.-W., & Mumma, S. A. (2007). Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant cooling panel. *Building*

- and Environment, 42(9), 3176–3185. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.006>
- [24] Zhao, K., Liu, X.-H., & Jiang, Y. (2013). Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation. *Energy and Buildings*, 66, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.014>
- [25] Zhao, K., Liu, X.-H., & Jiang, Y. (2015). Cooling capacity prediction of radiant floors in large spaces of an airport. *Solar Energy*, 113, 221–235. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.003>
- [26] Kim, K. W., & Olesen, B. W. (2015). Radiant heating and cooling systems: part 1. *ASHRAE Journal*, 57(2), 28–37.
- [27] Żukowski, M. (2009). Ogrzewanie podłogowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
- [28] Verein Deutscher Ingenieure. (2018). Economic efficiency of building installations - Energy effort of benefit transfer for water heating systems (Standard No. VDI 2067-Part 20)
- [29] Sattari, S., & Farhanieh, B. (2006). A parametric study on radiant floor heating system performance. *Renewable Energy*, 31(10), 1617–1626. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.009>
- [30] Hasan, A., Kurnitski, J., & Jokiranta, K. (2009). A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating. *Energy and Buildings*, 41(5), 470–479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.016>
- [31] Fonseca Díaz, N., & Cuevas, C. (2010). Testing and thermal modeling of radiant panels systems as commissioning tool. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2663–2677. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.001>
- [32] Rastegarpour, S., Gros, S., & Ferrarini, L. (2020). MPC approaches for modulating air-to-water heat pumps in radiant-floor buildings. *Control Engineering Practice*, 95, artykuł 104209. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104209>
- [33] Joe, J., & Karava, P. (2019). A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. *Applied Energy*, 245, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.209>
- [34] Hu, M., Xiao, Fu, Jørgensen, J. B., & Li, R. (2019). Price-responsive model predictive control of floor heating systems for demand response using building thermal mass. *Applied Thermal Engineering*, 153, 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.10>
- [35] Chen, Q., Li, N., & Feng, W. (2021). Model predictive control optimization for rapid response and energy efficiency based on the state-space model of a radiant floor heating system. *Energy and Buildings*, 238, artykuł 110832. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110832>
- [36] Liang, X., Shim, J., & Song, D. (2025). A simple and efficient machine-learning based approach for optimal heating control of radiant floor heating systems: Proposal and validation. *Building and Environment*, 272, artykuł 112666. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112666>
- [37] Liu, Y., Nan, X., Han, H., & Li, J. (2024). The variable water temperature control strategy of the air-source heat pump compatible with floor heating system for an apartment. *Journal of Building Engineering*, 90, artykuł 109440. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.109440>
- [38] Shin, M.-S., Rhee, K.-N., & Jung, G.-J. (2020). Optimal heating start and stop control based on the inferred occupancy schedule in a household with radiant floor heating system. *Energy and Buildings*, 209, artykuł 109737. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109737>
- [39] Zhang, D., Cai, N., Cui, X., Xia, X., Shi, J., & Huang, X. (2019). Experimental investigation on model predictive control of radiant floor cooling combined with underfloor ventilation system. *Energy*, 176, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.102>
- [40] Cesari, S., Emmi, G., & Bottarelli, M. (2022). A weather forecast-based control for the improvement of PCM enhanced radiant floors. *Applied Thermal Engineering*, 206, Artykuł 118119. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118119>

STUDIA PODYPLOMOWE Politechnika Śląska w Gliwicach

Rozpczęła się rekrutacja na kolejne edycje studiów podyplomowych.
Czekamy na Ciebie!



**Zarządzanie gospodarką wodną
i ochrona wód
– Wody: Interdyscyplinarne
Podejście (WIP)**



**Systemy Bezpieczeństwa
Zapotrzebowania w Wodę**



październik 2026 - czerwiec 2027
(2 semestry)

Politechnika Śląska, jako uczelnia kładąca szczególny nacisk na przygotowywanie kadr zgodnie z aktualnym zapotrzebowaniem regionu i kraju oraz ze względu na coraz większe zainteresowanie wpływem różnorodnych czynników na racjonalną gospodarkę zasobami wodnym przy współpracy z Regionalnym Zarządzeniem Gospodarki Wodnej w Gliwicach uruchamia rekrutację na kolejną edycję dwusemestralnych studiów podyplomowych Zarządzanie gospodarką wodną i ochrona wód – Wody: Interdyscyplinarne Podejście.

Absolwent tych studiów rozszerzy, jak i zdobędzie wiedzę z zakresu prawnych aspektów gospodarki wodnej, w tym najważniejszych zmian zapisów Ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, wprowadzonych Ustawą z 13 marca 2026 r. (Dz.U. 2026, poz. 605) dotyczących oceny ryzyka i zarządzania ryzykiem w obszarach zasilania dla punktów poboru wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

Gwarantujemy wysoką jakość i najnowsze metody kształcenia oraz praktyczne seminaria wyjazdowe.

Dwusemestralne studia podyplomowe, poświęcone są zarządzaniu ryzykiem w zaopatrzeniu w wodę. Zostały uruchomione z myślą o przygotowaniu kadr do przeprowadzania ocen ryzyka i wdrażania Planów Bezpieczeństwa Wody, w oparciu o obowiązujące od 2026 roku regulacjami prawnymi (Dz. U. 2026, poz. 605 oraz Dz.U. 2026, poz. 748).

Dają możliwość zdobycia interdyscyplinarnej wiedzy dotyczącej identyfikacji zagrożeń i zdarzeń niebezpiecznych, oceny ryzyka z nimi związanego dla jakości wody i zdrowia ludzkiego oraz zarządzania tym ryzykiem.

Zakres merytoryczny studiów uwzględni aspekty prawne, organizacyjne, techniczno-technologiczne, zdrowotne oraz praktyczne postępowanie. Program studiów zgodnie z zaleceniami nowych regulacji obejmuje wszystkie elementy Planów Bezpieczeństwa Wody według zaleceń i wytycznych WHO oraz normy europejskiej PN-EN 15975-2:2013-12 Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia — Wytyczne dotyczące zarządzania kryzysowego i ryzyka — Część 2: Zarządzanie ryzykiem a także studia przypadków (praktyczne przykłady Planów bezpieczeństwa wody). Wiedza ta ułatwi interpretację nowych, obowiązujących już przepisów prawnych. Integralnym elementem programów studiów są wizyty studyjne na wybranych obiektach wodociągowych.

**Zajęcia odbywają się w trybie hybrydowym, łączącym zajęcia w trybie online
ze stacjonarnymi sobotnio-niedzielnymi zjazdami**

Szczegółowe informacje na temat studiów podyplomowych



<https://rekrutacja.polsl.pl/kierunek/wip/>



REKRUTACJA ONLINE



<https://rekrutacja.polsl.pl/kierunek/spd-sbzw/>

