

Załącznik nr 2

Autoreferat

dr inż. Tomasz Cholewa

Lublin 2019

Spis treści

1. Imiona i nazwisko	1
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	1
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych	2
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):	2
a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego	2
b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy	2
c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	3
Cel naukowy i uzasadnienie jego przyjęcia.....	3
Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki	5
Możliwości wykorzystania wyników pracy	9
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)	11

1. Imiona i nazwisko

Tomasz Cholewa

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Dyplomy i stopnie naukowe

- Magister inżynier, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2008 r.
 - I specjalność: Ogrzewnictwo, Wentylacja i Klimatyzacja;
 - II specjalność: Wodociągi i Kanalizacja.
- Stopień **doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, specjalność: Ogrzewnictwo, Wentylacja i Klimatyzacja, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013 r.

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Analiza wpływu parametrów pracy ogrzewania i chłodzenia podłogowego na komfort termiczny i zużycie energii*

Promotor: dr hab. Marzenna R. Dudzińska, prof. PL

Recenzenci: dr hab. inż. Jan Danielewicz – Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska
dr hab. inż. Krzysztof Wojdyga, prof. PW – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska

Rozprawa została wyróżniona przez Radę Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej.

Uprawnienia zawodowe

- Uprawnienia budowlane do projektowania bez ograniczeń (LUB/0007/POOS/11) w zakresie sieci, instalacji i urządzeń cieplnych, wentylacyjnych, gazowych, wodociągowych i kanalizacyjnych, Lubelska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, 2011.
- Uprawnienia budowlane do kierowania robotami budowlanymi bez ograniczeń (LUB/0097/OWOS/14) w zakresie sieci, instalacji i urządzeń cieplnych, wentylacyjnych, gazowych, wodociągowych i kanalizacyjnych, Lubelska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, 2014.
- Świadectwo kwalifikacji (nr 472-II E-654/18) do wykonywania prac na stanowisku eksploatacji w zakresie: obsługi, konserwacji, naprawy, montażu, prac kontrolno-pomiarowych dla następujących urządzeń i sieci: grupa 2 (urządzenia wytwarzające, przetwarzające, przesyłające i zużywające ciepło oraz inne urządzenia energetyczne). Komisja Kwalifikacyjna nr 472, Lublin 2018.
- Świadectwo kwalifikacji (nr 472-II D-267/18) do wykonywania prac na stanowisku dozoru w zakresie: obsługi, konserwacji, naprawy, montażu, prac kontrolno-

pomiarowych dla następujących urządzeń i sieci: grupa 2 (urządzenia wytwarzające, przetwarzające, przesyłające i zużywające ciepło oraz inne urządzenia energetyczne). Komisja Kwalifikacyjna nr 472, Lublin 2018.

- Świadectwo kwalifikacji (nr 472-III E-655/18) do wykonywania prac na stanowisku eksploatacji w zakresie: obsługi, konserwacji, naprawy, montażu, prac kontrolno-pomiarowych dla następujących urządzeń i sieci: grupa 3 (urządzenia, instalacje i sieci gazowe wytwarzające, przetwarzające, przesyłające, magazynujące i zużywające paliwa gazowe. Komisja Kwalifikacyjna nr 472, Lublin 2018.
- Świadectwo kwalifikacji (nr 472-III D-376/18) do wykonywania prac na stanowisku dozoru w zakresie: obsługi, konserwacji, naprawy, montażu, prac kontrolno-pomiarowych dla następujących urządzeń i sieci: grupa 3 (urządzenia, instalacje i sieci gazowe wytwarzające, przetwarzające, przesyłające, magazynujące i zużywające paliwa gazowe. Komisja Kwalifikacyjna nr 472, Lublin 2018.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

- 2008-2015, asystent, Zakład Jakości Powietrza Zewnętrznego i Wewnętrznego, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Lubelskiej
- 2015-obecnie, adiunkt, Katedra Jakości Powietrza Wewnętrznego i Zewnętrznego, Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej

4. Wskazanie osiągnięcia¹ wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Sterowanie prognozowe dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania

b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy

Tomasz Cholewa, Sterowanie prognozowe dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 159, Wydawnictwo Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Warszawa 2019, ISBN 978-83-63714-58-1.

Recenzent wydawniczy:

prof. dr hab. inż. Krzysztof Wojdyga

¹ w przypadku, gdy osiągnięciem tym jest praca/prace wspólne, należy przedstawić oświadczenia wszystkich jej współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w jej powstanie

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Cel naukowy i uzasadnienie jego przyjęcia

Głównym celem naukowym zaprezentowanego osiągnięcia było opracowanie autorskiej metodyki prognozowania dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania do obiektów istniejących, jak i nowopowstających oraz zaproponowanie na tej podstawie metody sterowania prognozowego dostawą ciepła do obiektów. Przyjęcie powyższego celu wynikało z dwóch przesłanek:

- wagi problemu przy równoczesnym braku istniejącej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania, która uwzględnia równocześnie aspekty prognozowania zużycia ciepła dla zmiennych warunków atmosferycznych, jak i profile zachowania mieszkańców, które powinny być połączone z ich edukacją,
- potwierdzonych w literaturze możliwości obniżenia zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania dzięki edukacji mieszkańców oraz zastosowania rozbudowanych systemów sterowania prognozowego.

Według Polityki energetycznej Polski do 2030 roku konieczne jest zwiększenie efektywności energetycznej szczególnie przez odbiorców końcowych. Jest to również zgodne z nowelizacją ustawy o efektywności energetycznej, która nastąpiła 20 maja 2016 roku i w której podkreśla się podstawowy udział zwiększenia efektywności energetycznej w zakresie energii finalnej przez odbiorców końcowych, szczególnie w sektorze budownictwa. Zatem obniżanie zużycia energii właśnie w tym sektorze zyskuje cały czas na znaczeniu, szczególnie w obliczu zobowiązań poszczególnych krajów członkowskich Unii Europejskiej, które wynikają z pakietu energetyczno-klimatycznego „3x20” w zakresie zwiększenia efektywności energetycznej.

Racjonalizacja zużycia ciepła powinna być uwzględniona w budynkach nowych już na etapie projektowania efektywnych energetycznie systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, a następnie kontynuowana poprzez edukację i pełne zaangażowanie mieszkańców w proces efektywnego wykorzystania dostarczanego ciepła.

W większości budynków istniejących, zmniejszenie zużycia ciepła zostało już zrealizowane poprzez wykonanie termomodernizacji przegród zewnętrznych budynku, często połączonej z pewnym zakresem modernizacji systemu ogrzewania (np. zamontowanie zaworów termostatycznych przy grzejnikach). Dlatego też kolejne działania modernizacyjne, które będą miały na celu dalsze zwiększanie poziomu efektywności energetycznej w tego typu budynkach, będą się teraz koncentrowały w szczególności na modernizacji systemu ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, edukacji mieszkańców oraz poprawie sterowania i automatyzacji procesów dostawy, magazynowania i odbioru energii.

Rozwiązaniami preferowanymi są działania, które charakteryzują się krótkim czasem wykonania prac modernizacyjnych, brakiem utrudnień podczas realizacji prac modernizacyjnych dla użytkowników oraz możliwie wysokim efektem (zmniejszenie zużycia ciepła) przy możliwie najniższych nakładach inwestycyjnych. Zatem rozwiązanie to powinno charakteryzować się możliwie krótkim czasem zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych (SPBT – Simple Pay Back Time).

Obecnie wykorzystywane układy centralnej regulacji instalacji ogrzewczych w budynkach są realizowane przy wykorzystaniu głównie centralnej, jakościowej regulacji pogodowej, która opiera się na pomiarze temperatury zewnętrznej oraz wewnętrznej w miejscu reprezentatywnym budynku. Następnie regulacja temperatury wewnętrznej w poszczególnych pomieszczeniach realizowana jest najczęściej miejscowo poprzez regulację ilościową przy wykorzystaniu zaworów termostatycznych czy też innych lokalnych regulatorów zintegrowanych z zaworami wyposażonymi w siłowniki. W przypadku budynków jednorodzinnych istnieje i jest często wykorzystywana przez użytkowników funkcja obniżenia temperatury wewnętrznej podczas ich nieobecności. Jednak ta opcja nie jest wykorzystywana przy regulacji centralnej w prawie wszystkich większych budynkach (większych od budynku jednorodzinnego). Poza tym wybór krzywej grzewczej jest wykonywany często w nieodpowiedni i niedokładny sposób, co nie odpowiada (nawet w sposób zbliżony) charakterystyce cieplnej danego obiektu i powoduje pogorszenie efektywności energetycznej pracy układu. Żaden z dostępnych na rynku regulatorów nie uwzględnia równocześnie aspektów prognozowania zużycia ciepła dla zmiennych warunków atmosferycznych, jak i profili zachowania mieszkańców, które powinny być połączone z ich edukacją.

Z drugiej strony dostępne są zaawansowane rozwiązania tzw. model predictive control (MPC). W rozwiązaniach MPC mierzy się wiele parametrów w poszczególnych pomieszczeniach (m.in.: temperaturę powietrza wewnętrznego, wilgotność, prędkość przepływu powietrza), jak i w poszczególnych częściach systemu ogrzewczego czy też klimatyzacyjnego (temperatura czynnika, prędkość czy też strumień czynnika roboczego), które to służą w pierwszej kolejności do czasochłonnej (zależy głównie od ilości pomieszczeń w budynku, ale najczęściej 1–2 lata) kalibracji modelu budynku, układu ogrzewczego i preferencji użytkowników, a następnie do prognozowania zużycia ciepła/chłodu na poszczególne cele z odpowiednim wyprzedzeniem. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie oszczędności zużycia ciepła, jak i na obniżenie szczytowego zapotrzebowania na ciepło. Jednak z uwagi na czasochłonność procesu kalibracji oraz znaczne nakłady inwestycyjne (duża liczba aparatury kontrolno-pomiarowej) jest to rozwiązanie nadal bardzo rzadko spotykane. Należy tu podkreślić, że ten czasochłonny proces kalibracji przeprowadzany jest w tym przypadku dla każdego budynku/systemu oddzielnie i muszą w nim uczestniczyć dodatkowe osoby, które posiadają doświadczenie z zakresu optymalizacji systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji. Dodatkowo należy zauważyć, że rozwiązania wykorzystujące MPC nie są stosowane w budynkach istniejących (szczególnie wielorodzinnych) z uwagi na potrzebę przewidzenia dodatkowych urządzeń pomiarowych w poszczególnych pomieszczeniach, co jest możliwe do wykonania ewentualnie na etapie projektowym, a nie eksploatacyjnym.

W przeglądzie literatury wykazałem, że dostępne rozwiązania układów sterowania instalacji ogrzewczych nie uwzględniają wszystkich czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie), zachowania/preferencji mieszkańców (czynnik wewnętrzny) na potrzeby prognozowania zużycia ciepła. Nie pozwalają również w prosty, automatyczny sposób (bez konieczności wnikania w dokumentację techniczną obiektu czy też zastosowania szeregu różnych, dodatkowych, urządzeń pomiarowych) na opracowanie dokładnego modelu cieplnego obiektu, który będzie służył na potrzeby prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej.

Dlatego też poszukiwane i rekomendowane są w pierwszej kolejności rozwiązania możliwe do szerokiego (powszechnego) zastosowania przy możliwie krótkim czasie instalacji i zwrotu nakładów inwestycyjnych, które wymagają możliwie małego zaangażowania ze strony Inwestora na etapie wdrożenia, jak i późniejszej eksploatacji.

Biorąc to pod uwagę zasadnym jest opracowanie, zoptymalizowanie oraz przetestowanie metody prognozowania dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania obiektów (budynek, podstacja ciepłna, kotłownia osiedlowa), która bazuje na innowacyjnych algorytmach obliczeniowych zarówno w zakresie uzyskania dokładnego modelu cieplnego indywidualnie dla każdego obiektu, jak i prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej uwzględniającego prognozę pogody oraz zachowania użytkowników systemu ogrzewczego. Dodatkowo zakłada się, że praca proponowanego systemu sterowania prognozowego realizowana jest bez konieczności szczegółowej znajomości parametrów z zakresu budynku (współczynniki przenikania ciepła, powierzchnia przegród), instalacji ogrzewczej oraz bez potrzeby instalowania dodatkowych urządzeń w poszczególnych pomieszczeniach budynku.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki

Na potrzeby przeprowadzenia analiz umożliwiających osiągnięcie przyjętego celu rozprawy wykorzystano rzeczywiste, archiwalne, godzinowe dane eksploatacyjne dotyczące ilości ciepła dostarczanego na potrzeby ogrzewania do budynków oraz podstacji ciepłych zlokalizowanych na terenie miasta Lublin i Świdnik. Dane te były pobrane z systemu monitoringu węzłów ciepłych na podstawie uzgodnień, umów współpracy oraz umów o zachowaniu poufności zawartych w 2015 roku pomiędzy Przedsiębiorstwami Energetyki Ciepłej w Lublinie (LPEC) i w Świdniku a Politechniką Lubelską, z ramienia której osobą odpowiedzialną za uzgodnienia i prace badawcze był wyznaczony autor rozprawy. W badaniach opracowanych w ramach rozprawy przedstawiono wyniki dla wybranych obiektów, aby pokazać na ich przykładzie autorskie podejście do problemu prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania obiektów w okresie ostatnich 3 sezonów ogrzewczych (2015/2016, 2016/2017, 2017/2018). Poza godzinowymi danymi związanymi ze zużyciem ciepła w analizowanych obiektach, w analizie wykorzystano również następujące czynniki atmosferyczne, w szczególności:

- średnią prędkość wiatru w danej godzinie, [m/s],
- maksymalną (podmuch) prędkość wiatru w danej godzinie, [m/s],
- średnie zachmurzenie w danej godzinie określone przy użyciu 9-stopniowej (oktanowej) skali, [oktant],
- średnie nasłonecznienie w danej godzinie, [J/cm²].

W celu ujednoczenia metodyki badań, w analizach uwzględniano okres od 1 października do 30 kwietnia danego roku (np. od 1 października 2015 do 30 kwietnia 2016), czyli z każdego sezonu ogrzewczego otrzymano 5112 godzinowych odczytów.

W pierwszej kolejności opracowano algorytmy obliczeniowe, które pozwalają na otrzymanie modelu cieplnego danego obiektu w formie równoważnej temperatury zewnętrznej ($t_e^{rów}$) uwzględniającej wpływ prędkości wiatru (korektę z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V)) oraz nasłonecznienia (korektę z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N)) lub zachmurzenia (równanie nr 1).

$$t_e^{rów} = t_e - t_e^V + t_e^N \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

Ważnym aspektem przy wyznaczaniu rzeczywistego modelu cieplnego obiektu (budynek, podstacja ciepła, kotłownia osiedlowa) będzie uwzględnienie tylko danych (obejmujących zużycie ciepła i parametry meteorologiczne) pochodzących z okresów czasu, w których wpływ użytkowników systemu ogrzewczego (np. zmiana ustawień na zaworach termostatycznych) na zużycie ciepła jest zminimalizowany.

Poza modelem cieplnym danego obiektu (opracowywany na podstawie badań eksploatacyjnych), który odpowiada za właściwe uwzględnienie wpływu czynników zewnętrznych na zużycie ciepła, istotnym aspektem jest również odpowiednie uwzględnienie wpływu czynników wewnętrznych (zachowania i preferencje użytkowników systemu) na potrzeby cieplne obiektu. Dlatego też opracowane zostały algorytmy obliczeniowe, za pomocą których będzie wypracowywany indywidualnie dla każdego obiektu profil zastępczej temperatury wewnętrznej, który obejmuje całość procesów cieplnych w obiekcie związanych z zachowaniami użytkowników. Zakłada się, że profil równoważnej temperatury wewnętrznej będzie następnie aktualizowany w celu uzyskania możliwie wysokiej dokładności prognozowania zużycia ciepła.

Następnie uwzględniając prognozę pogody dla danej lokalizacji będzie można wyznaczyć prognozowaną równoważną temperaturę zewnętrzną ($t_e^{rów}$) oraz wewnętrzną ($t_i^{rów}$) dla danego obiektu i w ten sposób dostosować dostawę ciepła na cele ogrzewcze do zmieniających się warunków zewnętrznych i wewnętrznych, a to z kolei pozwoli na zmniejszenie zużycia ciepła.

Należy podkreślić, że w konkurencyjnych technologiach centralnej regulacji instalacji ogrzewczej nie jest stosowane prognozowanie zużycia ciepła na cele ogrzewcze z równoległym wykorzystaniem rzeczywistego modelu budynku oraz odpowiednio dobranego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, która w inteligentny sposób uwzględnia preferencje i zachowania użytkowników systemu (profile zachowań mieszkańców).

Wpływ prędkości wiatru na zapotrzebowanie mocy cieplnej związany jest ze wzrostem współczynnika przejmowania ciepła na drodze konwekcji na zewnętrznej ścianie budynku, który rośnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru oraz wzrostem podciśnienia w układach wentylacji naturalnej czy też mechanicznej, co powoduje zwiększenie krotności wymiany powietrza i związanych z tym dodatkowych nakładów energetycznych na podgrzanie powietrza infiltrującego. W celu oceny wpływu prędkości wiatru na zapotrzebowanie na moc cieplną na potrzeby ogrzewania dla wybranych do analizy budynków opracowano (na podstawie danych z całego sezonu ogrzewczego) równania regresji oraz współczynniki determinacji (R^2). W pierwszej kolejności opracowano zależności dla prędkości wiatru: $v < 3$ m/s, dla $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v > 6$ m/s oraz czterech zakresów danych godzinowych:

- dla całej doby,
- dla godzin 6–18 (dzień), czyli danych charakteryzujących dzień,
- dla godzin 18–6, czyli danych charakteryzujących wieczór i noc
- dla godzin 23–4, czyli danych charakteryzujących noc.

Analizę tę przeprowadzono dodatkowo dla dwóch wariantów, ponieważ rozpatrywano zarówno średnią prędkość wiatru w danej godzinie, jak i maksymalną prędkość wiatru (podmuch) w danej godzinie. Po przeprowadzeniu analizy dla zakresów prędkości wiatru ($v < 3$ m/s, dla $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v > 6$ m/s), skonkretyzowano zależności dla węższych zakresów, które charakteryzowały już poszczególne prędkości wiatru $v = 1$ m/s, $v = 2$ m/s, $v = 3$ m/s... $v = 9$ m/s, $v \geq 10$ m/s.

Z kolei promieniowanie słoneczne działające na obudowę budynku ma wpływ na chwilowe zapotrzebowania na moc cieplną w okresie całego sezonu ogrzewczego. Zacienienie budynków jest czynnikiem osłabiającym pozyskiwanie ciepła promieniowania słonecznego. Dodatkowo wpływ na natężenie promieniowania słonecznego może mieć zmętnienie atmosfery spowodowane zjawiskami naturalnymi, takimi jak zachmurzenie czy zanieczyszczenie pyłami pochodzącymi z terenów zurbanizowanych oraz wymiana ciepła przez promieniowanie pomiędzy ścianą budynku a powierzchnią ziemi, warstwą otaczającego powietrza czy też kopułą nieboskłonu. Dlatego też w ramach rozprawy wykonano prace badawcze ukierunkowane na określenie wpływu kolejnego z głównych czynników zewnętrznych oddziałujących na zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania (poza wartością temperatury powietrza zewnętrznego oraz prędkością wiatru), jakim są zyski ciepła od promieniowania słonecznego. Wpływ tego czynnika zewnętrznego może być uwzględniony, biorąc pod uwagę nasłonecznienie lub zachmurzenie. Dlatego też ważnym aspektem było wypracowanie uniwersalnego algorytmu obliczeniowego, który będzie pozwalał na wyznaczenie właściwego (o możliwie wysokim współczynniku determinacji) oraz możliwie miarodajnego równania korygującego temperaturę powietrza zewnętrznego z uwagi na nasłonecznienie lub zachmurzenie indywidualnie dla każdego obiektu. Na potrzeby wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej w zależności od stopnia zachmurzenia określone zostały zależności mocy cieplnej dostarczanej do obiektu względem temperatury zewnętrznej dla zachmurzenia z zakresu: 0–2 oktant (zachmurzenie małe); 3–5 oktant (zachmurzenie umiarkowane); 6–7 (zachmurzenie duże); 8 (zachmurzenie całkowite) przy prędkościach wiatru w zakresach $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz $v > 6$ m/s. Z kolei na potrzeby wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie zostały określone zależności mocy cieplnej dostarczanej do obiektu względem temperatury zewnętrznej dla nasłonecznienia z zakresów: 0–35 J/cm²; 35–100 J/cm²; 100–200 J/cm²; >200 J/cm² przy prędkościach wiatru $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v > 6$ m/s i dwóch przedziałów godzinowych: całej doby oraz godzin od 10 do 14 (dzień- brak użytkowników w obiekcie).

Na podstawie wyników tych analiz został wybrany odpowiedni zakres danych oraz parametr nasłonecznienie charakteryzujący wpływ zysków ciepła od promieniowania słonecznego, które pozwalają w możliwie wysokim stopniu zminimalizować wpływ innych czynników

zakłócających (między innymi prędkość wiatru czy też zachowania użytkowników systemu ogrzewczego).

Kolejnym aspektem było przeprowadzenie prac badawczych ukierunkowanych na przedstawienie sposobu określenia wpływu zachowań i preferencji użytkowników systemu ogrzewczego na zużycie ciepła dostarczanego do danego obiektu (budynek, podstacja cieplna czy też system ciepłowniczy) na potrzeby ogrzewania. Miało to na celu opracowanie uniwersalnych algorytmów obliczeniowych na potrzeby wyznaczenia i późniejszego wyboru (indywidualnie dla każdego z obiektów) odpowiedniego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$), która będzie uwzględniała aspekt związany z użytkownikami systemu przy prognozowaniu zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania. Nie należy jednak utożsamiać w sposób bezpośredni wartości ($t_i^{rów}$) z średnią wartością temperatury powietrza wewnętrznego w poszczególnych mieszkaniach/ czy też lokalach usługowych w danym obiekcie, którą można by uzyskać poprzez uśrednienie odczytów z zainstalowanych czujników temperatury powietrza w poszczególnych pomieszczeniach ogrzewanych. Jest to bowiem parametr ($t_i^{rów}$), który pozwala w sposób pośredni określić wpływ czynników wewnętrznych związanych z zachowaniami użytkowników systemu ogrzewczego na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania.

Ponieważ preferencje i zachowania użytkowników obiektów mogą być zmienne zarówno w trakcie doby, tygodnia czy też sezonu ogrzewczego, dlatego też przy wyborze godzinowego profilu $t_i^{rów}$ (uwzględnianego przy prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania) zaproponowano rozważać pięć przypadków:

- profil A: dla każdego dnia tygodnia niezależnie (poniedziałek, wtorek, środa, itd.);
- profil B: średni dla dnia podczas dni pracy (poniedziałek–piątek) oraz średni dla dnia podczas weekendu (sobota–niedziela);
- profil C: uśredniony z 1 doby wstecz;
- profil D: uśredniony z 2 dób wstecz;
- profil E: stała wartość temperatury wewnętrznej na poziomie 20°C.

Wybór odpowiedniego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, czyli pozwalającego na uzyskanie najbardziej dokładnej prognozy zużycia ciepła, będzie przeprowadzany w sposób automatyczny za pomocą odpowiednich algorytmów obliczeniowych indywidualnie dla każdego z obiektów.

Weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną przeprowadzono zarówno dla budynków, podstacji, jak i miejskiego systemu ciepłowniczego i na te potrzeby określono prognozowane zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla danego obiektu (Q_{PROG}), które następnie porównano z rzeczywistym zapotrzebowaniem mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla danego obiektu (Q_{RZ}) i określono średni błąd bezwzględny, średni błąd względny oraz odchylenie standardowe.

Przeprowadzone prace badawcze pozwoliły osiągnąć główny cel pracy, czyli opracować autorską metodę pozwalającą na prognozowanie zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania z wysoką dokładnością, charakteryzowaną przez średni błąd względny prognozy poniżej 15%.

Wpływ głównych czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie) na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania jest brany pod uwagę w formie równoważnej temperatury zewnętrznej ($t_e^{równ}$), która uwzględnia korektę z uwagi na prędkość wiatru (korekta ze znakiem ujemnym) oraz korektę z uwagi na nasłonecznienie (korekta ze znakiem dodatnim).

Należy podkreślić, że korekty te powinny być wyznaczane indywidualnie dla każdego obiektu, ponieważ może on odmiennie reagować na dane warunki pogodowe. W przypadku analizy dotyczącej wpływu zachmurzenia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na cele ogrzewania nie osiągnięto logicznych wyników w przypadku analizowanych obiektów, ponieważ wraz ze wzrostem stopnia zachmurzenia powinno wzrastać zapotrzebowanie na moc cieplną przy danej temperaturze powietrza zewnętrznego i przy możliwie zbliżonej prędkości wiatru. Jednak w przypadku analizowanych obiektów było odwrotnie i dlatego pominięto ten parametr w dalszych analizach.

Przedstawiono dokładne zalecenia na potrzeby wyznaczania wpływu prędkości wiatru na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania w formie korekty temperatury zewnętrznej (t_e^V) oraz na potrzeby wyznaczania wpływu nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania w formie korekty temperatury zewnętrznej (t_e^N), odnośnie wyboru danych do analizy na potrzeby zminimalizowania pozostałych czynników zewnętrznych, jak i wewnętrznych, które mogą zakłócać poprawne zdefiniowanie wpływu czy to prędkości wiatru czy to nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów.

Możliwości wykorzystania wyników pracy

Uzyskane wyniki pracy mogą znaleźć zastosowanie zarówno w dalszych badaniach naukowych, jak i w praktyce projektowej oraz eksploatacyjnej systemów ogrzewczych.

W przypadku wdrożenia autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na ciepło na potrzeby ogrzewania do praktyki inżynierskiej w formie autorskiej metody sterowania prognozowego dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania, rezultatem będzie nowy produkt (system sterowania), który w szybki, prosty, ekonomicznie uzasadniony, a mimo to dokładny sposób uwzględni wpływ głównych czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie) i wewnętrznych (zachowania i preferencje użytkowników systemu) na potrzeby odpowiedniego sterowania dostawą ciepła szczególnie w budynkach już istniejących, ponieważ w nich zużywana jest obecnie największa ilość ciepła.

Zastosowanie tak opracowanego systemu sterowania układów ogrzewczych przy uwzględnieniu prognozy pogody, odpowiedniej równoważnej temperatury zewnętrznej (charakterystycznej dla danego obiektu) oraz odpowiedniego, aktualnego dobowego profilu

równowaznej temperatury wewnętrznej (charakterystycznego dla danego obiektu) może pozwolić na uzyskanie zmniejszenia zużycia ciepła na poziomie co najmniej 10% w porównaniu do wariantu wejściowego (w którym zainstalowana jest już tradycyjna regulacja pogodowa).

Zatem proponowany system sterowania instalacjami ogrzewczymi, cechuje się dużym potencjałem rynkowym, ze względu na możliwość uzyskania zmniejszenia zużycia ciepła (co najmniej o 10%) w obiektach (szczególnie w budynkach) już istniejących w porównaniu do dostępnych dotychczas technologii oraz możliwością szerokiego zastosowania (efekt skali) dzięki automatyzacji zaawansowanych procesów obliczeniowych oraz minimalizacji czasu instalacji całego układu regulacji.

Podstawą do określenia rynku docelowego była wykonana analiza całego obszaru, gdzie możliwe jest zastosowanie proponowanego systemu sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania. Jak już wcześniej wspomniano, zgodnie z *Polityką energetyczną Polski do 2030 roku* konieczne jest zwiększenie efektywności energetycznej szczególnie przez odbiorców końcowych.

Głównym obszarem zastosowania tego energooszczędnego rozwiązania są budynki ogrzewane. W Polsce łączna liczba budynków wielorodzinnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej jest na poziomie około 0,5 miliona – dane *GUS* (2017). W sektorze mieszkaniowym największe zapotrzebowanie energii związane jest z ogrzewaniem pomieszczeń. Według danych *GUS* (2014) w gospodarstwach domowych na potrzeby ich ogrzewania wykorzystywane jest 68,8%, na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej 14,8% całkowitego zużycia energii, a pozostałe cele stanowią gotowanie, oświetlenie oraz urządzenia elektryczne. Jak widać, w sektorze budynków tkwi zatem olbrzymi potencjał oszczędności energii, szczególnie w zakresie ich ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Dlatego też niezbędne jest ograniczenie zapotrzebowania energii na ogrzewanie do poziomów optymalnych pod względem kosztów przy zachowaniu komfortu cieplnego.

Dlatego też biorąc powyższe pod uwagę proponowany, innowacyjny system sterowania dostawą ciepła jest dedykowany w szczególności do zainstalowania w już istniejących budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej wyposażonych w wodne, centralne instalacje ogrzewcze oraz posiadających (lub nie) system centralnej regulacji dostawy ciepła do instalacji ogrzewczej (regulacja pogodowa węzła ciepłowniczego, kotłowni, pompy ciepła lub jeszcze innych źródeł ciepła) w celu zwiększenia efektywności energetycznej. Z uwagi na uniwersalność i prostotę instalowania, jak i bezobsługowy charakter proponowanego systemu sterowania można będzie go aplikować w budynku bez względu na stan techniczny, rodzaj czy też materiał wewnętrznej instalacji ogrzewczej i nie będzie on wymagał zainstalowania dodatkowych urządzeń w pomieszczeniach poszczególnych użytkowników/mieszkańców. Można będzie go zainstalować również w nowoprojektowanych obiektach czy też w źródłach ciepła dostarczających ciepło na potrzeby kilku obiektów (podstacje cieplne, ciepłownie i kotłownie osiedlowe), które mogą wykorzystywać dodatkowo odnawialne źródła energii do wspomagania pracy źródeł konwencjonalnych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

W początkowym etapie zatrudnienia w Politechnice Lubelskiej moje zainteresowania naukowe koncentrowały się wokół zagadnień związanych z wymianą ciepła w zakresie ogrzewań płaszczyznowych, w szczególności ogrzewania/chłodzenia podłogowego oraz sufitowego. W latach 2011-2013 byłem głównym wykonawcą w projekcie badawczym nr N523 745240 „Ogrzewanie płaszczyznowe w aspekcie zachowania komfortu cieplnego i oszczędności energii w pomieszczeniach budynków mieszkalnych”, który był wspólnie realizowany wraz z Politechniką Warszawską. Wykonane badania eksperymentalne na autorskim stanowisku badawczym w laboratorium ogrzewań płaszczyznowych Wydziału Inżynierii Środowiska, Politechniki Lubelskiej, pozwoliły mi na realizację własnej rozprawy doktorskiej pt. „*Analiza wpływu parametrów pracy ogrzewania i chłodzenia podłogowego na komfort termiczny i zużycie energii*”, która została wyróżniona przez Radę Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej. Wyznaczone w ramach pracy autorskiej zależności na potrzeby określania współczynników przejmowania ciepła z płaszczyzny ogrzewania/chłodzenia podłogowego zostały opublikowane w czasopiśmie międzynarodowym Energy and Buildings [1]. Z kolei wyniki dla ogrzewania i chłodzenia sufitowego zostały również opublikowane w późniejszym terminie w czasopiśmie międzynarodowym Applied Thermal Engineering [2].

Już przed skończeniem doktoratu rozpocząłem prowadzenie badań z zakresu efektywności energetycznej oraz racjonalizacji zużycia energii w budynkach (szczególnie istniejących), czego efektem były publikacje w czasopismach anglojęzycznych [3,4], oraz napisanie wniosku o projekt badawczy z zakresu racjonalizacji zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym.

Bezpośrednio po obronie rozprawy doktorskiej (21.10.2013) przystąpiłem do realizacji (w latach 2013-2015) projektu badawczego nr IP2012 007772 pt. „*Racjonalizacja zużycia energii w sektorze mieszkaniowym na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych*”, którego byłem kierownikiem, a projekt był finansowany z MNiSW w ramach programu *Iuventus Plus*. W ramach tego projektu nawiązałem współpracę z większością spółdzielni mieszkaniowych oraz przedsiębiorstw energetyki ciepłej z województwa lubelskiego, co pozwoliło na zgłębienie wiedzy praktycznej, zapoznanie się z problemami jak i oczekiwaniami poszczególnych podmiotów oraz opublikowanie szeregu prac w czasopismach z listy A zarówno z zakresu racjonalizacji zużycia ciepła systemów ogrzewczych [5-9], jak i systemów przygotowania ciepłej wody użytkowej [10, 11].

Jednak główne wyniki badań przeprowadzonych w ramach tego projektu badawczego zostały opublikowane w monografii [12].

W monografii [12] przedstawiono szereg wyników długoterminowych badań eksploatacyjnych, umożliwiających określenie i sprawdzenie wpływu różnych przedsięwzięć modernizacyjnych na zużycie energii, szczególnie w istniejących budynkach wielorodzinnych. Do każdego rozpatrywanego przypadku wybierano reprezentatywną grupę budynków, aby zakres przeprowadzonych prac modernizacyjnych pozwolił, w możliwie jednoznaczny sposób, pokazać wpływ danego działania modernizacyjnego na zużycie ciepła w danej grupie budynków, a nie był tylko przypadkowym wynikiem otrzymanym dla

pojedynczego obiektu. Na tej podstawie rekomendowano wiele działań modernizacyjnych i pokazano, jaki poziom zmniejszenia zużycia ciepła można osiągnąć poprzez zastosowanie danego działania modernizacyjnego w zakresie systemu ogrzewania czy też przygotowania ciepłej wody.

Należy jednak w tym miejscu podkreślić, że przedstawione w monografii [12] badania opierały się na działaniach modernizacyjnych, które zostały już przeprowadzone w analizowanych obiektach, a mimo wszystko zarządcy nieruchomości oraz mieszkańcy oczekują teraz wdrażania nowych (kolejnych) rozwiązań, które pozwoliłyby jeszcze bardziej obniżyć zużycie ciepła (obniżyć koszty ogrzewania i przygotowania ciepłej wody) przy zachowaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniach ogrzewanych. Takie sugestie autor rozprawy otrzymywał podczas dyskusji z zarządcami poszczególnych nieruchomości, wspólnot, spółdzielni, którzy podkreślają dodatkowo, że nowe działania modernizacyjne, aby mogły być wdrożone w ich zasobach mieszkaniowych, powinny się charakteryzować:

- łatwością wdrożenia do istniejącego układu ogrzewczego,
- zrozumiałym (z fizycznego punktu widzenia) sposobem działania, który często należy wytłumaczyć w pierwszej kolejności zarządcy decydującemu się na takie działanie modernizacyjne i często w drugiej kolejności również mieszkańcom danego obiektu, wspólnoty czy też spółdzielni,
- brakiem uciążliwości podczas montażu (możliwie krótki czas montażu), jak i późniejszej eksploatacji dla mieszkańców i zarządców nieruchomości,
- szybkim czasem zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych,
- możliwością powszechnego zastosowania (efekt skali).

Biorąc to pod uwagę autor rozprawy uznał za zasadne opracowanie, zoptymalizowanie oraz przetestowanie autorskiej metody prognozowania dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania obiektów (budynek, podstacja cieplna, kotłownia osiedlowa), która bazuje na innowacyjnych algorytmach obliczeniowych zarówno w zakresie uzyskania dokładnego modelu cieplnego indywidualnie dla każdego obiektu, jak i prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej uwzględniającego prognozę pogody oraz zachowania użytkowników systemu ogrzewczego, a praca proponowanego systemu sterowania prognozowego realizowana jest bez konieczności szczegółowej znajomości parametrów z zakresu budynku (współczynniki przenikania ciepła, powierzchnia przegród), instalacji ogrzewczej oraz bez potrzeby instalowania dodatkowych urządzeń w poszczególnych pomieszczeniach budynku, co zostało przedstawione właśnie w rozprawie habilitacyjnej.

Efekty swoich prac prowadzonych po uzyskaniu tytułu doktora nauk technicznych zawarłem w 12 publikacjach w czasopiśmie z bazy JCR z listy A, 6 krajowych publikacjach, 1 monografii oraz 10 artykułach konferencyjnych (tabela 2 oraz załącznik nr 4 Wykaz dorobku habilitacyjnego). Wyniki prac były prezentowane na 5 konferencjach międzynarodowych oraz 4 konferencjach ogólnopolskich.

Część publikacji naukowych powstała w ramach współpracy międzynarodowej (koordynowanej z ramienia Politechniki Lubelskiej przez habilitanta) z University of Zagreb (Chorwacja), National Observatory of Athens (Grecja), University of Split (Chorwacja),

Malmö University (Szwecja) oraz z Università degli studi di Cassino (Włochy)- szczegóły w załączniku nr 4 Wykaz dorobku habilitacyjnego.

Za działalność naukową otrzymałem 4 nagrody Rektora Politechniki Lubelskiej (załącznik nr 4 Wykaz dorobku habilitacyjnego).

Przywołana literatura

- [1] Cholewa T., Rosiński M., Spik Z., Dudzińska M.R., Siuta-Olcha A.: On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room. ENERGY AND BUILDINGS 66 (2013) 599–606
- [2] Cholewa T., Anasiewicz R., Siuta-Olcha A., Skwarczyński M.A.: On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant ceiling and room. APPLIED THERMAL ENGINEERING 117 (2017) 76–84.
- [3] Cholewa T., Siuta-Olcha A.: Experimental investigations of a decentralized system for heating and hot water generation in a residential building. ENERGY AND BUILDINGS 42 (2010) 183–188.
- [4] Cholewa T., Siuta-Olcha A., Skwarczyński M.A.: Experimental evaluation of three heating systems commonly used in the residential sector. ENERGY AND BUILDINGS 43 (2011) 2140–2144.
- [5] Cholewa T., Siuta-Olcha A.: Long term experimental evaluation of the influence of heat cost allocators on energy consumption in a multifamily building. ENERGY AND BUILDINGS 104 (2015) 122–130
- [6] Cholewa T., Siuta-Olcha A.: Experimental evaluation of circular frequency supply of radiant floor heating system. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 17 Rok 2015, p.438-449.
- [7] Cholewa T., Siuta-Olcha A., Anasiewicz R.: Analiza czynników wpływających na zużycie ciepła dostarczanego na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej w budynkach wielorodzinnych. ROCZNIK OCHRONA ŚRODOWISKA vol. 18 (2016) 169-180.
- [8] Cholewa T., Siuta-Olcha A., Balaras C.A.: Actual energy savings from the use of thermostatic radiator valves in residential buildings – Long term field evaluation. ENERGY AND BUILDINGS 151 (2017) 487–493.
- [9] Cholewa T., Balen I., Siuta-Olcha A.: On the influence of local and zonal hydraulic balancing of heating system on energy savings in existing buildings-long term experimental research. ENERGY AND BUILDINGS 179 (2018) 156-164.
- [10] Cholewa T.: Improving energy efficiency of hot water storage tank by use of obstacles, Rocznik Ochrona Środowiska Tom. 15 Rok 2013, Część. 1, p.392-404, ISSN 1506-218x.
- [11] Cholewa T., Siuta-Olcha A., Anasiewicz R.: On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings - Long term field research. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION 217 (2019) 194-203
- [12] Cholewa T., Siuta-Olcha A.: Racjonalizacja zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym. Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie". Warszawa 2016. ISBN 978-83-88695-33-9. 210 stron.

W tabeli 1 zestawilem liczbę cytowań publikacji i indeks Hirscha według Web of Science (WoS), Google Scholar oraz Scopus. Podsumowanie wszystkich moich dotychczasowych publikacji naukowych przedstawia tabela 2.

Tab. 1. Podsumowanie cytowań publikacji i indeks Hirscha

Podstawa	Liczba cytowań		Indeks Hirscha
	ogółem	bez autocytowań	
Web of Science	100	92	5
Google Scholar	187	160	6
Scopus	113	102	5

Tab. 2. Zestawienie danych o publikacjach

Publikujące czasopismo	Liczba publikacji	Impact factor (IF)	Punktacja MNiSW	
		z roku publikacji	z roku publikacji	z roku publikacji z uwzględnieniem tylko udziału habilitanta
Przed doktoratem				
z bazy JCR (lista A wg MNiSW)	3	5,058	92	39,2
z listy B wg MNiSW, indeksowane w WoS	-	-	-	-
z listy B wg MNiSW, nieindeksowane w WoS	12	-	71	37,2
materiały konferencyjne indeksowane w WoS	-	-	-	-
monografia w j. angielskim	1	-	24	12
rozdział w monografii w j. angielskim	7	-	39	21,8
monografia w j. polskim	2	-	24	12
rozdział w monografii w j. polskim	4	-	12	5,6
Razem przed doktoratem	29	5,058	262	127,8
Po doktoracie				
z bazy JCR (lista A wg MNiSW)	12	28,311	330	244,5
z listy B wg MNiSW, indeksowane w WoS	-	-	-	-
z listy B wg MNiSW, nieindeksowane w WoS	6	-	42	26,9
materiały konferencyjne indeksowane w WoS	2	-	30	21
monografia w j. angielskim	-	-	-	-
rozdział w monografii w j. angielskim	-	-	-	-
monografia w j. polskim	1	-	12	7,2
rozdział w monografii w j. polskim	-	-	-	-
Razem po doktoracie	21	28,311	414	299,6
Razem przed i po doktoracie	50	33,369	676	427,4