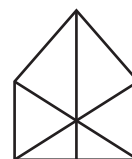
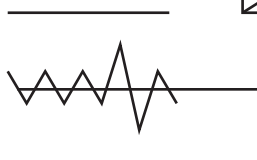
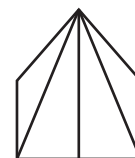
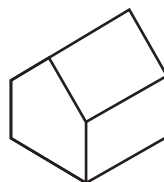
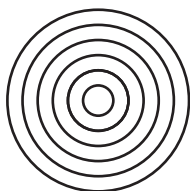


Karol Bandurski

# WPŁYW UŻYTKOWNIKÓW NA BILANS ENERGETYCZNY BUDYNKÓW MIESZKALNYCH – BADANIA I MODELOWANIE

Autoreferat rozprawy doktorskiej







---

# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

---



**WYDZIAŁ  
INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
I ENERGETYKI**

mgr inż. Karol Bandurski

## **Wpływ użytkowników na bilans energetyczny budynków mieszkalnych – badania i modelowanie**

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor: prof. dr hab. inż. Halina Koczyk  
Promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej Górka

Poznań 2021



## 1. Efektywność energetyczna w budownictwie

W ostatnich dziesięcioleciach ważnym zagadnieniem w branży budowlanej stała się efektywność energetyczna. Powodem są zarówno zmiany klimatyczne spowodowane m.in. spalaniem paliw kopalnych (a dokładniej emisją gazów cieplarnianych), jak i ograniczone zasoby tych paliw. W odpowiedzi na te problemy podjęto wysiłki zmierzające do obniżenia dyssypacji energii przez budownictwo<sup>1</sup>, jak i integracji budynków z odnawialnymi źródłami energii. Przykładem mogą być ewoluujące polskie przepisy prawne określające wymagania dla wznoszonych budynków czy dyrektywa Unii Europejskiej o efektywności energetycznej budynków. Choć nie należy przeceniać potencjału branży budowlanej w ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych, to konieczna jest społeczno-technologiczna zmiana w sposobie projektowania i eksploatacji budynków oraz związanych z nimi systemów energetycznych.

## 2. Użytkowanie a efektywność energetyczna budynku

Najpowszechniejszym i podstawowym sposobem obniżenia zużycia energii przez budynek jest poprawienie jego hermetyczności (zwiększenie izolacyjności cieplnej przegród i szczelności powietrznej), aby zminimalizować i lepiej kontrolować procesy wymiany ciepła między nim a środowiskiem zewnętrznym. W ten sposób, w bilansie energetycznym, coraz większe znaczenie mają słoneczne i wewnętrzne zyski ciepła. Wielkość i harmonogram tych drugich wynika bezpośrednio ze sposobu użytkowania budynku. Jednak również zyski słoneczne są regulowane przez użytkowników, którzy, szczególnie w budynkach mieszkalnych, mają kontrolę nad większością strumieni ciepła przepływających przez budynek. Innymi słowy to użytkownicy wykorzystują energię, a nie sam budynek, a jest to efekt dwóch procesów:

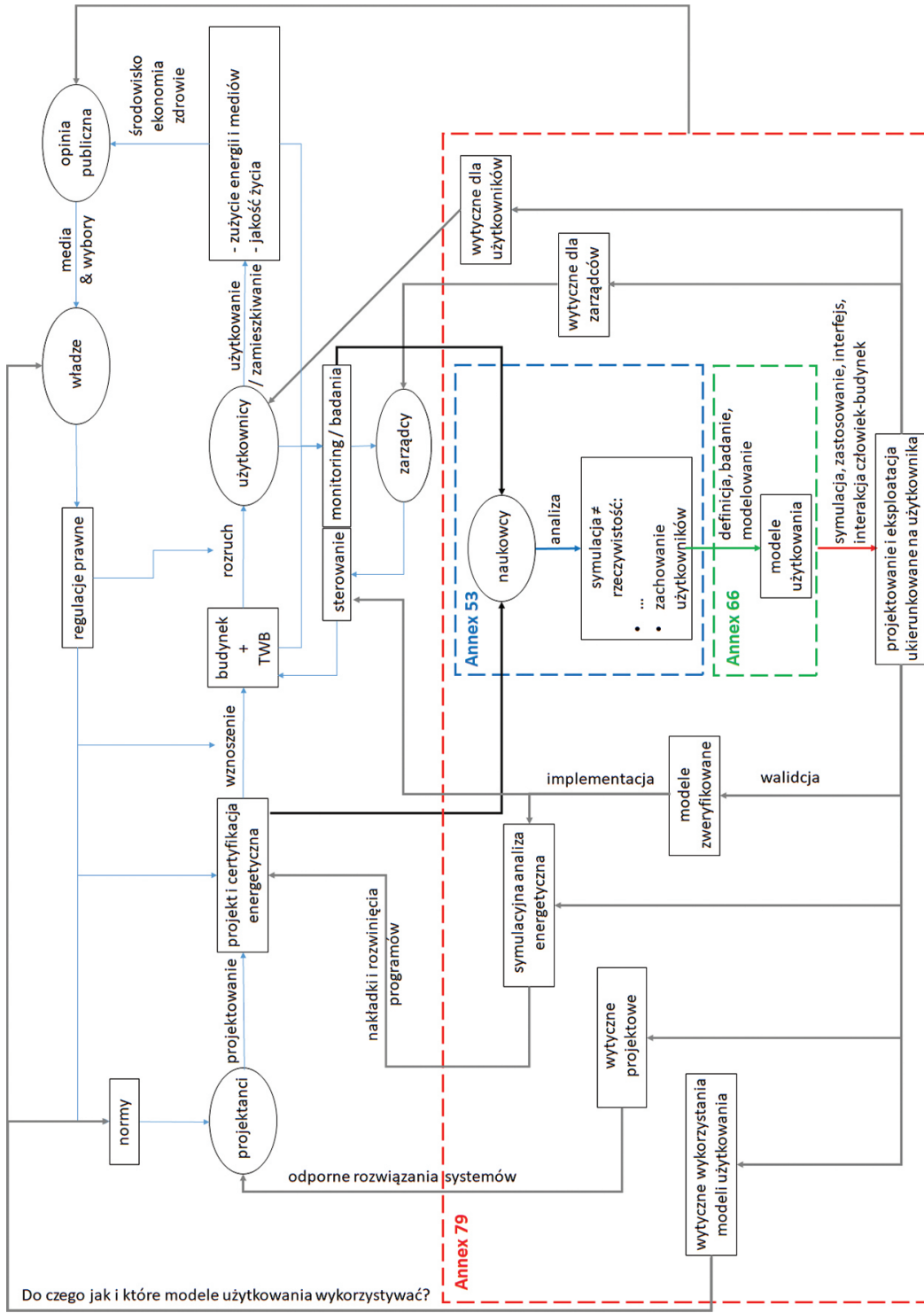
- **użytkowania przestrzeni (bierny)**, na co składa się: harmonogram obecności; aktywności (wewnętrzne zyski ciepła); zużycie ciepłej wody użytkowej; dostarczanie niezbędnej ilości powietrza wentylacyjnego (do celów fizjologicznych); wyznaczanie powierzchni klimatyzowanej (czyli pośrednio współczynnika strat ciepła uwzględniającego użytkowanie tylko części budynku) oraz określanie temperatury zadanej;
- **interakcja z budynkiem i jego technicznym wyposażeniem (aktywny)**, która polega na sterowaniu parametrami jakości środowiska wewnętrznego (z ang. *indoor environmental quality* – IEQ) dla osiągnięcia komfortu za pomocą okien, zaciemnienia ruchomego i technicznego wyposażenia budynków (TWB).

Niemożliwym jest odizolowywanie budynku od użytkowników, tak jak czyni się to względem środowiska zewnętrznego. Dlatego celem jest projektowanie budynków i ich TWB w taki sposób, aby przy minimalnym wykorzystaniu energii, odpowiadały dynamicznym potrzebom użytkowników.

## 3. Aktualny stan badań

Podczas projektowania budynków i TWB w kontekście efektywności energetycznej, podstawowym narzędziem są programy do symulacji energetycznej budynków. Okazało się jednak, że często istnieje istotna różnica między obliczonym a rzeczywistym wykorzystaniem energii przez budynek (tzw. *performance gap*). W ramach programu *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* Międzynarodowej Agencji Energii (IEA EBC) w projekcie *Annex 53: Total Energy Use in Buildings: Analysis and Evaluation Methods 2008–2013* (z ang. Całkowite zużycie energii przez budynek: analiza i metody oceny) ustalono, że jedną z głównych przyczyn tej różnicy

<sup>1</sup> Dyssypacja energii lub ewentualnie wykorzystanie energii to najbardziej precyzyjne określenia procesu przekształcania energii do którego dochodzi w budynkach podczas ich eksploatacji za pośrednictwem TWB. Jednak w pracy zdecydowano się używać również określenia „zużycie energii”, które jest bardziej popularne, a w domyśle oznacza zużycie z punktu widzenia istniejącego systemu energetycznego.



**Rys. 1:** Tematyka projektów badawczych związanych z wpływem użytkownika na wykorzystanie energii w budynkach (Annex 53, 66 i 79), w ramach programu IEA EBC, i ich zastosowanie w praktyce. Niebieskimi strzałkami zaznaczono procesy istniejące, czarnymi zaznaczono skąd omawiane projekty badawcze czerpały pierwsze informacje do swoich analiz, a szarymi zaznaczono wpływ tych projektów na przebieg istniejących procesów. Niniejsza praca jest najbardziej związana z Annex 66

jest właśnie niepoprawne modelowanie użytkowania budynku i jego technicznego wyposażenia. Dlatego jednym z kolejnych projektów realizowanych w tym samym programie był Annex 66: *Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings 2013–2018* (z ang. Definiowanie i symulacja zachowań użytkowników w budynkach), w którym zajęto się metodologią badania i modelowania zachowań użytkowników na potrzeby dynamicznych analiz energetycznych budynków i ich technicznego wyposażenia. W ramach tego projektu powstał pierwszy podręcznik do tego typu badań. Kontynuacją tych działań jest obecnie realizowany projekt Annex 79: *Occupant-Centric Building Design and Operation 2018–2023* (z ang. Ukierunkowane na użytkowników projektowanie i eksploatacja budynków). Na rys. 1 przedstawiono wzajemne relacje między przywołanymi projektami i praktyką. Istnieje również szereg badań powiązanych z tematyką projektów, które toczyły się niezależnie od nich.

#### 4. Cel i zakres pracy

W ramach niniejszej pracy zdecydowano się poszerzyć zbiór badań tego typu o analizę danych z Polski, a także zaproponować metodę analizy danych z mieszkaniowych liczników ciepła. Są to dane łatwo dostępne, możliwe do zebrania bez zakłócenia prywatności lokatorów. Dlatego przedstawione podejście ma potencjał zastosowania na szerszą skalę.

Podstawowym celem niniejszej pracy jest zbadanie i scharakteryzowanie sposobu użytkowania lokali mieszkalnych pod względem energetycznym. Dzięki jego realizacji będzie można (a) bardziej realnie sformułować założenia odnośnie aspektów użytkowych w symulacyjnych analizach energetycznych i (b) poznać czynniki i procesy odpowiedzialne za wysokość zużycia energii przez mieszkańców w budynkach wielorodzinnych.

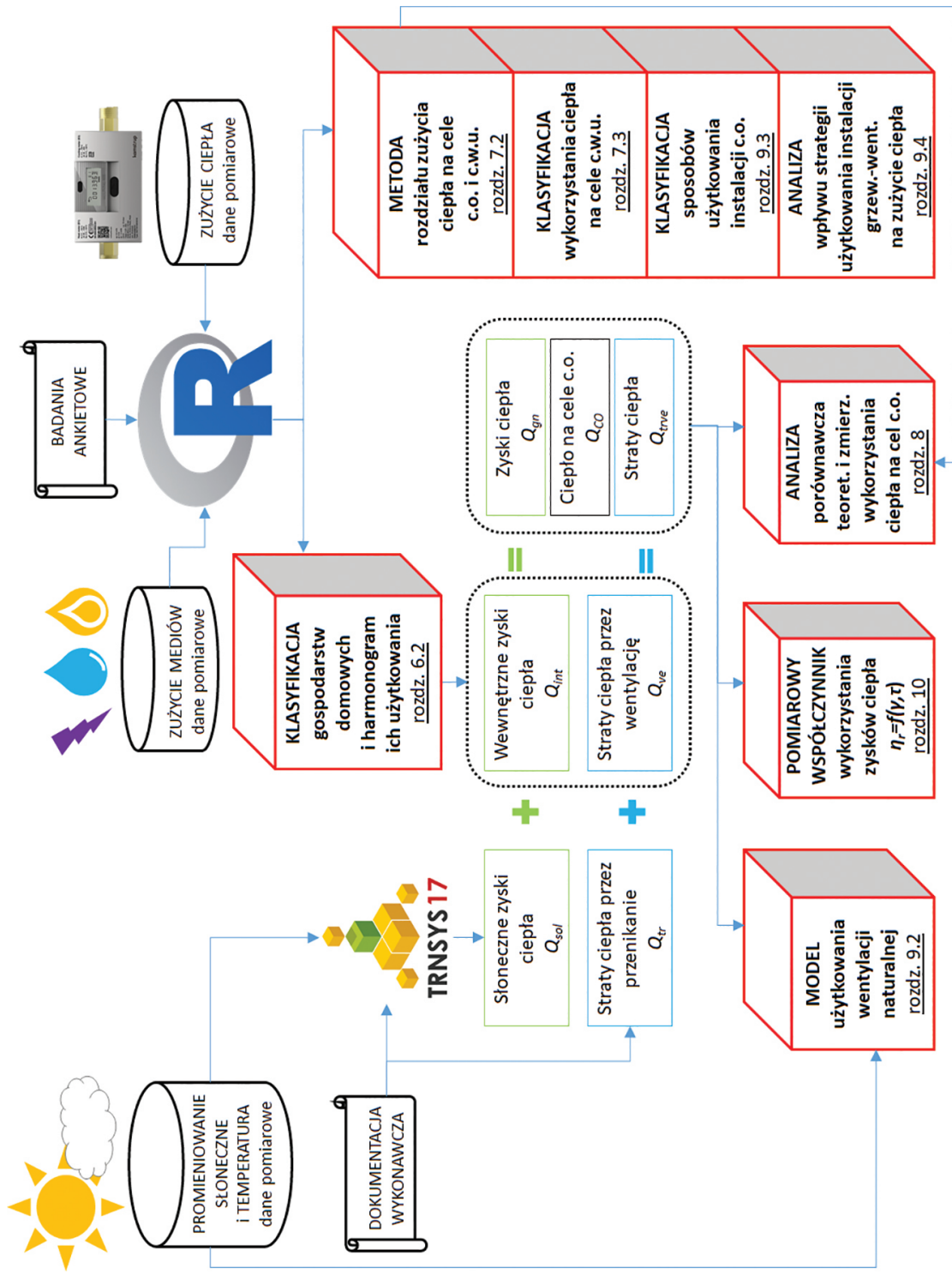
Pracę można przedstawić również jako próbę weryfikacji następujących tez:

1. Jest możliwe sklasyfikowanie gospodarstw domowych zarówno pod kątem sposobu użytkowania przestrzeni/lokalu, jak i sposobu interakcji z budynkiem i TWB, na podstawie danych pomiarowych, zbieranych poza granicą lokali mieszkalnych, i danych ankietowych.
2. Zużycia poszczególnych mediów przez gospodarstwa domowe są ze sobą skorelowane.
3. W budynkach wielorodzinnych ciepło na potrzeby grzewcze jest wykorzystywane w znacznie większej ilości niż wynika to z obliczeń teoretycznych opartych o obowiązujące normy czy regulacje prawne.
4. Wentylacja naturalna w budownictwie wielorodzinnym jest wykorzystywana nie tylko latem, ale również w sezonie grzewczym i przejściowym do dostarczenia świeżego powietrza wg potrzeb fizjologicznych, jak i odprowadzenia chwilowo nadmiarowych zysków ciepła: słonecznych i wewnętrznych, co należy liczyć jako stratę ciepła.
5. Na zużycie ciepła na cele c.o. przez lokale mieszkalne ma wpływ zarówno izolacyjność cieplna mieszkania, harmonogram jego użytkowania jak i strategia interakcji użytkowników z interfejsem instalacji grzewczo-wentylacyjnej.

Na rys. 2 przedstawiono schemat realizacji rozprawy, na którym przedstawiono zebrane dane i sposób ich wykorzystania do realizacji celów pracy.

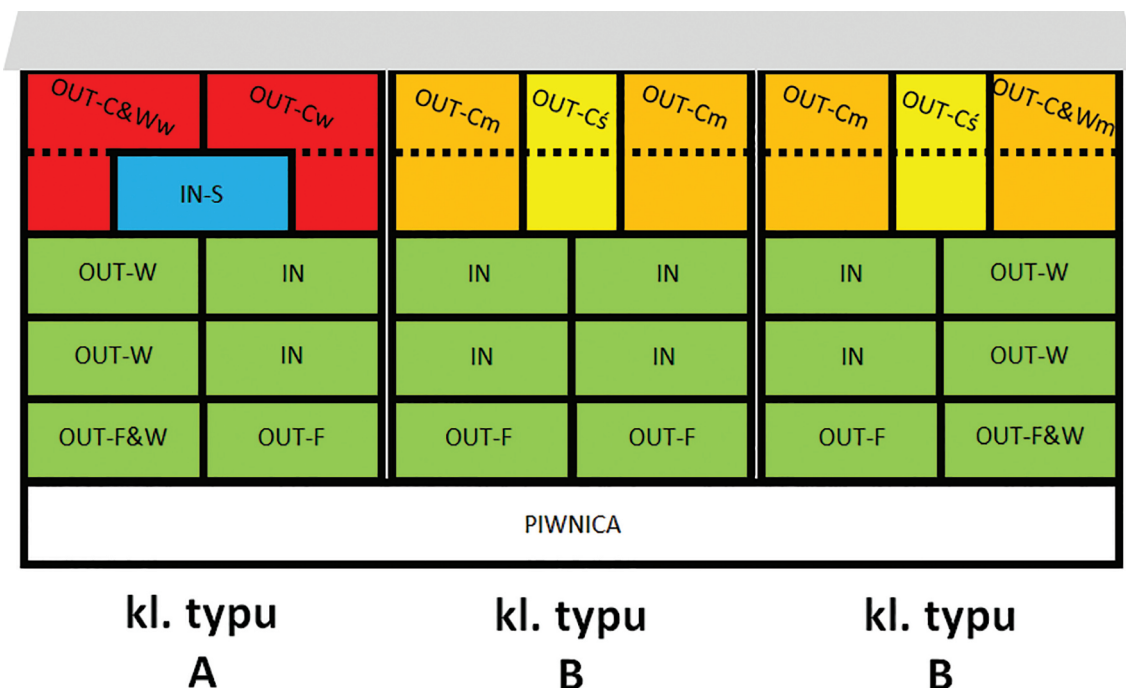
#### 5. Obiekt badawczy i metody badawcze

Jako obiekt badań wybrano typowe osiedle budynków wielorodzinnych wykonanych w technologii tradycyjnej w pierwszej dekadzie XXI wieku, w dużym polskim mieście. Osiedle składa się z ponad 100 mieszkań. Na podstawie projektu powykonawczego możliwa jest do wyznaczenia ich teoretyczna charakterystyka energetyczna. Standard budynków jest zgodny z ówczesnymi regulacjami, innymi niż obecnie obowiązujące, ale można uznać, że reprezentuje współczesne (energooszczędne) budownictwo polskie. W badaniach uwzględniono roczne dane dobowe z liczników ciepła oraz dane z liczników pozostałych mediów, a także ankietowanie mieszkańców.



**Rys. 2:** Graficzne przedstawienie koncepcji niniejszej rozprawy. Kolorowe ikony przedstawiają programy, które wykorzystano (TRNSYS i R) oraz narzędzie pomiarowe, z którego pobierano dane (Kamstrup M302), na czarno oznaczono dane wejściowe pochodzące z badań ankietowych, pomiarowych i dokumentacji technicznej, a na czerwono zaznaczono osiągnięcia pracy, podkreślono numery rozdziałów w których są opisane dane osiągnięcia





**Rys. 3:** Typy klatek schodowych i mieszkań w analizowanych budynkach. Poszczególne kolory oznaczają mieszkania o tej samej powierzchni użytkowej i kubaturze, nazwy opisują położenie lokali względem przegród zewnętrznych. Oznaczenia: linia podwójna – granica klatek schodowych, linia przerywana – podział na kondygnacje w lokalach dwupoziomowych, linia ciągła – pozostałe przegrody budynku; IN – mieszkania wewnętrzne, przegrody zewnętrzne jedynie na elewacji; IN-S – mieszkania wewnętrzne na ostatniej kondygnacji (kawalerki); OUT – mieszkania obwodowe otoczone przegrodami zewnętrznymi na elewacji i: F – stropem nad piwnicą, W – ścianą szczytową, C – stropodachem

Słoneczne zyski ciepła dla każdego lokalu wyznaczono na podstawie zmierzonego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą i modelu geometrycznego badanych budynków. Wykorzystano do tego celu program do dynamicznej analizy energetycznej budynków i systemów – TRNSYS.

Wszystkie zebrane dane poddano analizie energetycznej oraz statystycznej. Analiza statystyczna polegała m.in. na badaniu korelacji, wyznaczaniu regresji linowej i wykorzystywaniu algorytmów k-średnich oraz hierarchicznego do grupowania badanych mieszkań/gospodarstw domowych wg ich cech. Na podstawie tych prac zweryfikowano postawione tezy. Całą analizę danych przeprowadzono w programie R.

### 5.1. Klasyfikacja gospodarstw domowych – teza I

W pracy udowodniono, że gospodarstwa domowe można sklasyfikować metodami matematycznymi. Klasyfikacji dokonano w trzech aspektach:

- składu demograficznego (tab. 2),
- sposobu użytkowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) (tab. 3),
- sposobu regulacji instalacją centralnego ogrzewania (c.o.) (tab. 4)

W każdym przypadku klasyfikacja była uzasadniona statystycznie za pomocą ogólnie przyjętych metod grupowania: metody k-średnich i metody hierarchicznej.

W przypadku klasyfikacji demograficznej gospodarstw domowych (tab. 2) stworzono również model metabolicznych zysków ciepła w postaci tygodniowego harmonogramu użytkowania danego typu gospodarstw domowych. Model posłużył również do wyznaczenia zapotrzebowania na świeże powietrze wg kryterium higienicznego dla poszczególnych gospodarstw domowych.

**Tab. 1:** Charakterystyka typów mieszkań, oznaczenia lokali wg rys. 3. Pozostałe oznaczenia:  $A_f$  – powierzchnia użytkowa,  $H_{tr}$  – współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie (do wyznaczenia przyjęto temperaturę w lokalu 20 °C, na klatce schodowej 16 °C, w piwnicy 8 °C, a zewnętrzną –18 °C),  $C_m$  – efektywna pojemność cieplna konstrukcji mieszkania,  $A_{ok}$  – powierzchnia otworów okiennych,  $\dot{Q}_{grz}$  – zainstalowana w lokalu moc cieplna grzejników

Typ lokalu	$A_f$ m <sup>2</sup>	$H_{tr}$ W/K	$C_m$ kJ/K	$A_{ok}$ m <sup>2</sup>	$A_{ok}/H_{tr}$ m <sup>2</sup> /(W/K)	$\dot{Q}_{grz}$ W
<i>IN</i>	53	22,5	30,0	9,0	0,40	1180
<i>IN-S</i>	36	17,3	16,7	6,8	0,39	880
<i>OUT-W</i>	53	31,8	29,9	9,9	0,31	1510
<i>OUT-Cm</i>	83	38,6	46,4	13,3	0,35	2410
<i>OUT-Cś</i>	79	42,2	35,9	15,8	0,38	2250
<i>OUT-Cw</i>	104	49,8	55,6	16,7	0,34	2990
<i>OUT-F</i>	53	30,8	30,0	9,0	0,29	1570
<i>OUT-CWm</i>	83	57,0	46,7	15,5	0,27	3060
<i>OUT-CWw</i>	104	68,3	55,4	18,9	0,28	3630
<i>OUT-FW</i>	53	40,0	29,9	9,9	0,25	1920

**Tab. 2:** Wyodrębnione typy gospodarstw domowych i wartości cech ich skupień: liczba osób, udział dzieci w liczbie osób, średni czas spędzany w domu przez osobę, odsetek dni w ciągu roku spędzonych w lokalu

Typ	L.os. [os]	U.dz.	W domu [h/os]	Ob.	Opis
<i>PS</i>	1,4	0 %	11,7	91 %	para lub pojedyncza osoba w wieku produkcyjnym
<i>Em</i>	1,6	0 %	22,9	99 %	para lub pojedyncza osoba nie pracująca, w podeszłym wieku
<i>RM</i>	2,5	0 %	11,6	99 %	rodzina mniejsza i/lub ze starszymi dziećmi
<i>RD</i>	3,8	36 %	13,2	99 %	rodzina większa i/lub z młodszymi dziećmi

**Tab. 3:** Wyodrębnione typy użytkowania c.w.u., wartości cech ich skupień, przy założeniu podgrzewania wody o 45 K oraz liczba lokali należących do danego typu

Typ	Zużycie c.w.u. [dm <sup>3</sup> /(d·os)]			liczba lokali
	dni robocze	soboty	niedziele	
<i>Min</i>	15,2	12,0	14,8	36
<i>Śred</i>	28,3	29,4	39,7	45
<i>Max</i>	50,9	53,0	86,0	16
<i>2Max</i>	156,5	199,0	258,8	1

Na potrzeby klasyfikacji sposobów korzystania z c.w.u. (tab. 3) opracowano metodę rozdzielania poborów ciepła na cele c.o. i c.w.u. przy korzystaniu ze wspólnego licznika. Wykazano także, że między gospodarstwami domowymi istnieją nie tylko różnice w ilości zużytej wody, ale również w tygodniowym profilu korzystania z tego medium. Profil tygodniowy jest zauważalny

również po odjęciu wyznaczonych poborów na cele c.w.u., co świadczy o wzroście poboru ciepła na cele c.w.u. wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej lub o zależności intensywności korzystania z c.o. również od dnia tygodnia.

Klasyfikacja sposobów regulacji instalacją grzewczą (tab. 4) pokazała, że tylko 19% lokali użytkuje zawory termostatyczne (TRV) całkowicie zgodnie z ich ideą (patrz **mQ.s:m** w tab. 4 i wartość  $B_{\Delta t_{CO}}$ ). Reszta gospodarstw domowych użytkuje zawory TRV bardziej jak zawory dwupołożeniowe lub regulatory mocy grzejnika, a nie temperatury w lokalu. Wśród gospodarstw domowych wyróżnia się również grupa lokali (patrz **hQ** w tab. 4), która używa grzejników z wysokimi mocami i zużywa dwukrotnie więcej ciepła niż pozostałe lokale. Ta grupa nie wyróżnia się dłuższym sezonem grzewczym, co może świadczyć o tym, że sposób użytkowania grzejników nie jest determinowany oczekiwaniami cieplnymi, ale samą strategią sterowania. Najniższym wykorzystaniem ciepła charakteryzowała się grupa, która ustawia grzejniki na umiarkowane moce i ma ponad dwukrotnie krótszy sezon grzewczy niż pozostałe grupy (patrz **lQ.s:t** w tab. 4). Może to sugerować, że są to lokale o względnie niskiej temperaturze wewnętrznej, które są ogrzewane przez sąsiednie lokale.

**Tab. 4:** Wyodrębnione typy użytkowania instalacji c.o. i wartości cech ich skupień: średnioroczny spadek temperatury na instalacji c.o., średnioroczny względny dobowy pobór ciepła na cele c.o., nachylenie krzywej regulacyjnej TRV (praca TRV zgodna z ideą:  $B_{\Delta t_{CO}} = -35\%/K$ ), długość sezonu grzewczego

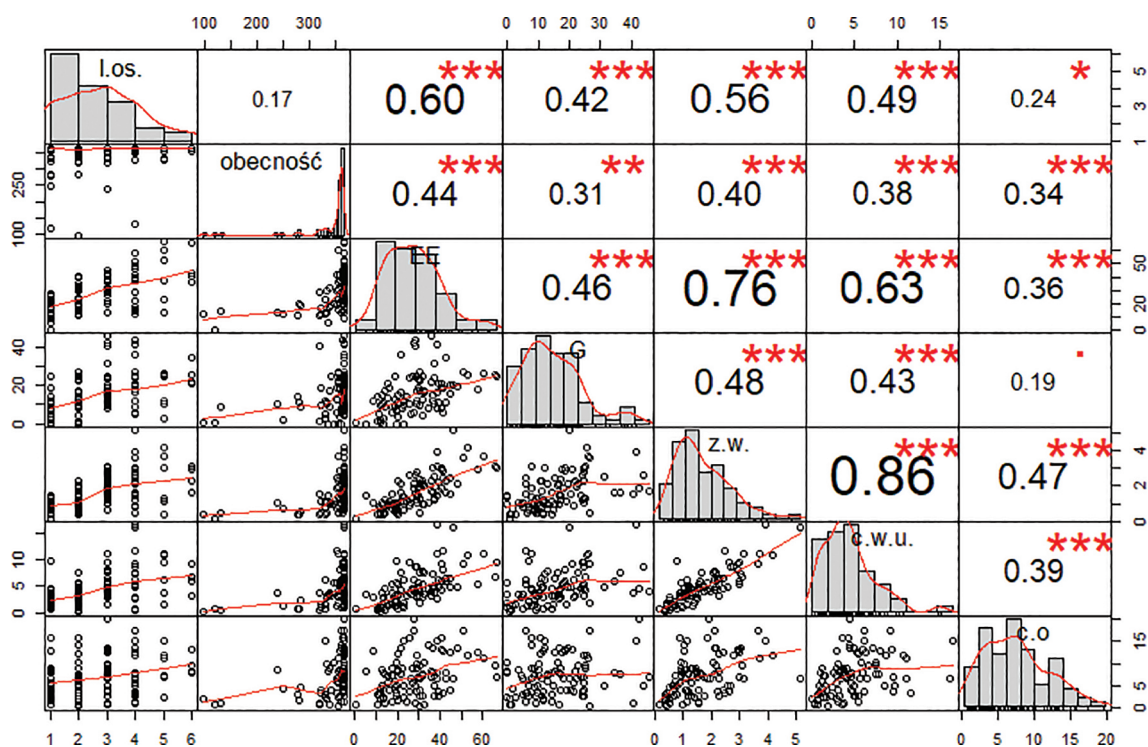
Typ	liczba mieszkań	$\overline{\Delta t_{CO,r}}$ [K]	$\overline{Q_{CO,r}}$	$B_{\Delta t_{CO}}$ [K/%]	długość sezonu grzewczego [d/rok]
<i>hQ</i>	15	16,4	30 %	-3,7	198
<i>mQ.s:A</i>	19	25,0	15 %	12,1	206
<i>mQ.s:m</i>	19	26,2	17 %	-26,3	193
<i>mQ.s:const</i>	26	14,1	14 %	-0,8	203
<i>lQ.s:t</i>	18	23,7	5 %	-0,5	91

Nie udało się przeprowadzić precyzyjnej klasyfikacji gospodarstw domowych pod względem użytkowania wentylacji naturalnej. Otrzymano wiele różnych modeli sterowania wentylacją przez użytkowników. Niektóre modele uwzględniają w swoich formułach dodatkowo wymianę ciepła z sąsiednimi lokalami i dynamikę cieplną masy termicznej obiektu. Wśród modeli zauważono dość ogólną tendencję nie przyswajania przez lokale znacznej części zysków ciepła z uwagi na wentylowanie w funkcji stosunku zysków ciepła do strat ciepła. W wielu przypadkach można również zauważyć, że modele wskazują na częste intensyfikowanie wentylacji w okresach cieplejszych czy w czasie wzrostu temperatury zewnętrznej lub promieniowania słonecznego. Natomiast w okresie spadku temperatury zewnętrznej lub promieniowania słonecznego wskazują na redukcję strumienia powietrza wentylacyjnego. Zaobserwowano również zależność niektórych modeli od prędkości wiatru.

## 5.2. Korelacja wykorzystania mediów – teza 2

Wykazano, że wykorzystanie poszczególnych mediów: zimnej wody (*ZW*), energii elektrycznej (*EE*), gazu (*G*), c.o., c.w.u., przez gospodarstwa domowe jest ze sobą istotnie skorelowane (rys. 4). Są to korelacje pozytywne o współczynniku  $r \geq 0,19$ . Największa korelacja występuje między wykorzystaniem *ZW* i c.w.u. a najmniejsza między c.o. i *G*. Wszystkie wykorzystania mediów są również pozytywnie skorelowane z liczebnością gospodarstwa domowego ( $r \geq 0,24$ ) i liczbą dni spędzonych w lokalu ( $r \geq 0,34$ ). Biorąc pod uwagę współczynniki korelacji między wyko-

rzystaniem poszczególnych mediów a liczebnością gospodarstwa domowego i czasem obecności, średnio silniejsza jest korelacja z liczebnością gospodarstwa domowego, tylko w przypadku wykorzystania ciepła na cele c.o. silniejsza jest korelacja z obecnością.



Rys. 4: Korelacja między zużyciem poszczególnych mediów przez gospodarstwa domowe, liczebnością gospodarstw domowych i liczbą dni, w trakcie których ludzie przebywają w danym lokalu w ciągu roku. Kolejność zmiennych na wykresie (wzdłuż przekątnej od lewego górnego rogu do prawego dolnego): liczba osób w gospodarstwie domowym; liczba dni, w których odnotowano obecność w lokalu; tygodniowe średnie zużycie energii elektrycznej; tygodniowe średnie zużycie gazu; tygodniowe średnie zużycie zimnej wody; roczne zużycie ciepła na cele ciepłej wody użytkowej; roczne zużycie ciepła na cele centralnego ogrzewania. Dokładny sposób czytania wykresu opisano w pracy

### 5.3. Rzeczywiste wykorzystanie ciepła – teza 3

W pracy porównano zmierzone wykorzystanie ciepła na cele c.o. z teoretycznym zapotrzebowaniem na ciepło (tab. 5) wyznaczonym wg metody miesięcznej, która jest zalecana do obliczania charakterystyki energetycznej budynków w polskich przepisach prawnych. W skali osiedla średnie wykorzystanie ciepła przez mieszkania jest około dwukrotnie większe niż wynika to z obliczeń teoretycznych. Natomiast wśród badanych mieszkań są takie, które wykorzystują zdecydowanie więcej ciepła niż wynika z obliczeń teoretycznych i takie, które wykorzystują zdecydowanie mniej.

Zyski słoneczne i wewnętrzne stanowią ok. 2/3 strumienia ciepła przekazywanego do budynków w trakcie teoretycznego sezonu grzewczego. Wykorzystanie ciepła przez poszczególne mieszkania na potrzeby c.o. jest skorelowane pozytywnie zarówno z parametrami charakterystyki energetycznej, jak i z zyskami ciepła. Prawdopodobnie istotnym czynnikiem wpływającym na nadmierne zużycie ciepła przez lokale mieszkalne jest niewykorzystanie zysków ciepła z uwagi na ich chwilową dużą intensywność, której mała pojemność cieplna lokali nie jest w stanie zakumulować, co skutkuje wzrostem temperatury i w skutek tego zwiększeniem strumienia powietrza wentylacyjnego ponad potrzeby higieniczne w celu wychłodzenia pomieszczeń. Wg

przeprowadzonych obliczeń między 80 a 90 % zysków ciepła jest odprowadzanych przez system wentylacyjny.

**Tab. 5:** Składowe bilansu cieplnego analizowanych budynków i całego osiedla wyznaczone z pomiarów ( $Q_{CO,p:r}$  – ciepło dostarczone przez instalację c.o.,  $Q_{sol:r}$  – zyski słoneczne) lub oszacowane ( $Q_{int:r}$  – wewnętrzne zyski ciepła) dla okresu korzystania z instalacji c.o. oraz wskaźniki odchyłki zmierzonego wykorzystania ciepła od teoretycznego ( $\Delta Q_{CO,p-tr,t:r}$  – różnica między  $Q_{CO,p:r}$  a teoretycznymi stratami ciepła przez przenikanie,  $Q_{CO,p:r}/Q_{CO,t:r}$  – stosunek  $Q_{CO,p:r}$  do teoretycznego zapotrzebowania na ciepło,  $Q_{CO,p:r}/Q_{CO,tp:r}$  – stosunek  $Q_{CO,p:r}$  do teoretycznego zapotrzebowania na ciepło przy założeniu oszacowanych wewnętrznych zysków ciepła –  $Q_{int:r}$ )

Obiekt	$Q_{int}$	$Q_{int:r}$	$Q_{sol:r}$	$Q_{CO,p:r}$	$Q_{CO,p-tr,t:r}$	$\frac{Q_{CO,p:r}}{Q_{CO,t:r}}$	$\frac{Q_{CO,p:r}}{Q_{CO,tp:r}}$
	[W/m <sup>2</sup> ]					—	
Osiedle	5,59/5,75	41,2	32,9	31,3	-8,8	1,99	2,14
SN3	5,51/5,80	41,4	30,8	32,5	-7,1	1,79	1,89
WE2	5,47/5,50	39,2	36,5	36,0	-7,0	2,37	2,73
WE3	5,66/5,59	40,1	31,1	28,0	-11,5	1,79	1,74
WE4	5,95/5,94	42,6	33,3	30,2	-9,2	2,09	2,26

Wartość  $Q_{int}$  wg schematu mediana/średnia

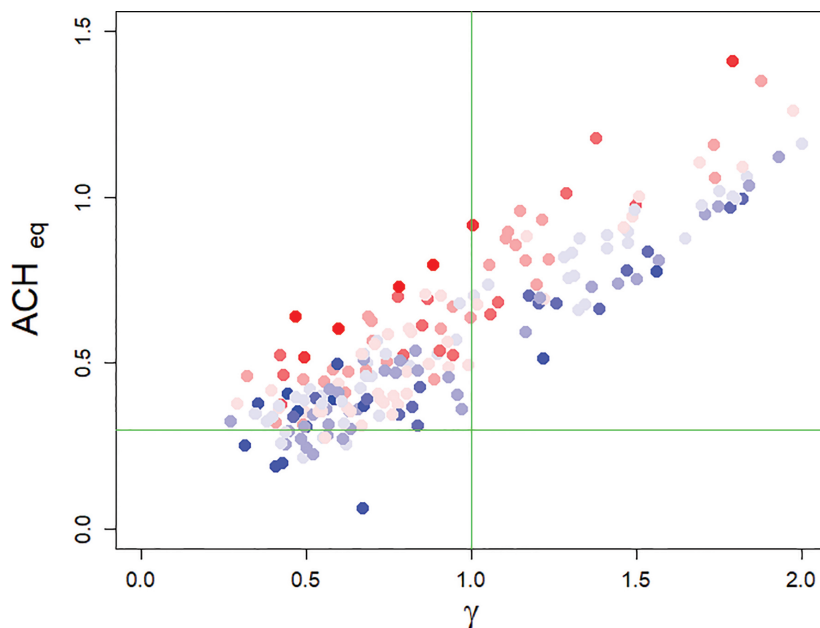
Obliczenia wartości teoretycznych były wykonywane w oparciu o projekt budynku, przy założeniu jego bardzo dobrego wykonania. Mostki ciepła i inne detale nie były szczegółowo uwzględniane z uwagi na brak narzędzi do realnej oceny stanu rzeczywistego obiektów. Dlatego wyznaczona różnica między obliczeniami teoretycznymi a rzeczywistymi może wynikać w pewnym stopniu z różnicy między wyznaczonym a rzeczywistym współczynnikiem przenoszenia ciepła przegród, a nie ze sposobu użytkowania lokali. Jednak ta uwaga dotyczy wszystkich lokali w podobny sposób, czyli nie tłumaczy zróżnicowania w wykorzystaniu ciepła na cele c.o. przez poszczególne lokale.

#### 5.4. Wentylacja naturalna – teza 4

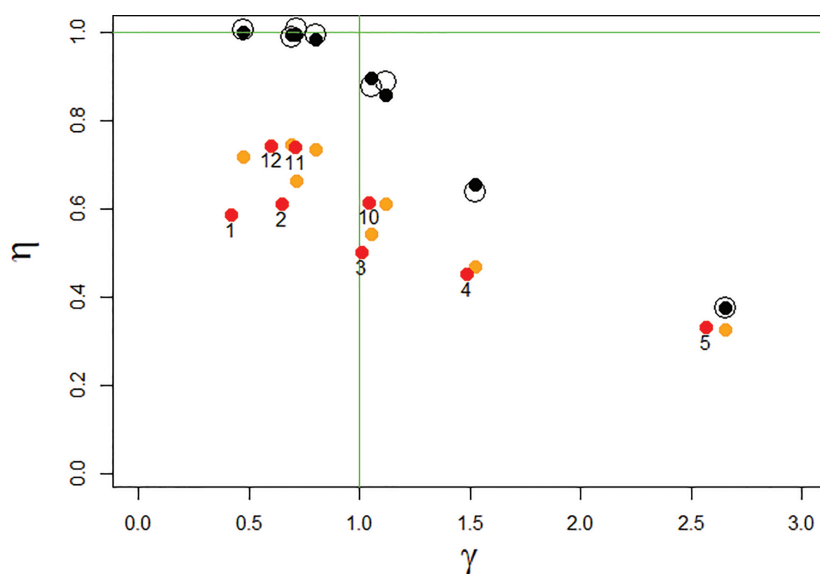
W oparciu o zaproponowane modele liniowe dowiedziono, że strumień powietrza wentylacyjnego jest silnie zależny od współczynnika  $\gamma$ , czyli stosunku zysków do strat ciepła (rys. 5). Ta zależność nie opisuje tylko sezonu letniego, ale jest istotną składową w okresie zimowym i przejściowym, przez co wpływa na wykorzystanie ciepła (intensyfikuje wentylację nawet o 1 h<sup>-1</sup>, czyli o ponad dwukrotność potrzeb higienicznych). Jest to zjawisko charakterystyczne dla budynków wielorodzinnych energooszczędnych, z dużym zaludnieniem. Jest dość powszechne w Polsce z uwagi na standard energooszczędny wznoszonych budynków, dużą liczbę budynków po termomodernizacji i jednocześnie jeden z największych współczynników przeludnienia mieszkań w Europie. Drugą istotną zmienną wpływającą na intensywność wentylacji jest różnica między bieżącą temperaturą zewnętrzną a jej średnią z minionych dni (w pracy zastosowano tygodniową średnią ruchomą): wentylacja jest intensyfikowana podczas wzrostu temperatury zewnętrznej i redukowana przy jej spadku (zmiana o ok. 0,2 h<sup>-1</sup>). To zjawisko powoduje niższą wentylację w okresie jesiennym niż wiosennym. Efekt opisanych zachowań można zaobserwować na wykresie przedstawiającym pomiarowy współczynnik wykorzystania zysków ciepła (rys. 6).

#### 5.5. Czynniki determinujące wykorzystanie ciepła na cele c.o. – teza 5

Na podstawie analizy statystycznej wykazano, że zróżnicowanie w wykorzystaniu ciepła na cele c.o., przez poszczególne mieszkania może być w 33% przypisane współczynnikowi przenoszenia ciepła przez przenikanie,  $H_{tr}$ , i typowi gospodarstwa domowego. Natomiast charakterystyka



**Rys. 5:** Ekwiwalentny strumień powietrza wentylacyjnego ( $ACH_{eq}$ ) w funkcji stosunku zysków do strat ciepła ( $\gamma$ ) wg danych agregowanych dla całego osiedla. Kolorami oznaczono wartość różnicy między temperaturą zewnętrzną a uśrednioną temperaturą zewnętrzną z minionego tygodnia: wartości dodatnie na czerwono, ujemne na niebiesko, a zerowe na biało. Zielone linie oznaczają:  $\gamma = 1$  (pionowa) i  $0,3 h^{-1}$  (pozioma) – wyznaczony minimalny strumień powietrza wentylacyjnego  $ACH_{nd}$



**Rys. 6:** Współczynnik wykorzystania zysków ciepła ( $\eta$ ) w funkcji stosunku zysków do strat ciepła ( $\gamma$ ) w porównaniu z symulacją dynamiczną dla jednego z analizowanych budynków (WE3). Punkty: czarne – wartości teoretyczne wg PN-EN 832, okręgi – obliczenia dynamiczne w TRNSYSie, pomarańczowe – obliczenia wg pomiarowego wykorzystania ciepła na cele c.o. i wartości wewnętrznych zysków ciepła zgodnych z obowiązującymi przepisami prawnymi, czerwone – obliczenia wg pomiarowego wykorzystania ciepła na cele c.o. i wartości wewnętrznych zysków wg szacunków własnych. Liczby przy punktach oznaczają numer miesiąca

użytkowania instalacji grzewczo-wentylacyjnej może wyjaśnić zróżnicowanie współczynnika wykorzystania ciepła na na cele c.o.,  $Q_{CO,p-tr,t;r}$ , w 21%. W oparciu o bardziej szczegółową analizę statystyczną można stwierdzić, że szczególnie istotny dla wykorzystania ciepła na cele

c.o. był współczynnik  $H_{tr}$  oraz gospodarstwa typu  $PS$ , czyli te z niskim poziomem obecności. Wśród czynników związanych z użytkowaniem instalacji grzewczo-wentylacyjnej najistotniejsza dla wartości  $Q_{CO,p-tr,tr}$  była regulacja grzejnikami w funkcji pory dnia, liczba ogrzewanych pomieszczeń, temperatura wewnętrzna preferowana oraz liczba wentylatorów wyciągowych za-instalowanych w mieszkaniu. Przy czym, lokale z większą liczbą wentylatorów charakteryzowały się niższą wartością współczynnika wykorzystania ciepła na cele c.o. (tab. 6).

**Tab. 6:** Charakterystyka użytkowania i użytkowników a zużycie ciepła (współczynnik  $Q_{CO,p-tr,tr}$ ) przez lokale w budynku wielorodzinnym: analiza wariancji jednoczynnikowej ( $ANOVA_1$ ) i wieloczynnikowej ( $ANOVA_m$ ). Z analiz statystycznych usuwano odpowiedzi, które występowały rzadziej niż 3 razy. Podkreślono wyniki, które wskazują na istnienie związku między zużyciem ciepła a daną zmienną.

Zmienna	$ANOVA_1$	$ANOVA_m$
Urządzenie regulacyjne	0,23	0,21
Stała nastawa TRV	0,72	0,73
Regulacja w funkcji obecności	0,59	0,37
Regulacja w funkcji pory dnia	<u>0,10</u>	0,11
Regulacja w funkcji temperatury	0,32	0,55
Liczba nieogrzewanych pomieszczeń	<u>0,08</u>	0,26
Temperatura wewnętrzna	0,20	0,19
Temperatura preferowana	<u>0,07</u>	0,70
Używanie wentylatorów	<u>0,05</u>	0,16
Ogrzewanie i wietrzenie	0,20	0,37
Zaparowanie okien	0,13	0,31
Szczelność okien	0,19	0,73
Występowanie pleśni	0,27	0,38
Oszczędność użytkowników	0,62	0,77
Status ekonomiczny użytkowników	0,76	0,92
Priorytet użytkowników	0,35	0,99

Na poparcie tej tezy warto przytoczyć wyniki klasyfikacji sposobów użytkowania instalacji grzewczej (tab. 4). One również obrazują znaczenie sposobu regulacji dla wykorzystania ciepła na cele c.o. Lokale o największym wykorzystaniu ciepła, choć nie wyróżniały się wyjątkowo długim sezonem grzewczym, to użytkowały grzejniki przy najwyższych mocach i to spowodowało ich wysoki wskaźnik wykorzystania ciepła.

## 6. Implikacje inżynierskie

Przedstawione wyniki mają dwie implikacje inżynierskie. Po pierwsze, pokazują proces niewykorzystania zysków ciepła przez obecnie najpopularniejsze rozwiązanie instalacji grzewczo-wentylacyjnych. Co więcej, nawet zyskujące na popularności rozwiązanie – czyli stosowanie bezpośredniego odzysku ciepła w rekuperatorach centrali wentylacyjnych – może nie stanowić rozwiązania przedstawionego problemu. Odzysk ciepła bezpośrednio do powietrza nawiewanego zakłada, że odzyskane ciepło z powietrza wywiewanego wraca od razu do budynku wraz z powietrzem nawiewanym. Jednak w przypadku chwilowo nadmiarowych zysków ciepła taki odzysk nie jest potrzebny i nie zostanie wykorzystany. Dochodzi wówczas do wzrostu temperatury wewnętrznej, co często powoduje otwarcie okna. Wówczas do budynku dochodzi dodatkowy strumień powietrza, mający na celu wychłodzenie danego pomieszczenia. Z punktu widzenia kryterium higienicznego ten strumień jest zbędny i zwiększa straty ciepła. W ten sposób część zysków ciepła jest tracona pomimo istnienia systemu odzysku. W tym kontekście należy

rozważyć inne rozwiązania w projektowaniu technicznego wyposażenia budynków, które pomogłyby w wykorzystaniu zysków ciepła. Być może, częściowym rozwiązaniem problemu byłoby zwiększenie strumienia powietrza wentylacyjnego czy niższe temperatury nawiewu. Wówczas system wentylacyjny miałby większy potencjał wykorzystania zysków ciepła. Z drugiej strony zwiększenie strumienia powietrza wentylacyjnego bez powodów higienicznych można traktować jako niepotrzebną stratę energii. Co więcej, wówczas należałoby odpowiednio rozplanować liczbę i lokalizację nawiewników oraz wywiewników, żeby zapobiec lokalnemu dyskomfortowi. Innym rozwiązaniem jest zmiana koncepcji wykorzystania ciepła z powietrza wentylacyjnego, np. na cele c.w.u. czy c.o.

Drugą implikacją inżynierską jest kwestia metod obliczeniowych. Badania pokazały, że metoda miesięczna błędnie oszacowała zapotrzebowanie na ciepło analizowanych lokali. Jednak, źródłem błędu nie jest wyłącznie natura tej metody, ale założenia odnośnie użytkowania instalacji grzewczo-wentylacyjnej. Również w symulacjach dynamicznych jest zauważalny problem urealnienia zachowań użytkowników. Dlatego, dla każdego z poziomów szczegółowości należałoby stworzyć model użytkowania. W przypadku metod dynamicznych będzie on funkcją zmiennych parametrów meteorologicznych, parametrów klimatu wewnętrznego czy przyjętego modelu komfortu. W przypadku metod stacjonarnych będą to np. informacje, jaka część zysków o danej wartości i charakterystyce czasowej jest przyswajana przy danych obciążeniach cieplnych. Ważnym będzie też wprowadzenie wariantów użytkowania (np. typowych harmonogramów zysków ciepła), które będą pomagały zbadać, czy budynek i jego techniczne wyposażenie są odporne na tego typu niepewności. Należy jednak podkreślić, że projektowanie budynków energooszczędnych wymaga połączenia wiedzy i doświadczenia architekta, inżyniera sanitarnego i automatyka. Dlatego, pierwsze udane realizacje będą skutkiem uwzględnienia w procesie projektowym analiz dynamicznych. Polegają one na przeprowadzaniu tzw. wirtualnych eksperymentów ułatwiających podejmowanie decyzji projektowych i integrację TWB z budynkiem, w celu zapewnienia efektywnego działania całości.

## 7. Propozycje dalszych prac

Wnioski sformułowane w niniejszej pracy są dość śmiałe i pokazują, że wykorzystanie ciepła przez mieszkania (bez uwzględnienia części wspólnych i piwnic) na typowym polskim osiedlu jest około dwukrotnie wyższe niż wynikałoby to z ich charakterystyki energetycznej. Taki stan rzeczy należałoby potwierdzić na innych obiektach tego typu i zastanowić się, czy są inne czynniki, które mogły wpłynąć na zaprezentowane wyniki. Na przykład, zastanawiający jest fakt, że wartości promieniowania słonecznego są widocznie wyższe w badanym roku niż w typowym roku meteorologicznym. Może to być zarówno wyjątkowość badanego roku, ogólna tendencja związana ze zmianami klimatu, a także w jakimś stopniu niedoskonałość pomiaru.

Obliczenie zapotrzebowania na świeże powietrze oparte było na analizie potrzeb fizjologicznych człowieka. Otrzymane wartości korespondowały z wartościami rekomendowanymi w polskich regulacjach. Możliwe jednak, że dla jakości powietrza w lokalach mieszkalnych są istotne również inne źródła zanieczyszczeń, których strumień powietrza higienicznego nie neutralizuje. Aby to zweryfikować potrzebne byłyby analizy chociażby procesu przygotowania posiłków czy pomiary stężeń innych gazów odpowiedzialnych za jakość powietrza w lokalach mieszkalnych.

Analiza przedstawiona w pracy jest oparta na danych agregowanych rocznie lub danych dobowych. Dlatego dynamika zachowań użytkowników jest wciąż ukryta i nie sposób zobrazować dokładnie procesu tracenia zysków ciepła, np. w rozdzielczości godzinowej. Można by temu zaradzić przez bardziej dokładne pomiary wykorzystania ciepła, chociażby przez zmianę sposobu rejestracji danych w licznikach ciepła. Wg domyślnych ustawień liczniki zapisują przyrost wykorzystania ciepła o każdą 0,01 GJ, co nie pozwala na analizę godzinową, a często nawet



dokładną analizę dobową. Zmiana rozdzielczości zapisu danych jest problemem pojemności karty pamięci licznika, a nie dokładności licznika. Drugim rozwiązaniem, które mogłoby pomóc w weryfikacji przedstawionych wniosków, byłaby implementacja opracowanych modeli do programu do dynamicznej analizy energetycznej budynków, typu TRNSYS i szukanie potwierdzenia powyższych wniosków w wynikach symulacji.

Być może nadmierne wykorzystanie ciepła jest jeszcze większe niż wynika z przeprowadzonych pomiarów. Nie odnotowano tego z uwagi na dokładność pomiaru liczników ciepła. Jak zauważono w pracy wykorzystane liczniki ciepła nie odnotowywały mniejszych przepływów przez średnie grzejniki i wszystkich przepływów przez najmniejsze grzejniki instalacji. Należałoby to zweryfikować w oparciu o pomiary wykorzystanie ciepła przez cały budynek oraz klatki schodowe. Niestety, tego typu opomiarowanie instalacji nie jest praktykowane, dlatego wymagałoby to obiektu specjalnie przystosowanego do badań.

Dopracowane modele użytkowania ostatecznie powinny posłużyć do zmniejszenia rozbieżności między wynikami symulacji a pomiarami w eksploatowanych budynkach. Natomiast w kolejnym korku powinny zostać zaprzęgnięte do symulacyjnej weryfikacji nowych rozwiązań inżynierskich, które umożliwiłyby zminimalizowanie przedstawionych w pracy strat ciepła.

### Dotychczas opublikowane prace

- [1] M. Z. Pomianowski, F. Khalegi, G. Domarks, J. Taminskas, K. Bandurski, K. K. Madsen, S. Gedsø i R. L. Jensen. „Experimental Investigation of the Influence of Obstacle in the Room on Passive Night-Time Cooling using Displacement Ventilation”. W: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics: NSB 2011*. Red. J. Vinha, J. Piironen i K. Salminen. 2011, s. 499–506.
- [2] K. Bandurski i H. Koczyk. „Wpływ rodzaju wentylacji na zużycie energii przez budynek i komfort cieplny mieszkańców”. *Czasopismo Techniczne. Budownictwo 2-B* (2012), s. 213–221.
- [3] K. Bandurski. „Wybrane programy do symulacji energetycznej budynków”. W: *Zintegrowany system zmniejszenia eksploatacyjnej energochłonności budynków. Zadanie badawcze nr 2: Opracowanie optymalnych energetycznie typowych rozwiązań strukturalno-materiałowych i instalacyjnych budynków. Tom I-B*. Red. S. Mańkowski i E. Szczechowiak. Instytut Techniki Budowlanej & Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2013, s. 73–85.
- [4] K. Bandurski, M. Basińska i H. Koczyk. „Influence of the Heating and Ventilation Systems Cooperation, in the Dwelling, on Energy Demand and Occupants Thermal Comfort”. W: *Proceedings of CLIMA 2013 : 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC Energy efficient, smart and healthy buildings*. 2013, s. 370-1–370-10.
- [5] K. Bandurski i H. Koczyk. „Symulacyjna analiza parametrów komfortu cieplnego i zapotrzebowania na energię wybranych rozwiązań wentylacji mieszkania. Część. 1. Założenia modelu”. *Cieplownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 44* (2013), s. 70–74.
- [6] K. Bandurski i H. Koczyk. „Symulacyjna analiza parametrów komfortu cieplnego i zapotrzebowania na energię wybranych rozwiązań wentylacji mieszkania. Część. 2. Wyniki symulacji”. *Cieplownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 44*. 122-125 (2013).
- [7] E. Szczechowiak, H. Koczyk, T. Mróz, M. Porowski, G. Krzyżaniak, M. Basińska, A. Górka, B. Antoniewicz, R. Górzeński, D. Kaczorek, M. Szymański, K. Bandurski, M. Klimas i K. Ratajczak. *Zintegrowany system zmniejszenia eksploatacyjnej energochłonności budynków. Zadanie badawcze nr 2: Opracowanie optymalnych energetycznie typowych rozwiązań strukturalno-materiałowych i instalacyjnych budynków. Tom III-A*. Red. E. Szczechowiak. Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2013, s. 1–906.
- [8] K. Bandurski, H. Koczyk i T. Mielczyński. „Thermal comfort and energy consumption of the ecological house – simulation analysis of DomTrzon”. *Czasopismo Techniczne 3-B* (2014), s. 11–22. doi: 10.4467/2353737XCT.14.216.3304.

- [9] K. Bandurski i H. Koczyk. „Zachowanie użytkowników współczesnych budynków mieszkalnych – znaczenie i modelowanie”. W: *2014 air & heat energy in buildings*. 2014, s. 337–342.
- [10] Andrzej Górka, R. Górzeński, M. Szymański i K. Bandurski. „Multivariant measurements of airtightness of multi-family building”. W: *Proceedings of 36th AIVC Conference Effective ventilation in high performance buildings*. 2015.
- [11] K. Bandurski, Andrzej Górka, R. Górzeński i M. Szymański. „Wariantowe pomiary szczelności powietrznej budynku wielorodzinnego”. W: *I Ogólnopolska Konferencja Air-Tight'15*. 2015.
- [12] K. Bandurski i H. Koczyk. „IEA EBC Annex 66: definition and simulation of occupant behavior in buildings” – aktualne metody modelowania zachowania użytkowników budynku”. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 46 (2015), s. 63–68. DOI: 10.151.99/9.2015.2.5.
- [13] K. Bandurski i H. Koczyk. „Wpływ losowych zysków wewnętrznych w budynkach wielorodzinnych na zapotrzebowanie na energię w ciągu roku”. *Instal* 12 (2015), s. 55–61.
- [14] K. Bandurski i H. Koczyk. „Concept of occupants' behaviors model to test residential building heating/cooling and ventilation system (literature survey)”. W: *International Symposium & IEA EBC Annex 66 3rd Expert Meeting*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.13220.07047.
- [15] Andrzej Górka, K. Bandurski i E. Szczechowiak. „Budynki Efektywne Energetycznie – Zintegrowane Metody Symulacji i Projektowania”. W: *Innowacyjne wyzwania techniki budowlanej: 63 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2017*. 2017, s. 177–198.
- [16] K. Bandurski, M. Hamerla, J. Szulc i H. Koczyk. „The influence of multifamily apartment building occupants on energy and water consumption – the preliminary results of monitoring and survey campaign”. *E3S Web of Conferences* 22 (2017). Red. B. Kaźmierczak, M. Kutylowska, K. Piekarska, H. Jouhara i J. Danielewicz, s. 00010. DOI: 10.1051/e3sconf/20172200010. (Data dostępu: 2021-01-23).
- [17] K. Pałazyńska, K. Bandurski i M. Porowski. „Energy demand and thermal comfort of HVAC systems with thermally activated building systems as a function of user profile”. *E3S Web of Conferences* 22 (2017). DOI: 10.1051/e3sconf/20172200130.
- [18] B. Radomski, K. Bandurski i T. M. Mróz. „Rola parametrów komfortu klimatycznego w budynkach pasywnych”. *Instal* 10 (2017), s. 27–33.
- [19] K. Bandurski. „Dom jako narzędzie osiągnięcia komfortu. Wykorzystanie metody skupionych pojemności cieplnych do dynamicznej analizy strategii zarządzania energią w budynkach”. W: *Profesor Halina Koczyk: jubileusz XLV-lecia pracy naukowej i dydaktycznej*. 2018, s. 129–143.
- [20] K. Bandurski. *Symulacja dynamiczna reprezentatywnych pomieszczeń wraz z systemem stropów grzewczo-chłodzących (TABS) w budynku Wydziału Architektury i Wydziału Inżynierii Zarządzania (WAWIZ)*. Sprawozdanie techniczne. Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2018, s. 1–54.
- [21] E. Szczechowiak, R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, K. Bandurski, J. Sinacka i A. Michalak. *Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości termoregulacyjne tynku cementowo-wapiennego*. Sprawozdanie techniczne. Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2018, s. 1–19.
- [22] E. Szczechowiak, R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, K. Bandurski, J. Sinacka i A. Michalak. *Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości termoregulacyjne tynku gipsowego*. Sprawozdanie techniczne. Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2018, s. 1–19.
- [23] E. Szczechowiak, R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, M. Michalkiewicz, K. Bandurski i J. Sinacka. *Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości antykondensacyjne farby*

- i jej odporność na agresję mikrobiologiczną*. Sprawozdanie techniczne. Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2018, s. 1–30.
- [24] E. Szczechowiak, R. Górzeński, A. Górka, M. Gaczek, M. Michalkiewicz, K. Bandurski i J. Sinacka. *Badania specjalistyczne sprawdzające właściwości antykondensacyjne tynku i jego odporność na agresję mikrobiologiczną*. Sprawozdanie techniczne. Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, 2018, s. 1–30.
- [25] K. Bandurski, H. Bandurska, E. Kazimierczak-Grygiel i H. Koczyk. „The green structure for outdoor places in dry, hot regions and seasons-providing human thermal comfort in sustainable cities”. *Energies* 13.11 (2020). doi: 10.3390/en13112755.
- [26] C. Chen, T. Hong, G. de Rubens, S. Yilmaz, K. Bandurski, Z. Bélafi, M. D. Simone, M. V. Bavaresco, Y. Wang, P. Liu, V. M. Barthelmes, J. Adams, S. D’Oca i Ł. Przybylski. „Culture, conformity, and carbon? A multi-country analysis of heating and cooling practices in office buildings”. *Energy Research and Social Science* 61 (2020), s. 101344. doi: 10.1016/j.erss.2019.101344.
- [27] C. F. Chen, S. Yilmaz, A. L. Pisello, M. De Simone, A. Kim, T. Hong, K. Bandurski, M. V. Bavaresco, P. L. Liu i Y. Zhu. „The impacts of building characteristics, social psychological and cultural factors on indoor environment quality productivity belief”. *Building and Environment* 185.May (2020), s. 107189. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107189.