

Wpływ zmiany temperatury pomieszczeń na zużycie energii i gazu w budynku jednorodzinnym o różnym standardzie energetycznym w warunkach klimatycznych Polski

Influence of changes in room temperature on energy and gas consumption in a single-family building with different energy standards in Polish climatic conditions

Piotr Kowalski, Wojciech Cepiński, Paweł Szałański^{*}

Słowa kluczowe: kryzys energetyczny, ogrzewanie, oszczędzanie energii, oszczędzanie gazu, PN-EN ISO 13790

Streszczenie

W artykule przeanalizowano wpływ zmiany temperatury w pomieszczeniach na zużycie energii i gazu ziemnego, w typowym budynku jednorodzinnym dla różnych na przestrzeni lat 1964 – 2021 standardów energetycznych. Analizowano obniżenie temperatury powietrza w pomieszczeniach z 20°C do 18°C i 16°C oraz podwyższenia do 22°C. Analizy przeprowadzono dla pięciu lokalizacji budynku (Koszalin, Wrocław, Warszawa, Białystok i Suwałki) w różnych strefach klimatycznych Polski dla okresu zimnego. Do analiz wykorzystano i porównano metodę miesięczną i godzinową obliczania zapotrzebowania na energię do ogrzewania wg PN-EN ISO 13790, z uwzględnieniem polskich przepisów dot. charakterystyki energetycznej budynków. Przedstawiono wpływ rodzaju gazowego źródła ciepła na oszczędności gazu. Wykazano, że w zależności od standardu energetycznego budynku i jego lokalizacji, zmiana zapotrzebowania na energię do ogrzewania, przy obniżeniu temperatury o 1°C, może wahać się w zakresie od 5,4 %/°C do 19,9 %/°C, przy czym spadek temperatury o 1 lub 2°C w pomieszczeniu można zrównoważyć, nosząc dodatkową odzież.

Keywords: energy crisis, heating, energy saving, gas saving, PN-EN ISO 13790

Abstract

The paper analyzes the effect of changing indoor temperature on energy and natural gas consumption, in a typical single-family building for different energy standards between 1964 and 2021. Indoor air temperature reductions from 20°C to 18°C and 16°C and increases to 22°C were analyzed. The analyses were carried out for five building locations (Koszalin, Wrocław, Warsaw, Białystok and Suwałki) in different climatic zones of Poland for the cold period. For the analyses, the monthly and hourly methods of calculating energy demand for heating according to PN-EN ISO 13790 were used and compared, taking into account Polish regulations on the energy performance of buildings. The effect of the type of gas heat source on gas savings was presented. It has been shown that, depending on the energy standard of the building and its location, the change in energy demand for heating can range from 5.4%/°C to 19.9%/°C, where a 1 or 2°C decrease can be compensated by wearing additional clothing.

1. WSTĘP

W sytuacji zaistniałego kryzysu energetycznego [26, 6], spowodowanego wojną na Ukrainie, polityką energetyczną Rosji oraz uzależnieniem Polski i Europy od surowców energetycznych, zaistniała konieczność by zacząć w sposób szczególny i ponadstandardowy oszczędzać energię i paliwa, w tym gaz. Działania takie można w możliwie szybki i łatwy sposób wykonać w budynkach mieszkalnych, czego przykład zaprezentowano w artykule.

W pracy przeanalizowano wpływ wprowadzenia prostych zmian w funkcjonowaniu instalacji na możliwe ograniczenie konsumpcji gazu ziemnego, na przykładzie budynku jednorodzinnego dla różnych źródeł ciepła zasilanych paliwem gazowym. Analizowane zmiany polegały na zmianie przez mieszkańców nastaw temperatury w pomieszczeniach.

1.1 Zużycie energii w sektorze mieszkaniowym w Polsce i UE

Według raportu GUS „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2021 roku” [4] udział gospodarstw domowych w krajowym zużyciu energii wynosił 20,2%. Zużycie na mieszkańca wynosiło 24,6 GJ, przy średniej europejskiej 24,5 GJ – 65,1% tej energii zużywane było na ogrzewanie pomieszczeń i wartość ta spadła o 3,7% w stosunku do 2012 r.

Dominującym nośnikiem ciepła do ogrzewania pomieszczeń w 2021 r. było ogrzewanie sieciowe (52,2% w 2021 r., wzrost o 10,7% w stosunku do 2012 r.). Udział gazu ziemnego w 2021 r. wynosił 14,6% i wzrósł o 5,8% w stosunku do 2012 roku. W tym okresie udział pomp ciepła również wzrósł wielokrotnie, z 0,05% do 0,69%. Gwałtownie spadł natomiast udział węgla kamiennego

^{*} Piotr Kowalski, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, ul. C.K. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, mail: piotr.kowalski@pwr.edu.pl, ORCID: 0000-0003-4423-9884
Wojciech Cepiński, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, ul. C.K. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, mail: wojciech.cepinski@pwr.edu.pl, ORCID: 0000-0003-4294-0431
Paweł Szałański, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, ul. C.K. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, mail: pawel.szalanski@pwr.edu.pl, ORCID: 0000-0001-9263-3486

i drewna opałowego, odpowiednio z 40,8% do 20,9% i z 40,0% do 20,7% [5].

Typowe wiejskie gospodarstwo domowe to dom jednorodzinny ogrzewany paliwem stałym (21,6% ogółu gospodarstw domowych i 66,8% gospodarstw wiejskich w 2021 r.), natomiast typowe miejskie gospodarstwo domowe to gospodarstwo w budynku wielorodzinnym. ogrzewane ciepłem z sieci (49,1% gospodarstw domowych ogółem i 72,6% gospodarstw miejskich w 2021 r.) [4].

Z przedstawionych danych statystycznych GUS wynika, że udział sektora mieszkaniowego w zużyciu energii w Polsce jest istotny. Istnieje zatem duży potencjał oszczędności energii we wskazanym obszarze, który przełoży się na bilans energetyczny kraju.

1.2 Struktura źródeł ciepła w budynkach wg Centralnej Ewidencji Emisyjności Budynków (CEEB)

Z danych CEEB [2] (stan na kwiecień 2023 r.), otrzymanych na podstawie złożonych deklaracji o źródłach ciepła w budynkach mieszkalnych i niemieszkalnych (zgłoszono ponad 9 mln budynków) wynika, że około 55% spośród nich zużywa paliwo stałe (węgiel, drewno, pellet lub inny rodzaj biomasy), 24% gaz ziemny, 12% prąd, 3% to miejska sieć ciepłownicza, a około 1% to kotły olejowe. Pomp ciepła w systemie stanowią około 2%. Kolektory słoneczne do przygotowywania ciepłej wody użytkowej lub z funkcją wspomaganą ogrzewania to około 3% instalacji.

Z przedstawionych danych ewidencyjnych CEEB wynika, że udział gazowych źródeł ciepła w zużyciu energii w Polsce jest istotny. Istnieje zatem duży potencjał w oszczędności energii we wskazanym obszarze, który przełoży się na bilans energetyczny kraju.

1.3 Cel badawczy

Oprócz działań długofalowych, takich jak budowa budynków energooszczędnych i nowoczesnych instalacji grzewczych oraz stosowanie obniżenia temperatury poza okresem użytkowania pomieszczeń, jako odpowiedź na kryzysy energetyczne możliwe są działania, polegające na eksploatacji pomieszczeń poza typowymi parametrami komfortu cieplnego. Rozwiązaniem, które może przynieść natychmiastowe efekty, jest zmiana sposobu użytkowania budynków i ich instalacji, poprzez zmianę parametrów mikroklimatu na wartości spoza standardowego zakresu, ale nadal akceptowalne przez mieszkańców, co skutkuje zmniejszeniem zużycia energii w budynku [6–8]. Analiza przeprowadzona w [1] wykazała znaczne zmniejszenie zapotrzebowania budynku na energię cieplną, w przypadku obniżenia temperatury powietrza wewnętrznego nawet o 1 K.

Wpływ obniżenia temperatury powietrza w pomieszczeniach, na zmniejszenie zużycia energii cieplnej przez budynki o różnym stopniu zaizolowania, wynikającym ze zmieniających się na przestrzeni lat przepisów oraz stopnia ich termomodernizacji, w różnych warunkach klimatycznych Polski oraz w polskich ramach prawnych, został przedstawiony, dla przykładowego budynku wielorodzinnego [24]. Celem niniejszej pracy jest analiza możliwości zmniejszenia zużycia energii cieplnej przez budynki, w wyniku zmian temperatury eksploatacyjnej pomieszczeń dla budownictwa jednorodzinnego. Zostaną ujawnione różnice wynikające z ogrzewania budynku różnymi gazowymi źródłami ciepła.

Ponadto zostaną porównane wyniki obliczeń zmniejszenia zapotrzebowania na energię i gaz do ogrzewania, uzyskiwanych metodami miesięczną i godzinową, ze stosowanej w Polsce normy PN-EN ISO 13790 [18], co ma również poznawcze znaczenie w kontekście wyboru metod obliczeń zapotrzebowania na energię.

2. Materiały i metody

2.1 Możliwości obniżenia temperatury powietrza w pomieszczeniu

Na etapie projektowania zakładane są podstawowe parametry powietrza w pomieszczeniach. Wartości temperatury obliczeniowej w pomieszczeniach podane są w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury

z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [14].

Typowe wartości stosowane w budownictwie mieszkaniowym to:

- 20°C – pomieszczenia przeznaczone na stały pobyt ludzi bez okryć zewnętrznych, niewykonywujących w sposób ciągły pracy fizycznej (pokoje mieszkalne, przedpokoje, kuchnie),
- 24°C – pomieszczenia przeznaczone do rozbierania i na pobyt ludzi bez odzieży (łazienki).

Jednak, eksploatacyjne parametry powietrza mogą różnić się od założeń projektowych. Dodatkowo mogą być realizowane nocne obniżenia temperatury, obniżenia temperatury podczas nieobecności mieszkańców. Rozporządzenie [14] określa, że regulatory dopływu ciepła powinny umożliwiać użytkownikom uzyskanie temperatury niższej niż projektowa temperatura powietrza wewnętrznego, ale nie niższej niż 16°C w pomieszczeniach o projektowej temperaturze powietrza wewnętrznego 20°C i wyższej.

W [25] przedstawiono wyniki ciągłych pomiarów temperatury powietrza wewnętrznego, zarejestrowanych w okresie od 14 stycznia 2020 r. do 8 marca 2020 r. w osiemnastu mieszkaniach ogrzewanych różnymi źródłami ciepła i nośnikami energii. Przedstawione dane wykazały, że temperatury eksploatacyjne, utrzymywane przez użytkowników, są często niższe niż typowy zakres komfortu cieplnego. Przyczyny takich zachowań użytkowników mogą być różne i mogą wynikać z obniżenia kosztów eksploatacyjnych lub ograniczenia nadmiernego zużycia energii, ubóstwa energetycznego lub ograniczeń technicznych. W niektórych mieszkaniach zaobserwowano spadki temperatury powietrza wewnętrznego do średniej wartości około 16°C, a najniższa odnotowana temperatura w łazience wyniosła 13°C. Jednak najwyższe średnie wartości temperatury powietrza w badanych mieszkaniach wynosiły około 22°C.

Biorąc powyższe pod uwagę, do przeprowadzonych analiz, dla pomieszczeń o wymaganej temperaturze obliczeniowej 22°C, przyjęto dwa warianty obniżenia temperatury do 18°C i 16°C oraz jeden wariant ze zwiększoną temperaturą 22°C.

2.2 Obniżenia temperatury wewnętrznej a komfort cieplny

Ocenę możliwości obniżenia temperatury powietrza w pomieszczeniu, ze względu na odczucia komfortu cieplnego użytkowników, daje model komfortu cieplnego stworzony przez P.O. Fanger [3] opisany w normie PN-EN ISO 7730 [20]. Za jego pomocą można określić wpływ temperatury powietrza w pomieszczeniu na parametry komfortu cieplnego PMV (Predicted Mean Vote) i PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) dla założonej temperatury promieniowania o 1°C niższej od temperatury powietrza w pomieszczeniu, wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu 40% oraz prędkości powietrza w pomieszczeniu 0,1 m/s. Według publikacji [24], w tych warunkach oraz przy stałej izolacyjności cieplnej zestawu odzieży użytkowników 1 clo (spłdy, koszula, spodnie, kurtka, skarpety, buty – standardowy zestaw wewnętrznej odzieży zimowej) i ich stałej aktywności 1,2 met (aktywność w pozycji siedzącej, miejsce zamieszkania) obniżenie temperatury powietrza z 20°C o 1°C do 19°C powoduje obniżenie kategorii komfortu z kategorii B do C, a dalsze obniżenia powodują, że również kategoria C nie zostaje zachowana. W publikacji [24] przeanalizowano również możliwość utrzymania kategorii komfortu przy obniżeniu temperatury, poprzez zwiększenie izolacyjności cieplnej ubioru. Kategorię komfortu B, można utrzymać, przy obniżeniu o 1°C, poprzez zwiększenie izolacyjności ubioru o 0,14 clo (dla kamizelki bez rękawów wynosi 0,12 clo). Natomiast przy obniżeniu do 18°C potrzebne jest zwiększenie o 0,28 clo (dla swetra wynosi 0,28 clo) dla zachowania kategorii B oraz o 0,13 przy akceptacji kategorii C. Utrzymanie kategorii B przy obniżeniu do 16°C wymagałoby już zwiększenia o 0,55 clo; czyli przykładowo płaszcza, o 0,60 clo, na standardowy zestaw wewnętrznej odzieży zimowej. Gdyby, przy takim obniżeniu, dopuścić obniżenie kategorii do C wystarczy dodatkowe 0,38 (dla swetra wynosi 0,28 clo oraz dla kalesonów 0,10).

Przedstawione dane potwierdzają, że przyjęty do obliczeń zakres obniżenia temperatury jest akceptowalny, a obniżanie temperatury poniżej 16°C, w pomieszczeniach o temperaturze obliczeniowej 20°C powodowałoby znaczne trudności ze skompensowaniem odczuć komfortu cieplnego.

2.3 Metody obliczeniowe zapotrzebowania na energię

Analizę wpływu eksploatacyjnej temperatury powietrza w budynku, na zmianę zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji, przeprowadzono w oparciu o dwie metody: prostą metodę godzinową (ozn. A) oraz miesięczną (ozn. B), obie według normy PN-EN ISO 13790 [18], uzupełnione metodami krajowymi [11]. Dla analizowanego budynku zapotrzebowanie na energię przedstawiane jest na poziomach energii użytkowej i końcowej, przy zmienności temperatury regulowanej, standardu energetycznego i lokalizacji budynku oraz jego systemu grzewczego. Rodzaj systemu grzewczego ma wpływ na poziom energii końcowej, na podstawie której wyznaczane jest zapotrzebowanie na gaz.

Metody użyte w pracy są powszechnie stosowane do obliczeń energetycznych. Wykazują one dobre zbliżenie z metodami numerycznymi. Ze względu, na to, że obie analizowane metody: miesięczna i godzinowa, dają różniące się od siebie wyniki [7,9], w pracy porównano trendy uzyskiwane na podstawie obu tych metod i przedstawiono szerokie spektrum możliwych do uzyskania tymi metodami wyników.

2.3.1 Metoda miesięczna

Zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania stanowi bilans strat i zysków ciepła wyznaczany w każdym miesiącu [18]:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{H,nd}$ – zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania, kWh/mies.

$Q_{H,ht}$ – całkowite przeniesienie ciepła dla trybu ogrzewania, kWh/mies.

$Q_{H,gn}$ – zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania, kWh/mies.

$\eta_{H,gn}$ – bezwymiarowy czynnik wykorzystania zysków ciepła, –

Energia w okresie roku jest sumą miesięcznych dodatnich bilansów energii. Straty ciepła są sumą strat ciepła związanych z przenikaniem Q_{tr} i wentylacją Q_{ve} , natomiast zyski ciepła są sumą wewnętrznych zysków ciepła Q_{int} i od promieniowania słonecznego przez elementy przezroczyste Q_{sol} . Składniki bilansu ciepła wyznaczono wg metod krajowych [11].

Zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania [11]

$$Q_{k,H} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,g} \cdot \eta_{H,e} \cdot \eta_{H,d} \cdot \eta_{H,s}} \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{k,H}$ – zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania, kWh/rok

$\eta_{H,g}$ – średnia sezonowa sprawność wytwarzania ciepła z nośnika energii lub energii dostarczanych do źródła ciepła,

$\eta_{H,e}$ – średnia sezonowa sprawność regulacji i wykorzystania ciepła w przestrzeni ogrzewanej,

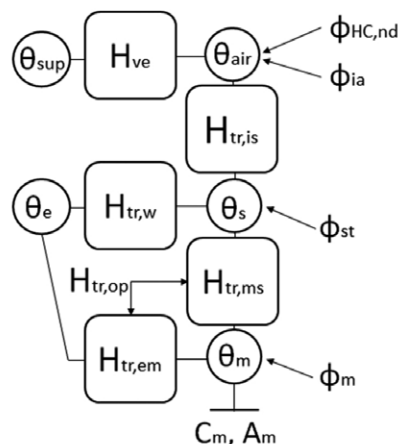
$\eta_{H,d}$ – średnia sezonowa sprawność przesyłu ciepła ze źródła ciepła do przestrzeni ogrzewanej,

$\eta_{H,s}$ – średnia sezonowa sprawność akumulacji ciepła w elementach pojemnościowych systemu ogrzewania.

Przy czym sprawności systemów technicznych charakteryzują, w ujęciu rocznym, straty ciepła z nimi związane i zostały podane w pkt. 2.4.3.

2.3.2 Prosta metoda godzinowa

Prosta metoda godzinowa [18] jest uproszczeniem modeli dynamicznych, odzwierciedlonym w modelu oporowo-pojemnościowym (SRIC), którego schemat przedstawiono na rys. 1. Przedstawia on bilans energii powiązany ze stratami ciepła, przez przenikanie (H_{tr}) oraz wentylację (H_{ve}), z uwzględnieniem akumulacji ciepła (C_m) oraz strumieni ciepła (Φ). Wymiana ciepła następuje między temperaturami: θ_{air} – powietrza zewnętrznego, θ_{sup} – powietrza nawiewanego z systemu wentylacji, θ_s – powierzchni, θ_m – powietrza i promieniowania, θ_e – powietrza zewnętrznego.



Rys. 1. Algorytm prostej metody godzinowej

Fig.1. Algorithm of simple hourly method

Zapotrzebowanie na energię obliczane jest godzinowo, na podstawie wymaganych mocy grzewczych, do utrzymania zadanej nastawy temperatury powietrza w węźle obliczeniowym θ_{air} . Przy czym, w wykonanej analizie, założono, że system grzewczy zawsze ma wystarczającą moc do zaspokojenia zapotrzebowania na moc wynikającego z obliczeń. Tym samym obliczeniowa temperatura wewnętrzna θ_{air} ma możliwość osiągnięcia nastawy $\theta_{int,H,set}$. Zapotrzebowanie na moc dla każdej godziny oblicza się na podstawie zerowej i równej 10 W/m² mocy grzewczej i odpowiadającym im temperaturom powietrza $\theta_{air,0}$ i $\theta_{air,10}$ wg poniższego równania.

$$Q_{HC,nd,un} = Q_{H,nd10} \cdot \frac{(\theta_{air,set} - \theta_{air,0})}{(\theta_{air,10} - \theta_{air,0})} \quad (3)$$

W odróżnieniu od zapisów normy [18], sposób obliczenia strumieni ciepła od promieniowania słonecznego Φ_{sol} i Φ_{int} oparto na wytycznych krajowych [11].

Pełny zestaw równań zawiera norma [18] oraz publikacje [10, 13, 15]. Ze względu na jedną strefę obliczeniową, w obliczeniach nie uwzględniano sprzężenia cieplnego między strefami. Podane równania pozwalają określić temperatury dla węzłów obliczeniowych, zgodnie z rys. 1, przy czym indeks dolny t oznacza wartość w czasie chwilowym, a $t-1$ w poprzednim kroku czasowym. Zakłada się godzinowy krok czasowy.

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1} \cdot \left[\frac{C_m}{3600} - 0,5 \cdot (H_{tr,3} + H_{tr,em}) \right] + \Phi_{m,tot}}{\frac{C_m}{3600} + 0,5 \cdot (H_{tr,3} + H_{tr,em})} \quad (4)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}}{2} \quad (5)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr,ms} \cdot \theta_m + \Phi_{st} + H_{tr,w} \cdot \theta_e + H_{tr,1} \cdot \left(\theta_{sup} + \frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (6)$$

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr,is} \cdot \theta_s + H_{ve} \cdot \theta_{sup} + \phi_{ia} + \phi_{HC,nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (7)$$

Gdzie strumienie ciepła Φ i charakterystyki strat ciepła H określa się jak poniżej.

$$\Phi_m = 0,5 \cdot \phi_{int} \quad (8)$$

$$\Phi_m = \frac{A_m}{A_t \cdot (0,5 \cdot \phi_{int} + \phi_{sol})} \quad (9)$$

$$\Phi_{st} = \left(1 - \frac{A_m}{A_t} - \frac{H_{tr,w}}{9,1 \cdot A_t}\right) \cdot (0,5 \cdot \phi_{int} + \phi_{sol}) \quad (10)$$

$$H_{tr,1} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,2}} + \frac{1}{H_{tr,is}}} \quad (11)$$

$$H_{tr,2} = H_{tr,1} + H_{tr,w} \quad (12)$$

$$H_{tr,3} = \frac{1}{1/H_{tr,2} + 1/H_{tr,ms}} \quad (13)$$

$$H_{tr,is} = h_{is} \cdot A_{tot} \quad (14)$$

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,op}} + \frac{1}{H_{tr,ms}}} \quad (15)$$

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \cdot A_m \quad (16)$$

$$\Phi_{m,tot} = \Phi_m + H_{tr,em} \cdot \theta_e + H_{tr,3} \cdot \left(\Phi_{st} + H_{tr,w} \cdot \theta_e + H_{tr,1} \cdot \left(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{ve}} + \theta_{sup} \right) \right) \quad (17)$$

A_t – pole powierzchni podłogi, m²

A_{tot} – pole wszystkich zwróconych do wnętrza strefy powierzchni strefy budynku równe $A_{ot} \cdot A_t$, m²

A_{at} – bezwymiarowy stosunek pola powierzchni wewnętrznych do pola powierzchni podłogi, wg [9] przyjmować równe 4,5

A_m – efektywne pole powierzchni masy, m²

C_m – wewnętrzna pojemność cieplna, J/K

Φ_{int} – strumień ciepła od wewnętrznych źródeł ciepła, W

Φ_{sol} – strumień ciepła od nasłonecznienia, W

$H_{tr,w}$ – przenoszenie ciepła przez przenikanie przez okna (bez masy akumulacyjnej), W/K

$H_{tr,op}$ – przeniesienie ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne zawierające masę akumulacyjną, W/K

$H_{tr,is}$ – sprzęgająca przewodność cieplna, W/K

$H_{tr,ms}$ – sprzężona przewodność między węzłami m i s, W/K

H_{ve} – przenoszenie ciepła przez wentylację, W/K

h_{is} – współczynnik przejmowania ciepła między węzłem powietrznym, θ_{air} i węzłem powierzchniowym, θ_s , z ustaloną wartością $h_{is} = 3,45$ W/(m²·K)

h_{ms} – współczynnik przeniesienia ciepła między węzłami m i s, z ustaloną wartością $h_{ms} = 9,1$ W/(m²·K)

Zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania wyznacza się tak samo jak dla metody miesięcznej.

2.3.3 Dokładność metod obliczeniowych

Walidacja prostej metody godzinowej i metody miesięcznej została opisana w normie PN-EN ISO 13790 [18]. Obie metody podano przypadkom testowym opisanym w normie PN-EN 15265:2011 Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń z zastosowaniem metod dynamicznych – Kryteria ogólne i procedury walidacji [19].

Dla prostej metody godzinowej były to przypadki testowe dla danych klimatycznych Paryża. Wyniki dla metody godzinowej zostały

spełnione dla kryteriów podanych w normie [19]. W normie tej podano trzy poziomy klasyfikacji A, B, C. Dla zapotrzebowania energii na cele ogrzewania poziom A to $rQ_H \leq 0,05$ i $rQ_C \leq 0,05$; poziom B to $rQ_H \leq 0,10$ i $rQ_C \leq 0,10$ oraz poziom C to $rQ_H \leq 0,15$ i $rQ_C \leq 0,15$; przy czym:

$$rQ_H = \frac{abs(Q_H - Q_{H,ref})}{Q_{tot,ref}} \quad (18)$$

$$rQ_C = \frac{abs(Q_C - Q_{C,ref})}{Q_{tot,ref}} \quad (19)$$

gdzie:

Q_H – wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania uzyskane walidowaną metodą, kWh,

$Q_{H,ref}$ – referencyjne wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania, kWh,

Q_C – wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię do chłodzenia uzyskane walidowaną metodą, kWh,

$Q_{C,ref}$ – referencyjne wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię do chłodzenia, kWh,

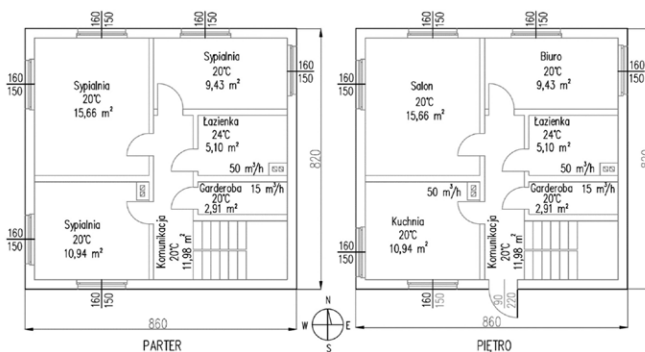
$Q_{tot,ref}$ – sumaryczne referencyjne wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia, kWh.

Dla metody miesięcznej, do przypadków testowych dla Paryża z normy [19] dodano Sztokholm i Rzym. Podsumowane wyniki odchylenia (średnie kwadratowe dla ośmiu przypadków) na bazie rocznej, w przypadku zapotrzebowania na energię na cele ogrzewania, wyniosły 10%, 3% i 8%, odpowiednio dla Paryża, Rzymu i Sztokholmu.

Wartości wszystkich danych wejściowych w niniejszej pracy zostały założone. Przyjęto je takie same dla każdego z analizowanych przypadków, prócz temperatur wewnętrznych, współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych i danych klimatycznych, które były zmieniane w zależności od analizowanego przypadku. Dane wejściowe przyjęte do analiz nie wynikają z pomiarów.

2.4 Analizowany budynek jednorodzinny

Obiekt poddany analizie to budynek jednorodzinny, 2 kondygnacyjny, niepodpiwniczony. Rzut parteru i piętra przedstawiono na rys. 2. Ogrzewaną strefą obliczeniową jest część mieszkalna, która ma kubaturę 307,07 m³ i powierzchnię 113,74 m².



Rys. 2. Rzut analizowanego budynku

Fig. 2. Plan of the analysed building

Obliczenia przeprowadzono dla poniższych założeń:

- temperatura w budynku w wariantach bazowym 20°C oraz w kolejnych wariantach wynosi 16°C, 18°C lub 22°C, a w łazienkach 24°C we wszystkich wariantach,
- współczynniki przenikania ciepła przegród budowlanych, zależnie od standardu energetycznego, według tab. 1,
- lokalizację analizowanego budynku przyjęto w wybranych miastach z poszczególnych stref klimatycznych Polski dla okresu zimnego, jak w tab. 2,

- ogrzewanie centralne, wodne, grzejnikowe z zaworami termostatacznymi,
- centralne gazowe źródło ciepła o sprawnościach wytwarzania jak w tab. 3,
- analizowany budynek nie jest zacieniony przez inne sąsiednie obiekty,
- współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego oszklenia okien $g = 0,75$ [18], udział przeszklenia w powierzchni otworu okiennego $C = 0,7$ [11],
- jednostkowe obciążenie cieplne wewnętrznymi zyskami ciepła: $6,8 \text{ W/m}^2$ [11],
- konstrukcja budynku: ciężka,
- jednostkowa pojemność cieplna budynku, odniesiona do powierzchni podłogi: $C_{mj} = 260\,000 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{K)}$ [18],
- sezon grzewczy, w którym uwzględniano zapotrzebowanie budynku na energię do ogrzewania, trwa maksymalnie od września do maja,
- pozostałe zróżnicowanie założeń podano w opisie scenariuszy (punkty od 2.4.1 do 2.4.3).

2.4.1 Standardy energetyczne

Obliczenia przeprowadzono dla określonych poniżej potrzeb analiz standardów energetycznych budynku.

ST1 – Wentylacja mechaniczna z odzyskiem ciepła o sprawności temperaturowej 0,85, strumień podstawowy $180 \text{ m}^3/\text{h}$, $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$. Dodatkowo przewidziano możliwość ograniczenia strumienia powierza (średnio na poziomie 0,75) [6]. Współczynniki przenikania ciepła według tab. 1. Standard ma cechy charakterystyczne dla standardu budynku energooszczędnego i został określono na podstawie wytycznych NFOŚiGW [23] dla standardu NF15.

ST2 – Wentylacja grawitacyjna, strumień podstawowy $0,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$. Standard o izolacyjności cieplnej przegród zgodnej z aktualnymi przepisami techniczno-budowlanymi [14]

ST3 – Wentylacja grawitacyjna, strumień podstawowy $0,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, $n_{50} = 4,0 \text{ h}^{-1}$. Standard o izolacyjności cieplnej przegród zgodnej z przepisami techniczno-budowlanymi z 2002 r. [22]

ST4 – Wentylacja grawitacyjna, strumień podstawowy $0,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, $n_{50} = 6,0 \text{ h}^{-1}$. Współczynniki przenikania ciepła wg tab. 1. Standard ma cechy charakterystyczne dla standardu budynków z drugiej połowy XX w.

Tabela 1. Współczynniki przenikania ciepła przyjęte do analiz dla poszczególnych standardów energetycznych

Table 1. The heat transfer coefficients assumed for the analyses for each energy standard

Standard energetyczny	Przepis	Ściana zewnętrzna	Stropodach	Okna, drzwi
	-	W/(m ² ·K)	W/(m ² ·K)	W/(m ² ·K)
ST1	Standard NF15	0,12	0,12	0,8
ST2	Przepisy techniczno-budowlane (rok 2021)	0,20	0,15	0,9
ST3	Przepisy techniczno-budowlane (rok 2002)	0,30	0,3	2,0/2,6 2)
ST4	PN-64/B-03404	1,16/1,451)	0,87	3,0

1) I strefa klimatyczna, 2) I, II i III strefa klimatyczna

2.4.2 Lokalizacja

Analizy przedstawione w artykule przeprowadzono dla pięciu wybranych miast, zlokalizowanych w Polsce. Polska podzielona jest na pięć stref klimatycznych (I, II, III, IV i V) [17], ze względu na wartość obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego, przyjmowaną przy projektowaniu ogrzewania budynków odpowiednio:

-16°C, -18°C, -20°C, -22°C, -24°C. Do analizy, podobnie jak w [12], wybrano po jednym mieście dla każdej ze stref: I – Koszalin, II – Wrocław, III – Warszawa, IV – Białystok, V – Suwałki. Wykorzystano typowe lata meteorologiczne [4] służące w Polsce do wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków. W tab. 2, zestawiono minimalne, średnie i maksymalne wartości temperatur powietrza zewnętrznego w poszczególnych lokalizacjach, z pomięciem miesięcy od czerwca do sierpnia.

Tabela 2. Temperatury powietrza zewnętrznego i natężenie promieniowania słonecznego w zależności od lokalizacji [12]

Table 2. Outdoor air temperatures and solar radiation intensity depending on location [12]

Lokalizacja	Temperatura zewnętrzna od września do maja			Średnia temperatura zewnętrzna całoroczna	Średnie dobowe natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyznę poziomą od września do maja
	Minimum	Maksimum	Średnia		
-	°C	°C	°C	°C	Wh/doba
Koszalin	-16,5	27,1	5,5	8,0	1 695
Wrocław	-18,8	24,0	5,2	8,2	2 040
Warszawa	-12,3	24,5	5,1	8,3	1 966
Białystok	-17,6	26,9	3,9	6,9	1 831
Suwałki	-26,2	27,3	3,2	6,4	1 721

2.4.3 System grzewczy i warianty źródła ciepła

W każdym analizowanym przypadku wewnętrzna instalacja grzewcza, prócz źródła ciepła, jest taka sama – rozprowadzenie ciepła w budynku ze źródła ciepła w budynku i grzejniki, wyposażone w zawory termostacyjne, jako odbiorniki ciepła oraz dodatkowo regulacja centralna dostawy ciepła. Tym samym sprawności przesyłu i regulacji ciepła wynoszą odpowiednio: $n_{H,d} = 1,0$ [11] i $n_{H,e} = 0,88$ [11].

Do analiz przyjęto różne warianty gazowych źródła ciepła, charakteryzujących się różnymi sprawnościami wytwarzania ciepła ($n_{H,g}$) i akumulacji ciepła ($n_{H,s}$):

KGT – Kotły niskotemperaturowe na paliwo gazowe lub ciekłe, z zamkniętą komorą spalania i palnikiem modulowanym: $n_{H,d} = 0,87$ [11], $n_{H,s} = 1,0$ [11],

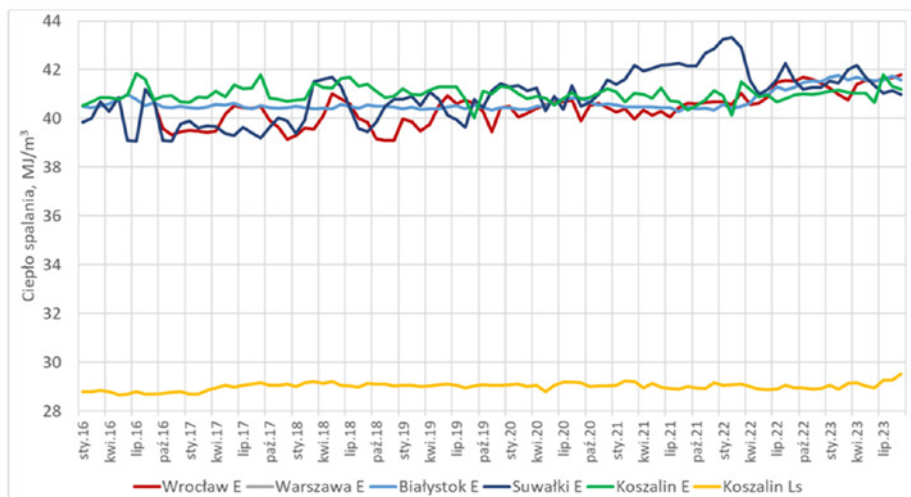
KGK – Kocioł gazowy niskotemperaturowy kondensacyjny (55/45°C): $n_{H,d} = 0,94$ [14], $n_{H,s} = 1,0$ [11],

GPC – Pompa ciepła typu powietrze/woda, sprężarkowe, napędzane gazem (55/45°C): $n_{H,d} = 1,3$ [14], $n_{H,s} = 0,95$ [11].

2.4.4 Kaloryczność gazu

Wartość kaloryczna gazu jest zmienna w czasie oraz w zależności od lokalizacji. Na rys. 3 przedstawiono zmienność ciepła spalania, wg danych publikowanych przez Polską Spółkę Gazownictwa [21] dla ORCS z analizowanych w pracy lokalizacji. Warto zwrócić uwagę, że zmienność ta jest mniejsza od rozpoczęcia kryzysu energetycznego (marzec – kwiecień 2022 r.). Jednak powiązanie tej zmienności ciepła spalania z typowymi latami meteorologicznymi [12] jest możliwe tylko w sposób umowny. Dlatego do przeprowadzonych obliczeń zużycia gazu założono stałą wartość opałową gazu. Zgodnie z metodologią z Rozporządzenia [11] przyjęto wartość opałową gazu ziemnego W_o na podstawie raportu KOBIZE [8] równą $36,65 \text{ MJ/m}^3$. Tym samym zużycie gazu C_w wyznaczono na podstawie energii końcowej $Q_{k,H}$ z zależności (20).

$$C_w = \frac{3,6 \cdot Q_{k,H}}{W_o} \quad (20)$$



Rys. 3. Zmienność wartości ciepła spalania dla Obszarów Rozliczeniowych Ciepła Spalania [26]
Fig. 3. Variation of combustion heat values for Combustion Heat Settlement Areas [26]

3 Dyskusja wyników

3.1 Zużycie energii w zależności od przyjętych temperatur powietrza wewnętrznego i metody obliczeniowej

W tab. 3 i 4 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania analizowanego budynku dla metody A i B. W tab. 3 przedstawiono wyniki obliczeń dla poszczególnych wariantów standardu energetycznego budynku i jego lokalizacji oraz dla poszczególnych scenariuszy nastawy temperatury. Podano wartości bezwzględne zapotrzebowania na energię użytkową dla scenariusza bazowego (scenariusz odniesienia, oznaczony pogrubieniem w tabeli) i pozostałych rozpatrywanych.

W tab. 4 przedstawione procentowe zmiany (różnice) zapotrzebowania na energię użytkową, w odniesieniu do scenariusza bazowego.

Uzyskano wyniki redukcji zużycia energii, wynikające z obniżenia temperatury od – 11,0 do – 68,2% wg metody A i od – 12,3 do 5 – 9,7% wg metody B w skali roku, zależnie od standardu energetycznego i stopnia obniżenia temperatury w pomieszczeniach. Największe bezwzględne ograniczenie zużycia energii można osiągnąć w starszych budynkach o niższej izolacyjności, a mniejsze w przypadku nowych budynków. Natomiast w odniesieniu do wartości względnych największe ograniczenie energii występuje w nowszych budynkach o wyższej izolacyjności, a mniejsze w przypadku starszych budynków.

Na podstawie przedstawionych wyników zaobserwowano zależność w zmianie zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania, w odniesieniu do standardu energetycznego i lokalizacji budynku:

Zapotrzebowanie na energię zwiększa się wraz z obniżeniem standardu energetycznego (warianty od ST1 do ST4), oraz wyższą temperaturą wewnętrzną, co jest oczekiwane.

Tabela 3. Zestawienie wyników zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania dla metody A i B

Table 3. Summary of energy demand results for methods A and B

Metoda	A				B				Standard energetyczny
t, °C	16	18	20	22	16	18	20	22	
Jednostka	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a	
Koszalin	425	703	1021	1369	397	652	969	1338	ST1
	4477	5590	6835	8170	4250	5431	6727	8130	ST2
	10279	12411	14722	17233	10512	12898	15465	18175	ST3
	26715	31489	36497	41635	31010	37084	43347	49710	ST4
Wrocław	283	563	890	1244	370	604	892	1232	ST1
	4538	5594	6726	7943	4192	5319	6543	7878	ST2
	10405	12410	14551	16881	10492	12799	15277	17908	ST3
	24747	29056	33926	39313	27689	33212	39433	46260	ST4
Warszawa	345	626	970	1341	382	637	948	1304	ST1
	4580	5709	6913	8214	4239	5411	6677	8039	ST2
	10576	12761	15055	17459	10607	12991	15531	18202	ST3
	25290	29588	34114	38826	28033	33491	39124	44856	ST4
Białystok	918	1291	1701	2136	838	1177	1558	1980	ST1
	6337	7521	8762	10050	5731	6964	8282	9691	ST2
	12018	13947	15989	18178	11710	13915	16263	18739	ST3
	29217	33491	37977	42641	32581	38056	43701	49449	ST4
Suwałki	1200	1548	1936	2370	1096	1468	1880	2329	ST1
	7075	8276	9564	10928	6495	7752	9098	10533	ST2
	13236	15240	17344	19546	12909	15128	17496	19988	ST3
	31576	35764	40196	44817	34976	40447	46099	51854	ST4

Tabela 4. Zestawienie różnic procentowych zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania dla poszczególnych temperatur wewnętrznych dla metody A i B
 Table 4. Summary of percentage differences in heating energy demand for different indoor temperatures for Methods A and B

Metoda	A				B				Standard energetyczny
t, °C	16	18	20	22	16	18	20	22	
Jednostka	%	%	kWh/a	%	%	%	kWh/a	%	
Koszalin	-58,4	-31,1	1 021	34,0	-59,0	-32,7	969	38,1	ST1
	-34,5	-18,2	6 835	19,5	-36,8	-19,3	6 727	20,9	ST2
	-30,2	-15,7	14 722	17,1	-32,0	-16,6	15 465	17,5	ST3
	-26,8	-13,7	36 497	14,1	-28,5	-14,4	43 347	14,7	ST4
Wrocław	-68,2	-36,8	890	39,8	-58,5	-32,3	892	38,1	ST1
	-32,5	-16,8	6 726	18,1	-35,9	-18,7	6 543	20,4	ST2
	-28,5	-14,7	14 551	16,0	-31,3	-16,2	15 277	17,2	ST3
	-27,1	-14,4	33 926	15,9	-29,8	-15,8	39 433	17,3	ST4
Warszawa	-64,4	-35,4	970	38,3	-59,7	-32,8	948	37,5	ST1
	-33,7	-17,4	6 913	18,8	-36,5	-19,0	6 677	20,4	ST2
	-29,7	-15,2	15 055	16,0	-31,7	-16,4	15 531	17,2	ST3
	-25,9	-13,3	34 114	13,8	-28,3	-14,4	39 124	14,7	ST4
Białystok	-46,0	-24,1	1 701	25,5	-46,2	-24,5	1 558	27,1	ST1
	-27,7	-14,2	8 762	14,7	-30,8	-15,9	8 282	17,0	ST2
	-24,8	-12,8	15 989	13,7	-28,0	-14,4	16 263	15,2	ST3
	-23,1	-11,8	37 977	12,3	-25,4	-12,9	43 701	13,2	ST4
Suwałki	-38,0	-20,1	1 936	22,4	-41,7	-21,9	1 880	23,9	ST1
	-26,0	-13,5	9 564	14,3	-28,6	-14,8	9 098	15,8	ST2
	-23,7	-12,1	17 344	12,7	-26,2	-13,5	17 496	14,2	ST3
	-21,4	-11,0	40 196	11,5	-24,1	-12,3	46 099	12,5	ST4

Zmiana zapotrzebowania na energię wykazuje oczekiwaną zbieżność ze zmianami średnich temperatur zewnętrznych, w okresie od września do maja. Wraz ze wzrostem średnich temperatur zewnętrznych maleją zapotrzebowania na energię. Wyjątkiem jest Koszalin, którego zapotrzebowanie, w niektórych przypadkach, jest większe niż dla Wrocławia. Można to uzasadnić niższym natężeniem promieniowania słonecznego w Koszalinie, w stosunku do innych lokalizacji. Zyski ciepła są ujmowane w bilansie ciepła i zmniejszają zapotrzebowanie na energię budynku. Ma na to również wpływ częstota występowania temperatur zewnętrznych, przy których budynek wymaga ogrzewania. Większe zapotrzebowanie dla Wrocławia niż dla Koszalina występuje tylko w kilku przypadkach, dla metody A: w ST2 dla 16°C i 18°C i w ST3 dla 16°C. Można również zauważyć małe różnice w zapotrzebowaniu między Wrocławiem i Warszawą. Dla warunków ST4 dla 20°C dla obu metod i dodatkowo dla 22°C dla metody B, nawet zapotrzebowanie na energię dla Wrocławia jest większe niż dla Warszawy. Małe różnice również w tym przypadku można uzasadnić zbliżonymi średnimi danymi klimatycznymi obu miast.

Oszczędności energii, wynikające z obniżenia temperatury, wyrażone w wartościach bezwzględnych zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania, rosną wraz z obniżaniem standardu energetycznego (warianty od ST1 do ST4).

Natomiast procentowe zmiany zapotrzebowania na energię odniesione do scenariusza bazowego:

- rosną wraz ze wzrostem standardu energetycznego (warianty od ST1 do ST4) z wyjątkiem jednego przypadku (Wrocław, metoda B, 22°C, ST3 i ST4),
- w wariantach o wyższym standardzie energetycznym ST1 i ST2, maleją zawsze wraz z malejącą średnią temperaturą zewnętrzną, tylko w przypadku lokalizacji o najniższych wartościach średniej temperatury zewnętrznej (Suwałki i Białystok),

- dla analizowanych przypadków, uzyskano zmiany zapotrzebowania na energię użytkową odniesione do zmiany temperatury wewnętrznej o 1°C, od 5,4%/°C do 19,9%/°C według metody A i od 6,0%/°C do 19,1%/°C według metody B.

Przy czym:

- w przypadku stałego podniesienia temperatury z 20°C do 22°C, uzyskano przyrosty zapotrzebowania na energię od 11,2%/°C do 19,9%/°C dla standardu ST1 i od 5,7%/°C do 9,8%/°C dla standardów ST2-ST4 wg metody A oraz od 11,9%/°C do 19,1%/°C dla standardu ST1 i od 6,2 %/°C do 10,4%/°C dla standardów ST2-ST4 wg metody B,
- w przypadku stałego obniżenia temperatury z 20°C do 18°C uzyskano obniżenia zapotrzebowania na energię od 10,0%/°C do 18,4%/°C dla standardu ST1 i od 5,5%/°C do 9,1%/°C dla standardów ST2-ST4 wg metody A oraz od 10,9%/°C do 16,4%/°C dla standardu ST1 i od 6,1%/°C do 9,6%/°C dla standardów ST2-ST4 wg metody B,
- w przypadku stałego obniżenia temperatury z 20°C do 16°C uzyskano obniżenia zapotrzebowania na energię od 9,5%/°C do 17,0%/°C dla standardu ST1 i od 5,4%/°C do 8,6%/°C dla standardów ST2-ST4 wg metody A oraz 10,4%/°C do 14,9%/°C dla standardu ST1 i od 6,0%/°C do 9,2%/°C dla standardów ST2-ST4 wg metody B.

Z czego wynika, że:

- obniżenia zapotrzebowania na energię na 1°C obniżenia są większe w przypadku obniżenia do 16°C niż do 18°C,
- wpływ lokalizacji w przypadku budynku o najwyższym standardzie energetycznym ST1 jest znacznie większy niż w przypadku pozostałych standardów.

3.2 Porównanie wyników obliczeń dla metod A (godzinowej) i B (miesięcznej)

Analizę przeprowadzono w bardzo szerokim zakresie zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Zróżnicowanie jednostkowego, odniesionego do powierzchni budynku, zapotrzebowania na energię analizowanych wariantów wyniosło od 2,49 kWh/(m²·a) (dla Wrocławia, ST1, 16°C, metoda A) do 455,9 kWh/(m²·a) (dla Suwałk, ST4, 22°C, metoda B). Tak różne warunki wejściowe powodują, że pomiędzy wynikami metody A i B występują zauważalne różnice. Jednak wykazują one dobrą zbieżność w zauważonych trendach. Zarówno metoda A jak i B może dać większe lub mniejsze wartości względem siebie w zależności od analizowanego przypadku. Jednak w szerokim zakresie porównania wartości te są do siebie zbliżone, co pokrywa się z wnioskami z PN-EN ISO 13790 [2].

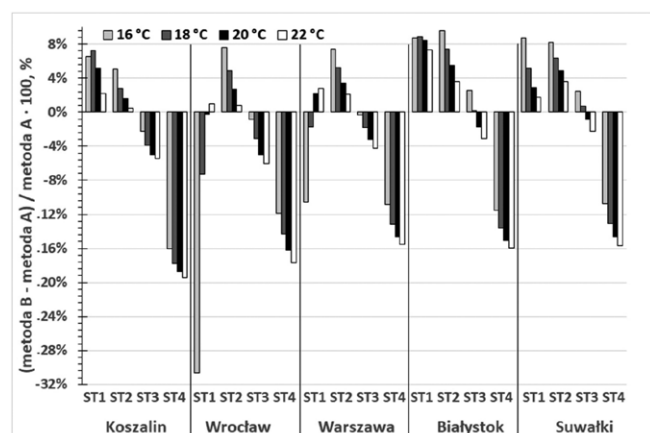
Przeanalizowano względne różnice między wynikami zapotrzebowania na energię uzyskane metodą A i B, odniesione do wartości dla metody A (rys. 4). Minimalna różnica wynosi -9,6% (dla Białegostoku, ST2, 16°C), a maksymalna wynosi 30,7% (dla Wrocławia, ST1, 16°C). Średnie wartości dla wszystkich lokalizacji, odpowiednio dla standardu energetycznego, wynoszą: ST1 - 6,5%, ST2 - 4,7%, ST3 - 2,8%, ST4 - 14,8%. Natomiast średnie wartości dla wszystkich standardów energetycznych, odpowiednio dla lokalizacji, wynoszą: Koszalin - 7,5%, Wrocław - 8,2%, Warszawa - 6,2%, Białystok - 7,7%, Suwałki - 6,4%.

Szczególną ostrożność jednak należy zachować w przyjmowaniu podanych wyników w konfrontacji z rzeczywistym zużyciem energii. Analizowane metody powodują większe błędy szczególnie w skrajnych przypadkach bilansu zysków i strat ciepła. Potwierdzają to uzyskane wyniki, gdzie większe rozbieżności zauważa się dla skrajnych standardów energetycznych ST1 (mało strat ciepła w bilansie) i ST4 (dużo strat ciepła w bilansie). Natomiast nie zaobserwowano istotnego wpływu lokalizacji na rozbieżności wyników dwóch metod.

Warto zaznaczyć, że analizie został poddany budynek o ciężkiej konstrukcji, a tym samym dużej pojemności cieplnej, bez przerw w ogrzewaniu. Wpływ tych parametrów różnicuje wyniki między metodami, co wykazano w [7, 9].

Biorąc powyższe pod uwagę występują też różnice w oszczędnościach w zapotrzebowaniu na energię uzyskane według obu metod. W większości przypadków (prócz ST1 Wrocław i Warszawa - 54 spośród 60 przypadków) metodą miesięczną B uzyskano:

- większe obniżenia zapotrzebowania na energię w wyniku obniżenia temperatury wewnętrznej (16°C i 18°C) z największą różnicą między metodami 0,9%/°C,



Rys. 4. Różnice wynikające z metody obliczeniowej w zależności od zmiany temperatury wewnętrznej i lokalizacji budynku

Fig. 4. Differences resulting from the calculation method as a function of the change in internal temperature and the location of the building

- większe wzrosty zapotrzebowania na energię w wyniku podniesienia temperatury wewnętrznej z największą różnicą między metodami 2,1%/°C.

W pozostałych przypadkach tendencja była odwrotna i metodą miesięczną B uzyskano:

- mniejsze obniżenia zapotrzebowania na energię w wyniku obniżenia temperatury wewnętrznej (16°C i 18°C) z największą różnicą między metodami 2,4%/°C,
- mniejsze wzrosty zapotrzebowania na energię w wyniku podniesienia temperatury wewnętrznej z największą różnicą między metodami 0,9%/°C.

3.3 Zużycie gazu w zależności od źródła ciepła w budynku

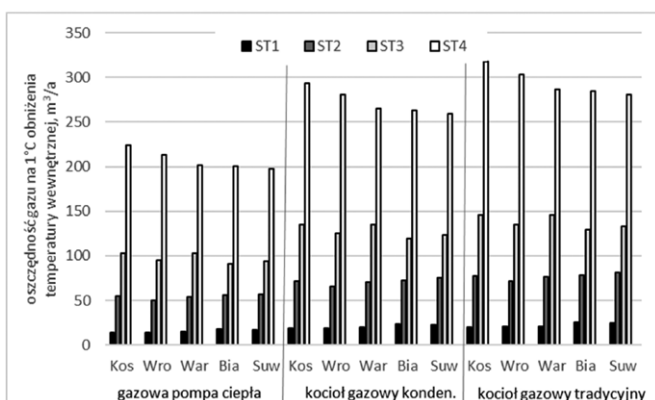
Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń zaoszczędzonych ilości gazu, w wyniku obniżenia temperatury wewnętrznej na podstawie obliczeń zapotrzebowania na energię metodą godzinową, dla wszystkich analizowanych przypadków i trzech wariantów źródła ciepła. Przedstawiono zmniejszenie zużycia gazu na 1°C obniżenia temperatury wewnętrznej. Dla poszczególnych przypadków podano wartości uśrednione dla obniżen z 20°C na 18°C i z 20°C na 16°C.

Należy zwrócić uwagę, że mimo, że oszczędności energii użytkowej są takie same dla każdego źródła ciepła (tab. 4), to ilości zaoszczędzonej energii końcowej, a więc również gazu, różnią się w zależności od źródła ciepła, ze względu na jego sprawność. W przypadku źródeł o sprawnościach niższych, takich jak kocioł gazowy tradycyjny, przy takim samym obniżeniu temperatury wewnętrznej można zaoszczędzić więcej gazu niż w przypadku źródeł o sprawnościach wyższych, takich jak gazowa pompa ciepła.

Dla danego rodzaju źródła ciepła oszczędności gazu, podobnie jak oszczędności energii użytkowej, są tym większe im niższy jest standard energetyczny.

Ponadto stwierdzono, że:

- w przypadku standardu ST1 oszczędności gazu są najmniejsze dla Koszalina i coraz większe kolejno dla lokalizacji: Wrocław, Warszawa, Białystok i Suwałki,
- w przypadku standardu ST4 oszczędności gazu są najmniejsze dla Suwałk i coraz większe kolejno dla lokalizacji: Białystok, Warszawa, Wrocław i Koszalin,
- natomiast dla standardów ST2 i ST3 trudno podać podobną, jednoznaczną kolejność lokalizacji, ponieważ wyniki dla standardów ST2 i ST3 stanowią obszar przejściowy pomiędzy standardami skrajnymi ST1 i ST4.



Rys. 5. Uśrednione oszczędności gazu (obniżenia z 20°C do 18°C oraz z 20°C do 16°C) odniesione do 1°C obniżenia temperatury wewnętrznej w analizowanym budynku dla różnych rodzajów gazowego źródła ciepła

Fig. 5. Averaged gas savings (reductions from 20°C to 18°C and from 20°C to 16°C) related to 1°C reduction in indoor temperature in the analyzed building for different types of gas heat source

4. Podsumowanie

Z przedstawionych analiz wynika, że nawet niewielkie obniżenie temperatury w pomieszczeniach może prowadzić do znaczącego zmniejszenia zapotrzebowania na energię. Może to skutkować obniżeniem kategorii komfortu cieplnego, którą można jednak skompensować, uzupełniając odzież, na przykład o kamizelkę (0,12 clo) przy obniżeniu o 1°C, czy sweter (0,28 clo) przy obniżeniu o 2°C.

W analizowanym budynku jednorodzinny, obniżenie temperatury o 1°C zmienia zapotrzebowanie na energię do ogrzewania o od 6,0 do 19,1%/°C (10,4 do 19,1%/°C dla ST1 i od 6,0 do 10,4%/°C dla ST2-ST4) według metody miesięcznej oraz od 5,4 do 19,9 %/°C (9,5 do 19,9%/°C dla ST1 i od 5,4 do 9,8%/°C dla ST2-ST4) wg metody godzinowej, w zależności od rozpatrywanego scenariusza i lokalizacji. Podobne wyniki (6,6%/°C do 13,2%/°C) otrzymano i opisano w [24] dla metody godzinowej wg PN-EN ISO 13790 [18]. Uzyskano je dla tych samych lokalizacji, standardów analogicznych do ST2-ST4, jednak dla budynku mieszkalnego wielorodzinnego i różnych wariantów eksploatacyjnych. W obu pracach w przypadku starszych budynków o niższym standardzie izolacyjności cieplnej, wartości bezwzględne zaoszczędzonej energii są wyższe niż w przypadku budynków nowszych. Natomiast oszczędności wyrażone w procentach odniesionych do scenariusza odniesienia są wyższe dla budynków nowszych.

Tym samym przedstawione wyniki są zbliżone i pozwalają na oszacowanie zmiany zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania budynków mieszkalnych, w granicy przyjętych założeń.

Zużycie paliwa przez źródło ciepła wynika bezpośrednio z zapotrzebowania na energię użytkową budynku oraz sprawności systemu grzewczego. W przypadku źródeł o sprawnościach niższych, takich jak kocioł gazowy tradycyjny (w analizowanych przypadkach od 19,8 do 317,5 (m³/a)/1°C), przy takim samym obniżeniu temperatury wewnętrznej można zaoszczędzić więcej gazu niż w przypadku źródeł o sprawnościach wyższych, takich jak gazowa pompa ciepła (w analizowanych przypadkach od 13,9 do 223,7 (m³/a)/1°C). Z tego wynika, że oszczędność gazu w przypadku gazowej pompy ciepła stanowi około 70,5% oszczędności dla przypadku z tradycyjnym kotłem gazowym.

Praca daje szersze spojrzenie na możliwości oszczędności energii, poprzez obniżenie temperatury eksploatacyjnej w pomieszczeniach oraz pokazuje jak wybór metody może rzutować na wynik obliczeń. Określa również wpływ rodzaju źródła ciepła na pobór gazu. Pozwala również, na podstawie uzyskanych danych przekrojowych, oszacować możliwe oszczędności orientacyjnie dla konkretnego przypadku, zależnie od standardu energetycznego budynku, jego lokalizacji i rodzaju źródła ciepła.

W skali całego kraju ograniczenie zużycia energii w każdym budynku, ze względu na istotny udział w bilansie energetycznym potrzeb grzewczych gospodarstw domowych, może przynieść pożądane, szczególnie w dobie kryzysu energetycznego, oszczędności energii i gazu, a tym samym pozwolić na uniknięcie zakłóceń w ich dostawach.

Są możliwe dalsze prace rozszerzające analizę na inne kategorie budynków, scenariusze użytkowania, a także zastosowania dynamicznych metod obliczeniowych.

LITERATURA

- [1] Ballerini V., E. Rossi di Schio, P. Valdiserri. 2022. „How the Energy Price Variability in Italy Affects the Cost of Building Heating: A Trnsys-Guided Comparison between Air-Source Heat Pumps and Gas Boilers”. *Buildings*. 12. (11): 1936. <https://doi.org/10.3390/buildings12111936>
- [2] Centralna Ewidencja Emisyjności budynków. <https://www.gunb.gov.pl/podmenu/1713>. [data dostępu 15.04.2023].
- [3] Fanger P.O. 1970. „Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering”. MacGrw-Hill. Copenhagen. Denmark. New York. USA.
- [4] Główny Urząd Statystyczny. 2023. „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2021r.”.
- [5] Główny Urząd Statystyczny. 2023. „Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2021r. Informacje sygnalne”.
- [6] Hercegova K. 2022. „European energy crisis and the war in Ukraine European energy crisis and the war in Ukraine”. *International Seminar on the EU Energy Security At Prague*.
- [7] Horvat I., D. Dović. 2016. „Dynamic modeling approach for determining buildings technical system energy performance”. *Energy Convers. Manag.* 125: 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.062>.
- [8] KOBIZE. 2023. „Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO2 (WE) w roku 2020 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2023”.
- [9] Kokogiannakis G., P. Strachan, J. Clarke. 2008. „Comparison of the simplified methods of the ISO 13790 standard and detailed modelling programs in a regulatory context”. *J Build Perform Simul.* 1. (4): 209–219. <https://doi.org/10.1080/19401490802509388>
- [10] Michnikowski P. 2012. „Zużycie energii do ogrzewania lokalu w budynku wielorodzinnym”. *Rynek Energii*. 102: 81–86.
- [11] Minister Infrastruktury i Rozwoju. 2015. „Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej”.
- [12] Ministerstwo Rozwoju. 2016. „Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków”. <https://dane.gov.pl/pl/dataset/797,typowe-lata-meteorologiczne-i-statystyczne-dane-klimatyczne-dla-obszaru-polski-do-obliczen-energetycznych-budynkow> [data dostępu 15.02.2023].
- [13] Narowski P. 2018. „Podstawy uproszczonej metody godzinowej obliczania ilości ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków”. *Energ. i Budynek*. 15: 6–11.
- [14] „Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie” (Dz.U. 2022 poz. 1225).
- [15] Panek A., J. Rucińska. 2009. „Analiza godzinowego algorytmu obliczania rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku”. *Budownictwo, Czasopismo Techniczne*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. 1-B/2009. Zeszyt 5 Rok 106: 191-198.
- [16] Papadopoulos S., C.E. Kontokosta, A. Vlachokostas, E. Azar. 2019. „Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates”. *Build Environ.* 155: 350–359. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.03.062>
- [17] PN-B-02403:1982 Ogrzewnictwo – – Temperatury obliczeniowe zewnętrzne.
- [18] PN-EN ISO 13790 Energetyczne właściwości użytkowe budynków Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.
- [19] PN-EN 15265:2011 Energetyczne właściwości użytkowe budynków – – Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń z zastosowaniem metod dynamicznych – – Kryteria ogólne i procedury walidacji.
- [20] PN-EN ISO 7730:2006 Ergonomia środowiska termicznego – – Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego.
- [21] Polska Spółka Gazownictwa, Obszary Rozliczeniowe Ciepła Spalania <https://mapa.psgaz.pl/>, [data dostępu 27.10.2023]
- [22] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002nr 75 poz. 690)
- [23] Strona internetowa <http://archiwum.nfosigw.gov.pl/oferta-finansowania/srodki-krajowe/programy-priorytetowe/doplata-do-kredytow-na-domy-energo-oszczedne/wytyczne-do-programu-priorytpt/>. [data dostępu 15.04.2023].
- [24] Szalański P., P. Kowalski, W. Cepiński, P. Kęskiewicz. 2023. „The Effect of Lowering Indoor Air Temperature on the Reduction in Energy Consumption and CO2 Emission in Multifamily Buildings in Poland”. *Sustainability*. 15. (15): 12097. <https://doi.org/10.3390/su151512097>.
- [25] Szulgowska-Zgrzywa M., E. Stefanowicz, K. Piechurski, A. Chmielewska, M. Kowalczyk. „Impact of Users’ Behavior and Real Weather Conditions on the Energy Consumption of Tenement Houses in Wrocław, Poland: Energy Performance Gap Simulation Based on a Model Calibrated by Field Measurements”. *Energies (Basel)*. 13. (24): 6707. <https://doi.org/10.3390/en13246707>.
- [26] Vaughan A. 2022. „The first global energy crisis”. *Insight Energy*. 253. (3379): 18–21. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(22\)00513-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0262-4079(22)00513-9)