

Agnieszka Sobolewska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

e-mail: agnieszka_sobolewska@sggw.pl

Mariusz Sobolewski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

e-mail: pub.cw.sggw@gmail.com

EKONOMICZNA EFEKTYWNOŚĆ TERMOIZOLACJI ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH MUROWANEGO DOMU MIESZKALNEGO

ECONOMIC EFFICIENCY OF THERMAL INSULATION IN EXTERNAL WALLS OF A BRICK DETACHED HOUSE

DOI: 10.15611/pn.2018.509.32

JEL Classification: 013, 018

Streszczenie: Celem pracy jest określenie ekonomicznej efektywności poprawy termoizolacyjności ścian zewnętrznych murowanego domu jednorodzinnego. W artykule przedstawiono koszt wykonania systemu ETICS w dwóch najczęściej stosowanych technologiach: z płytami polistyrenu EPS oraz z płytami wełny mineralnej. Określono koszty zmienne ogrzewania budynku w kilku wariantach związanych z zastosowaniem różnych systemów grzewczych. Uzyskane wyniki wykazują ekonomiczną efektywność poprawy termoizolacyjności ścian zewnętrznych. Najwyższe wskaźniki uzyskano w przypadku domu ogrzewanego energią elektryczną. Poprawa termoizolacyjności ścian zewnętrznych przy zastosowaniu polistyrenu charakteryzuje się wyższą ekonomiczną efektywnością niż w przypadku wełny mineralnej. Efektywność rozpatrywanej inwestycji spada wraz ze wzrostem izolacyjności cieplnej ścian osłonowych budynku.

Słowa kluczowe: izolacyjność cieplna ścian zewnętrznych, system ETICS, zapotrzebowanie budynku na energię, ekonomiczna efektywność termoizolacji, koszt termoizolacji.

Summary: The objective of this study is to determine the economic efficiency of increasing the thermal insulation in the external walls of a brick detached house. The paper presents the cost of performing the *ETICS* system in two most commonly used technologies: with polystyrene and mineral wool boards. The variable costs of heating the model house have been determined in a few variants associated with various heating systems. The obtained results showed that the economic efficiency of improving the thermal insulation of external walls is achieved. The highest indexes were obtained in the case of a model house heated by electricity. The improvement of external walls thermal insulation using polystyrene *EPS*

shows more economic efficiency than using mineral wool (*MW*). The effectiveness of the investment considered decreases when the thermal insulation of the external walls increases.

Keywords: external walls thermal insulation, *ETICS* system, building's demand for energy, economic efficiency of thermal insulation, thermal insulation costs.

1. Wstęp

Koncepcja budowy domów energooszczędnych powstała w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Obecnie energooszczędność w sektorze budowlanym jest jednym z głównych priorytetów polityki państw UE. Budynki są wciąż znacznym konsumentem energii. Na sektor mieszkaniowy i usługowy w krajach UE przypada średnio ponad 40% całkowitego rocznego zużycia energii zależnie od warunków klimatycznych i poziomu rozwoju gospodarczego [Gałązka 2015]. W Polsce konsumpcja energii w gospodarstwach domowych stanowi ponad 30% całkowitego jej zużycia [Gałązka 2015; Witczak 2015]. W skład oceny klasy energetycznej budynku wchodzi poziom zużycia energii do celów: ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, podgrzewania wody i oświetlenia. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię obiektów budowlanych wiąże się bezpośrednio z obniżeniem kosztów eksploatacyjnych ponoszonych głównie na ogrzewanie i przygotowanie ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). Wynika to z faktu, że w budynkach mieszkalnych najwięcej energii pochłania ogrzewanie pomieszczeń (60-70%) oraz podgrzewanie wody (ok. 15%) [Gałązka 2015; Garecki 2015].

Poprawa efektywności energetycznej projektowanych budynków zależy od wielu czynników i związana jest z nakładami inwestycyjnymi na: wysokiej sprawności systemy grzewcze, większą izolacyjność cieplną ścian zewnętrznych, dachu i podłogi, energooszczędną stolarkę budowlaną, wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła, pompę ciepła, gruntowy wymiennik ciepła oraz infrastrukturę pozwalającą na wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Projektując nowe budynki, należy brać również pod uwagę orientację względem stron świata, kształt bryły z minimalizacją mostków cieplnych oraz rozmieszczenie i wielkość przeszklania.

Zmniejszenie strat energii z budynków wiąże się m.in. z dobrze zaprojektowanymi przegrodami zewnętrznymi o wysokiej termoizolacyjności. Wszystkie przegrody zewnętrzne muszą skutecznie chronić przed ucieczką ciepła, ale największe możliwości w zredukowaniu jego strat daje zwiększenie izolacyjności ścian [Garecki 2015]. Straty ciepła przez ściany zewnętrzne zarówno w tradycyjnym budynku mieszkalnym, jak i współczesnym budynku energooszczędnym stanowią 30-36% strat całkowitych. Zwiększenie termoizolacyjności jest najłatwiejsze w ścianach, w których izolacja stanowi odrębną część od ich konstrukcji (tzw. ściany dwuwarstwowe).

Wymagania techniczne na potrzeby projektowania budynków są wyrażane wskaźnikiem EP określającym roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, chłodzenia, wentylacji i przygotowania c.w.u. oraz współczynnikiem przenikania ciepła U przegród budowlanych. Wartości graniczne tych parametrów ciągle ulegają modyfikacji (są zmniejszane). Według Rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [Rozporządzenie z 5 lipca 2013], od 2017 r. maksymalny wskaźnik EP_{max} dla jednorodzinne go budynku mieszkalnego wynosi 95 kWh/(m²rok), a maksymalny współczynnik przenikania ciepła wynosi: $U_{max} = 0,23$ W/(m²K) dla ścian zewnętrznych, $U_{max} = 0,18$ W/(m²K) dla dachu oraz $U_{max} = 0,30$ W/(m²K) dla podłogi na gruncie. Rozporządzenie przewiduje zmianę wymagań od 2021 r. Wskaźnik EP_{max} ma wynosić 70 kWh/(m²rok), natomiast współczynnik U_{max} dla ścian zewnętrznych 0,20 W/(m²K), dla dachu 0,15 W/(m²K), a dla podłogi na gruncie 0,30 W/(m²K). W domu energooszczędnym średni współczynnik przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne nie może być większy niż 0,20 W/(m²K), przy czym przyjmuje się, że dla ścian powinien wynosić 0,15 W/(m²K) [Garecki 2015].

Na stosowany w praktyce stopień izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych wpływa nie tylko dopuszczalna prawnie wartość współczynnika przenikania ciepła, lecz także wynik porównania kosztów związanych z wykonaniem termoizolacji z efektem, którym jest zmniejszenie kosztów ogrzewania pomieszczeń w okresie eksploatacji budynku. Zagadnieniom dotyczącym minimalizacji kosztów związanych ze stratami ciepła w budynkach i okresów zwrotu nakładów inwestycyjnych na termoizolację poświęconych było wiele prac, w tym Stachniewicza [2009], Sobierajewicza [2011] i Orzechowskiego [2016].

2. Cel i metodyka

Celem pracy jest określenie ekonomicznej efektywności wykonania termicznej izolacji ścian zewnętrznych murowanego domu jednorodzinne go systemem *ETICS* (External Thermal Insulation Composite System). Nakłady, jakich wymaga tego typu inwestycja, porównano z efektem, którym jest ograniczenie kosztów ogrzewania budynku.

Analizę przeprowadzono na przykładzie modelowe go domu o powierzchni użytkowe j 161 m². Podstawowe parametry techniczne obiektu omówione zostały w dalsze j części artykułu. W pracy uwzględniono dwa najbardziej popularne materiały termoizolacyjne: polistyren ekspandowany *EPS* oraz wełnę mineralną *MW* o różn ych deklarowan ych współczynnikach przewodzenia ciepła λ_D . Stanowią one prawie 95% materiałów izolacyjnych stosowan ych przy instalacji systemów *ETICS* w Europie (82-83% udziału przypada średnio na *EPS* i 11-12% na *MW*). W Polsce proporcje te są podobne: wełna mineralna stanowi 12%, a polistyren ekspandowany 84% [Orlik-Koźdoń, Steidl 2012; Garecki 2015]. Za pomocą programu Audy-

tor OZC 6.8 pro dla wybranych materiałów określono grubości izolacji cieplnej ścian zewnętrznych przy różnych poziomach współczynnika przenikania ciepła U . W obliczeniach uwzględniono punktowe i liniowe mostki cieplne występujące w systemie *ETICS*. Następnie w każdym rozpatrywanym przypadku ocieplenia ścian zewnętrznych wyznaczono zapotrzebowanie na ciepło budynku. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie kosztów zmiennych ogrzewania modelowego domu przy wykorzystaniu energii elektrycznej, gazu płynnego, oleju opałowego, gazu ziemnego, drewna (drewno opałowe i pelety) oraz węgla (ekogroszek i miał węglowy).

Nakłady na wykonanie systemu izolacji cieplnej ścian zewnętrznych wyznaczono za pomocą programu Norma Pro wersja 4.44b. W obliczeniach uwzględniono koszty robocizny, materiału termoizolacyjnego oraz materiałów pomocniczych, takich jak łączniki mechaniczne, listwy startowe, klej, wyprawa cienkowarstwowa i inne. Wyznaczając średnioroczny koszt termoizolacji domu mieszkalnego, przyjęto 30-letni okres trwałości technicznej systemu *ETICS*. W odniesieniu do budynków mieszkalnych zakładany cykl życia wynosi 50 lat [Ajdukiewicz 2011; Narowski, Panek 2012]. Jednak trwałość techniczna poszczególnych komponentów budynku jest bardzo zróżnicowana. Badania dotyczące trwałości systemów ociepleń wykazują, że ich okres użytkowania może wynosić 25 do 45 lat [Dylewski, Adamczuk 2010; Frössel i in. 2011; Żurawski 2012; Witczak 2013]. Zgodnie z rozporządzeniem Komisji UE nr 244/2012 [Rozporządzenie z 16 stycznia 2012] okres trwałości warstwy termoizolacyjnej ścian zewnętrznych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej wynosi 30 lat. Obliczenia wykonano w cenach z grudnia 2017 r.

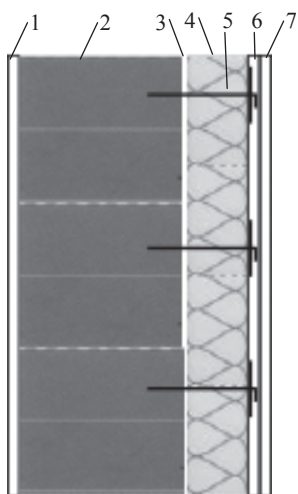
3. Model murowanego domu jednorodzinnego

Według danych GUS [Kowalska i in. 2017], typowy dom jednorodzinny w Polsce to budynek wolno stojący bez podpiwniczenia lub częściowo podpiwniczony, jedno- lub dwukondygnacyjny o powierzchni zabudowy 121-165 m², powierzchni użytkowej 162-167 m² i kubaturze 741-865 m³. W obliczeniach przyjęto zbliżony parametrami murowany budynek wolno stojący o następujących danych technicznych: powierzchnia całkowita 250,24 m², powierzchnia użytkowa 161,08 m² (w tym parteru 87,56 m², poddasza 73,52 m²), powierzchnia zabudowy 112,46 m², kubatura części przykrytej i zamkniętej z wszystkich stron 774,60 m³. Zgodnie z projektem architektoniczno-budowlanym na parterze znajduje się kuchnia z jadalnią, 2 pokoje, łazienka i kotłownia. Na poddaszu zaplanowano 4 pokoje z łazienką.

Budynek ma drewnianą więźbę dachową w układzie krokwiowo-jętkowym. Powierzchnia dachu do izolacji termicznej od wewnątrz wynosi 117,04 m², powierzchnia podłogi na gruncie 95,12 m², powierzchnia elewacji 219,82 m². Budynek posiada wentylację grawitacyjną. Przekrój ściany zewnętrznej przedstawiono na rysunku 1. Przyjęta w obliczeniach grubość warstwy termoizolacyjnej waha się od 5 do 40 cm

i jest uzależniona od współczynnika przewodzenia ciepła materiału izolacyjnego oraz założonego dla ściany współczynnika przenikania ciepła U .

W pracy zbadano ekonomiczną efektywność wykonania termoizolacji z polistyrenu *EPS* o deklarowanym współczynniku przenikania ciepła λ_D równym 0,040 W/(mK), 0,038 W/(mK) i 0,031 W/(mK) oraz z wełny mineralnej o λ_D wynoszącym 0,040 W/(mK) i 0,036 W/(mK). Uwzględnione w obliczeniach wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ_D są charakterystyczne dla materiałów powszechnie dostępnych na rynku. Dla każdego wariantu w modelach ścian zewnętrznych wyznaczono grubość warstwy termoizolacyjnej, zakładając zmiany współczynnika przenikania ciepła w zakresie 0,1-0,7 W/(m²K).



1. tynk cementowo-wapienny gr. 2 cm, $\lambda = 0,82$ W/(mK)
2. mur z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej gr. 25cm, $\lambda = 0,77$ W/(mK)
3. zaprawa klejowa gr. 0,5 cm, $\lambda = 0,8$ W/(mK)
4. warstwa termoizolacyjna gr. 5÷40 cm
5. łączniki mechaniczne z trzpieniami metalowymi o średnicy rdzenia 0,008 m w ilości 5 sztuk na 1m² powierzchni ściany
6. warstwa zbrojona z zaprawy klejowej i siatki gr. 3 cm, $\lambda = 0,8$ W/(mK)
7. tynk mineralny cienkowarstwowy gr. 2 cm, $\lambda = 1,0$ W/(mK)

Rys. 1. Budowa ściany zewnętrznej z systemem ETICS przyjęta w obliczeniach cieplnych domu modelowego

Źródło: opracowanie własne.

W celu wyeliminowania zarówno strat, jak i zysków ciepła przez pozostałe przegrody zewnętrzne (dach i podłogę na gruncie) założono ich wysoką izolacyjność cieplną. Dla dachu skośnego przyjęto współczynnik $U = 0,1$ W/(m²K), a dla podłogi na gruncie $U = 0,15$ W/(m²K). Do zaizolowania poddasza użytkowego wybrano wełnę mineralną, a do podłogi na gruncie polistyren *EPS*. Współczynnik przenikania ciepła dla stolarki okiennej wynosi $U = 1,3$ W/(m²K). Drzwi zewnętrzne charakteryzują się współczynnikiem $U = 1,7$ W/(m²K). Koszt eksploatacji obiektu nie obejmował zużycia c.w.u. W każdym wariantcie uwzględniono wpływ punktowych i liniowych mostków cieplnych występujących w systemie *ETICS*.

4. Koszty termoizolacji ścian zewnętrznych domu modelowego

Na całkowity koszt ocieplenia ścian zewnętrznych budynku składają się koszty robocizny, materiałów i sprzętu. W przeprowadzonej analizie koszt sprzętu został uwzględniony w kosztach robocizny. Założono, że inwestycja finansowana jest ze środków własnych. Obliczenia wykonano, opierając się na wartościach średniorocznych i zakładając 30-letni okres trwałości ekonomicznej systemu *ETICS*.

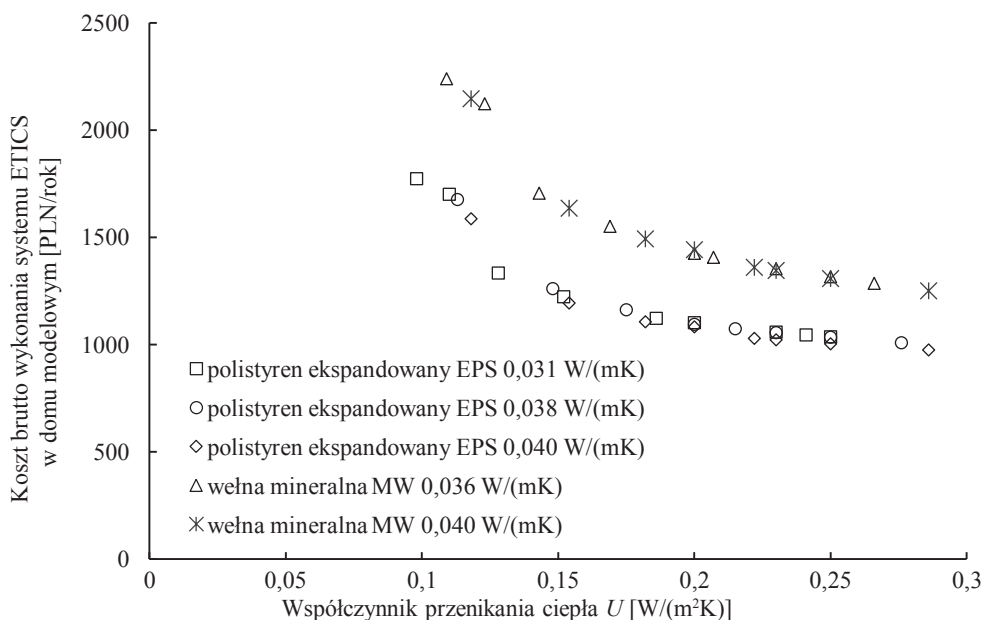
Wyniki pokazują, że koszt wykonania termoizolacji przy założonym współczynniku przenikania ciepła U zależy od rodzaju wykorzystanego materiału (rys. 2). Ceny jednostkowe wełny mineralnej są dwukrotnie wyższe od cen polistyrenu (tab. 1). Równocześnie wykonanie systemu *ETICS* z wykorzystaniem wełny mineralnej wymaga większego nakładu pracy, co wiąże się z wyższymi (o ok. 14,4%) kosztami robocizny. Powyższe czynniki powodują, że koszt termoizolacji modelowego domu jednorodzinnego z zastosowaniem wełny mineralnej jest o ok. 30% wyższy niż w przypadku polistyrenu.

Tabela 1. Ceny brutto materiałów izolacyjnych

Rodzaj izolacji cieplnej	Deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła λ_D [W/(mK)]	Cena brutto [PLN/m ³]
Polistyren EPS	0,040	130,38
	0,038	159,90
	0,031	191,88
Wełna mineralna MW	0,040	276,75
	0,036	307,50

Źródło: [https://www.styropian-ocieplenia.pl/styropiany_k_11.html; <https://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-pl/wsparcie/broszury/2.-cenniki/>].

Z obliczeń wynika również, że koszt ocieplenia budynku, przy założonym poziomie izolacyjności ścian zewnętrznych, nie zależy od jakości, mierzonej deklarowanym współczynnikiem przewodzenia ciepła λ_D , wykorzystanego materiału. Wartość deklarowanego współczynnika przewodzenia ciepła λ_D świadczy o właściwościach izolacyjnych wyrobu i ma wpływ na jego cenę (tab. 1). Zastosowanie materiału gorszej jakości powoduje konieczność zwiększenia grubości warstwy termoizolacyjnej, a więc ilości zużytego materiału izolacyjnego i materiałów pomocniczych, w celu zachowania współczynnika przenikania ciepła na założonym poziomie. W konsekwencji koszty się wyrównują.



Rys. 2. Średnioroczny koszt systemu ETICS przy różnych współczynnikach przenikania ciepła przez ściany zewnętrzne

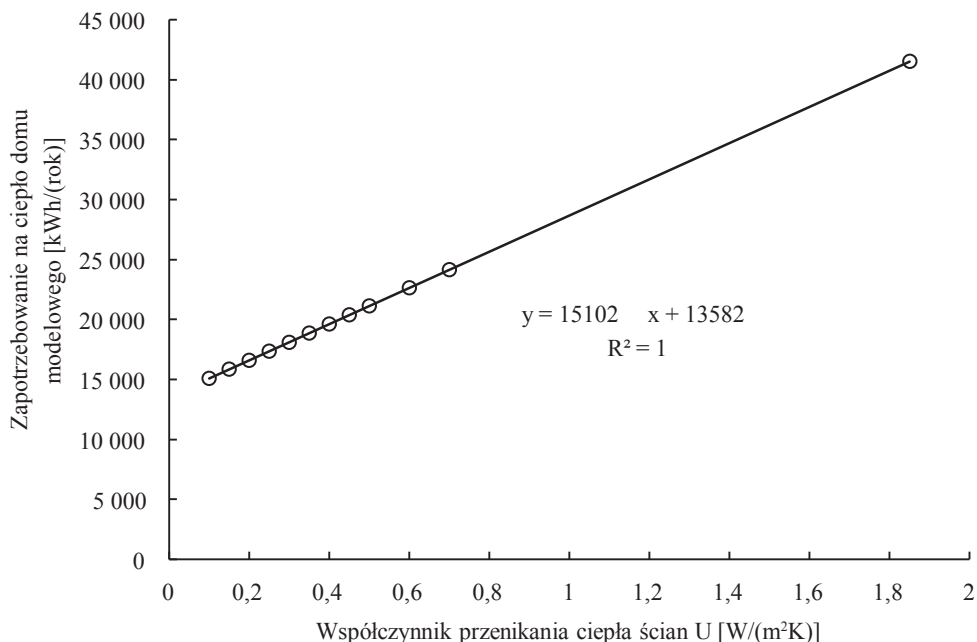
Źródło: opracowanie własne.

Zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła U przegród zewnętrznych powoduje wzrost nakładów na wykonanie systemu *ETICS*. Wynika to z zastosowania grubszej warstwy izolacji, dłuższych łączników mechanicznych, szerszych listew startowych itp. Termoizolacja ścian zewnętrznych modelowego domu systemem *ETICS* w celu osiągnięcia wymaganego obecnie współczynnika $U = 0,23$ W/(m²K) generuje średnioroczny koszt w wysokości 1344 zł/rok w przypadku wełny mineralnej i 1054 zł/rok przy zastosowaniu polistyrenu. Zwiększenie termoizolacyjności do $U = 0,20$ W/(m²K) (poziomu, który będzie wymagany od 2021 r.) pociąga za sobą dodatkowe koszty, w wysokości 97 zł/rok dla wełny i 27 zł/rok dla polistyrenu. Osiągnięcie współczynnika przewodzenia ciepła $U = 0,10$ W/(m²K), charakteryzującego budynki pasywne, zwiększa koszty w stosunku do aktualnie wymaganego stopnia termoizolacyjności budynku o ok. 67% w przypadku wełny mineralnej i 74% przy zastosowaniu polistyrenu.

5. Koszt ogrzewania domu modelowego

Punktem wyjścia do wyznaczenia kosztów ogrzewania jest określenie zapotrzebowania na ciepło, które w analizowanym przypadku uzależnione jest od stopnia izolacyjności cieplnej ścian zewnętrznych. Wynika to z faktu założenia w modelu

domu wysokiej izolacyjności cieplnej podłogi na gruncie oraz dachu. Uzyskaną zależność pomiędzy izolacyjnością cieplną przegród zewnętrznych a zapotrzebowaniem budynku na ciepło przedstawiono na rysunku 3.



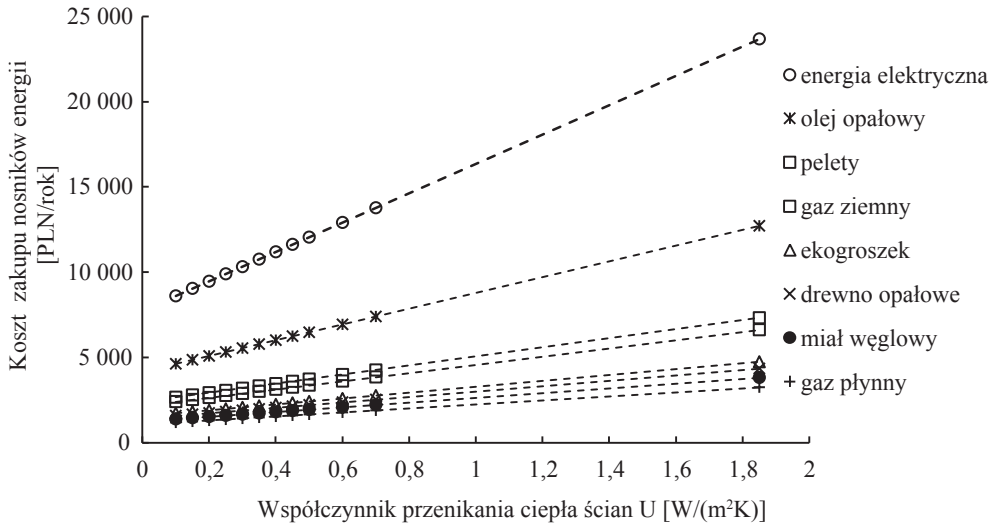
Rys. 3. Zapotrzebowanie na ciepło modelowego budynku przy różnych współczynnikach przenikania ciepła przez ściany zewnętrzne

Źródło: opracowanie własne.

Zmiana współczynnika przenikania ciepła U ścian zewnętrznych o $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zmienia zapotrzebowanie na ciepło modelowego budynku o ok. $1510 \text{ kWh}/\text{rok}$. W przypadku pozostawienia ścian zewnętrznych bez termoizolacji ($U = 1,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) zapotrzebowanie na ciepło uwzględnionego w analizie domu wynosi $41\,521 \text{ kWh}/\text{rok}$. Natomiast zwiększenie izolacyjności ścian zewnętrznych do $U = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zmniejsza zapotrzebowanie na ciepło o $24\,466 \text{ kWh}/\text{rok}$, tj. 59% . Dalsza poprawa termoizolacyjności przegród zewnętrznych od $U = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ do $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ogranicza zapotrzebowanie na ciepło o kolejne $453 \text{ kWh}/\text{rok}$. Przy współczynniku przenikania ciepła $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zapotrzebowanie na ciepło spada do $15\,092 \text{ kWh}/\text{rok}$.

Na podstawie uzyskanych wyników dotyczących zapotrzebowania na ciepło wyznaczono roczne koszty zakupu nośników energii do różnych systemów grzewczych (rys. 4). Ponieważ celem pracy jest określenie ekonomicznej efektywności poprawy izolacyjności cieplnej ścian zewnętrznych, w obliczeniach dotyczących

efektów uwzględniono jedynie koszty zmienne, zależne od ilości zużytego nośnika. Uzyskane wartości nie odzwierciedlają więc całkowitych kosztów ogrzewania bu-



Rys. 4. Roczny koszt zmienny zakupu opału do ogrzewania modelowego budynku przy różnych współczynnikach przenikania ciepła przez ściany zewnętrzne

Źródło: opracowanie własne.

dynku. Z badań wynika, że poprawa izolacyjności ścian zewnętrznych wywoła największy spadek kosztów wynikających z zapotrzebowania na ciepło w przypadku systemu grzewczego wykorzystującego energię elektryczną. Różnica rocznych kosztów ogrzewania w modelowym budynku bez izolacji $U = 1,85$ W/(m²K) i z izolacją zapewniającą współczynnik przenikania ciepła $U = 0,23$ W/(m²K) wynosi w tym przypadku 13 945 zł/rok (spadek o 59%). Zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła U z 0,23 W/(m²K) do 0,20 W/(m²K) ograniczy koszty o 258 zł/rok. Dalsza poprawa izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych do $U = 0,10$ W/(m²K) zmniejszy koszty ogrzewania o kolejne 860 zł/rok.

Najmniejsze różnice w kosztach wynikających z zapotrzebowania budynku na ciepło uzyskano dla systemów grzewczych wykorzystujących gaz płynny. W tym przypadku wykonanie systemu ETICS i ograniczenie współczynnika przenikania ciepła U z 1,85 W/(m²K) do 0,23 W/(m²K) oraz 0,20 W/(m²K) i 0,10 W/(m²K) wywoła odpowiednio spadek kosztów o 1913zł/rok, 1948 zł/rok i 2066 zł/rok.

6. Ekonomiczna efektywność systemu ETICS

Dokonując oceny ekonomicznej efektywności inwestycji polegającej na termoizolacji ścian zewnętrznych budynku mieszkalnego, do porównania efektów i nakładów

wykorzystano wskaźnik relacja korzyść/koszt (EI). Średnioroczne koszty wykonania systemu *ETICS* zestawiono z efektem, jakim jest spadek kosztów ogrzewania. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Efektywność systemu *ETICS* z wykorzystaniem wełny mineralnej i polistyrenu

Nośnik energii	Wełna mineralna			Polistyren		
	współczynnik przenikania ciepła U [W/(m ² K)]					
	0,23	0,20	0,10	0,23	0,20	0,10
Energia elektryczna	10,37	9,85	6,72	13,66	13,14	8,50
Olej opałowy	5,57	5,29	3,61	7,34	7,05	4,56
Pelety	3,21	3,05	2,08	4,22	4,06	2,63
Gaz ziemny	2,90	2,76	1,88	3,82	3,67	2,37
Ekogroszek	2,08	1,97	1,35	2,73	2,63	1,70
Drewno opałowe	1,90	1,81	1,23	2,51	2,41	1,56
Miał węglowy	1,67	1,59	1,06	2,20	2,12	1,37
Gaz płynny	1,42	1,35	0,92	1,87	1,80	1,16

Źródło: obliczenia własne.

Z badań wynika, że wykonanie termicznej izolacji ścian zewnętrznych murowanego domu jednorodzinnego systemem *ETICS* jest ekonomicznie efektywne. Najwyższe wskaźniki osiągnięto w przypadku domu ogrzewanego energią elektryczną. Są one znacznie wyższe od wskaźników uzyskanych dla innych nośników energii. Ogrzewanie domu przy wykorzystaniu energii elektrycznej generuje najwyższe koszty zmienne, stąd też poprawa termoizolacyjności ścian zewnętrznych, a w konsekwencji zmniejszenie strat ciepła przyniesie największe korzyści. W Polsce energia elektryczna jest bardzo rzadko głównym źródłem ciepła w domach jednorodzinnych. Wykorzystuje się ją raczej jako czynnik wspomagający inne systemy grzewcze. Najniższą ekonomiczną efektywność uzyskano w przypadku domów ogrzewanych gazem płynnym i miałem węglowym.

Poprawa termoizolacyjności ścian zewnętrznych przy zastosowaniu polistyrenu charakteryzuje się wyższą ekonomiczną efektywnością niż w przypadku wełny mineralnej. Różnice te rosną wraz z poprawą termoizolacyjności ścian zewnętrznych: im mniejsza wartość współczynnika przenikania ciepła U , a co się z tym wiąże, grubsza warstwa materiału izolacyjnego, tym większa różnica w kosztach wykonania systemu.

Niestety, ekonomiczna efektywność rozpatrywanej inwestycji spada wraz ze wzrostem izolacyjności cieplnej ścian zewnętrznych budynku. Przy wykorzystaniu do ogrzewania gazu płynnego osiągnięcie wysokiej termoizolacji ścian (współczynnik $U = 0,1$ W/(m²K), odpowiadający domom pasywnym) wełną mineralną nie jest ekonomicznie efektywne. Wskaźnik korzyść/koszt poniżej jedności świadczy o tym, że średnioroczne koszty przewyższają korzyści z tej inwestycji.

7. Zakończenie

Na podstawie badań można sformułować kilka wniosków natury ogólnej:

1. Wykonanie systemu *ETICS* zapewniającego większą termoizolacyjność ścian zewnętrznych i zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła przez te przegrody od $U = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ do $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ powoduje wzrost nakładów o ok. 67% w przypadku wełny mineralnej i 74% przy zastosowaniu polistyrenu.

2. Wykorzystanie wełny mineralnej do termoizolacji ścian zewnętrznych skutkuje wyższymi o ok. 30% nakładami na inwestycję niż w przypadku polistyrenu.

3. Koszt ocieplenia budynku, przy założonym poziomie izolacyjności cieplnej ścian zewnętrznych, w niewielkim stopniu zależy od jakości wykorzystanego materiału mierzonej deklarowanym współczynnikiem przewodzenia ciepła λ_D .

4. Wykonanie termicznej izolacji ścian osłonowych murowanego domu jednorodzinного systemem *ETICS* jest ekonomicznie efektywne. Najwyższe wskaźniki osiągnięto w domu ogrzewanym energią elektryczną. Najniższą efektywność ekonomiczną uzyskano w przypadku termoizolacji ścian domu ogrzewanego gazem płynnym i miałem węglowym.

5. Poprawa termoizolacyjności ścian zewnętrznych przy zastosowaniu polistyrenu charakteryzuje się wyższą ekonomiczną efektywnością niż w przypadku wełny mineralnej. Znajduje to odzwierciedlenie w decyzjach inwestorów. Polistyren ekspandowany stanowi 87%, a wełna mineralna jedynie 12% materiałów termoizolacyjnych stosowanych przy instalacji systemów *ETICS* w Polsce.

6. Ekonomiczna efektywność rozpatrywanej inwestycji spada wraz ze wzrostem izolacyjności cieplnej ścian osłonowych budynku. Nie ma więc ekonomicznego bodźca zachęcającego inwestorów do zwiększenia w ten sposób energooszczędności domów jednorodzinnych. W związku z powyższym zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła U przez przegrody zewnętrzne w nowo projektowanych budynkach mieszkalnych od 2021 r. z $U = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ do $U = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ jest wymuszone prawnie, a nie wynika z rachunku ekonomicznego.

Literatura

- Ajdukiewicz A., 2011, *Aspekty trwałości i wpływu na środowisko w projektowaniu konstrukcji betonowych*, Przegląd Budowlany, nr 2, s. 20-29.
- Dylewski R., Adameczuk J., 2010, *Efektywność kosztowa termoizolacji budynku*, Przegląd Budowlany, nr 1, s. 34-37.
- Frössel F., Oberhaus H., Riedel W., 2011, *Ochrona cieplna budynków. Systemy izolacji ETICS*, Wydawnictwo PolCen Sp. z o.o., Warszawa.
- Gałązka T., 2015, *Krajowy plan mający na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii. Budownictwo energooszczędne w Polsce – stan i perspektywy*, Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz, s. 7-19.

- Garecki M., 2015, *Nowe wymagania w zakresie izolacyjności przegród budowlanych w systemach ETICS – kierunki zmian*, Izolacje 2015. Kierunki rozwoju izolacji a wyzwania budownictwa niskoenergetycznego. Materiały konferencyjne, Warszawa, s. 121-137.
<https://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-pl/wsparcie/broszury/2.-cenniki> (2.01.2018).
https://www.styropian-ocieplenia.pl/styropiany_k_11.html (18.12.2017).
- Kowalska M. i in., 2017, *Ceny robot budowlano-montażowych i obiektów budowlanych*, GUS, Warszawa, s. 11-12.
- Narowski P., Panek A.D., 2012, *Zmiany klimatyczne a wymagania izolacyjności cieplnej*, Izolacje 2012. Wyzwania współczesnego budownictwa w dziedzinie izolacji. Materiały konferencyjne, Warszawa, s. 19-29.
- Orlik-Kozdoń B., Steidl T., 2012, *Izolacje cieplne z wełny mineralnej i styropianu*, Izolacje 2012. Wyzwania współczesnego budownictwa w dziedzinie izolacji. Materiały konferencyjne, Warszawa, s. 85-94.
- Orzechowski T., 2016, *Optimalizacja grubości izolacji cieplnej budynku ze względu na koszty inwestycyjne*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 47 (6), s. 229-233.
- Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) nr 244/2012 z 16 stycznia 2012 uzupełniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i ustanawiające ramy metodologii porównawczej do celów obliczania optymalnego pod względem kosztów poziomu wymagań minimalnych dotyczących charakterystyki energetycznej budynków i elementów budynków, Dz.Urz. L 081 z 21.03.2012.
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z 5 lipca 2013 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- Sobierajewicz P., 2011, *Ocena kosztów poprawy energetycznej w budynkach termomodernizowanych*, Przegląd Budowlany, nr 12, s. 83-87.
- Stachniewicz R., 2009, *Metody oceny efektywnej grubości izolacji termicznej*, Materiały Budowlane, nr 1, s. 61-63.
- Witczak K., 2013, *Budownictwo zeroenergetyczne lub prawie zeroenergetyczne – aspekty pozaenergetyczne*, Izolacje 2013, Rola izolacji w nowoczesnym projektowaniu i architekturze. Materiały konferencyjne, Warszawa, s. 7-16.
- Witczak K., 2015, *Wpływ rodzaju nośników energii końcowej na efektywność energooszczędną budynków wielorodzinnych*, Izolacje 2015, Kierunki rozwoju izolacji a wyzwania budownictwa niskoenergetycznego. Materiały konferencyjne, Warszawa, s. 32-38.
- Żurawski J., 2012, *Budownictwo zero- lub prawie zeroenergetyczne w warunkach polskich*, Izolacje 2012. Wyzwania współczesnego budownictwa w dziedzinie izolacji. Materiały konferencyjne, Warszawa, s. 31-41.