

## 6

# EKONOMICZNE I EKOLOGICZNE KOSZTY OGRZEWANIA ORAZ OPTYMALNA GRUBOŚĆ TERMOIZOLACJI

### 6.1 WPROWADZENIE

Termoizolacja przegród pionowych zewnętrznych budynku jest jednym ze sposobów na zmniejszenie zużycia energii. Inwestycja termoizolacyjna może przynosić korzyści ekonomiczne, ale można też oceniać ją pod względem ekologicznym. W literaturze przedmiotu można znaleźć kilka artykułów, w których rozwija się metody oceny termoizolacji pod względem ekonomicznym. Bazują one przede wszystkim na informacji o stopniu-dniach okresu grzewczego budynku. Można korzystając z nich wyznaczyć optymalną grubość termoizolacji ze względów ekonomicznych [2, 3, 4, 7].

W artykule zaproponowano metodę wyznaczania ekologicznych kosztów ogrzewania na wzór metody wyznaczania ekonomicznych kosztów ogrzewania, wprowadzonej w pracy [5]. Pozwala to na analityczny opis ekologicznej, podobnie jak ekonomicznej, wartości bieżącej netto inwestycji termoizolacyjnej. Można też wyznaczyć optymalną grubość termoizolacji zarówno ze względów ekonomicznych jak i ekologicznych. W pracy zbadano różne przypadki występujące w warunkach polskich. Wzięto pod uwagę różne warianty: materiału konstrukcyjnego przegrody, rodzaju źródła ciepła, rodzaju materiału termoizolacyjnego. Uwzględniono też różnorodność stref klimatycznych występujących w Polsce.

Dalsza część artykułu została podzielona na następujące punkty. W punkcie drugim opisano metody oceny ekonomicznej i ekologicznej dla inwestycji termoizolacyjnej. Wprowadzono między innymi wskaźnik ekologicznych kosztów ogrzewania, pozwalający na wyznaczenie optymalnej grubości termoizolacji ze względów ekologicznych. W trzecim punkcie przedstawiono wyniki dla różnych wariantów inwestycji termoizolacyjnej, z wykorzystaniem opisanych metod. Na koniec przeprowadzono dyskusję otrzymanych wyników i przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań.

### 6.2 METODY

Termoizolację przegród pionowych zewnętrznych budynku można traktować jako inwestycję zarówno ze względów ekonomicznych jak i ekologicznych. W sekcji tej przedstawiamy metodę oceny takiej inwestycji ze względów ekonomicznych, wprowadzoną

w pracy [5]. Zaproponowano też metodę oceny inwestycji ze względów ekologicznych. Kluczowe w obydwóch metodach jest oszacowanie odpowiednio ekonomicznych i ekologicznych kosztów ogrzewania. Znajomość tych kosztów pozwala wyznaczyć optymalne grubości termoizolacji oraz opłacalność inwestycji odpowiednio ze względów ekonomicznych i ekologicznych.

### 6.2.1 Ocena ekonomiczna inwestycji termoizolacyjnej

W celu oceny inwestycji termoizolacyjnej ze względów ekonomicznych można wyznaczyć ekonomiczną wartość bieżącą netto  $NPV$  inwestycji, opisaną wzorem [3]:

$$NPV = - (K_m \cdot d + K_w) + S_N \cdot G_0 \cdot (U_0 - U) \quad [\text{PLN}/\text{m}^2] \quad (6.1)$$

gdzie:  $K_m$  – koszt 1 m<sup>3</sup> materiału termoizolacyjnego [PLN/m<sup>3</sup>],  
 $K_w$  – koszty wykonania termoizolacji 1 m<sup>2</sup> przegrody budowlanej [PLN/m<sup>2</sup>],  
 $d$  – grubość warstwy termoizolacyjnej [m],

$$S_N = \sum_{j=1}^N \frac{(1+s)^j}{(1+r)^j} \quad \text{– skumulowany czynnik dyskontujący,}$$

$N$  – liczba lat użytkowania termoizolacji,

$r$  – realna roczna stopa procentowa,

$s$  – realny roczny wzrost (w procentach) kosztów ogrzewania,

$G_0$  – oczny ekonomiczny koszt ogrzewania, odniesiony do 1 m<sup>2</sup> powierzchni rozpatrywanej przegrody zewnętrznej [(PLN·K)/(W·y)],

$U_0$  – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez warstwy termoizolacyjnej [W/m<sup>2</sup>K],

$U$  – współczynnik przenikania ciepła przegrody z termoizolacją [W/m<sup>2</sup>K].

Zgodnie z wcześniejszym, kluczowe jest oszacowanie  $G_0$ . W pracy [5] zaproponowano:

$$G_0 = \frac{D_{U_0} - D_{U_n}}{U_0 - U_n} \cdot \frac{p_u}{p} \cdot K_c \quad [(\text{PLN} \cdot \text{K})/(\text{W} \cdot \text{y})] \quad (6.2)$$

gdzie:  $U_n = 0,25$  [W/m<sup>2</sup>K] wymagana wartość współczynnika przenikania ciepła przegrody z warstwą termoizolacji (zgodnie z [11]),

$D_U$  – roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania przypadające na 1m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej budynku, przy współczynniku przenikania ciepła  $U$  [kWh/m<sup>2</sup>y], (odpowiednio  $D_{U_0}$  przy  $U_0$  i  $D_{U_n}$  przy  $U_n$ ),

$p_u$  – powierzchnia użytkowa budynku [m<sup>2</sup>],

$p$  – powierzchnia przegród zewnętrznych pionowych [m<sup>2</sup>],

$K_c$  – koszt wytworzenia ciepła dla danego źródła ciepła i paliwa [PLN/kWh],  
 pozostałe – tak jak wcześniej.

Zależność między  $d$  i  $U$  opisana jest wzorem:

$$d = \lambda \cdot (1/U - 1/U_0) \quad [\text{m}] \quad (6.3)$$

gdzie:  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła materiału [W/mK],  
 pozostałe – tak jak wcześniej.

Znając  $G_0$  można wyznaczyć ze wzoru (1.1) dla jakiej wartości współczynnika przenikania ciepła  $U$  wartość maksymalną osiąga  $NPV$ . Oznaczmy ją przez  $U_{opt}$  [3]:

$$U_{opt} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot K_m}{G_0 \cdot S_N}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (6.4)$$

Optymalna grubość termoizolacji ze względów ekonomicznych (wzór 1.3 i 1.4), odpowiadająca  $U_{opt}$ , wynosi:

$$d_{opt} = \lambda \cdot (1/U_{opt} - 1/U_0) \quad [\text{m}] \quad (6.5)$$

Ponadto, zapotrzebowanie na energię do ogrzewania  $D_{U_{opt}}$  budynku ze współczynnikiem przenikania ciepła  $U_{opt}$ , uzyskany ze wzoru (1.4), i przy rocznym koszcie ogrzewania  $G_0$  (ze wzoru (1.2)) może być wyznaczone w następujący sposób [5]:

$$D_{U_{opt}} = D_{U_0} - G_0 \cdot (U_0 - U_{opt}) \cdot \frac{p_u}{K_c} \quad [\text{kWh/m}^2\text{y}] \quad (6.6)$$

### 6.2.2 Ocena ekologiczna inwestycji termoizolacyjnej

W punkcie tym zaproponowano metodę pozwalającą na ocenę inwestycji termoizolacyjnej ze względów ekologicznych. Metoda ta wzorowana na tej z p. 2.1. i wykorzystująca analizę LCA, pozwala na wyznaczenie ekologicznych kosztów ogrzewania i optymalnej grubości termoizolacji ze względów ekologicznych.

Do oceny inwestycji termoizolacyjnej ze względów ekologicznych proponuje się ekologiczną wartość bieżącą netto  $NPV_E$  inwestycji (patrz [6]):

$$NPV_E = - K_l \cdot d + N \cdot (E_{U_0} - E_U) / p \quad [\text{Pt/m}^2] \quad (6.7)$$

gdzie:  $K_l$  – wynik analizy LCA dla 1 m<sup>3</sup> materiału termoizolacyjnego [Pt/m<sup>3</sup>],  
 $E_{U_0}$  – roczne obciążenie środowiska wynikające z ogrzewania w fazie użytkowania budynku, przy współczynniku przenikania ciepła  $U_0$  (dla przegród zewnętrznych budynku bez termoizolacji) [Pt/y],  
 $E_U$  – roczne obciążenie środowiska wynikające z ogrzewania w fazie użytkowania budynku, przy współczynniku przenikania ciepła  $U$  (dla przegród zewnętrznych budynku z termoizolacją) [Pt/y],  
 pozostałe – tak jak wcześniej.

Wartość  $E_U$  (podobnie  $E_{U_0}$ ) można wyznaczyć w następujący sposób:

$$E_U = D_U \cdot p_u \cdot K_e \quad [\text{Pt/y}], \quad (6.8)$$

gdzie:  $K_e$  – wynik analizy LCA uzyskania 1kWh energii cieplnej dla danego źródła ciepła [Pt/kWh],  
 pozostałe – tak jak wcześniej.

Podstawiając wzór (6.8) do (6.7) otrzymuje się:

$$NPV_E = - K_l \cdot d + N \cdot K_e \cdot (p_u / p) \cdot (D_{U_0} - D_U) \quad [\text{Pt/m}^2] \quad (6.9)$$

Można teraz zdefiniować, jako roczny ekologiczny koszt ogrzewania, odniesiony do 1 m<sup>2</sup> powierzchni rozpatrywanej przegrody zewnętrznej,  $G_E$  spełniające zależność:

$$G_E \cdot (U_0 - U_n) = K_e \cdot (p_u / p) \cdot (D_{U_0} - D_{U_n}) \quad [\text{Pt/m}^2\text{y}] \quad (6.10)$$

Stąd otrzymuje się:

$$G_E = \frac{D_{U_0} - D_{U_n}}{U_0 - U_n} \cdot \frac{p_u}{p} \cdot K_e \quad [(Pt \cdot K)/(W \cdot y)] \quad (6.11)$$

Zatem wykorzystując koszty  $G_E$  wyznaczone ze wzoru (6.11) można  $NPV_E$  wyznaczać ze wzoru:

$$NPV_E = -K_l \cdot d + N \cdot G_E \cdot (U_0 - U) \quad [Pt/m^2] \quad (6.12)$$

Zaletą tej wersji jest analityczna zależność  $NPV_E$  od  $U$ , podobnie jak w  $NPV$ . Ekologiczna wartość bieżąca netto  $NPV_E$  traktowana, jako funkcja zmiennej  $U$  jest funkcją wklęsłą. Można wyznaczyć jej wartość maksymalną ze względu na  $U$ , oznaczmy ją przez  $U_{Eopt}$ :

$$U_{Eopt} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot K_l}{G_E \cdot N}} \quad [W/m^2K] \quad (6.13)$$

i w konsekwencji optymalną ze względów ekologicznych grubość termoizolacji  $d$ , oznaczmy ją przez  $d_{Eopt}$ :

$$d_{Eopt} = \lambda \cdot (1/U_{Eopt} - 1/U_0) \quad [m] \quad (6.14)$$

Ponadto, zapotrzebowanie na energię do ogrzewania  $D_{UEopt}$  budynku, przy współczynniku przenikania ciepła  $U_{Eopt}$  (wyznaczonym ze wzoru (6.13)) i rocznym ekologicznym koszcie ogrzewania  $G_E$  (wyznaczonym ze wzoru (6.11)) można obliczyć korzystając z następującego wzoru:

$$D_{UEopt} = D_{U_0} - G_E \cdot (U_0 - U_{Eopt}) \cdot \frac{p_u}{p} / K_e \quad [kWh/m^2y] \quad (1.15)$$

### 6.3 WYNIKI BADAŃ

W punkcie tym przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem metod opisanych w punktach 6.2.1. i 6.2.2. W badaniach wzięto pod uwagę dane charakterystyczne dla warunków polskich, związane ze strefami klimatycznymi, materiałami konstrukcyjnymi przegród zewnętrznych, materiałami termoizolacyjnymi oraz stosowanymi źródłami ciepła.

#### 6.3.1 Badany budynek i dane przyjęte do analizy

Analizie poddano standardowy budynek mieszkalny jednorodzinny dwutondygnacyjny (z użytkowym poddaszem) i częściowo podpiwniczony, przewidziany dla 4-6 osobowej rodziny, o powierzchni użytkowej  $p_u = 140,20 \text{ m}^2$ , powierzchni przegród zewnętrznych pionowych  $p = 183,55 \text{ m}^2$  oraz kubaturze  $376,14 \text{ m}^3$  (patrz [5]).

W budynku przewidziano ogrzewanie wodne pompowe, rury izolowane termicznie prowadzone w brzdach ściennych, w posadzce oraz po wierzchu ścian. W pomieszczeniach mieszkalnych zaprojektowano grzejniki płytowe, a w łazience grzejniki drabinkowe. System wentylacji naturalnej zapewnia wymianę powietrza w pomieszczeniach. Założono sprawność akumulacji ciepła 97%. Sprawność transportu czynnika grzewczego wynosi 97% ze względu na ogrzewanie centralne z lokalnego źródła ciepła usytuowanego

w ogrzewanym budynku. Sprawność regulacji i wykorzystania przyjęto 98% ze względu na zastosowanie w budynku regulacji centralnej i miejscowej ogrzewania wodnego. Obliczeniowa uśredniona temperatura powietrza wewnętrznego wynosi 20°C. Moc wewnętrzną zysków przyjęto na poziomie 3,5 W/m<sup>2</sup>. Konstrukcja budynku jest tradycyjna murowana, stropy żelbetowe gęstożebrowe, schody drewniane, dach o konstrukcji drewnianej, pokrycie blacho-dachówkową. Na przegrodach przewidziano tynk mineralny. Stolarstwo okienne jest z nawiewnikami, o współczynniku przenikania ciepła 1,3 W/m<sup>2</sup>K, drzwi zewnętrzne o współczynniku przenikania ciepła 1,8 W/m<sup>2</sup>K. Dach jest drewniany o konstrukcji jętkowej, izolowany wełną mineralną o grubości 16 cm oraz dodatkową warstwą 5 cm w celu likwidacji mostków cieplnych na krokwiach. W zależności od rodzaju źródła ciepła przyjęto wartość sprawności wytworzenia: kocioł na węgiel kamienny – 82%; kocioł gazowy kondensacyjny – 94%; kocioł na energię elektryczną – 99%; pompa ciepła – 350% (sezonowy współczynnik sprawności pompy SCOP = 3,5). W tab. 6.1 zestawiono najważniejsze dane dotyczące materiałów konstrukcyjnych przegrody, materiałów termoizolacyjnych i źródeł ciepła wziętych pod uwagę.

**Tab. 6.1 Wykorzystane dane dla materiałów konstrukcyjnych przegrod, materiałów termoizolacyjnych i źródeł ciepła**

Rodz. mat. konstrukcyjnego	Beton komórk. 500 (C1)	Błoczki ceramicz. MAX (C2)	Błoczki wap.-piaskowe SILKA E (C3)	
Grubość muru [m]	0,360	0,290	0,240	
Opór cieplny R [m <sup>2</sup> K/W]	2,118	0,659	0,453	
Współ. przenikania ciepła przegrody bez termoizolacji U <sub>o</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	0,430	1,154	1,514	
Materiał termoizolacyjny	Styropian EPS (I1)	Wełna mineralna (I2)	Poliuretan PUR (I3)	
λ [W/mK]	0,040	0,039	0,028	
Km [PLN/m <sup>3</sup> ]	167,300	522,000	713,300	
Kw [PLN/m <sup>2</sup> ]	30,000	30,000	30,000	
Źródło ciepła	Kocioł na węgiel kam. (S1)	Kocioł gazowy kondens. (S2)	Kocioł na energię elektr. (S3)	Pompa ciepła (S4)
Kc [PLN/kWh]	0,116	0,325	0,586	0,166

Źródło: opracowanie własne

Polska podzielona jest na pięć stref klimatycznych, oznaczonych odpowiednio cyframi rzymskimi: I, II, III, IV i V (patrz [10]). Ze względu na różnice w zapotrzebowaniu na energię cieplną w zależności od strefy klimatycznej, w badaniach uwzględniono lokalizację budynku w każdej z wyróżnionych stref. Ze względu na umiejscowienie stacji meteorologicznych wybrano do analizy: dla strefy I (najcieplejsza) – miasto Szczecin; dla strefy II – miasto Zielona Góra; dla III strefy – miasto Kielce; dla IV strefy – miasto Białystok oraz dla V strefy (najzimniejsza) – miasto Suwałki. Szczegóły podziału Polski na strefy klimatyczne i współrzędne geograficzne miast znajdują się w pracy [5]).

Do obliczania wielkości zapotrzebowania na energię do ogrzewania  $D_U$  wykorzystano program komputerowy CERTO służący do wykonywania certyfikacji energetycznej budynków. Program ten został opracowany przez Dolnośląską Agencję Energii i Środowiska [1]. W tab. 6.2 zestawiono wyznaczone zapotrzebowanie dla budynku bez termoizolacji  $D_{Uo}$  (przy różnych wartościach  $U_o$  w zależności od materiału konstrukcyjnego przegrody) i z termoizolacją  $D_{Un}$  (przy  $U_n = 0,25$  [W/m<sup>2</sup>K]) w zależności od strefy klimatycznej, w której znajduje się budynek.

**Tab. 6.2 Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku w [kWh/m<sup>2</sup>y]**

Strefa klimatyczna	$D_{Uo}$ rodz. mat. konstrukcyjnego			$D_{Un}$
	C1	C2	C3	
I	101,93	185,09	227,60	82,28
II	110,72	198,46	243,58	89,93
III	115,50	207,70	253,86	93,64
IV	128,11	224,84	273,32	104,73
V	137,99	239,03	289,55	113,62

Źródło: opracowanie własne

Należy zwrócić uwagę na istotne różnice w zapotrzebowaniu na energię takiego samego budynku, ale umieszczonego w różnych strefach. W strefie V zapotrzebowanie to jest większe o około 30% niż w strefie I. Biorąc pod uwagę budynki bez termoizolacji, różniące się materiałem konstrukcyjnym przegrody i w konsekwencji wartością  $U_o$ , zapotrzebowanie w przypadku C3 jest ponad dwukrotnie większe jak w przypadku C1.

### 6.3.2 Wykorzystanie analizy LCA

Metodyka środowiskowej oceny cyklu istnienia LCA (Life Cycle Assessment) jest stosowana m. in. w zagadnieniach związanych z energetyką czy budownictwem. Została ona znormalizowana w oparciu o dwie normy ISO 14040 oraz ISO 14044 [8, 9]. Analiza LCA składa się z czterech zasadniczych etapów: Określenie celu i zakresu (Goal and Scope Definition); Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI – Life Cycle Inventory); Ocena wpływu cyklu życia (LCIA – Life Cycle Impact Assessment); Interpretacja (Interpretation).

W artykule LCA wykorzystano do określenia oddziaływania na środowisko materiałów termoizolacyjnych budowlanych użytych do izolacji przegrody zewnętrznej pionowej, nieprzeźroczystej. System wyrobu obejmuje fazę wytworzenia materiałów termoizolacyjnych wraz z fazą pozyskania surowców i energii do ich wytworzenia oraz fazę użytkowania (tzw. fazę energetyczną), która związana jest bezpośrednio ze współczynnikiem przewodzenia ciepła poszczególnych materiałów, co ma wpływ na zapotrzebowanie budynku na energię cieplną. Poza systemem pozostawiono fazę recyklingu po okresie użytkowania. W badaniach rozpatrywane będą różne grubości warstwy termoizolacyjnej, dlatego jako jednostkę funkcjonalną dla materiałów termoizolacyjnych przyjęto 1m<sup>3</sup> materiału. Natomiast dla fazy energetycznej cyklu istnienia budynku, przyjęto jako jednostkę funkcjonalną wytworzenie 1 kWh energii cieplnej.

Do wykonania analizy LCA wykorzystano program SimaPro 7.1 [12]. Program ten został opracowany w ośrodku europejskim, posiada bazę danych odnoszącą się do warunków średnich w Europie, co jest szczególnie istotne pod kątem zastosowania go w Polsce. Program SimaPro 7.1 umożliwia skorzystanie aż z 21 procedur (metod) oceny, z których wykorzystano w artykule procedurę Ekowskażnik 99. Procedura ta umożliwia jednoznaczne przyporządkowanie jedenastu kategorii oddziaływania do trzech kategorii szkód i tym samym pozwala na dokonanie oceny wpływu na: zdrowie ludzkie, jakość środowiska i zużycie zasobów naturalnych. Umożliwia także dokonanie ważenia i przedstawienie wyniku końcowego LCA w Pt (wartość 1 Pt reprezentuje 103 rocznego obciążenia środowiska jednego mieszkańca Europy; wartość tą oblicza się poprzez podzielenie całego obciążenia środowiska w Europie przez liczbę mieszkańców i pomnożenie przez 1000). W tab 1.3 zestawiono wyniki analizy LCA dla branż pod uwagę materiałów termoizolacyjnych i źródeł ciepła w budynku.

**Tab. 6.3 Wyniki analizy LCA dla materiałów termoizolacyjnych i źródeł ciepła**

Materiał termoizolacyjny	Styropian EPS (I1)	Wełna mineralna (I2)	Poliuretan PUR (I3)	
Kl [Pt/m <sup>3</sup> ]	4,205	8,108	16,062	
Źródło ciepła	Kocioł na węgiel kam. (S1)	Kocioł gazowy kondens. (S2)	Kocioł na energię elektr. (S3)	Pompa ciepła (S4)
Ke [Pt/kWh]	0,0193	0,0123	0,0485	0,0137

Źródło: opracowanie własne

### 6.3.3 Analiza ekonomiczna

W pierwszej kolejności wyznaczono korzystając ze wzoru (6.2) roczny ekonomiczny koszt ogrzewania  $G_0$ . Wartość  $G_0$  zależy istotnie od strefy klimatycznej, parametrów budynku bez termoizolacji i stosowanego źródła ciepła (patrz tab. 6.4). Zdecydowanie największy wpływ na  $G_0$  ma stosowane źródło ciepła i związane z nim  $K_C$  (patrz tab. 6.1).

**Tab. 6.4 Roczny ekonomiczny koszt ogrzewania  $G_0$  [(PLN·K)/(W·y)]**

Rodz. mat. konstrukcyjnego	Strefa klimatyczna	Źródło ciepła			
		S1	S2	S3	S4
C1	I	8,593	24,075	43,409	12,297
	II	9,092	25,472	45,928	13,010
	III	9,559	26,783	48,292	13,680
	IV	10,224	28,645	51,650	14,631
	V	10,657	29,858	53,837	15,251
C2	I	8,952	25,081	45,223	12,811
	II	9,450	26,477	47,739	13,523
	III	9,932	27,826	50,172	14,212
	IV	10,458	29,302	52,833	14,966
	V	10,920	30,595	55,164	15,627
C3	I	9,050	25,355	45,716	12,950
	II	9,568	26,808	48,337	13,693
	III	9,978	27,954	50,404	14,278
	IV	10,499	29,415	53,037	15,024
	V	10,956	30,695	55,346	15,678

Znając  $G_0$  można wyznaczyć już optymalną ze względów ekonomicznych wartość współczynnika przenikania ciepła  $U_{opt}$  (wzór (6.4)). Wyniki przedstawiono w tab. 6.5. Dalsze obliczenia wykonano dla wszystkich wariantów. Jednak ze względu na dużą ilość danych, w kolejnych tabelach podano wyniki tylko dla stref klimatycznych I, III i V. Dla większości przypadków uzyskano  $U_{opt}$  mniejsze od  $U_n$ . Dla wariantu S1-I2 otrzymano jednak  $U_{opt}$  większe od  $U_n$ , podobnie dla S1-I3, S4-I2 i S4-I3. W tych czterech przypadkach mamy jednocześnie niski koszt wytwarzania ciepła  $K_c$  (S1 i S4) oraz stosunkowo drogi materiał termoizolacyjny  $K_m$  (I2 i I3) (patrz tab. 6.1).

**Tab. 6.5 Optymalne ze względów ekonomicznych wartości współczynnika przenikania ciepła  $U_{opt}$  [W/m<sup>2</sup>K]**

Źródło ciepła		S1 Materiał termoizolacyjny			S2 Materiał termoizolacyjny			S3 Materiał termoizolacyjny			S4 Materiał termoizolacyjny		
Mat. konstr.	Strefa klimat.	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
		C1	I	0,211	0,368	0,364	0,126	0,220	0,218	0,094	0,164	0,162	0,176
III	0,200		0,349	0,345	0,119	0,208	0,206	0,089	0,155	0,154	0,167	0,291	0,289
V	0,189		0,330	0,327	0,113	0,197	0,195	0,084	0,147	0,145	0,158	0,276	0,273
C2	I	0,207	0,360	0,357	0,123	0,215	0,213	0,092	0,160	0,159	0,173	0,301	0,298
	III	0,196	0,342	0,339	0,117	0,204	0,202	0,087	0,152	0,151	0,164	0,286	0,283
	V	0,187	0,326	0,323	0,112	0,195	0,193	0,083	0,145	0,144	0,156	0,273	0,270
C3	I	0,205	0,358	0,355	0,123	0,214	0,212	0,091	0,159	0,158	0,172	0,299	0,297
	III	0,196	0,341	0,338	0,117	0,204	0,202	0,087	0,152	0,150	0,164	0,285	0,282
	V	0,187	0,326	0,322	0,112	0,195	0,193	0,083	0,145	0,143	0,156	0,272	0,270

Źródło: opracowanie własne

Dla wyznaczonych  $U_{opt}$  można już określić optymalne ze względów ekonomicznych grubości termoizolacji  $d_{opt}$  (6.5) i zapotrzebowania  $D_{U_{opt}}$  (6.6). W tab. 6.6 podano obliczone grubości termoizolacji. Jak widać zróżnicowanie grubości jest bardzo duże. Zależy ona istotnie od wszystkich czterech branych pod uwagę czynników. Otrzymane ze wzoru (6.6) zapotrzebowania na energię do ogrzewania (przy współczynniku  $U_{opt}$ ) wyznaczono też dla porównania za pomocą programu CERTO. Błąd oszacowania  $D_{U_{opt}}$  ze wzoru (6.6) w stosunku do wyników uzyskanych w programie CERTO nie przekraczał  $\pm 0,5\%$ .

#### 6.3.4 Analiza ekologiczna

Korzystając z metody wprowadzonej w p. 6.2.2. przeprowadzono analizę ekologiczną dla inwestycji termoizolacyjnej. Na początku wyznaczono korzystając ze wzoru (6.11) roczny ekologiczny koszt ogrzewania  $G_E$ . Podobnie jak w przypadku  $G_0$ , wartość  $G_E$  zależy istotnie od stosowanego źródła ciepła i strefy klimatycznej oraz w mniejszym stopniu od



parametrów budynku bez termoizolacji (tab. 6.7). Zdecydowanie największy wpływ na  $G_E$  ma stosowane źródło ciepła i związane z nim  $K_e$  (tab. 6.3).

**Tab. 6.6 Optymalne ze względów ekonomicznych grubości termoizolacji  $d_{opt}$  [m]**

Źródło ciepła	S1 Materiał termoizolacyjny			S2 Materiał termoizolacyjny			S3 Materiał termoizolacyjny			S4 Materiał termoizolacyjny				
	Mat. konstr.	Strefa klimat.	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
C1	I		0,097	0,015	0,012	0,224	0,087	0,063	0,333	0,147	0,108	0,134	0,036	0,027
	III		0,107	0,021	0,016	0,243	0,097	0,071	0,356	0,161	0,117	0,146	0,043	0,032
	V		0,119	0,027	0,021	0,261	0,107	0,078	0,383	0,175	0,128	0,160	0,051	0,037
C2	I		0,159	0,075	0,054	0,291	0,148	0,107	0,400	0,210	0,152	0,197	0,096	0,070
	III		0,169	0,080	0,058	0,307	0,157	0,114	0,425	0,223	0,161	0,209	0,103	0,075
	V		0,179	0,086	0,062	0,322	0,166	0,121	0,447	0,235	0,170	0,222	0,109	0,079
C3	I		0,169	0,083	0,060	0,299	0,156	0,114	0,413	0,220	0,159	0,206	0,105	0,076
	III		0,178	0,089	0,064	0,315	0,165	0,120	0,433	0,231	0,168	0,217	0,111	0,081
	V		0,187	0,094	0,068	0,331	0,174	0,127	0,456	0,243	0,177	0,230	0,118	0,085

Źródło: opracowanie własne

**Tab. 6.7 Roczny ekologiczny koszt ogrzewania GE [(Pt·K)/(W·y)]**

Rodz. mat. konstrukcyjnego	Strefa klimatyczna	Źródło ciepła			
		S1	S2	S3	S4
C1	I	1,430	0,911	3,593	1,018
	II	1,513	0,964	3,801	1,077
	III	1,590	1,014	3,997	1,132
	IV	1,701	1,084	4,275	1,211
	V	1,773	1,130	4,456	1,262
C2	I	1,489	0,949	3,743	1,060
	II	1,572	1,002	3,951	1,119
	III	1,652	1,053	4,152	1,176
	IV	1,740	1,109	4,373	1,239
	V	1,817	1,158	4,566	1,293
C3	I	1,506	0,960	3,784	1,072
	II	1,592	1,015	4,001	1,133
	III	1,660	1,058	4,172	1,182
	IV	1,747	1,113	4,390	1,243
	V	1,823	1,162	4,581	1,298

Źródło: opracowanie własne

Znając  $G_E$  można wyznaczyć optymalną ze względów ekologicznych wartość współczynnika przenikania ciepła  $U_{Eopt}$  (6.13). Wyniki przedstawiono w tab. 6.8. Podobnie jak przy analizie ekonomicznej, dalsze obliczenia wykonano dla wszystkich wariantów, a w kolejnych tabelach podano wyniki dla stref klimatycznych I, III i V. Dla wszystkich przypadków uzyskano  $U_{Eopt}$  mniejsze od  $U_{opt}$  i dużo mniejsze od  $U_n$ .

Tab. 6.8 Optymalne ze względów ekologicznych wartości współczynnika przenikania ciepła  $U_{Eopt}$  [W/m<sup>2</sup>K]

Źródło ciepła	S1 Materiał termoizolacyjny			S2 Materiał termoizolacyjny			S3 Materiał termoizolacyjny			S4 Materiał termoizolacyjny				
	Mat. konstr.	Strefa klimat.	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
C1	I		0,069	0,094	0,112	0,086	0,118	0,141	0,043	0,059	0,071	0,081	0,111	0,133
	III		0,065	0,089	0,106	0,081	0,112	0,133	0,041	0,056	0,067	0,077	0,106	0,126
	V		0,062	0,084	0,101	0,077	0,106	0,126	0,039	0,053	0,064	0,073	0,100	0,119
C2	I		0,067	0,092	0,110	0,084	0,115	0,138	0,042	0,058	0,069	0,080	0,109	0,130
	III		0,064	0,087	0,104	0,080	0,110	0,131	0,040	0,055	0,066	0,076	0,104	0,124
	V		0,061	0,083	0,100	0,076	0,105	0,125	0,038	0,053	0,063	0,072	0,099	0,118
C3	I		0,067	0,092	0,109	0,084	0,115	0,137	0,042	0,058	0,069	0,079	0,109	0,130
	III		0,064	0,087	0,104	0,080	0,109	0,130	0,040	0,055	0,066	0,075	0,103	0,123
	V		0,061	0,083	0,099	0,076	0,104	0,124	0,038	0,053	0,063	0,072	0,099	0,118

Źródło: opracowanie własne

Dla wyznaczonych  $U_{Eopt}$  można określić optymalne ze względów ekologicznych grubości termoizolacji  $d_{Eopt}$  (6.14) i zapotrzebowania  $D_{UEopt}$  (6.15). W tab. 6.9 podano obliczone grubości termoizolacji. Grubości izolacji optymalne ze względów ekologicznych są dużo większe od optymalnych ze względów ekonomicznych. W niektórych przypadkach wynoszą nawet ponad 0,5 m (np. S3-I1).

Tab. 6.9 Optymalne ze względów ekologicznych grubości termoizolacji  $d_{Eopt}$  [m]

Źródło ciepła	S1 Materiał termoizolacyjny			S2 Materiał termoizolacyjny			S3 Materiał termoizolacyjny			S4 Materiał termoizolacyjny				
	Mat. konstr.	Strefa klimat.	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
C1	I		0,487	0,324	0,185	0,372	0,240	0,133	0,837	0,570	0,329	0,401	0,261	0,145
	III		0,522	0,348	0,199	0,401	0,258	0,145	0,883	0,606	0,353	0,426	0,277	0,157
	V		0,552	0,374	0,212	0,426	0,277	0,157	0,933	0,645	0,372	0,455	0,299	0,170
C2	I		0,562	0,390	0,230	0,442	0,305	0,179	0,918	0,639	0,382	0,465	0,324	0,191
	III		0,590	0,414	0,245	0,465	0,321	0,189	0,965	0,675	0,400	0,492	0,341	0,202
	V		0,621	0,436	0,256	0,492	0,338	0,200	1,018	0,702	0,420	0,521	0,360	0,213
C3	I		0,571	0,398	0,238	0,450	0,313	0,186	0,926	0,647	0,387	0,480	0,332	0,197
	III		0,599	0,423	0,251	0,474	0,332	0,197	0,974	0,683	0,406	0,507	0,353	0,209
	V		0,629	0,444	0,264	0,500	0,349	0,207	1,026	0,710	0,426	0,529	0,368	0,219

## 6.4 DYSKUSJA

Analizując wyniki z p. 3. należy zwrócić uwagę na kilka aspektów. W przypadku analizy ekonomicznej okazało się, że w niektórych przypadkach optymalna grubość izolacji nie gwarantuje uzyskania wymaganej przepisami wartości współczynnika przenikania ciepła (otrzymano  $U_{opt} > U_n = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Może się tak zdarzyć, gdy koszt wytworzenia ciepła jest niski (źródła ciepła S1 i S4) i jednocześnie koszt materiału izolacyjnego jest wysoki (materiały izolacyjne I2 i I3). Należy też zwrócić uwagę, że typ materiału konstrukcyjnego przegrody praktycznie nie ma wpływu na uzyskany współczynnik  $U_{opt}$ . Oczywiście optymalna grubość termoizolacji  $d_{opt}$  zależy już istotnie od materiału konstrukcyjnego przegrody poprzez współczynnik  $U_o$  (6.5). Zgodnie z przewidywaniami zaobserwowano, że im zimniejsza jest strefa klimatyczna tym mniejsza jest wartość  $U_{opt}$  (tab. 6.5).

W przypadku analizy ekologicznej, w każdym badanym wariantcie uzyskano  $U_{Eopt} < U_n = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ale w niektórych przypadkach grubość izolacji optymalna ze względów ekologicznych (nawet ok. 1m) jest nierealna do zastosowania.

Ze względu na powyższe spostrzeżenia postanowiono sprawdzić, ile wynoszą wartości NPV (6.1) i  $NPV_E$  (6.12), przy współczynnikach przenikania ciepła o wartościach  $U_n$ ,  $U_{opt}$  i  $U_{Eopt}$ . W tab. 6.10 podano, ile wynoszą wartości NPV uzyskane dla  $U = U_n$ . Należy zauważyć, że dla niektórych wariantów otrzymano wartości ujemne (C1 w połączeniu z S1 albo S4). Zdecydowanie największe wartości uzyskano dla wariantu C3-S3. W wariantcie tym przegroda C3 ma najgorszy (największy) współczynnik  $U_o$  przed termoizolacją. Natomiast ogrzewanie z wykorzystaniem źródła ciepła S3 charakteryzuje się największą wartością kosztów  $K_c$  ze wszystkich rozpatrywanych źródeł ciepła. Dużo mniejszy wpływ na wartość NPV ma strefa klimatyczna i rodzaj materiału termoizolacyjnego.

W tabeli 6.11 podano, jakie byłyby wartości  $NPV_E$  uzyskane dla  $U = U_n$ . Należy podkreślić, że dla wszystkich wariantów uzyskano wartości dodatnie. Podobnie jak w przypadku NPV, największy wpływ na wartość  $NPV_E$  ma materiał konstrukcyjny przegrody i stosowane źródło ciepła. Znowu, zdecydowanie największe wartości uzyskano dla wariantu C3-S3, ponieważ przegroda C3 ma najgorszy współczynnik  $U_o$ . Ponadto ogrzewanie z wykorzystaniem źródła ciepła S3 charakteryzuje się największą wartością kosztów  $K_e$  ze wszystkich rozpatrywanych źródeł ciepła. Najmniejszy wpływ na wartość  $NPV_E$  ma rodzaj materiału termoizolacyjnego.

Wyznaczono też wartości NPV i  $NPV_E$  dla  $U = U_{opt}$ . Dla każdego wariantu otrzymano oczywiście  $NPV(U_{opt}) > NPV(U_n)$ , też dla wariantów, w których  $U_{opt} > U_n$ . Podobnie jak dla  $U = U_n$ , także dla  $U = U_{opt}$  otrzymano dla wszystkich wariantów dodatnie wartości  $NPV_E$ . Przy czym, tam gdzie było  $U_{opt} < U_n$  uzyskano  $NPV(U_{opt}) > NPV_E(U_n)$  i na odwrót. Największą różnicę, dla wszystkich materiałów konstrukcyjnych przegrody i stref klimatycznych, między  $NPV_E(U_{opt})$  i  $NPV_E(U_n)$  uzyskano dla wariantu S3-I1.

Na koniec wyznaczono wartości NPV i  $NPV_E$  dla  $U = U_{Eopt}$ . W przypadku NPV wartość istotnie zależy od wszystkich parametrów branych pod uwagę. Np. dla wariantu C2-S1-I2 otrzymano  $NPV(U_{Eopt}) < 0$ , natomiast dla wariantu C2-S1-I1 otrzymano

$NPV(U_{Eopt}) > 0$ , w każdej strefie klimatycznej. Już przy  $U = U_n$  dla każdego przypadku  $NPV_E(U_n) > 0$ , zatem też  $NPV_E(U_{Eopt}) > 0$ .

Na poniższych wykresach przedstawiono, dla różnych wariantów, zależności  $NPV$  i  $NPV_E$  od  $U$ . Na rys. 6.1. przedstawiono wyniki dla wariantu C1-S2-I2 i III strefy klimatycznej. Należy zauważyć, że w tym wariantcie ( $U_o = 0,430 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) dla  $U = U_{Eopt}$  otrzymano  $NPV < 0$ . Natomiast różnica między  $NPV_E(U_{opt})$  i  $NPV_E(U_{Eopt})$  jest niewielka.

**Tab. 6.10 Wartości  $NPV$  [PLN/m<sup>2</sup>]  
 uzyskane dla  $U = U_n$**

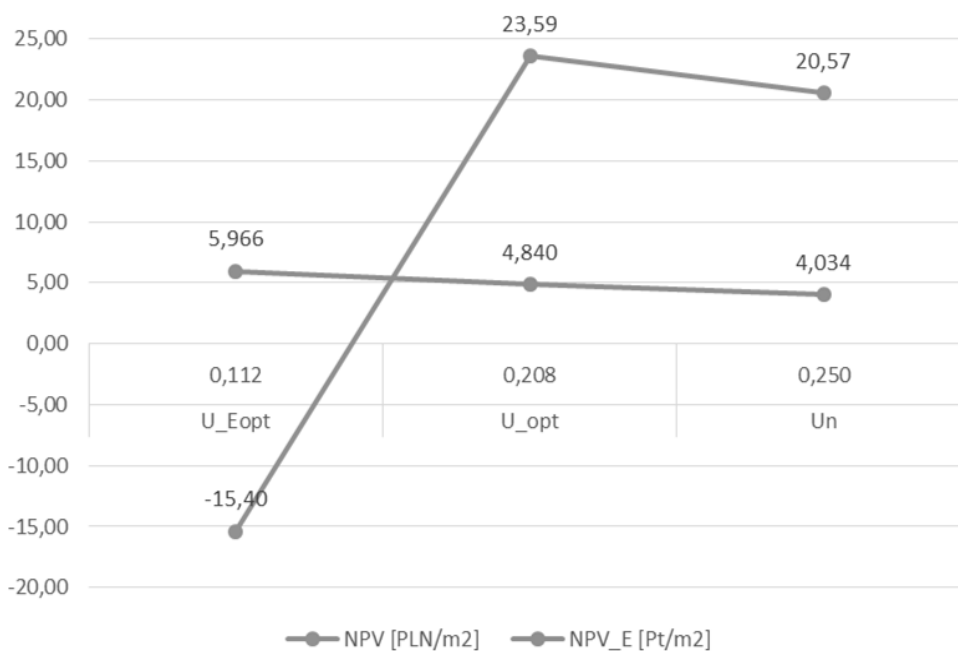
C3				C2				C1				Mat. konstr. Strefa klimat.	Źródło ciepła
V	III	I	I	V	III	I	I	V	III	I	I		
190,31	168,63	148,08	148,08	122,12	106,46	90,94	90,94	-7,59	-11,05	-14,10	I1	Materiał termoizolacyjny S1 S2 S3 S4	
144,87	123,19	102,64	102,64	79,35	63,69	48,17	48,17	-30,31	-33,77	-36,82	I2		
145,68	124,00	103,45	103,45	80,26	64,60	49,08	49,08	-29,91	-33,37	-36,42	I3		
627,64	566,91	509,32	509,32	433,87	389,99	346,50	346,50	52,99	43,29	34,75	I1		
582,20	521,47	463,88	463,88	391,10	347,22	303,73	303,73	30,27	20,57	12,03	I2		
583,01	522,28	464,69	464,69	392,01	348,13	304,64	304,64	30,67	20,97	12,43	I3		
1173,78	1064,29	960,44	960,44	823,18	744,07	665,66	665,66	128,64	111,15	95,75	I1		
1128,34	1018,85	915,00	915,00	780,41	701,30	622,89	622,89	105,92	88,43	73,03	I2		
1129,15	1019,66	915,81	915,81	781,32	702,21	623,80	623,80	106,32	88,83	73,43	I3		
294,93	263,92	234,50	234,50	196,70	174,29	152,08	152,08	6,91	1,95	-2,41	I1		
249,49	218,48	189,06	189,06	153,93	131,52	109,31	109,31	-15,81	-20,77	-25,13	I2		
250,30	219,29	189,87	189,87	154,84	132,43	110,22	110,22	-15,41	-20,37	-24,73	I3		

Źródło: opracowanie własne

**Tab. 6.11 Wartości  $NPV_E$  [Pt/m<sup>2</sup>]  
 uzyskane dla  $U = U_n$**

C3				C2				C1				Mat. konstr. Strefa klimat.	Źródło ciepła
V	III	I	I	V	III	I	I	V	III	I	I		
57,039	51,895	47,016	47,016	40,535	36,819	33,135	33,135	7,697	6,875	6,152	I1	Materiał termoizolacyjny S1 S2 S3 S4	
56,548	51,404	46,525	46,525	40,072	36,356	32,672	32,672	7,452	6,630	5,907	I2		
56,092	50,948	46,069	46,069	39,648	35,932	32,248	32,248	7,224	6,402	5,679	I3		
36,147	32,869	29,760	29,760	25,642	23,274	20,926	20,926	4,803	4,279	3,818	I1		
35,656	32,378	29,269	29,269	25,179	22,811	20,463	20,463	4,558	4,034	3,573	I2		
35,200	31,922	28,813	28,813	24,755	22,387	20,039	20,039	4,330	3,806	3,345	I3		
144,187	131,261	119,002	119,002	102,658	93,319	84,063	84,063	19,769	17,704	15,885	I1		
143,696	130,770	118,511	118,511	102,195	92,856	83,600	83,600	19,524	17,459	15,640	I2		
143,240	130,314	118,055	118,055	101,771	92,432	83,176	83,176	19,296	17,231	15,412	I3		
40,441	36,780	33,307	33,307	28,703	26,058	23,436	23,436	5,398	4,813	4,298	I1		
39,950	36,289	32,816	32,816	28,240	25,595	22,973	22,973	5,153	4,568	4,053	I2		
39,494	35,833	32,360	32,360	27,816	25,171	22,549	22,549	4,925	4,340	3,825	I3		

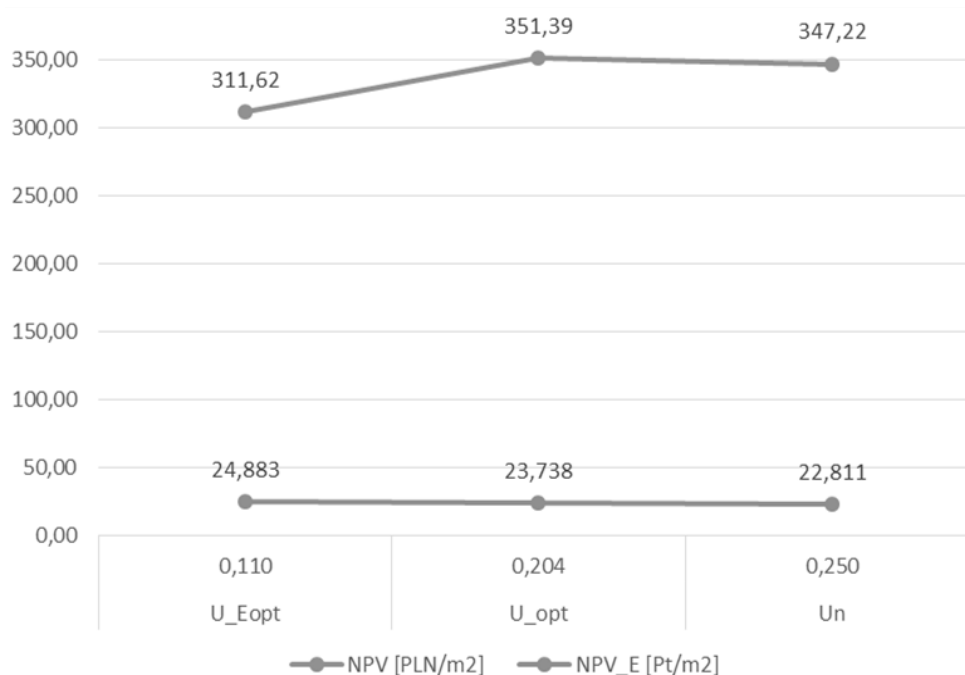
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 6.1** Wartości  $NPV$  i  $NPV_E$  w zależności od  $U$  dla wariantu C1-S2-I2 i III strefy klimatycznej

Źródło: opracowanie własne

Na rys. 6.2 przedstawiono wyniki dla wariantu C2-S2-I2 i III strefy klimatycznej. Należy zauważyć, że w tym wariancie ( $U_o = 1,154 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) dla  $U = U_{Eopt}$  otrzymano już  $NPV > 0$ . Zarówno różnica (w procentach) między  $NPV_E(U_{opt})$  i  $NPV_E(U_{Eopt})$  jest nie wielka, jak i między  $NPV(U_{opt})$  i  $NPV(U_{Eopt})$ .

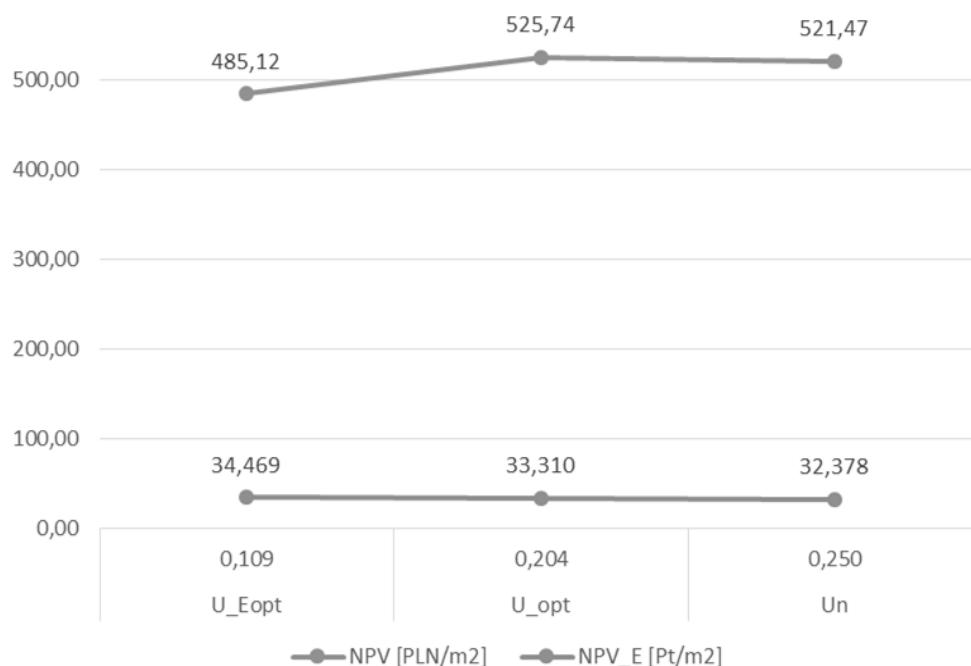


**Rys. 6.2** Wartości  $NPV$  i  $NPV_E$  w zależności od  $U$  dla wariantu C2-S2-I2 i III strefy klimatycznej

Źródło: opracowanie własne

Na rys. 6.3 podano wyniki dla wariantu C3-S2-I2 i III strefy klimatycznej. W tym przypadku ( $U_o = 1,514 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) sytuacja wygląda podobnie jak dla poprzedniego wariantu, przy czym różnice procentowe są jeszcze mniejsze.

Podsumowując można stwierdzić, że opłacalne jest zastosowanie większych grubości izolacji termicznych niż optymalne ze względów ekonomicznych. Uzyskuje się wtedy większe korzyści środowiskowe, przy nie wielkim spadku korzyści ekonomicznych.



**Rys. 6.3** Wartości  $NPV$  i  $NPV_E$  w zależności od  $U$  dla wariantu C3-S2-I2 i III strefy klimatycznej.

Źródło: opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano metody wyznaczania ekonomicznych i ekologicznych kosztów ogrzewania. Dzięki temu można analitycznie opisać ekonomiczną i ekologiczną wartość bieżącą netto inwestycji oraz wyznaczyć optymalną grubość termoizolacji zarówno ze względów ekonomicznych jak i ekologicznych. Dla wszystkich zbadanych przypadków wszystkich stref klimatycznych występujących w Polsce, optymalną grubość termoizolacji ze względów ekologicznych otrzymano dużo większą niż ze względów ekonomicznych. W każdym wariancie, już przy grubości termoizolacji optymalnej ze względów ekonomicznych inwestycja była opłacalna ze względów ekologicznych. Uzyskiwano zmniejszenie obciążenia środowiska w wyniku wykonania inwestycji termoizolacyjnej.

Ponadto można zauważyć, że korzystne jest zastosowanie większych grubości termoizolacji niż optymalne ze względów ekonomicznych. Otrzymuje się wtedy większe korzyści ekologiczne z inwestycji termoizolacyjnej, przy nie wielkim zmniejszeniu korzyści ekonomicznych.

## LITERATURA

1. Certo. 2014. Pobrano z: [http://cieplej.pl/index\\_daes.php5?dzial=3&kat=14](http://cieplej.pl/index_daes.php5?dzial=3&kat=14). [Dostęp: 13.01.2017].
2. K. Çomaklı, B. Yüksel. „Optimum insulation thickness of external walls for energy saving”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, p. 473-479, 2003. (doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00209-0)).
3. R. Dylewski, J. Adamczyk. „Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls”. *Building and Environment*, vol. 46, p. 2615-2623, 2011. (doi: [10.1016/j.buildenv.2011.06.023](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.023)).
4. R. Dylewski, J. Adamczyk. „Ocena wpływu lokalizacji budynku na zapotrzebowanie na energię”, *Systemy wspomagania w inżynierii produkcji – Jakość i Bezpieczeństwo*. J. Sitko and B. Szczęśniak, (red.). Gliwice: PA NOVA, 2014, p. 60-73.
5. R. Dylewski, J. Adamczyk. „Study on ecological cost-effectiveness for the thermal insulation of building external vertical walls in Poland”. *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, p. 467-478, 2016. (doi: [10.1016/j.jclepro.2016.05.155](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.155)).
6. R. Dylewski, J. Adamczyk. „The environmental impacts of thermal insulation of buildings including the categories of damage: A Polish case study”. *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 878-887, 2016. (doi: [10.1016/j.jclepro.2016.07.172](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.172)).
7. A. Hasan. „Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost”. *Applied Energy*, vol. 63, pp. 115-124, 1999. (doi: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00023-9)).
8. ISO EN 14040. 2006. (ISO EN 14040:2006 – *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*).
9. ISO EN 14044. 2006. (ISO EN 14044:2006 – *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*).
10. PN-EN 12831. 2006. *Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*.
11. RMT. 2013. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie: w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2013 poz. 926).
12. SimaPro. 2009. *PRé Consultants. SimaPro LCA Software. Version 7.1. Product Ecology Consultants. Netherlands*. ([www.pre.nl/simapro](http://www.pre.nl/simapro). 13.01.2017).

## EKONOMICZNE I EKOLOGICZNE KOSZTY OGRZEWANIA ORAZ OPTYMALNA GRUBOŚĆ TERMOIZOLACJI

**Streszczenie:** W artykule zaproponowano metodę wyznaczania ekologicznych kosztów ogrzewania na wzór metody wyznaczania ekonomicznych kosztów ogrzewania. Dzięki temu można analitycznie opisać ekologiczną, podobnie jak ekonomiczną, wartość bieżącą netto inwestycji termolizacyjnej oraz wyznaczyć optymalną grubość termoizolacji zarówno ze względów ekonomicznych jak i ekologicznych. Zbadano różne przypadki występujące w warunkach polskich. Poddano wariantowości: materiał konstrukcyjny przegrody, rodzaj źródła ciepła, rodzaj materiału termolizacyjnego. Uwzględniono też różnorodność stref klimatycznych występujących w Polsce. Dla wszystkich zbadanych wariantów otrzymano grubość termoizolacji optymalną ze względów ekologicznych dużo większą niż ze względów ekonomicznych. Korzystne jest zastosowanie większych grubości termoizolacji niż optymalne ze względów ekonomicznych. Otrzymuje się wtedy większe korzyści ekologiczne z inwestycji termolizacyjnej, przy niewielkim zmniejszeniu korzyści ekonomicznych.

**Słowa kluczowe:** optymalna grubość termoizolacji; ekonomiczne koszty ogrzewania; ekologiczne koszty ogrzewania

## ECONOMIC AND ECOLOGICAL COSTS OF HEATING AND OPTIMUM THICKNESS OF THE THERMAL INSULATION

**Abstract:** This article presents the method of the assessment of the ecological costs of heating, which was modelled after the method for assessment of the economical costs of heating. Thanks to that, it is possible to analytically describe, in a similar fashion to the economic one, the ecological net present value of the thermal insulation investment, and to assess the optimum thickness of the thermal insulation both from the economic and ecological perspective. Different cases occurring in Polish conditions were also examined. Different variants were also analyzed: construction material of the building wall, type of a heat source, type of the thermal insulation material. The diversity of the climate zones in Poland was also taken into consideration. For all examined variants, the assessed optimal thickness of the thermal insulation layer from the ecological perspective was much bigger than from the economic perspective. Implementation of the greater thicknesses of the thermal insulation than the optimal from the economic perspective is beneficial. In this way, with the small decrease of the economical benefits, the greater ecological benefits from the thermal insulation investment are achieved.

**Key words:** optimum thickness of thermal insulation; economic cost of heating; ecological cost of heating

Dr Robert DYLEWSKI  
Uniwersytet Zielonogórski  
Wydział Matematyki, Informatyki i Ekonometrii  
ul. Licealna 9, 65-417 Zielona Góra  
e-mail: R.Dylewski@wmie.uz.zgora.pl

Data przesłania artykułu do Redakcji: 15.05.2017  
Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 31.05.2017