

6

OCENA WPŁYWU LOKALIZACJI BUDYNKU NA ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ

6.1 WSTĘP

Poprawa efektywności energetycznej jest obecnie postrzegana jako jeden z najlepszych sposobów (najbardziej uzasadnionych ekonomicznie) sprostania wyzwaniom związanym ze stale rosnącym zapotrzebowaniem na energię. Przyczynia się ona do obniżania w sposób opłacalny emisji gazów cieplarnianych, a tym samym do łagodzenia skutków zmiany klimatu. Wpływa również na zmniejszenie uzależnienia od importu nośników energii [3].

Polska gospodarka, mimo rzeczywistej poprawy efektywności energetycznej w ostatnich latach, nadal charakteryzuje się nadmiernym, ponad dwukrotnie wyższym niż w innych krajach Unii Europejskiej wykorzystaniem surowców, materiałów i energii w tworzeniu dochodu narodowego brutto.

W perspektywie 2020 r. techniczny potencjał dla efektywności energetycznej wynosi 50% natomiast ekonomicznie uzasadniony to nawet – 25%. Największy potencjał poprawy efektywności energetycznej przypada na sektory budownictwa – mieszkalnego i użyteczności publicznej. W Polsce izolacyjność termiczna nowo wznoszonych budynków prowadzi do wysokiego zapotrzebowania na energię wynoszącą aż 120÷150 kWh/m² na rok, podczas gdy wartości tego zapotrzebowania w tzw. starych krajach Unii Europejskiej wahają się między 40-90 kWh/m² rocznie. Jest to wynik zbyt liberalnych przepisów obowiązujących w Polsce, zwłaszcza, że przy obecnym poziomie cen energii i materiałów możliwe jest w sposób opłacalny budowanie obiektów o zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania na poziomie 60-90 kWh/m² na rok. Uwzględniając możliwości techniczne, obecnie wznosi się budynki w standardzie 15 kWh/m² rocznie – jest to standard budynku pasywnego [2].

Celem artykułu jest przedstawienie metodologii oceny ekologicznej efektywności kosztowej dla inwestycji polegającej na termoizolacji przegród zewnętrznych pionowych budynku w warunkach klimatu umiarkowanego oraz zbadanie tej efektywności dla przykładowych budynków w zależności od stanu budynku przed termoizolacją, stosowanego źródła ciepła i paliwa oraz rodzaju materiału termoizolacyjnego.

6.2 CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA BUDYNKU

Badaniu poddany zostanie budynek mieszkalny o standardowej¹ powierzchni użytkowej, zostanie on zlokalizowany na terenie Polski gdzie panuje klimat umiarkowany.

¹ Standardowa powierzchnia użytkowa (ok. 150 m²) rozumiana jako powierzchnia najczęściej budowanych domków jednorodzinnych w Polsce.

Poniżej przedstawiono charakterystykę analizowanego budynku.

Dom charakteryzuje się funkcjonalnym wnętrzem z użytkowym poddaszem, dla 4-6 osobowej rodziny. Jego powierzchnia użytkowa wynosi 140,20 m². W budynku przewidziano ogrzewanie wodne pompowe, rury izolowane termicznie prowadzone w bruzdach 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% z racji usytuowania buforu w systemie grzewczym wewnątrz osłony termicznej budynku. Sprawność transportu czynnika grzewczego wynosi 97% ze względu na ogrzewanie centralne z lokalnego źródła ciepła usytuowanego w ogrzewanym budynku, z zaizolowanymi przewodami, armaturą i urządzeniami, które są zainstalowane w pomieszczeniach ogrzewanych. Ze względu na zastosowanie w budynku regulacji centralnej i miejscowej ogrzewania wodnego, sprawność regulacji i wykorzystania przyjęto 98%. Obliczeniowa uśredniona temperatura powietrza wewnętrznego wynosi 20°C. Kubatura budynku wynosi 376.14 m³. Budynek jest częściowo podpiwniczony. Moc wewnętrzną zysków przyjęto na poziomie 3.5 W/m². Konstrukcja tradycyjna murowana, stropy żelbetowe gęstożebrowe, schody drewniane, dach o konstrukcji drewnianej, pokrycie blacho-dachówkową, na przegrodach przewidziano tynk mineralny. Stolarka okienna z nawiewnikami, o współczynniku przenikania ciepła $U = 1,3$ W/m²K, drzwi zewnętrzne o współczynniku przenikania ciepła $U = 1.8$ W/m²K. Dach drewniany o konstrukcji jętkowej izolowany wełną mineralną o grubości 16 cm oraz dodatkowo 5 cm w celu likwidacji mostków cieplnych na krokwiach. Powierzchnia przegród pionowych zewnętrznych wynosi 206,61 m².

W zależności od rodzaju źródła ciepła przyjęto wartość sprawności wytworzenia w kotle:

- węglowym – 82% (S_1);
- gazowym kondensacyjnym – 94% (S_2);

Konstrukcja przegród pionowych w budynku będzie poddana wariantowości ze względu na rodzaj materiału użytego do budowy tej przegrody jak i rodzaj oraz grubość materiału termoizolacyjnego. Do obliczenia wartości zapotrzebowania na ciepło wykorzystano program komputerowy CERTO v. 7.0.0.2 służący do wykonywania certyfikacji energetycznej domów jednorodzinnych, budynków mieszkalnych, a także budynków i lokali pełniących różne funkcje usługowe. Został on opracowany przez Dolnośląską Agencję Energii i Środowiska.

6.3 CHARAKTERYSTYKA LOKALIZACJI BUDYNKÓW MIESZKALNYCH

W celu zobrazowania różnicy zapotrzebowania na energię użytkową analizowanego budynku, w zależności od rozpatrywanej strefy klimatycznej, zostanie on zlokalizowany w każdej z pięciu stref wyróżnionych na terenie Polski. Polska została podzielona na pięć stref klimatycznych (rys. 6.1), oznaczonych odpowiednio cyframi rzymskimi: I, II, III, IV i V.

Rozpatrując lokalizacje omawianych budynków w poszczególnych strefach, ze względu na umiejscowienie stacji meteorologicznych, wskazano: dla strefy I – miasto Szczecin; dla strefy II – miasto Zielona Góra (nie zaznaczone na mapie, znajduje się ono w województwie

lubuskim, ok. 140 km na południowy-zachód od Poznania); dla III strefy – miasto Kielce; dla IV strefy miasto Białystok oraz dla V strefy miasto Suwałki (również nie zaznaczone na mapie, znajduje się ono w województwie podlaskim, oddalone od Białegostoku o ok. 120 km na północ).

Średnia roczna temperatura powietrza w Polsce waha się między 6-8,5°C. Najcieplejszymi regionami są: Nizina Śląska (ponad 8,5°C) oraz zachodnia część Kotliny Sandomierskiej (8°C). Najniższe temperatury występują w górach, gdzie notuje się ich spadek z wysokością (średnio 0,6°C na 100 m wzniesienia), co sprawia, iż występuje tam piętrowość klimatyczna. Na południu Polski w Tatrach na Kasprowym Wierchu średnia roczna temperatura powietrza wynosi 0,8°C. Poza obszarami górskimi najzimniejszym regionem kraju jest Suwalszczyzna (około 6,5°C), stąd też przewidziano tam jedną z lokalizacji. Suwalszczyzna często nazywana jest „polskim biegunem zimna”. Najcieplejszym polskim miesiącem jest lipiec, natomiast najzimniejszym styczeń.



Rys. 6.1 Mapa stref klimatycznych Polski

Źródło: [17]

Projektowa temperatura zewnętrzna (tabela 6.1) według PN-EN 12831 [17] odpowiada obliczeniowej temperaturze powietrza na zewnątrz budynku. W tabeli 6.1 przedstawiono również średnią roczną temperaturę zewnętrzną w każdej z pięciu stref klimatycznych Polski.

Tabela 6.1 Projektowa temperatura zewnętrzna i średnia roczna temperatura zewnętrzna

Strefa klimatyczna	Projektowa temperatura zewnętrzna [°C]	Średnia roczna temperatura zewnętrzna [°C]
I	-16	7,7
II	-18	7,9
III	-20	7,6
IV	-22	6,9
V	-24	5,5

Źródło: [17]

6.4 OCENA CYKLU ŻYCIA

Metodyka środowiskowej oceny cyklu istnienia (LCA – Life Cycle Assessment) rozwinęła się intensywnie w przeciągu ostatnich dwudziestu lat. W literaturze przedmiotu można przytoczyć wiele przykładów jej zastosowania, między innymi w [1, 4, 7, 8, 11, 15, 18]. Metodyka środowiskowej oceny cyklu istnienia jest znormalizowana w oparciu o dwie normy ISO 14040 oraz ISO 14044. Analiza LCA obejmuje cztery zasadnicze etapy opisane w powyższych normach [9, 10]:

- 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*).

Celem badań w niniejszym artykule jest określenie oddziaływania na środowisko materiałów budowlanych użytych do budowy przegrody zewnętrznej pionowej, nieprzeźroczystej oraz próba zmniejszenia tego negatywnego oddziaływania poprzez permutacje materiałów termoizolacyjnych zastosowanych w tych przegrodach. System wyrobu obejmuje fazę wytworzenia materiałów termoizolacyjnych wraz z fazą pozyskania surowców i energii do ich wytworzenia oraz fazę użytkowania (tzw. fazę energetyczną²). Poza systemem pozostawiono fazę recyklingu po okresie użytkowania w odniesieniu do wszystkich materiałów. Jako jednostkę funkcjonalną dla materiałów budowlanych przyjęto 1 m³ materiału budowlanego, natomiast jednostką funkcjonalną dla fazy energetycznej cyklu istnienia budynku jest zapotrzebowanie na energię cieplną do ogrzania 1 m² powierzchni użytkowej wolnostojącego budynku jednorodzinne. W celu porównania oddziaływania na środowisko różnych rodzajów źródeł ciepła w analizowanych budynkach jako jednostkę funkcjonalną przyjęto wytworzenie 1 kWh energii cieplnej. Powyżej wyartykułowano podstawowe elementy wymagane w normach serii ISO 14040 warunkujące przeprowadzenie skutecznej i poprawnej analizy LCA.

Wykorzystując technikę LCA można poddać ocenie oddziaływania na środowisko procesy: pozyskania surowców, produkcji, dystrybucji oraz unieszkodliwiania wyrobu. Do wykonania analizy LCA wykorzystuje się programy komputerowe. Producentami tego oprogramowania są m.in. PE International GmbH – program Gabi 4, ifu Hamburg GmbH – program Umberto 5.0, PRé Consultants – program SimaPro 7.1. itd. [6, 13]. Programy te zostały opracowane w ośrodkach europejskich, stąd też posiadają bazy danych odnoszące się do warunków średnich w Europie, co jest szczególnie istotne pod kątem zastosowania ich w Polsce. W artykule, do analizy wykorzystano program komputerowy SimaPro 7.1, który umożliwia skorzystanie aż z 21 procedur (metod) oceny, z których w powyższym opracowaniu wykorzystano procedurę Ekowskażnik 99 [16]. 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. Procedura powyższa umożliwia także dokonanie

² Faza energetyczna związana jest bezpośrednio ze współczynnikiem przewodzenia ciepła poszczególnych materiałów, co w konsekwencji pośrednio decyduje o zapotrzebowaniu budynku na energię cieplną

ważenia i przedstawienie wyniku końcowego LCA w Pt³ [8].

Ocenie oddziaływania na środowisko poddano trzy rodzaje różnorodnych materiałów termoizolacyjnych, które zostaną zastosowane w różnych układach z materiałem konstrukcyjnym ściennym analizowanego budynku. Analiza LCA obejmuje system wyrobu w zakresie fazy pozyskania surowców i jego wytworzenia. Wyniki analizy LCA zestawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Wyniki analizy LCA 1 m³ materiałów termoizolacyjnych

Rodzaj termoizolacji	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber - włókna celulozowe (I ₃)
LCA [Pt/m ³]	4,205	16,062	-0,832

Najwyższym oddziaływaniem na środowisko charakteryzuje się poliuretan (I₂), natomiast korzyść środowiskową wykazuje ekofiber (I₃) (ujemna wartość LCA) z racji wytwarzania tego materiału termoizolacyjnego z recyklingu gazet.

Poniżej (tabela 6.3), zestawiono wartości oddziaływania na środowisko dwóch rozpatrywanych źródeł ciepła w zakresie jednakowej jednostki funkcjonalnej.

Tabela 6.3 Wyniki analizy LCA dla źródeł ciepła

Źródło ciepła – kocioł opalany	Węglem (S ₁)	Gazem (S ₂)
LCA [Pt/kWh]	0,0193	0,0123

Wyższym oddziaływaniem na środowisko przy założonej jednostce funkcjonalnej charakteryzuje się kocioł opalany węglem (S₁).

6.5 METODOLOGIA OCENY EKOLOGICZNEJ EFEKTYWNOŚCI KOSZTOWEJ

W punkcie tym zaproponowano metodologię oceny ekologicznej efektywności kosztowej dla inwestycji polegającej na termoizolacji przegród zewnętrznych pionowych budynku.

Termoizolacja przegród budowlanych ma istotny wpływ na zmniejszenie zużycia energii cieplnej w budynkach w fazie użytkowania, a w konsekwencji na zmniejszenie obciążenia środowiska. Wykonanie termoizolacji przegrody zewnętrznej budynku można traktować ze względów ekologicznych jako inwestycję, której celem jest zmniejszenie obciążenia środowiska. W inwestycji te koszty związane są z zakupem, transportem i położeniem termoizolacji, natomiast zyski – ze zmniejszeniem zapotrzebowania na energię do ogrzania budynku.

Dla termoizolacji przegród zewnętrznych pionowych budynku, koszty finansowe zależą od grubości warstwy termoizolacyjnej, kosztów użytego materiału termoizolacyjnego i kosztów wykonania termoizolacji. Koszty te, przypadające na 1 m² powierzchni przegrody, można wyznaczyć w następujący sposób:

$$C_f = K_m \cdot d + K_w \quad [\text{PLN/m}^2], \quad (6.1)$$

³ Pt punkt eko-wskaźnika (Pt) oraz jego podwielokrotności np. mili-punkt (mPt). Wartość 1 Pt reprezentuje 10³ rocznego obciążenia środowiska jednego mieszkańca Europy. Wartość tę oblicza się poprzez podzielenie całego obciążenia środowiska w Europie przez liczbę mieszkańców i pomnożenie przez 1000 (czynnik skali).

gdzie:

K_m – koszt 1 m³ materiału termoizolacyjnego [PLN/m³],

K_w – koszty montażu termoizolacji na 1 m² powierzchni przegrody budowlanej [PLN/m²],

d – grubość warstwy termoizolacyjnej [m].

W tabeli 6.4 zestawiono wartości charakterystyczne dla materiałów termoizolacyjnych. Grubość d materiału termoizolacyjnego jest wartością zależną od: użytego do budowy rodzaju materiału konstrukcyjnego ściennego, wymagań normowych oraz rodzaju samego materiału termoizolacyjnego.

Tabela 6.4 Charakterystyka materiałów termoizolacyjnych

Rodzaj termoizolacji	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber - włókna celulozowe (I ₃)
λ [W/mK]	0,040	0,028	0,041
K_m [PLN/m ³]	167,30	713,30	150,00
K_w [PLN/m ²]	30,00	30,00	30,00
n [lata]	25	25	25

Najwyższym kosztem zakupu materiału termoizolacyjnego charakteryzuje się poliuretan, natomiast najniższym ekofiber. Jednak należy tutaj zaznaczyć, że właściwości izolacyjne poliuretanu są zdecydowanie lepsze od ekofibru (tabela 6.4, wskaźnik λ). Dla wszystkich rodzajów termoizolacji przyjęto taką samą wartość kosztów związanych z ich montażem na placu budowy oraz taki sam czas użytkowania termoizolacji.

Przy badaniu inwestycji termoizolacyjnej pod względem ekologicznym, nakłady związane są z dodatkowym zwiększeniem obciążenia środowiska, a dochody ze zmniejszeniem obciążenia środowiska w wyniku zrealizowania inwestycji. Ekologiczną wartość inwestycji V_E , przypadającą na 1 m² powierzchni przegrody, można więc określić w następujący sposób:

$$V_E = \sum_{j=0}^n E_j \text{ [Pt/m}^2\text{]} \quad (6.2)$$

gdzie:

$E_j < 0$ – wielkość zwiększenia obciążenia środowiska z powodu inwestycji w roku (t_{j-1} , t_j),

$E_j > 0$ – wielkość zmniejszenia obciążenia środowiska z powodu inwestycji w roku (t_{j-1} , t_j),

n – liczba lat użytkowania termoizolacji.

Inwestycję uznaje się za opłacalną pod względem ekologicznym (generuje ona zmniejszenie obciążenia środowiska) jeśli wartość V_E jest nieujemna. Porównując kilka inwestycji (ze względu na ten wskaźnik), lepsza jest ta, która ma większą wartość V_E .

Ze względów ekologicznych, nakłady (zwiększenie obciążenia środowiska) związane są z produkcją materiału termoizolacyjnego. Zależą one od rodzaju materiału termoizolacyjnego i grubości warstwy termoizolacyjnej:

$$E_0 = -K_l \cdot d \text{ [Pt/m}^2\text{]}, \quad (6.3)$$

gdzie:

K_l – wynik analizy LCA dla 1 m³ materiału termoizolacyjnego [Pt/m³] (patrz tabela 6.2),

d – jak wcześniej.

Dochody (zmniejszenie obciążenia środowiska) występują w fazie użytkowania budynku, z powodu zmniejszenia zużycia energii potrzebnej do ogrzewania budynku. Wpływ na dochody ekologiczne ma przede wszystkim: używane źródło ciepła oraz właściwości przegród bez i z termoizolacją:

$$E_j = (E_{U_o} - E_U)/p, \quad j = 1, 2, \dots, n \text{ [Pt/m}^2\text{]}, \quad (6.4)$$

gdzie:

E_{U_o} – wynik analizy LCA jednego roku termicznej fazy użytkowania budynku, przy współczynniku przenikania ciepła U_o (dla przegród budowlanych zewnętrznych bez termoizolacji) [Pt],

E_U – wynik analizy LCA jednego roku termicznej fazy użytkowania budynku, przy współczynniku przenikania ciepła U (dla przegród budowlanych zewnętrznych z termoizolacją) [Pt],

p – powierzchnia przegród zewnętrznych pionowych budynku [m^2].

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

$$E_U = D_U \cdot p_u \cdot K_e \text{ [Pt/year]}, \quad (6.5)$$

gdzie:

D_U – roczne zapotrzebowanie na moc cieplną budynku przypadające na 1 m^2 powierzchni użytkowej przy współczynniku przenikania ciepła U [$\text{kWh/m}^2\text{year}$],

p_u – powierzchnia użytkowa budynku [m^2],

K_e – wynik LCA uzyskania 1 kWh energii cieplnej dla danego źródła ciepła [Pt/kWh] (patrz tabela 6.4).

W tabeli 6.5 dokonano zestawienia charakterystycznych cech materiałów konstrukcyjnych, których przewidziano wariantowość zastosowania w analizowanym budynku. Zaproponowano dwa materiały, które cieszą się dużym powodzeniem wśród inwestorów, o zgoła odmiennych cechach fizycznych.

Tabela 6.5 Charakterystyka materiałów konstrukcyjnych

Rodzaj materiału konstrukcyjnego	Grubość muru d_0 [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/mK]	Opór cieplny R [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Współczynnik przenikania ciepła (przegrody bez termoizolacji), uwzględniono opór cieplny tynków U_o [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Beton komórkowy 500	0,36	0,17	2,118	0,430
SILKA E	0,24	0,53	0,453	1,514

Do porównania różnych wariantów termoizolacji można zastosować też metodę analizy efektywności kosztowej. Metodę tę stosuje się wtedy, gdy mierzenie korzyści odbywa się w jednostkach innych niż pieniężne (np. przy wyznaczaniu korzyści dla środowiska – ekopunkty [Pt]). Analizę przeprowadza się za pomocą tzw. wskaźnika dynamicznego kosztu jednostkowego DGC (Dynamic Generation Cost). Wskaźnik ten informuje o tym jaki jest koszt uzyskania jednostki zamierzonego rezultatu [14].

Dla inwestycji termoizolacji zewnętrznych przegród budowlanych, ekologiczną

efektywność kosztową (wskaźnik DGC) można określić jako koszt (w PLN) zmniejszenia obciążenia środowiska o 1 Pt w wyniku termoizolacji:

$$DGC = C_f/V_E \text{ [PLN/Pt]}, \quad (6.6)$$

gdzie:

C_f – koszty finansowe termoizolacji [PLN/m²], wyznaczony ze wzoru (1);

V_E – wielkość zmniejszenia obciążenia środowiska uzyskana w wyniku wykonania termoizolacji [Pt/m²], wyznaczona ze wzoru (2).

W Polsce, grubość warstwy termoizolacyjnej powinna być tak dobrana, żeby zaizolowane termicznie przegrody zewnętrzne pionowe miały współczynnik przenikania ciepła $U \leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (zgodnie z odpowiednim Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [18]). W celu osiągnięcia współczynnika $U_N = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$, grubość d_N termoizolacji powinna wynosić [12]:

$$d_N = \lambda \cdot (1/U_N - 1/U_o) \text{ [m]}, \quad (6.7)$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału termoizolacyjnego [W/mK],

$U_N = 0,25 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ – współczynnik przenikania ciepła przegrody z warstwą termoizolacji,

U_o – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez warstwy termoizolacji [W/m²K].

Tabela 6.6 Grubość d_N termoizolacji dla normowego współczynnika przenikania ciepła przegrody zewnętrznej pionowej wykonanej z betonu komórkowego d_{N1} oraz silikatu d_{N2} .

Rodzaj termoizolacji	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)
d_{N1} [m]	0,067	0,047	0,069
d_{N2} [m]	0,134	0,094	0,137

W tabeli 6.6 przedstawiono wartości grubości termoizolacji dla normowego współczynnika przenikania ciepła przegrody zewnętrznej pionowej. Grubość warstwy izolacji termicznej jest zdecydowanie większa (o 100%) dla materiału konstrukcyjnego o gorszym współczynniku przenikania ciepła jakim jest silikat.

Można też sprawdzić, dla jakiej wartości współczynnika przenikania ciepła przegrody z warstwą termoizolacji U_{opt} wartość bieżąca netto inwestycji NPV będzie maksymalna, a w konsekwencji przy jakiej grubości izolacji d_{opt} uzyskamy U_{opt} . Można pokazać, że ze względu na U funkcja NPV

$$NPV = -C_f + S_n \cdot G_o \cdot (U_o - U) \text{ [PLN/m}^2] \quad (6.8)$$

jest wklęsła i osiąga wartość maksymalną dla [5]:

$$U_{opt} = \sqrt{\frac{\lambda K_m}{G_o S_n}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.9)$$

Natomiast optymalna grubość warstwy termoizolacji odpowiadająca U_{opt} wynosi

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{\lambda G_o S_n}{K_m} - \frac{\lambda}{U_o}} \text{ [m]}, \quad (6.10)$$

gdzie:

$$S_n = \sum_{j=1}^n \frac{(1+s)^j}{(1+r)^j},$$

n – liczba lat użytkowania termoizolacji, do obliczeń przyjęto 25 lat,

r – realna roczna stopa procentowa, do obliczeń przyjęto 5%,

s – realny roczny wzrost (w procentach) kosztów ogrzewania, do obliczeń przyjęto 2%,

G_o – roczny koszt ogrzewania, odniesiony do 1 m² powierzchni rozpatrywanej przegrody zewnętrznej pionowej [(PLN·K)/(W·rok)],

$C_f, U_o, U, \lambda, K_m$ – jak wcześniej.

Bardzo istotne jest dokładne oszacowanie wartości kosztu G_o . Można go wyznaczyć ze wzoru:

$$G_o = \frac{D_{U_o} - D_{U_n}}{U_o - U_n} \cdot \frac{p_u}{p} \cdot K_c \text{ [(PLN·K)/(W·rok)],} \quad (6.11)$$

gdzie:

K_c – koszt wytwarzanego ciepła dla danego źródła ciepła i paliwa [PLN/kWh] (ogrzewanie kotłem węglowym – 0,116 PLN/kWh, ogrzewanie kotłem gazowym – 0,325 PLN/kWh),

pozostałe: – jak wcześniej.

W tabeli 6.7 zestawiono wartości optymalnego współczynnika przenikania ciepła U_{opt} dla dwóch wariantów konstrukcyjnych przegrody zewnętrznej (beton komórkowy oraz silikat). Dodatkowym elementem różnicującym wartości U_{opt} jest strefa klimatyczna (I ÷ V), w której znajduje się lokalizacja budynku oraz zastosowane źródło ciepła w postaci kotła węglowego lub gazowego. Zmienne te w istotny sposób wpływają na wartości U_{opt} .

Tabela 6.7 Optymalne wartości współczynnika przenikania ciepła U_{opt} [W/m²K] dla budynku

Przegroda zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z betonu komórkowego						
Rodzaj źródła ciepła	Ogrzewanie kotłem węglowym			Ogrzewanie kotłem gazowym		
	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)
Strefa klimatyczna						
I	0,211	0,364	0,202	0,126	0,218	0,121
II	0,205	0,354	0,196	0,122	0,212	0,117
III	0,200	0,345	0,192	0,119	0,206	0,114
IV	0,193	0,334	0,185	0,115	0,199	0,111
V	0,189	0,327	0,181	0,113	0,195	0,108
Przegroda zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z silikatu						
I	0,205	0,355	0,197	0,123	0,212	0,118
II	0,200	0,345	0,191	0,119	0,206	0,114
III	0,196	0,338	0,188	0,117	0,202	0,112
IV	0,191	0,329	0,183	0,114	0,197	0,109
V	0,187	0,322	0,179	0,112	0,193	0,107

6.6 OCENA EKOLOGICZNEJ EFEKTYWNOŚCI KOSZTOWEJ

W punkcie tym, wyznaczono ekologiczną efektywność kosztową dla inwestycji polegającej na termoizolacji przegród zewnętrznych pionowych budynku zgodnie z metodologią przedstawioną w p. 6.5. Efektywność zbadano dla budynku w zależności od jego

stanu przed termoizolacją, stosowanego źródła ciepła i paliwa oraz rodzaju materiału termoizolacyjnego.

W tabeli 6.8 podano wyznaczone (ze wzoru 6.2) ekologiczne wartości inwestycji termoizolacyjnej przy optymalnie dobranym (ze względów ekonomicznych) współczynniku przenikania ciepła U_{opt} (patrz wzór (6.9)) i grubości termoizolacji d_{opt} (patrz wzór (6.10)).

Tabela 6.8 Ekologiczna wartość inwestycji $V_{E, opt}$ [Pt/m²] dla budynku, ze współczynnikiem przenikania ciepła U_{opt}

Przełoga zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z betonu komórkowego						
Rodzaj źródła ciepła	Ogrzewanie kotłem węglowym			Ogrzewanie kotłem gazowym		
	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)
Strefa klimatyczna						
I	7,420	2,166	8,239	5,983	3,817	7,241
II	8,080	2,649	8,944	6,435	4,178	7,755
III	8,695	3,123	9,561	6,859	4,536	8,228
IV	9,600	3,778	10,524	7,465	5,040	8,874
V	10,183	4,229	11,147	7,857	5,386	9,333
Przełoga zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z silikatu						
I	48,562	42,663	49,725	32,112	29,403	33,755
II	51,565	45,514	52,811	34,080	31,298	35,787
III	53,951	47,778	55,190	35,624	32,774	37,364
IV	57,005	50,672	58,288	37,601	34,661	39,392
V	59,686	53,228	61,005	39,326	36,325	41,159

Tabela 6.9 Ekologiczna wartość inwestycji $V_{E, N}$ [Pt/m²] dla budynku, z normowym współczynnikiem przenikania ciepła U_N

Przełoga zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z betonu komórkowego						
Rodzaj źródła ciepła	Ogrzewanie kotłem węglowym			Ogrzewanie kotłem gazowym		
	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)	Styropian EPS (I ₁)	Poliuretan PUR (I ₂)	Ekofiber (I ₃)
Strefa klimatyczna						
I	6,152	5,679	6,491	3,818	3,345	4,157
II	6,525	6,052	6,864	4,056	3,583	4,395
III	6,875	6,402	7,214	4,279	3,806	4,618
IV	7,373	6,900	7,712	4,596	4,123	4,935
V	7,697	7,224	8,036	4,803	4,330	5,142
Przełoga zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z silikatu						
I	47,016	46,069	47,693	29,760	28,813	30,437
II	49,744	48,797	50,421	31,498	30,551	32,175
III	51,895	50,948	52,572	32,869	31,922	33,546
IV	54,635	53,688	55,312	34,615	33,668	35,292
V	57,039	56,092	57,716	36,147	35,200	36,824

W tabeli 6.9 podano wyznaczone (ze wzoru 6.2) ekologiczne wartości inwestycji termoizolacyjnej przy współczynniku przenikania ciepła $U_N = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ i odpowiednio dobranej grubości termoizolacji d_N (patrz wzór (6.7)).

Na podstawie ekologicznych wartości inwestycji V_E podanych w tabelach 6.8 i 6.9 oraz kosztów finansowych termoizolacji, wyznaczonych odpowiednio ze wzoru (1) wyznaczono ekologiczną efektywność kosztową dla grubości d_{opt} (tabela 10) i grubości d_N (tabela 6.11).

Tabela 6.10 Ekologiczna efektywność kosztowa DGC_{opt} [PLN/Pt] dla budynku, z optymalnie (ekonomicznie) dobranym współczynnikiem przenikania ciepła U_{opt}

Przegroda zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z betonu komórkowego						
Rodzaj źródła ciepła	Ogrzewanie kotłem węglowym			Ogrzewanie kotłem gazowym		
Strefa klimatyczna	Styropian EPS (I_1)	Poliuretan PUR (I_2)	Ekofiber (I_3)	Styropian EPS (I_1)	Poliuretan PUR (I_2)	Ekofiber (I_3)
I	6,23	17,80	5,61	11,28	19,63	9,18
II	5,82	15,10	5,27	10,77	18,62	8,80
III	5,51	13,26	4,99	10,30	17,78	8,46
IV	5,11	11,53	4,65	9,73	16,71	8,01
V	4,90	10,64	4,45	9,38	15,90	7,78
Przegroda zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z silikatu						
I	1,20	1,71	1,15	2,49	3,79	2,31
II	1,15	1,65	1,10	2,40	3,63	2,23
III	1,11	1,58	1,06	2,32	3,53	2,16
IV	1,06	1,54	1,02	2,24	3,42	2,09
V	1,03	1,47	0,99	2,17	3,32	2,03

Tabela 6.11 Ekologiczna efektywność kosztowa DGC_N [PLN/Pt] dla budynku, z normowym współczynnikiem przenikania ciepła U_N

Przegroda zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z betonu komórkowego						
Rodzaj źródła ciepła	Ogrzewanie kotłem węglowym			Ogrzewanie kotłem gazowym		
Strefa klimatyczna	Styropian EPS (I_1)	Poliuretan PUR (I_2)	Ekofiber (I_3)	Styropian EPS (I_1)	Poliuretan PUR (I_2)	Ekofiber (I_3)
I	6,70	11,19	6,22	10,79	18,99	9,71
II	6,32	10,50	5,88	10,16	17,73	9,18
III	5,99	9,92	5,59	9,63	16,69	8,74
IV	5,59	9,21	5,23	8,97	15,41	8,18
V	5,35	8,79	5,02	8,58	14,67	7,85
Przegroda zewnętrzna konstrukcyjna wykonana z silikatu						
I	1,11	2,11	1,06	1,76	3,37	1,66
II	1,05	1,99	1,00	1,66	3,18	1,57
III	1,01	1,90	0,96	1,59	3,04	1,51
IV	0,96	1,81	0,91	1,51	2,88	1,43
V	0,92	1,73	0,88	1,45	2,76	1,37

PODSUMOWANIE

Analizując wartości optymalnego (tabela 6.7) oraz normowego ($0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$) współczynnika przenikania ciepła przegrody można zauważyć, że dla niektórych materiałów termoizolacyjnych (przy niskim koszcie wytworzenia ciepła – ogrzewanie kotłem węglowym) wartość $U_{opt} > U_N$. Wynika to z wysokich kosztów zakupu materiału termoizolacyjnego jakim jest poliuretan PUR (tabela 6.4). Koszt zakupu tego materiału jest ponad czterokrotnie wyższy

od pozostałych analizowanych materiałów termoizolacyjnych.

W każdym z analizowanych przypadków ekologiczna wartość inwestycji V_E , przypadająca na 1 m^2 powierzchni przegrody zewnętrznej jest wartością większą od zera, co świadczy o generowaniu korzyści środowiskowych w 25-cio letnim czasookresie użytkowania termoizolacji. Warto dodać, że ekologiczna wartość inwestycji przy zastosowaniu optymalnej wartości grubości termoizolacji jest większa od ekologicznej wartości inwestycji przy zastosowaniu normowej wartości grubości termoizolacji pod warunkiem, że $U_{opt} < U_N$. Należy również nadmienić, że pomimo dużej (ponad trzykrotnej) różnicy w wartości przewodzenia ciepła materiałów konstrukcyjnych (beton komórkowy i silikat – tabela 5), wartości optymalnego współczynnika przenikania ciepła są zbliżone do siebie, oczywiście porównując je ze sobą parami w tej samej strefie klimatycznej (patrz tab. 6.8). Z powyższej właściwości materiałów konstrukcyjnych wynika również fakt, że ekologiczna wartość inwestycji $V_{E_{opt}}$ oraz V_{E_N} [Pt/m²] w każdym przypadku jest dużo wyższa dla silikatu, którego właściwości termiczne są dużo gorsze niż właściwości betonu komórkowego (tabela 6.8 i 6.9). Stąd też, dla przegrody zewnętrznej o wyższym współczynniku przewodzenia ciepła λ wykonanej z silikatu, bardziej się opłaca (ekologicznie) przeprowadzić inwestycję w postaci termoizolacji. O tym również może świadczyć niska wartość ekologicznej efektywności kosztowej DGC_N oraz DGC_{opt} dla tego rodzaju materiału konstrukcyjnego.

Porównując wyniki ekologicznej efektywności kosztowej DGC_N oraz DGC_{opt} pomiędzy sobą w zakresie tego samego materiału konstrukcyjnego i tego samego źródła ciepła, nie można jednoznacznie stwierdzić, że niższym kosztem pozyskania 1 Punktu charakteryzuje się przegroda z optymalną wartością współczynnika przenikania ciepła. Najkorzystniejsze (najniższe) wartości ekologicznej efektywności kosztowej uzyskują inwestycje termoizolacyjne w strefie o skrajnie niskich średnich temperaturach w czasie sezonu grzewczego (strefa V), z zastosowaniem ekofibru jako materiału termoizolacyjnego oraz (co zostało już wyartykułowane) z wykorzystaniem do budowy materiału konstrukcyjnego o najgorszych właściwościach termicznych (wysoka wartość współczynnika przewodzenia).

Lokalizacja budynku na terenie kraju ma istotne znaczenie w kontekście generowania kosztów ekonomicznych w celu zmniejszenia oddziaływania na środowisko o 1 Pt. Różnice między strefą I a V są największe i dla poliuretanu wynoszą nawet ponad 7 PLN/Pt (tabela 6.10).

LITERATURA

1. Andersson K, Hùgaas Eide M, Lundqvist U, Mattsson B. *The feasibility of including sustainability in LCA for product development*. Journal of Cleaner Production, 1998, 6, 289-298.
2. Arcipowska A., Tomaszewska A., *Efektywność zużycia energii - między deklaracjami, stanem obecnym a przyszłością*, Instytut na Rzecz Ekorozwoju, Warszawa, 2012, (<http://www.ine-isd.org.pl>)
3. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION, EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth, EUROPEAN COMMISSION, Brussels, 3.3.2010, COM(2010) 2020

4. Dylewski R., Adamczyk J., *Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments*. Energy and Buildings, 2012, 54, 88–95.
5. Dylewski R., Adamczyk J., *Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls*. Building and Environment, 2011, 46, 2615–2623.
6. Dzikuć M., *Application of life cycle analysis to assess the environmental impact of electricity generation, Zastosowanie analizy cyklu życia (LCA) do oceny wpływu wytwarzania energii elektrycznej na środowisko*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, no 4, 33-36.
7. Dzikuć M., *Applying the life cycle assessment method to an analysis of the environmental impact of heat generation*, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2013, Vol. 18, no 4, pp. 1275-1281.
8. Giama E., Papadopoulos A. M. *Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building*, Building and Environment, 2007, 42, 2178-2187.
9. ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
10. ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines
11. Kim, M.J., Cho, M.E., Kim, J.T., *Energy use of households in apartment complexes with different service life*, Energy and Buildings, 2013, 66, 591-598.
12. Laskowski L., *Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku*. Warszawa: Of. Wyd. Politechniki Warszawskiej; 2005.
13. Lewandowska, A., Noskowiak, A., Pajchrowski, G., *Comparative life cycle assessment of passive and traditional residential buildings' use with a special focus on energy-related aspects*, Energy and Buildings, 2013, 67, 635-646.
14. Minister Rozwoju Regionalnego: *Narodowe Strategiczne Ramy Odniesienia 2007-2013. Wytyczne w zakresie wybranych zagadnień związanych z przygotowaniem projektów inwestycyjnych, w tym projektów generujących dochód*. Warszawa, 19.09.2007.
15. Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W., *Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings*. Construction and Building Materials, 2014, 52, 428-436.
16. Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W., *Materials composition or energy characteristic - What is more important in environmental life cycle of buildings?* Building and Environment, 2014, 72, 15-27.
17. PN-EN 12831:2006P - *Instalacje ogrzewcze w budynkach -- Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*.
18. Pushkar S., Becker R., Katz A., *A methodology for design of environmentally optimal buildings by variable grouping*, Building and Environment, 2005, 40, 1126-1139.
19. 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)

OCENA WPŁYWU LOKALIZACJI BUDYNKU NA ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ

Streszczenie: Zagadnienie poprawy efektywności energetycznej jest jednym z najbardziej uzasadnionych ekonomicznie sposobów zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. W artykule omówiono korzyści ekologiczne wynikające z przeprowadzenia inwestycji polegającej na termoizolacji przegród zewnętrznych budynków. Wyznaczono optymalne wartości współczynnika przenikania ciepła pionowej przegrody zewnętrznej, ekologiczną wartość inwestycji oraz ekologiczną efektywność kosztową. Zastosowano wielowariantowość układów budowy przegrody zewnętrznej w odniesieniu do materiałów konstrukcyjnych oraz termoizolacyjnych. Dodatkowo wzięto pod uwagę lokalizację budynku w różnych pięciu strefach klimatycznych Polski oraz źródło ciepła stosowane w budynku.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, LCA, korzyści ekologiczne.

THE EVALUATION OF THE IMPACT OF BUILDING LOCATION ON ENERGY DEMAND

Abstract: The issue of improving energy efficiency is one of the most economically viable ways of reducing greenhouse gases' emission into the atmosphere. The article discusses ecological benefits arising from the performance of the investment based on the thermal insulation of building external walls. The authors determined optimal values of the heat transfer coefficient of the vertical external wall, ecological value of the investment and ecological cost efficiency. Multi-variant systems of the external wall structure were used with respect to construction and thermal insulation materials. Moreover, the location of the building in five different climatic zones in Poland was taken into consideration as well as the heat source used in the building.

Key words: energy efficiency, LCA, ecological benefits.

dr Robert DYLEWSKI
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Matematyki, Informatyki i Ekonometrii
ul. Licealna 9, 65-417 Zielona Góra
tel.: +4868 3282821; e-mail: R.Dylewski@wmie.uz.zgora.pl

dr inż. Janusz ADAMCZYK
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Ekonomii i Zarządzania
ul. Licealna 9, 65-417 Zielona Góra
tel.: +4868 3282237; e-mail: J.Adamczyk@wez.uz.zgora.pl