

Analiza stosowanych technologii energooszczędnych w budynkach o niskim zużyciu energii

Krzysztof Pawłowski

Zakład Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli; Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy; e-mail: krzypaw@utp.edu.pl, ORCID: 0000-0002-6738-5764

Streszczenie: Projektowanie, wykonanie i eksploatacja budynków o niskim zużyciu energii jest procesem złożonym, wymagającym znajomości zagadnień w zakresie: projektowania architektonicznego, fizyki budowli oraz instalacji budowlanych z zastosowaniem odnawialnych źródeł energii (OZE). W artykule przedstawiono podstawy prawne oraz charakterystykę budownictwa niskoenergetycznego. Realizacja obowiązujących wymagań technicznych w zakresie ciepłno-wilgotnościowym polega na sprawdzeniu wielu parametrów całego budynku, a w szczególności jego przegród zewnętrznych i ich złączy oraz instalacji budowlanych. Dlatego w pracy zaprezentowano obliczenia w zakresie kształtowania układów materiałowych przegród zewnętrznych i złączy budowlanych przy zastosowaniu profesjonalnych programów komputerowych. Integralną częścią artykułu jest określenie wpływu stosowanych technologii energooszczędnych na energochłonność budynku nowoprojektowanego, ale także poddawanego modernizacji.

Słowa kluczowe: technologie energooszczędne, budynek niskoenergetyczny, przegrody zewnętrzne, termomodernizacja budynków

1. Wprowadzenie

Wg [1] budynek o niskim zużyciu energii to taki, który spełnia wymagania związane z oszczędnością energii i izolacyjnością zawarte w przepisach techniczno-użytkowych, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1 ustawy – Prawo budowlane [2], tj. w szczególności dział X oraz załącznik 2 do rozporządzenia [3] obowiązujące od 31 grudnia 2020 roku (w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością – od 1 stycznia 2019 r.).

Na podstawie analiz przepisów prawnych [3] sformułowano kryteria oceny przegród zewnętrznych i budynków w aspekcie wymagań ciepłno-wilgotnościowych:

- kryterium ochrony cieplnej i oszczędności energii:
 - zaprojektowanie przegród w budynku, aby wartości współczynników przenikania ciepła U_c [$W/(m^2 \cdot K)$] przegród zewnętrznych, okien, drzwi oraz technika instalacyjna odpowiadały wymaganiom rozporządzenia [3],
 - zaprojektowanie izolacji termicznej (obwodowej) dla przegrody stykającej się z gruntem o oprze cieplnym większym niż R_{min} . [$(m^2 \cdot K)/W$],
 - wymaganie w zakresie ochrony przed przegrzewaniem pomieszczeń w okresie letnim g [-],

- zaprojektowanie budynku o zapotrzebowaniu na energię pierwotną EP [kWh/(m²·rok)] o wartości spełniającej wymagania rozporządzenia [3] z uwzględnieniem zastosowania wysokoefektywnych instalacji oraz odnawialnych źródeł energii (OZE) w budynku,
- kryterium wilgotnościowe:
 - ryzyko rozwoju kondensacji powierzchniowej – obliczenie czynnika temperaturowego f_{Rsi} [-],
 - ryzyko rozwoju kondensacji międzywarstwowej.

Zasadniczą zmianą rozporządzenia [3] w zakresie ochrony cieplnej budynków jest zmiana wartości maksymalnych współczynników przenikania ciepła $U_{c(max)}$. Zaostrezeniu uległy wymagania cząstkowe w zakresie izolacyjności cieplnej ścian zewnętrznych, dachów, podłóg oraz okien i drzwi. Ponadto nie ma już znaczenia typ przegrody (wielo – czy jednowarstwowa) oraz przeznaczenie obiektu (mieszkalny, użyteczności publicznej, magazynowy, gospodarczy itp.).

Wg wprowadzonych zmian w rozporządzeniu [3] wymagania cieplne dotyczą jednoczesnego spełnienia dwóch wymagań w zakresie współczynnika przenikania ciepła U [W/(m²·K)] dla pojedynczych przegród budynku oraz wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP [kWh/(m²·rok)] dla całego budynku.

Wymagania minimalne, o których mowa w ust. 1 rozporządzenia [3], uznaje się za spełnione dla budynku podlegającego przebudowie, jeżeli przegrody oraz wyposażenie techniczne budynku podlegające przebudowie odpowiadają przynajmniej wymaganiom izolacyjności cieplnej określonym w załączniku nr 2 do rozporządzenia [3].

W pracy przedstawiono analizę wybranych działań energooszczędnych w budynkach o niskim zużyciu energii w aspekcie wymagań cieplno-wilgotnościowych wg rozporządzenia [3].

2. Charakterystyka budynków o niskim zużyciu energii

Na podstawie prowadzonych analiz i obliczeń określono podstawowe grupy czynników w zakresie klasyfikacji budynków o niskim zużyciu energii:

- *architektura budynku*: usytuowanie budynku względem stron świata, zwarta bryła budynku (minimalny współczynnik kształtu A/V), wielkość i usytuowanie przegród przezroczystych, rozmieszczenie pomieszczeń, geometria dachu,
- *rozwiązania konstrukcyjno-materialowe przegród budowlanych i ich złączy*: stosowanie materiałów wysokiej jakości; stosowanie nowoczesnych materiałów izolacyjnych, np. płyty z pianek poliuretanowych, aerożele, panele próżniowe, izolacje transparentne; szkoła projektowania złączy budowlanych w aspekcie cieplno-wilgotnościowym z zastosowaniem narzędzi numerycznych,
- *izolacyjność termiczna przegród budowlanych*: grubość izolacji cieplnej niekiedy powyżej 25÷30 cm, uzyskanie wartości współczynnika przenikania ciepła $U \leq 0,10$ W/(m²·K) dla przegród nieprzezroczystych oraz $U \leq 0,90$ W/(m²·K) dla przegród przezroczystych z uwzględnieniem wymagania w zakresie przegrzewania pomieszczeń w okresie letnim,
- *rodzaj i sprawność systemu wentylacji*: wentylacja hybrydowa lub mechaniczna z odzyskiem ciepła, wentylacja mechaniczna z odzyskiem ciepła i gruntowym wymiennikiem ciepła, wysoka sprawność systemu (powyżej 70%),
- *rodzaj i sprawność systemu c.o. i c.w.u.*,

- *zastosowanie odnawialnych źródeł energii (OZE): energia słoneczna, energia wiatru, energia geotermalna,*
- *system zarządzania budynkiem, który pozwala również sterować produkcją energii.*

Od kilkunastu lat przepisy prawne związane z procesami projektowania, wznoszenia i eksploatacji budynków o niskim zużyciu energii wymuszają takie rozwiązania technologiczne i organizacyjne, w wyniku których nowo wznoszone budynki zużywają w trakcie eksploatacji coraz mniej energii na ogrzewanie, wentylację i przygotowanie ciepłej wody użytkowej. Zmiany maksymalnej wartości współczynnika przenikania ciepła U_{\max} (dawniej k_{\max}) wpływają na wielkość zużycia energii w trakcie eksploatacji budynków. Niestety przepisy prawne w tym zakresie nie regulują wymagań w zakresie ograniczenia strat ciepła przez złącza budowlane – mostki cieplne, ponieważ nie określono wartości granicznych np. w zakresie maksymalnych wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_{\max} [W/(m·K)]. Należy jednak podkreślić że, budynek stanowi strukturę przegród budowlanych i ich złączy o indywidualnym charakterze fizycznym i poddany jest oddziaływaniu środowiska zewnętrznego i wewnętrznego. W wielu przypadkach analiza przegród i złączy budowlanych w aspekcie konstrukcyjno-materiałowym i technologii wykonania nie budzi zwykle zastrzeżeń na etapie projektowania. Natomiast znajomość parametrów fizycznych, związanych z wymianą ciepła i wilgoci, pozwala na uniknięcie wielu wad projektowych i wykonawczych.

Zastosowanie odpowiedniego materiału termoizolacyjnego pozwala na osiągnięcie niskich wartości współczynnika przenikania ciepła U [W/(m²·K)] pełnej przegrody i liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] oraz minimalizację ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej i międzywarstwowej. Przed wyborem odpowiedniego materiału do izolacji cieplnej, w aspekcie projektowania nowych obiektów lub modernizacji budynków istniejących, należy zwrócić uwagę na następujące właściwości: współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)], gęstość objętościowa, izolacyjność akustyczna, przepuszczalność pary wodnej, współczynnik oporu dyfuzyjnego μ [-], wrażliwość na czynniki biologiczne i chemiczne oraz ochronę przeciwpożarową. Na podstawie prowadzonych obliczeń i analiz w tym zakresie zestawiono przykładowy dobór materiałów termoizolacyjnych (rysunek 1).

Przykładowy dobór materiałów termoizolacyjnych

Ocieplenie **ścian zewnętrznych** (od zewnątrz): styropian (EPS), styropian szary (grafitowy), płyty z piany fenolowej, wełna mineralna, inne innowacyjne materiały: maty aerożelowe, parogel, płytowe elementy próżniowe (VIP)

Ocieplenie **stropodachów dwudzielnych i stropów nad poddaszami nieużytkowanymi**: wełna celulozowa, wełna mineralna

Ocieplenie **dachów drewnianych**: płyty drzewne, płyty z wełny owczej, płyty z wełny mineralnej, pianka poliuretanowa (PUR/PIR), płyty korkowe

Ocieplenie **przegród stykających się z gruntem (izolacja obwodowa), cokołów i podłóg**: polistyren ekstrudowany (XPS), szkło piankowe

Docieplenie **od wewnątrz**: bloczki z betonu komórkowego (Multipor), płyty klimatyczne, tynki ciepłochronne (renowacyjne)

Ocieplenie z zastosowaniem **materiałów termoizolacyjnych „nowej generacji”**: aeorożel, parogel, izolacje refleksyjne, izolacje próżniowe VIP, izolacje transparentne, pianosilikaty

Rys. 1. Przykładowy dobór materiałów termoizolacyjnych – opracowanie własne

Działania energooszczędne stosowane w budynkach o niskim zużyciu energii można podzielić na trzy podstawowe grupy. Pierwsza to technologie związane z redukcją strat ciepła przez przegrody, a w szczególności: ocieplanie przegród zewnętrznych (podłogi na gruncie,

stropy, dach, ściany), dobór stolarki okiennej i drzwiowej z uwzględnieniem wymagań cieplnych wg rozporządzenia [3]. Druga grupa dotyczy redukcji strat oraz poprawy sprawności systemu instalacyjnego: wymiana lub modernizacja grzejników, wymiana lub modernizacja systemu grzewczego (wstawienie ogrzewania podłogowego, powietrznego itp.), instalacja termostatów, montaż nowoczesnych regulatorów pogodowych bądź pokojowych, izolacja przewodów c.w.u i c.o., wymiana lub modernizacja systemu wytwarzania ciepłej wody, wymiana lub modernizacja systemu wentylacji (zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła – rekuperator). Natomiast ostatnią grupę trzecią stanowią prace projektowo-wykonawcze lub modernizacyjne skupiające się na źródle ciepła, do których mogą należeć: zaprojektowanie i zainstalowanie lub wymiana źródła ciepła (zamiana kotła na nowy cechujący się lepszą sprawnością, bądź zamiana źródła lokalnego na miejską sieć ciepłowniczą), zmiana nośnika energii (zamiana kotła na inny, który wytwarza energię spalając paliwo innego rodzaju; wyjątkiem jest zamiana paliwa w tym samym kotle, który jest przystosowany do spalania kilku rodzajów surowców), zastosowanie technologii wykorzystującej odnawialne źródła energii na potrzeby grzewcze (np. pompy ciepła, biopaliwa, kolektory słoneczne), zastosowanie kogeneracji (produkcja jednoczesnego prądu oraz ciepła – dotyczy współdzielni), zastosowanie automatyki sterującej źródłem. Opisane powyżej grupy działań energooszczędnych dotyczą szczególnie budynków poddawanych termomodernizacji.

Szczegółowe analizy, obliczenia oraz przykładowe rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe i techniczne dla budynków o niskim zużyciu energii przedstawiono w pracach [4, 5, 6, 7, 8].

3. Wpływ stosowanych technologii energooszczędnych na energochłonność budynku

Podstawowym działaniem technicznym w zakresie jakości cieplnej elementów obudowy budynku jest dobór materiału termoizolacyjnego do ocieplenia przegród zewnętrznych w nowoprojektowanych jak i modernizowanych budynkach. Współczynnik przenikania ciepła U_c [$W/(m^2 \cdot K)$] jest podstawowym parametrem służącym do sprawdzenia kryterium cieplnego ($U_c \leq U_{c(max)}$). Wraz ze zmieniającymi się wartościami $U_{c(max)}$ (od 31.12.2020 r. dla ścian zewnętrznych, przy $t_i \geq 16^\circ C$; $U_{c(max)} = 0,20 W/(m^2 \cdot K)$), niektóre ich rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe nie spełniają podstawowego kryterium ($U_c \leq U_{c(max)}$). Dlatego zasadne staje się wykonanie szczegółowych obliczeń w tym zakresie.

Do obliczenia współczynnika przenikania ciepła ściany zewnętrznej dwuwarstwowej U_c [$W/(m^2 \cdot K)$], przy zastosowaniu zróżnicowanych materiałów, przyjęto następujące założenia:

- opory przejmowania ciepła dla ściany; wartości oporów przejmowania ciepła zostały przyjęte wg PN-EN ISO 6946:2008 [9] dla poziomego kierunku strumienia ciepła: opór przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody: $R_{se} = 0,04 [(m^2 \cdot K)/W]$, opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody: $R_{si} = 0,13 [(m^2 \cdot K)/W]$,
- wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [$W/(m \cdot K)$] przyjęto na podstawie tablic w pracy [10].

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1 w zależności od wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [$W/(m \cdot K)$] i grubości materiału termoizolacyjnego.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wartości współczynnika przenikania ciepła U_c według PN-EN ISO 6946:2008 [9] w odniesieniu do ściany zewnętrznej dwuwarstwowej – opracowanie własne

| l.p. | Warstwy materiałowe | d [m] | λ [W/(m·K)] | x [m] | Warianty izolacji cieplnej | | | | | |
|------|-----------------------|-------|---------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | I | II | III | IV | V | VI |
| | | | | | współczynnik przewodzenia ciepła materiałów izolacji cieplnej λ [W/(m·K)] | | | | | |
| | | | | | 0,040 | 0,038 | 0,035 | 0,031 | 0,021 | 0,015 |
| 1. | Tynk gipsowy | | | | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,22 | 0,16 | 0,12 |
| | Bl. z betonu | 0,01 | 0,40 | 0,10 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,14 | 0,11 |
| | komórkowego | 0,24 | 0,21 | 0,12 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,12 | 0,09 |
| | Izolacja cieplna | x | y | 0,15 | | | | | | |
| | Tynk cienkowarstwowy | 0,005 | 0,76 | 0,20 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,09 | 0,07 |
| 2. | Tynk gipsowy | | | | 0,32 | 0,31 | 0,29 | 0,26 | 0,19 | 0,14 |
| | Bl. wapienno-piaskowy | 0,01 | 0,40 | 0,10 | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,22 | 0,16 | 0,12 |
| | Izolacja cieplna | x | y | 0,15 | 0,23 | 0,22 | 0,20 | 0,18 | 0,13 | 0,09 |
| | Tynk cienkowarstwowy | 0,005 | 0,76 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,14 | 0,10 | 0,07 |
| 3. | Tynk gipsowy | | | | 0,33 | 0,32 | 0,30 | 0,27 | 0,19 | 0,14 |
| | Cegła pełna | 0,01 | 0,40 | 0,10 | 0,28 | 0,27 | 0,25 | 0,23 | 0,16 | 0,12 |
| | Izolacja cieplna | 0,25 | 0,77 | 0,12 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,13 | 0,10 |
| | Tynk cienkowarstwowy | x | y | 0,15 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,13 | 0,10 |
| | Tynk cienkowarstwowy | 0,005 | 0,76 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,14 | 0,10 | 0,07 |

Warianty izolacji cieplnej: **I** – płyty styropianowe $\lambda = 0,040$ W/(m·K), **II** – płyty z wełny mineralnej $\lambda = 0,038$ W/(m·K), **III** – płyty ekstrudowane $\lambda = 0,035$ W/(m·K), **IV** – płyty ze styropianu grafitowego $\lambda = 0,031$ W/(m·K), **V** – płyty rozżelowe $\lambda = 0,021$ W/(m·K), **VI** – płyty aerożelowe $\lambda = 0,015$ W/(m·K); do obliczeń U_c przyjęto $\Delta U=0$

Kolorem zielonym zaznaczono w tablicy wartości współczynnika przenikania ciepła U_c ścian zewnętrznych spełniających wymaganie: $U_c \leq U_c(\max) = 0,20$ W/(m²·K)

Istotny wpływ na wartość współczynnika przenikania ciepła przegrody budowlanej U_c [W/(m²·K)] ma wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] materiału izolacyjnego, ale także warstwy konstrukcyjnej. W odniesieniu do jednego rodzaju izolacji może się ona wahać w znacznym przedziale w zależności od produktu, co wynika z szybkiego rozwoju rynku materiałów termoizolacyjnych oraz coraz bardziej zaawansowanych technologii produkcyjnych. W przypadku izolacji aerożelowych (produkowanych w matach o gr. 1cm) przedstawiono obliczenia dla grubości 10, 12, 15 i 20 cm tylko w celach porównawczych w stosunku do innych materiałów termoizolacyjnych.

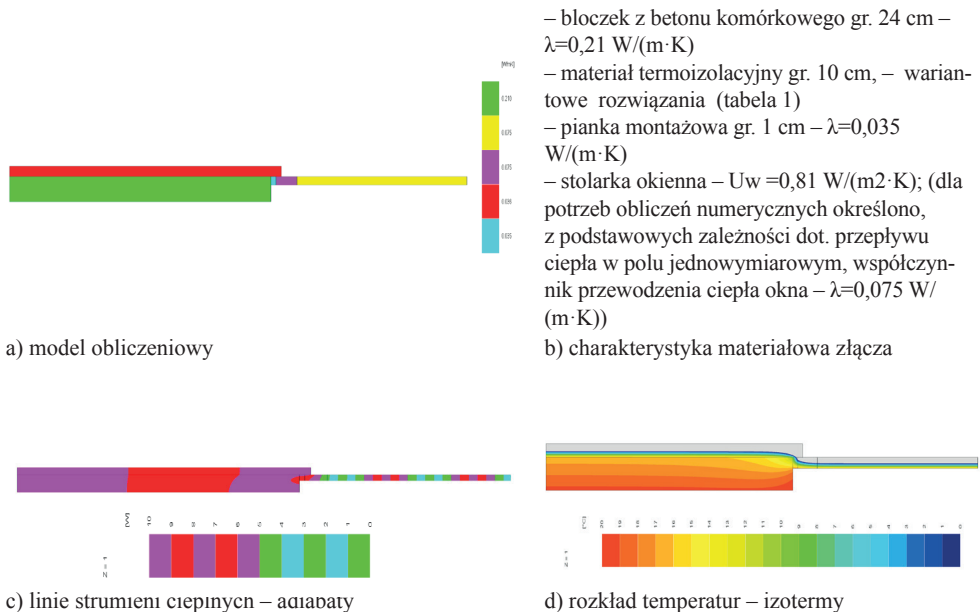
Należy podkreślić, że często zagadnienia fizyki cieplnej budowli sprowadzają się przede wszystkim do analizy cieplnej przegród zewnętrznych budynków, poddanych oddziaływaniom zmiennych w czasie temperatur zewnętrznych i wewnętrznych. W wielu przypadkach rozwiązanie przepływu ciepła sprowadza się do określenia przenikania ciepła przez płaską przegrodę budowlaną w polu jednowymiarowym (1D), bez uwzględnienia przepływu ciepła w polu dwuwymiarowym (2D) i trójwymiarowym (3D). Jednak realnym (rzeczywistym) polem wymiany ciepła jest zazwyczaj przegroda zewnętrzna jako fragment budynku, a więc połączona systemem złączy z przegrodami dowiązującymi (stropem, ścianą zewnętrzną lub wewnętrzną lub podłogą na gruncie). W obrębie przegrody mogą występować miejsca zaburzające jej ciągły charakter – wstawki materiałowe, stolarka okienna i drzwiowa, zmienna grubość izolacji cieplnej. W tych wszystkich przypadkach pojawia się pole temperatur: płaskie

(2D) lub przestrzenne (3D), zmieniające istotnie procedurę prowadzenia obliczeń ciepłno-wilgotnościowych przegrody.

Poniżej przedstawiono obliczenia parametrów fizykalnych złącza: połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę z zastosowaniem węgaraka (ocieplenie przedłużone na ościeżnicę), przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO-KOBRU 86 [11], przyjmując następujące założenia:

- modelowanie złącza wykonano zgodnie z zasadami przedstawionymi w PN-EN ISO 10211:2008 [12],
- opory przejmowania ciepła (R_{si} , R_{se}) przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 6946:2008 [9] przy obliczeniach strumieni ciepłych oraz wg PN-EN ISO 13788:2003 [13] przy obliczeniach rozkładu temperatur i czynnika temperaturowego $f_{Rsi(2D)}$,
- temperatura powietrza wewnętrznego $t_i = 20\text{ °C}$ (pokój dzienny), temperatura powietrza zewnętrznego $t_e = -20\text{ °C}$ (III strefa),
- wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych λ [$W/(m \cdot K)$] przyjęto na podstawie tablic w pracy [10],
- ściana zewnętrzna dwuwarstwowa: bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm – $\lambda=0,21\text{ W/(m \cdot K)}$, styropian EPS (przypadek A) – $\lambda=0,036\text{ W/(m \cdot K)}$, styropian grafitowy (przypadek B) – $\lambda=0,031\text{ W/(m \cdot K)}$, płyty fenolowe (rezolowe) (przypadek C) – $\lambda=0,022\text{ W/(m \cdot K)}$,
- stolarka okienna o współczynniku przenikania ciepła $U_w=0,81\text{ [W/(m}^2 \cdot K)]$.

Na rysunku 2 przedstawiono model obliczeniowy złącza oraz wyniki symulacji komputerowej: linie strumieni ciepłych (adiabaty) oraz rozkład temperatury (izotermy).



Rys. 2. Model obliczeniowy oraz wyniki symulacji komputerowej analizowanego złącza – opracowanie własne

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń parametrów fizykalnych analizowanego złącza przy zastosowaniu zróżnicowanych materiałów termoizolacyjnych (o gr. 10cm).

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabela 2) można stwierdzić, że analizowane złącza generują dodatkowe straty ciepła określone m.in. w postaci liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i [W/(m·K)] oraz obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody t_{min} [°C]. W przypadku tego typu złączy bardzo zasadne staje się określenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła, osobno dla ściany zewnętrznej $\Psi_{i,śc}$ [W/(m·K)] i dla okna $\Psi_{i,o}$ [W/(m·K)], ponieważ pozwala to na określenie dodatkowych strat ciepła, osobno dla ściany zewnętrznej i okna. Procedura obliczania gałęziowych współczynników przenikania ciepła Ψ polega na:

- wydzieleniu wewnętrznych gałęzi mostka termicznego, przypisanie warunków początkowych i brzegowych,
- obliczeniu (numerycznie) przy zastosowaniu programu komputerowego strumieni ciepła płynących przez wydzielone gałęzie (części) mostka,
- obliczeniu odpowiednich współczynników gałęziowych według odpowiednich zależności z zastosowaniem danych odpowiadających wydzielonym gałęziom.

W pracy przedstawiono obliczenia liniowego i gałęziowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i [W/(m·K)] po wymiarach wewnętrznych. Istnieje także możliwość wyznaczenia współczynników po wymiarach zewnętrznych Ψ_e i całkowitych wewnętrznych Ψ_{oi} . Wykonanie szczegółowych obliczeń, przy zastosowaniu certyfikowanego programu komputerowego w ujęciu stacjonarnym [11], pozwala na uzyskanie miarodajnych wyników parametrów ciepłno-wilgotnościowych. Procedury obliczeniowe w zakresie określania parametrów fizykalnych złączy budowlanych, zgodnie z PN-EN ISO 10211:2008 [12], przedstawiono szczegółowo w pracy [10].

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów fizykalnych złącza: połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę z zastosowaniem zróżnicowanych materiałów termoizolacyjnych – opracowanie własne

| Parametry fizykalne złącza | | | | | | |
|----------------------------|---|----------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| wariant | U (U_{ID}) [W/(m ² ·K)] | Φ [W] | L ^{2D} [W/(m·K)] | Ψ _i [W/(m·K)] | t _{min} . [°C] | f _{Rsi,(2D)} [-] |
| A | 0,24 ¹⁾ | 34,37 | 0,86 | 0,04 | 13,92 | 0,848 |
| | 0,25 ²⁾ | | | 0,03 ^{*)} | | |
| | 0,81 ³⁾ | | | 0,01 ^{**)} | | |
| B | 0,22 ¹⁾ | 33,35 | 0,83 | 0,04 | 14,30 | 0,858 |
| | 0,22 ²⁾ | | | 0,03 ^{*)} | | |
| | 0,81 ³⁾ | | | 0,01 ^{**)} | | |
| C | 0,17 ¹⁾ | 31,27 | 0,78 | 0,04 | 15,07 | 0,877 |
| | 0,17 ²⁾ | | | 0,03 ^{*)} | | |
| | 0,81 ³⁾ | | | 0,01 ^{**)} | | |

warianty z węgarkiem: A – polistyren ekstrudowany – $\lambda=0,036$ W/(m·K), B – styropian grafitowy – $\lambda=0,031$ W/(m·K), C – płyty fenolowe (rezolowe) – $\lambda=0,022$ W/(m·K);

U (U_{ID}) – współczynnik przenikania ciepła poszczególnych części analizowanego złącza (¹⁾ dotyczy ściany zewnętrznej, ²⁾ dotyczy węgarka z oknem, ³⁾ dotyczy okna)

Φ – strumień ciepła przepływający przez analizowane złącze,

L^{2D} – liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego analizowanego złącza; L^{2D}=Φ/(Δt·l)

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła analizowanego złącza, określony po wymiarach wewnętrznych,

^{*)} wartość liniowego (gałęziowego) współczynnika przenikania ciepła dotyczącego ściany zewnętrznej Ψ_{i,śc}

^{**)} wartość liniowego (gałęziowego) współczynnika przenikania ciepła dotyczącego okna Ψ_{i,o}.

t_{min}. – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego,

f_{Rsi,(2D)} – czynnik temperaturowy, określony na podstawie t_{min}.

Zastosowanie węgarka (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeżnicę okienną) pozwala na minimalizację dodatkowych strat ciepła (Ψ_i [W/(m·K)]) oraz ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej ($t_{\min.}$ [°C], $f_{Rsi,(2D)}$) w stosunku do rozwiązania bez przedłużenia izolacji cieplnej. Szczegółowe analizy w tym zakresie przedstawiono m.in. w pracach [6, 7, 10].

Określając energochłonność budynku należy uwzględnić także sprawności systemów instalacyjnych budynku wynikające z: regulacji i wykorzystania ciepła w przestrzeni ogrzewanej ($\eta_{H,e}$), przesyłu ciepła ze źródła ciepła do przestrzeni ogrzewanej ($\eta_{H,d}$), akumulacji ciepła w elementach pojemnościowych systemu ogrzewania ($\eta_{H,s}$), wytwarzania ciepła z nośnika energii lub energii dostarczanych do źródła ciepła ($\eta_{H,g}$). Instalacja grzewcza w budynku musi spełniać wymagania przepisów techniczno-budowlanych, a także powinna uwzględniać wiedzę techniczną z zakresu rozwiązań energooszczędnych. Projektowany system powinien być systemem wysokosprawnym. Należy zaplanować wysokosprawne źródła ciepła, dołożyć wszelkich starań w celu obniżenia strat na przesyłach czynnika grzewczego oraz jeśli występuje zbiornik akumulacyjny, straty na akumulacji powinny być minimalne, a także optymalnie dobrać elementy odpowiedzialne za regulację i wykorzystanie ciepła. Maksymalne możliwe sprawności można uzyskać wg [14] m.in. poprzez: stosowanie kotłów kondensacyjnych, pomp ciepła o wysokim współczynniku efektywności (COP), odpowiednie prowadzenie przewodów rozprowadzających czynnik grzewczy (zwarta instalacja) oraz ich właściwą izolację cieplną, odpowiednią izolację zbiorników buforowych oraz dobrane do specyfiki ich pracy i użytkowania sterowanie ładowaniem i rozładowaniem, niskotemperaturowe systemy grzewcze płaszczyznowe, grzejnikowe lub mieszane, stosowanie wysokosprawnych pomp pomocniczych charakteryzujących się niskim poborem mocy (skutkujące małym zużyciem energii pomocniczej).

Wartość wskaźnika rocznego zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną (EP) określa efektywność całkowitą budynku. Dotyczy energii zawartej w źródłach, w tym paliwach i nośnikach, niezbędnej do pokrycia zapotrzebowania na energię końcową, z uwzględnieniem dodatkowych nakładów na dostarczenie tej energii do granicy budynku. Wartość współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii lub energii dla systemów technicznych w_i przyjmuje się na podstawie danych udostępnionych przez dostawcę tego nośnika energii lub energii. Uzyskanie niskich wartości wskazuje na nieznaczne zapotrzebowanie i tym samym wysoką efektywność energetyczną budynku. Na stronach internetowych niektórzy dostawcy ciepła zamieszczają wartości wskaźnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej, i tak przykładowo:

- wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w roku 2016 dla sieci ciepłowniczej w warszawskim systemie ciepłowniczym Veolia Energia Warszawa S.A. zasilanym z elektrociepłowni Żerań i Siekierki, ciepłowni Kawęczyn i Wola oraz z Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów "Gwarków" OUZ-2, bez względu na ilość i rodzaj źródeł ciepła oraz technologii wykorzystywanych do wytwarzania i dostarczania ciepła do odbiorcy końcowego wynosi $W_{pe} = 0,69$ [15],
- Gdańskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej sp. z o.o. podaje, iż wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej w roku 2015 dla miejskiej sieci ciepłowniczej wynosi $W_{pe} = 0,658$ [16],
- wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla sieci ciepłowniczej Bielska-Białej za rok 2016: $W_{pe} = 0,71$ [17].

W przypadku braku takich danych przyjmuje się wartości współczynnika W_i określone w rozporządzeniu [18].

Poprawa standardu energetycznego (obniżenie wskaźnika energochłonności) istniejącego budynku może być zapewniona zarówno poprzez metody bez nakładu finansowego, jak też z nakładem. Do pierwszej grupy można zaliczyć działania związane ze zrównoważonym stosowaniem zaworów termostatycznych, przemyślanym wietrzeniem pomieszczeń, odpowiednim rozmieszczeniem grzejników oraz oszczędnością ciepłej wody użytkowej. Drugi sposób, wymaga inwestycji w przyszłość, która zwróci się po pewnym czasie. Szacowany czas zwrotu inwestycji może być przedstawiony przy pomocy współczynnika SPBT.

Do analizy wybrano budynek jednorodzinny z piwnicą i poddaszem użytkowym wzniesiony w 1990 roku. W trakcie oceny stanu technicznego i cieplnego stwierdzono, że wartości współczynników przenikania ciepła przegród zewnętrznych nie spełniają podstawowego kryterium wg rozporządzenia [3]: ($U_c \leq U_{c(max)}$). W trakcie eksploatacji w budynku przeprowadzono remont, w trakcie którego został wymieniony nieszczelny dach oraz stolarka okienna. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wg rozporządzenia [18] można stwierdzić, że analizowany budynek jest wysoce energochłonny (wskaźnik zapotrzebowania na energię użytkową – $EU=152,06 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$, wskaźnik zapotrzebowania na energię końcową – $EK=410,90 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$, natomiast wskaźnik zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną – $EP=455,41 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$). Aby przystosować analizowany budynek do obowiązujących przepisów prawnych wg rozporządzenia [3] należy przeprowadzić termomodernizację poszczególnych elementów: ocieplenie stropu nad nieogrzewaną piwnicą, ocieplenie ścian zewnętrznych, wymiana systemu ogrzewania C.O., wymiana systemu podgrzewania c.w.u., instalacja termostatów, izolacja przewodów grzewczych.

Główny podział wariantów oparto o zróżnicowanie w źródle ciepła potrzebnego do ogrzewania pomieszczeń budynku oraz przygotowanie c.w.u. – tabela 3.

Tabela 3. Rozpatrywane warianty termomodernizacyjne analizowanego budynku – opracowanie własne na podstawie [19]

| | Wariant I | Wariant II | Wariant III |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Źródło ciepła do c.o | kocioł – biomasa | kocioł – węgiel, pompa ciepła | kocioł kondensacyjny |
| Źródło ciepła do c.w.u. | kocioł – biomasa | kocioł – węgiel, pompa ciepła | kocioł kondensacyjny / kolektory |
| Ocieplenie ścian zewnętrznych | styropian | styropian | styropian |
| Ocieplenie stropu nad piwnicą | styropian | styropian | styropian |
| Izolacja przewodów grzewczych | otulina PUR | otulina PUR | otulina PUR |
| Instalacja termostatów | + | + | + |

Na podstawie założeń przedstawionych w tabeli 3 (wariant I, II, III) przeprowadzono obliczenia wskaźników charakterystyki energetycznej analizowanego budynku wg procedur prezentowanych w rozporządzeniu [18]. Wszystkie przegrody zewnętrzne po termomodernizacji spełniały podstawowe kryterium cieplne: $U_c \leq U_{c(max)}$, a wartości $U_{c(max)}$ przyjęto jako ostateczne obowiązujące od 31.12.2020 r. Natomiast dodatkowe straty ciepła wynikające z występowania liniowych mostków cieplnych uwzględniono przy zastosowaniu wartości Ψ_c wg PN-EN ISO 14683 [20]. Wyniki obliczeń podstawowych wskaźników EU, EK, EP) dla analizowanego budynku zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki obliczeń parametrów charakterystyki energetycznej budynku jednorodzinnego przed i po termomodernizacji w zróżnicowanych wariantach – opracowanie własne na podstawie [19]

| Parametry | Przed termomodernizacją | Po termomodernizacji | | |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|------------|-------------|
| | | Wariant I | Wariant II | Wariant III |
| EU [kWh/(m ² ·rok)] | 152,06 | 88.44 | 88.44 | 88.44 |
| EK [kWh/(m ² ·rok)] | 410,90 | 181.34 | 130.22 | 136.52 |
| EP [kWh/(m ² ·rok)] | 455,41 | 35.81 | 141.65 | 116.30 |

Wobec powyższego, jedynym wariantem, który może zostać wybrany, aby dostosować analizowany budynek do standardu „budynek o niskim zużyciu energii” ($EP \leq EP_{\max} = 70$ kWh/(m²·rok) i $U_c \leq U_{c(\max)}$) jest wariant I (tabela 3 i 4). Spełnienie wymagań wg rozporządzenia [3] bez zastosowania odnawialnych źródeł energii (OZE) jest bardzo trudne, a niekiedy niemożliwe. Dlatego im większe procentowe ich zastosowanie, tym zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną EP [kWh/(m²·rok)] jest niższe. Istnieje możliwość obniżenia wskaźników (EU, EK i EP) poprzez poprawę jakości izolacyjnej przegród zewnętrznych (U_c znacznie niższe niż $U_{c(\max)}$ obowiązujące po 31.12.2020 r.) przy zastosowaniu innowacyjnych materiałów termoizolacyjnych, o niskiej wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)].

4. Podsumowanie i wnioski

Dobór technologii energooszczędnych w budynkach o niskim zużyciu energii jest procesem złożonym, obejmującym m.in. zagadnienia projektowania architektonicznego, fizyki budowli oraz instalacji budowlanych.

Jakość cieplna obudowy budynku jest oceniana przez określenie wartości współczynników U_c , które wykorzystywane są do dalszych obliczeń w zakresie analizy ciepłno-wilgotnościowej przegród i całego budynku (np. współczynnik strat ciepła przez przenikanie H_{tr} [W/K], zapotrzebowanie na energię użytkową EU, energię końcową EK i pierwotną EP [kWh/(m²·rok)]). Należy także podkreślić, że przy kształtowaniu układu warstw materiałowych przegród zewnętrznych i ich złączy trzeba uwzględniać kryteria w zakresie: izolacyjności cieplnej, kondensacji powierzchniowej i międzywarstwowej, izolacyjności akustycznej, ochrony przeciwpożarowej oraz nośności i trwałości konstrukcji. Niektóre układy warstw materiałowych spełniają wymagania w zakresie izolacyjności cieplnej ($U_c \leq U_{c(\max)}$), jednak po przeprowadzeniu analizy w zakresie wymagań wilgotnościowych, akustycznych lub przeciwpożarowych usytuowanie warstwy izolacji cieplnej w dowolnym położeniu przegrody jest niedopuszczalne.

Istotne staje się także miarodajne określenie parametrów fizykalnych (ciepłno-wilgotnościowych) złączy budowlanych, których wartości zależą od usytuowania i grubości materiału termoizolacyjnego oraz położenia stolarki okiennej w ścianie zewnętrznej – tabela 2. Posługiwanie się wartościami przybliżonymi i orientacyjnymi, np. w oparciu o PN-EN ISO 14683:2008 [20], jest nieuzasadnione, ponieważ nie uwzględniają zmiany układów materiałowych oraz rodzaju i grubości izolacji cieplnej.

Zaostrzenie wymagań w zakresie izolacyjności cieplnej i oszczędności energii budynków wymusza wprowadzenie działań energooszczędnych, które kształtują się w istotny sposób na efektywność energetyczną budynków. Szczegółowe analizy dotyczące wpływu jakości cieplnej przegród budynków na ich zapotrzebowanie na energię (EU, EK, EP) szczegółowo opisano m.in. w pracy [21]. Podjęte działania termomodernizacyjne w budynkach istniejących powinny być przeprowadzane na podstawie szczegółowej analizy ich stanu technicznego

i cieplnego. Natomiast ocenę jakości prac związanych z dociepleniem przegród zewnętrznych należy przeprowadzać na podstawie badań termowizyjnych. Wyniki i analizy w tym zakresie zaprezentowano, dla osiedla na Górnym Śląsku, w pracy [22]. Istnieje potrzeba prowadzenia obliczeń i analiz dotyczących podejmowanych działań energooszczędnych na etapie ich projektowania, wykonawstwa oraz eksploatacji.

Dążenie do spełnienia wymagań dla osiągnięcia standardu dla budynku o niskim zużyciu energii w zakresie wskaźnika EP (np. dla budynku jednorodzinne, poniżej $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$) wymaga: zaprojektowania lub modernizacji przegród i złączy budowlanych zapewniających minimalne starty ciepła przez przenikanie ($U_c \leq U_{cmax}$), doboru odpowiednich elementów instalacji c.o., c.w.u., chłodzenia (ze szczególnym uwzględnieniem sprawności) oraz zastosowania odnawialnego źródła energii (OZE).

5. Literatura

- [1] Uchwała Rady Ministrów z dnia 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia „Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii”.
- [2] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz.U. z 2013 r. poz. 1409, z późn.zm.).
- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2017 r. poz. 2285).
- [4] Grudzińska M., Ostańska A., Życzyńska A. *Low energy and passive buildings*. Grupa Wydawnicza Medium, Warszawa 2017.
- [5] Kaliszuk-Wietecha A., Węglarz A. *Nowoczesne budynki energoefektywne. Znowelizowane warunki techniczne*. Wydawnictwo POLCEN sp. z o.o., Warszawa 2019.
- [6] Pawłowski K. *Zasady projektowania budynków energooszczędnych*. Grupa Wydawnicza Medium Warszawa 2017.
- [7] Pawłowski K. *Projektowanie ścian w budownictwie energooszczędnym. Obliczenia ciepłno-wilgotnościowe ścian zewnętrznych i ich złączy w świetle obowiązujących przepisów prawnych*. Grupa Wydawnicza Medium Warszawa 2017.
- [8] Pawłowski K. *Projektowanie przegród poziomych w budownictwie energooszczędnym. Obliczenia ciepłno-wilgotnościowe przegród stykających się z gruntem, stropów oraz dachów i stropodachów w świetle obowiązujących przepisów prawnych*. Grupa Wydawnicza Medium, Warszawa 2018.
- [9] PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [10] Pawłowski K. *Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków*. Obliczenia ciepłno-wilgotnościowe przegród zewnętrznych i ich złączy. Grupa Medium, Warszawa 2016.
- [11] Program komputerowy TRISCO-KOBRU 86, PHYSIBEL c.V, Belgia. Licencja stanowiskowa na cele badawczo-dydaktyczne.
- [12] PN- EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.
- [13] PN-EN ISO 13788:2003 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania.
- [14] *Poradnik w zakresie poprawy charakterystyki energetycznej budynków*. Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa, Warszawa, 2016.
- [15] www.energiadlawaarszawy.pl/cieplo-systemowe/dla-audytorow (2.08.2017).
- [16] www.gpec.pl/partnerzy-biznesowi/efektywnosc-energetyczna-gpec (2.08.2017).

-
- [17] www.therma.bielsko.pl/wskaznik-nakladu-wpc (data dostępu 2.08.2017).
- [18] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw charakterystyki energetycznej. (Dz.U. z 2015 r., poz. 376).
- [19] Andruszkiewicz K. *Studium projektowe dostosowania budynku jednorodzinnego do standardu budynku o niskim zużyciu energii*. Praca dyplomowa magisterska napisana pod kierunkiem dr. inż. K. Pawłowskiego, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2018.
- [20] PN-EN ISO 14683:2008 Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [21] Życzyńska A., Cholewa T. *The modifications to the requirements on energy savings and thermal insulation of buildings in Poland in the years 1974-2021*. Budownictwo i Architektura 14(1) (2015) 145-154.
- [22] Ostańska A. *Increasing The Energy Efficiency of Dwelling Houses: Case Study of Residentia; Quarter in Upper Silesia, Poland*. Budownictwo i Architektura 18(1) (2019) 23–32.