

Analiza parametrów fizykalnych przegród zewnętrznych niejednorodnych cieplnie

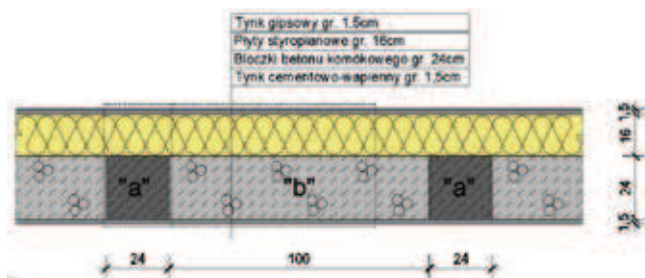
Dr inż. Krzysztof Pawłowski, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

1. Wprowadzenie

Krajowy plan wsparcia [1] zawiera rekomendowaną do stosowania w praktyce krajową definicję: „budynek o niskim zużyciu energii” to taki budynek, który spełnia wymogi 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 1 stycznia 2021 roku (w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością – od 1 stycznia 2019 r.). Zasadniczą zmianą rozporządzenia w zakresie ochrony cieplnej budynków [3] jest obniżenie wartości maksymalnych współczynników przenikania ciepła $U_{c(max)}$ dla przegród zewnętrznych bez znaczenia ze względu na typ przegrody (wielo- czy jednowarstwowa, jednorodna lub niejednorodna cieplnie) oraz przeznaczenie obiektu (mieszkalny, użyteczności publicznej, magazynowy, gospodarczy itp.). Dlatego zasadne staje się określenie parametrów fizykalnych przegród niejednorodnych cieplnie i ich złączy w celu wytypowania poprawnych rozwiązań układów materiałowych spełniających wymagania cieplno-wilgotnościowe.

2. Charakterystyka materiałowa wybranych przegród niejednorodnych cieplnie

Wiele współczesnych przegród zewnętrznych budynków ma budowę niejednorodną. Zakończenie ciągłości przegrody najczęściej następuje w wyniku wymagań konstrukcyjnych – np. złącza elementów prefabrykowanych,



Rys. 1. Ściana zewnętrzna niejednorodna cieplnie – opracowanie własne

połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec, słupy i rygle wbudowane w konstrukcję przegrody lub względnie wynika z natury zastosowanego tworzywa konstrukcyjnego – np. spoiny w murach z cegiel pełnych, pustaków, bloczków z betonu komórkowego lub wapienno-piaskowych). Źródłem zakłóceń ciągłości przegród są również obrzeża okien, drzwi balkonowych i wejściowych, oraz narożniki wewnętrzne i zewnętrzne. Ściany i dachy (stropodachy) budynków wykonanych w konstrukcjach drewnianych są z reguły niejednorodne [4]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe rozwiązanie materiałowe ściany zewnętrznej niejednorodnej cieplnie: słupy żelbetowe z wypełnieniem z bloczków z betonu komórkowego z ociepleniem od strony zewnętrznej.

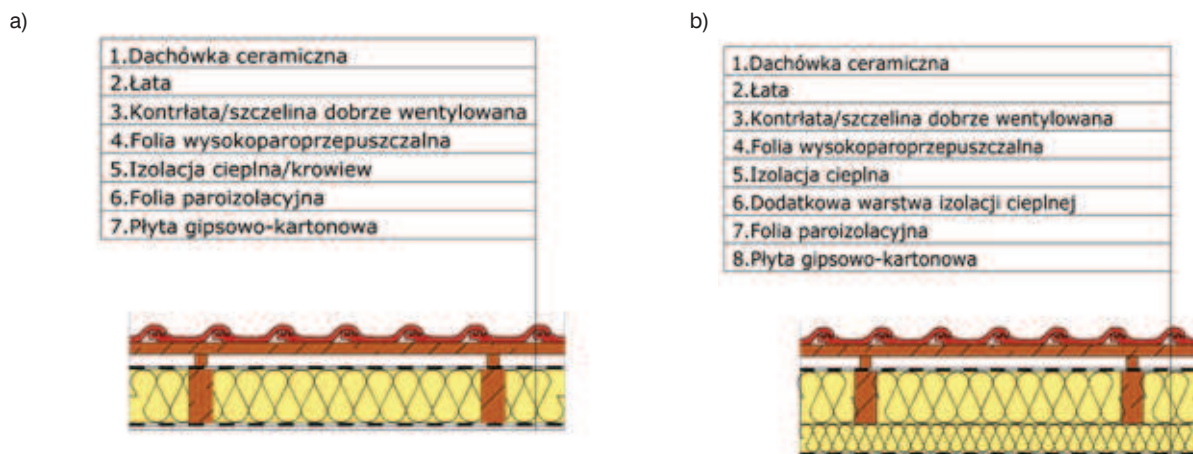
Natomiast na rysunku 2 zaprezentowano przykładowe rozwiązanie materiałowe stropodachu drewnianego: krokwie drewniane z wypełnieniem pomiędzy krokiewiami z wełny mineralnej.

Uwzględnienie wpływu nieciągłości termoizolacji na ukształtowanie pola temperatur w takiej przegrodzie wymaga numerycznego rozwiązania równania przewodzenia ciepła w polu dwu- i trójwymiarowym (2D i 3D) przy zastosowaniu programu komputerowego. W PN-EN ISO 6946:2008 [6] podano metodę uproszczoną (metodę kresów), która pozwala z pewnym przybliżeniem na rozwiązanie niektórych prostych przypadków przegród niejednorodnych cieplnie.

3. Obliczenia parametrów fizykalnych wybranych przegród niejednorodnych cieplnie i ich złączy

Budynek stanowi strukturę przegród budowlanych i ich złączy o indywidualnym charakterze fizykalnym 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 fizykalnych, związanych z wymianą ciepła i wilgoci, pozwala na uniknięcie wielu wad projektowych i wykonawczych.

Do obliczeń wytypowano ścianę zewnętrzną dwuwarstwową: słupy żelbetowe z wypełnieniem z bloczków z betonu



Rys. 2. Układy warstw materiałowych stropodachów drewnianych – źródło [5]: a) izolacja cieplna między krokiewiami, b) izolacja cieplna między i pod krokiewiami

komórkowego lub bloczków wapienno-piaskowych z ociepleniem od strony zewnętrznej wykonanym z płyt styropianowych lub płyt z pianki poliuretanowej PIR (rys. 3). W pierwszym etapie obliczeń (w celu poszukiwania poprawnego rozwiązania układu materiałowego spełniającego obowiązujące wymaganie cieplne: $U_c \leq U_{c(max)}$) wykonano obliczenia metodą kresów wg PN-EN ISO 6946:2008 [6] (w kilku wariantach obliczeniowych).

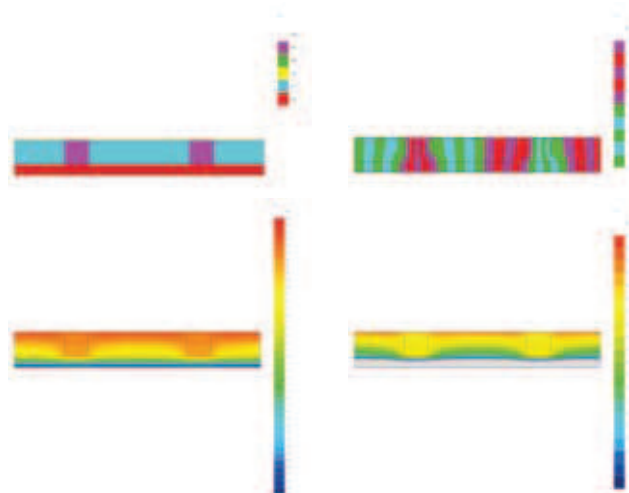
W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń całkowitego oporu cieplnego R_T [$m^2 \cdot K/W$] współczynnika przenikania ciepła ściany zewnętrznej dwuwarstwowej U [$W/(m^2 \cdot K)$] metodą kresów wg PN-EN ISO 6946:2008 [6].

W celu określenia rozkładu temperatur oraz dodatkowych strat ciepła wynikających z występowania niejednorodnej struktury materiałowej wykonano szczegółowe obliczenia przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO wybranych parametrów fizykalnych:

- strumienia cieplnego Φ [W],
- współczynnika przenikania ciepła pełnej przegrody U (U_{1D}) [$W/(m^2 \cdot K)$],
- liniowego współczynnika sprężenia cieplnego L^{2D} [$W/(m \cdot K)$],
- liniowego współczynnika przenikania ciepła (określający dodatkowe straty ciepła wynikające z występowania niejednorodnej cieplnie struktury materiałowej lub liniowych mostków cieplnych) Ψ [$W/(m \cdot K)$],
- temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego t_{min} [$^{\circ}C$],
- czynnika temperaturowego, określanego na podstawie temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego $f_{Rsi(2D)}$ [-].

Do obliczeń, przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO, przyjmuje się następujące założenia:

- modelowanie złączy wykonano zgodnie z zasadami przedstawionymi w PN-EN ISO 10211:2008 [7] oraz w pracach [4] i [9],
- opory przejmowania ciepła (R_{sp} , R_{se}) przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 6946:2008 [6] przy obliczeniach strumienia cieplnego oraz wg PN-EN ISO 13788:2003 [8]



Rys. 3. Przykładowe graficzne przedstawienie wyników symulacji komputerowej dla ściany dwuwarstwowej niejednorodnej cieplnie – opracowanie własne. a) model obliczeniowy, b) linie strumieni cieplnych (adiabaty), c) rozkład temperatur (izotermy)

przy obliczeniach rozkładu temperatur i czynnika temperaturowego $f_{Rsi(2D)}$

- temperatura powietrza wewnętrznego $t_i = 20^{\circ}C$ (pokój dzienny), temperatura powietrza zewnętrznego $t_e = -20^{\circ}C$ (III strefa),
- wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych λ [$W/(m \cdot K)$] przyjęto na podstawie tabel w pracy [9],
- wytypowane przypadki obliczeniowe: ściana zewnętrzna dwuwarstwowa ze słupami żelbetowymi o układzie warstw – tabela 1 i rysunek 3 oraz narożnik ścian zewnętrznych (o konstrukcji słupowej i bez słupów) – rysunek 4 i 5. Na rysunku 3 przedstawiono graficzne wyniki symulacji komputerowej dla ściany dwuwarstwowej niejednorodnej cieplnie przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO, a wyniki obliczeń parametrów fizykalnych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych ścian dwuwarstwowych niejednorodnych cieplnie przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO – opracowanie własne

Warianty obliczeniowe		U_1 [W/(m ² ·K)]	U_2 [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	L^{2D} [W/(m·K)]	Ψ [W/(m·K)]	t_{min} [°C]	f_{Rsi} [-]
I	a) x=0,10	0,260	0,354	28,58	0,715	0,025	15,22	0,881
	b) x=0,12	0,230	0,301	24,96	0,624	0,020	15,83	0,896
	c) x=0,15	0,196	0,246	20,98	0,525	0,014	16,50	0,913
II	a) x=0,10	0,164	0,197	17,26	0,432	0,009	17,14	0,929
	b) x=0,12	0,142	0,166	14,80	0,370	0,006	17,55	0,939
	c) x=0,15	0,118	0,134	12,20	0,305	0,005	17,98	0,954
III	a) x=0,10	0,319	0,354	32,60	0,815	0,007	15,72	0,893
	b) x=0,12	0,275	0,301	28,00	0,700	0,006	16,31	0,908
	c) x=0,15	0,228	0,246	23,11	0,578	0,004	16,94	0,924
IV	a) x=0,10	0,185	0,197	18,70	0,468	0,003	17,52	0,938
	b) x=0,12	0,158	0,166	15,85	0,396	0,001	17,89	0,947
	c) x=0,15	0,129	0,134	12,91	0,323	0,001	18,28	0,957

U_1 – współczynnik przenikania ciepła w przekroju przez materiał ścienny (bloczki z betonu komórkowego lub wapienno-piaskowe)
 U_2 – współczynnik przenikania ciepła w przekroju przez słup żelbetowy
 Φ – strumień ciepły przepływający przez fragment ściany dwuwarstwowej niejednorodnej cieplnie
 L^{2D} – liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego ($L^{2D} = \Phi / \Delta t \cdot l$)
 Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła ($\Psi = L^{2D} \cdot \Sigma U_i \cdot l$)
 t_{min} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni ściany zewnętrznej (w miejscu występowania słupa żelbetowego)
 f_{Rsi} – czynnik temperaturowy określony na podstawie temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody
 $(f_{Rsi} = (t_{min} - t_e) / (t_i - t_e))$
 x – grubość materiału termoizolacyjnego [m]

Tabela 3. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych narożnika ścian dwuwarstwowych niejednorodnych cieplnie przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO – opracowanie własne

Warianty obliczeniowe		U_1 [W/(m ² ·K)]	U_2 [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	L^{2D} [W/(m·K)]	Ψ [W/(m·K)]	t_{min} [°C]	$f_{Rsi(2D)}$ [-]
I	a) x=0,10	0,260	0,354	32,98	0,825	0,135	7,80	0,695
	b) x=0,12	0,230	0,301	29,03	0,726	0,121	8,99	0,725
	c) x=0,15	0,196	0,246	24,66	0,617	0,106	10,36	0,756
II	a) x=0,10	0,164	0,197	20,30	0,508	0,085	12,01	0,800
	b) x=0,12	0,142	0,166	17,54	0,439	0,075	12,96	0,824
	c) x=0,15	0,118	0,134	14,59	0,365	0,064	14,00	0,850
III	a) x=0,10	0,319	0,354	38,11	0,953	0,145	11,24	0,781
	b) x=0,12	0,275	0,301	32,99	0,825	0,131	12,26	0,807
	c) x=0,15	0,228	0,246	27,49	0,687	0,113	13,39	0,839
IV	a) x=0,10	0,185	0,197	22,21	0,555	0,091	14,64	0,866
	b) x=0,12	0,158	0,166	18,95	0,474	0,078	15,35	0,884
	c) x=0,15	0,129	0,134	15,56	0,389	0,067	16,11	0,903

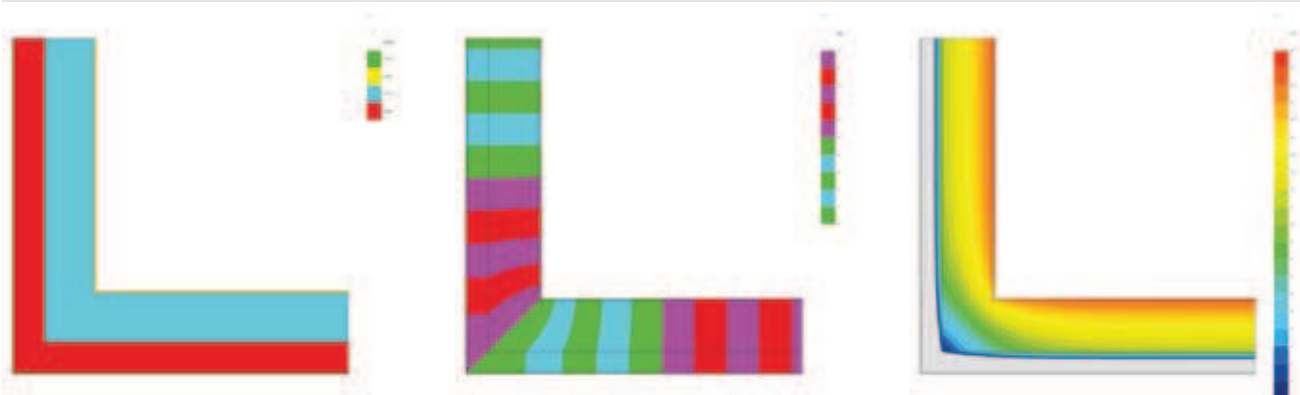
U_1 – współczynnik przenikania ciepła w przekroju przez materiał ścienny (bloczki z betonu komórkowego lub wapienno-piaskowe)
 U_2 – współczynnik przenikania ciepła w przekroju przez słup żelbetowy
 Φ – strumień ciepły przepływający przez narożnik ścian dwuwarstwowych niejednorodnych cieplnie
 L^{2D} – liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego ($L^{2D} = \Phi / \Delta t \cdot l$)
 Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła ($\Psi = L^{2D} \cdot \Sigma U_i \cdot l$)
 t_{min} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni narożnika ściany zewnętrznej (w miejscu występowania słupa żelbetowego)
 $f_{Rsi(2D)}$ – czynnik temperaturowy określony na podst. temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody
 $(f_{Rsi(2D)} = (t_{min} - t_e) / (t_i - t_e))$
 x – grubość materiału termoizolacyjnego [m]

W następnym etapie obliczeń określono parametry fizyczne narożnika ścian zewnętrznych dwuwarstwowych o układzie niejednorodnym cieplnie – rysunek 4. W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń parametrów cieplnych narożnika ścian zewnętrznych o strukturze niejednorodnej cieplnie. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia parametrów fizycznych dla narożnika ścian zewnętrznych

o strukturze jednorodnej cieplnie (bez słupów żelbetowych) – rysunek 5. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia parametrów fizycznych dla narożnika ścian zewnętrznych o strukturze jednorodnej cieplnie (bez słupów żelbetowych) – rysunek 5 i tabela 4.



Rys. 4. Przykładowe graficzne przedstawienie wyników symulacji komputerowej dla narożnika ściany dwuwarstwowej niejednorodnej cieplnie – opracowanie własne: a) model obliczeniowy, b) linie strumieni ciepłych (adiabaty), c) rozkład temperatur (izotermy)



Rys. 5. Przykładowe graficzne przedstawienie wyników symulacji komputerowej dla narożnika ściany dwuwarstwowej jednorodnej cieplnie – opracowanie własne: a) model obliczeniowy, b) linie strumieni ciepłych (adiabaty), c) rozkład temperatur (izotermy)

Tabela 4. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych narożnika ścian dwuwarstwowych jednorodnych cieplnie przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO – opracowanie własne

Warianty obliczeniowe		U [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	L ^{2D} [W/(m·K)]	Ψ [W/(m·K)]	t _{min.} [°C]	f _{Rsi (2D)} [-]
I	a) x=0,10	0,260	28,89	0,722	0,077	12,98	0,825
	b) x=0,12	0,230	25,79	0,645	0,074	13,59	0,840
	c) x=0,15	0,196	22,24	0,556	0,070	14,31	0,858
II	a) x=0,10	0,164	18,65	0,466	0,060	15,14	0,879
	b) x=0,12	0,142	16,27	0,407	0,055	15,67	0,892
	c) x=0,15	0,118	13,68	0,342	0,049	16,27	0,907
III	a) x=0,10	0,319	36,54	0,914	0,122	12,75	0,819
	b) x=0,12	0,275	31,78	0,795	0,113	13,57	0,839
	c) x=0,15	0,228	26,62	0,666	0,100	14,47	0,862
IV	a) x=0,10	0,185	21,65	0,541	0,082	15,47	0,887
	b) x=0,12	0,158	18,54	0,464	0,072	16,06	0,902
	c) x=0,15	0,129	15,27	0,382	0,062	16,69	0,917

U – współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych

Φ – strumień ciepły przepływający przez narożnik ścian dwuwarstwowych jednorodnych cieplnie

L^{2D} – liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego ($L^{2D} = \Phi / \Delta t \cdot l$)

Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła ($\Psi = L^{2D} \cdot \sum U_i \cdot l_i$)

t_{min.} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni narożnika ściany zewnętrznej

f_{Rsi (2D)} – czynnik temperaturowy określony na podstawie temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody

$f_{Rsi (2D)} = (t_{min.} - t_e) / (t_i - t_e)$

x – grubość materiału termoizolacyjnego [m]

4. Podsumowanie

Proces poprawnego kształtowania układu materiałowego przegrody zewnętrznej niejednorodnej cieplnie wymaga znajomości ich parametrów fizykalnych przy uwzględnieniu parametrów powietrza wewnętrznego i zewnętrznego. Ocena przegrody w aspekcie cieplno-wilgotnościowym nie powinna się tylko koncentrować w zakresie kryterium cieplnego wg rozporządzenia [3]: $U_c \leq U_{c(max)}$. Wprowadzenie elementów (stupów) żelbetowych w warstwie konstrukcyjnej ściany powoduje dodatkowe straty ciepła, opisane wartością liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] oraz obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody (w miejscu osłabienia izolacyjności cieplnej przegrody) t_{min} [°C].

Wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] w analizowanych wariantach obliczeniowych zależy od rozstawu stupów żelbetowych, rodzaju materiału ściennego (wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]) oraz rodzaju i grubości materiału termoizolacyjnego – tabela 2, 3. Niestety w rozporządzeniu [3] nie sformułowano wartości granicznych Ψ_{max} , co pozwoliłoby na wyeliminowanie błędnie (niepoprawnie) przegród i złączy budowlanych.

W przegrodach i złączach niejednorodnych cieplnie następuje znaczne obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody t_{min} [°C] oraz czynnika temperaturowego f_{Rsi} [-]. Spełnienie kryterium w zakresie uniknięcia występowania ryzyka kondensacji powierzchniowej (rozwoju pleśni i grzybów pleśniowych): $f_{Rsi(2D)} \geq f_{Rsi(kryt)}$, wymaga określenia wartości $f_{Rsi(2D)}$ na podstawie temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego (2D i 3D) t_{min} [°C] oraz wartości $f_{Rsi(kryt)}$ uwzględniającej parametry powietrza wewnętrznego i zewnętrznego (wilgotność i temperatura powietrza). Wg normy PN-EN ISO 13788:2003 [6] czynnik temperaturowy $f_{Rsi(kryt)}$ oblicza się lub przyjmuje w zależności od zastosowanego w budynku rodzaju wentylacji (wentylacja grawitacyjna – dominująca w budownictwie mieszkaniowym lub wentylacja mechaniczna, będąca często składnikiem systemów klimatyzacyjnych, pozwalających w prawie dowolny sposób kształtować właściwości mikroklimatu wewnątrz). Wartość maksymalna z 12 miesięcy w odniesieniu do lokalizacji (Bydgoszcz) i 3 klasy wilgotności pomieszczeń w budynku wynosi $f_{Rsi(max)} = f_{Rsi(kryt)} = 0,785$ (luty). Oznacza to, że w każdym miesiącu roku i dla każdego innych wartości temperatur brzegowych dla uniknięcia kondensacji powierzchniowej $f_{Rsi(2D)}$ powinien być większy od 0,785. W pewnych przypadkach (tabela 3) warunek: $f_{Rsi(2D)} \geq f_{Rsi(kryt)}$ nie został spełniony w związku z tym istnieje możliwość (ryzyko) występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody. W rozporządzeniu [3], mimo uznania normy PN-EN ISO 13788 [8] za obowiązującą w projektowaniu, istnieje odstępstwo od jej wymagań, polegające na przyjęciu średniej miesięcznej wilgotności względnej powietrza wewnętrznego

jako stałej wartości $\varphi_i = 0,50$ (50%) (punkt 2.2.2 Załącznika nr 2 [3]) dla pomieszczeń z temperaturą wewnętrzną równą co najmniej 20°C. Równocześnie dopuszczono (bez obliczeń) dla tych pomieszczeń przyjmowanie wartości czynnika $f_{Rsi(kryt)} = 0,72$, co praktycznie oznacza rezygnację z ustalania klas wilgotności pomieszczeń zaopatrzonych w wentylację grawitacyjną. To odstępstwo nie pozwala na uwzględnienie w obliczeniach wilgotnościowych realnych warunków lokalizacyjnych (klimatycznych) oraz mikroklimatycznych badanego budynku, przynajmniej w odniesieniu do pomieszczeń o temperaturze wewnętrznej $t_i \geq 20^\circ\text{C}$, dość drastycznie obniżając poziom wymagań w zakresie ochrony przed zagrzybieniem budynków położonych w Polsce w ostrzejszych strefach klimatycznych (strefa IV i V).

Należy podkreślić, że przedstawione przykłady obliczeniowe nie wyczerpują wszystkich przypadków przegród i złączy niejednorodnych cieplnie. Jednak często pomija się wpływ stupów żelbetowych na parametry fizykalne analizowanych przegród i ich złączy. Po analizie cieplno-wilgotnościowej narożników ścian zewnętrznych niejednorodnych i jednorodnych cieplnie (tabela 4 i 5) można stwierdzić, że wyniki parametrów fizykalnych są znacznie różnicowane.

Dążenie od osiągnięcia standardu „budynek o niskim zużyciu energii” wg [1, 2, 3] powinno się opierać na jasnych, precyzyjnych zasadach wynikających z szeroko rozumianej fizyki budowlanej z zastosowaniem narzędzi numerycznych uwzględniających specyficzne parametry powietrza zewnętrznego i wewnętrznego analizowanego budynku.

BIBLIOGRAFIA

- [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 Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowania (Dz.U. z 2013 r., poz. 926). Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2015, poz. 1422)
- [4] Dylla A., Fizyka cieplna budowlanej w praktyce. Obliczenia cieplno-wilgotnościowe, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2015
- [5] Maciaszek M., Studium projektowe przegród zewnętrznych i ich złączy z zastosowaniem nowoczesnych materiałów izolacyjnych. Praca dyplomowa inżynierska napisana pod kierunkiem dr. inż. K. Pawłowskiego, UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2016
- [6] PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania
- [7] PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe
- [8] 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
- [9] Pawłowski K., Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków. Obliczenia cieplno-wilgotnościowe przegród zewnętrznych i ich złączy, GW Medium, Warszawa, 2016