Wymiana ciepła

Analiza ponad dwóch tysięcy projektów architektoniczno-budowlanych wykazuje liczne powtarzające się błędy z zakresu fizyki budowli. Błędy te są powielane podczas budowy, co często skutkuje roszczeniami inwestorów, procesami sądowymi i innymi nieprzyjemnościami.

Mimo iż architekt podczas projektowania korzysta z usług projektantów branżowych, to rozwiązania i rysunki detali spadają na jego barki, nie zajmuje się nimi bowiem żaden branżysta. Z konieczności więc architekt zmuszony jest czuwać nad takimi zagadnieniami, jak hydro-, paro- i wiatroizolacje, rozszerzalność termiczna, mostki cieplne czy zabezpieczenia przed kondensacją pary wodnej albo zapewnienie mikroklimatu w budynku i komfort cieplny dla jego użytkowników. Ponieważ architekt nie ma branżysty do pomocy w fizyce budowli, to zmuszony jest posiąść niełatwą przecież wiedzę na jej temat.

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, jeśli w ciałach stałych, ciekłych lub gazowych — także między tymi ciałami — występuje różnica temperatur, to nieuchronnie zachodzi wymiana energii między cząsteczkami materiałów tworzących te ciała. Cząsteczki mające większą energię w miejscach o wyższej temperaturze przekazują ją cząsteczkom o energii mniejszej w miejscach o temperaturze niższej. Zjawisko to nazywamy wymianą ciepła. Jeśli proces tej wymiany nie zmienia się w czasie, nazywamy go stacjonarnym, jeśli zaś ulega zmianom w czasie, nazywamy go niestacjonarnym. Podział ten jest istotny, ponieważ systemy dostarczające ciepło do budynków projektujemy dla stanu stacjonarnego, a rozwiązania materiałowe przegród — dla stanu niestacjonarnego.

Co ważne, strumień ciepła ma zawsze kierunek zgodny ze spadkiem temperatury i prostopadły do izoterm. Wymiana ciepła jest zjawiskiem złożonym i obejmuje trzy składowe jednocześnie zachodzących procesów cieplnych: przewodzenia, konwekcji i promieniowania.

Przenikanie ciepła jest procesem złożonym. Zgodnie z prawem Fouriera (przewodzenie ciepła), prawem Newtona (przejmowanie ciepła) oraz prawem Stefana-Boltzmanna (promieniowanie ciepła), ilość ciepła $\boldsymbol{Q}$ przenikającego przez powierzchnię $\boldsymbol{A}$ między dwoma ośrodkami o temperaturach $\boldsymbol{t_i}$ (wewnątrz budynku) oraz $\boldsymbol{t_e}$ (na zewnątrz) w stanie stacjonarnym oblicza się z wzoru:

$$Q = U \cdot A\,(t_i - t_e),\ \mathrm{WA}$$

gdzie:

$\boldsymbol{U}$ jest współczynnikiem przenikania ciepła obliczanym z wzoru:

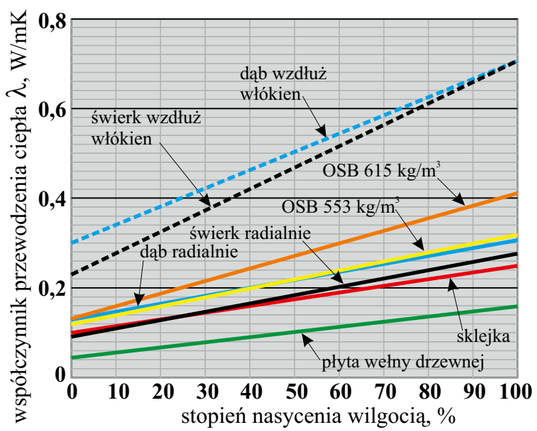
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{1}^{n} \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}},\ \mathrm{W/m^2K}$$

We wzorze tym $\boldsymbol{h_i}$ oraz $\boldsymbol{h_e}$ to współczynniki przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej i zewnętrznej, $\boldsymbol{d_n}$ jest grubością n-tej warstwy, $\boldsymbol{\lambda_n}$ jest zaś współczynnikiem przewodzenia ciepła materiału tej warstwy. Współczynnik $\boldsymbol{\lambda}$ charakteryzuje cieplne własności materiału, określa ilość bowiem ciepła, jaka przewodzona jest przez 1 m² powierzchni w czasie 1 s na drodze 1 m na skutek różnicy temperatur wynoszącej 1 K. Największa przewodność cieplna występuje w metalach (10–430 W/mK), średnia w materiałach budowlanych (0,40–2,45 W/mK), najniższa w gazach (0,005–0,250 W/mK). Materiały mające dużą ilość porów wypełnionych na przykład powietrzem, cechują się małą wartością współczynnika przewodzenia ciepła $\boldsymbol{\lambda}$ i są powszechnie nazywane termoizolacjami. Na uwagę zasługuje fakt, że woda cechuje się dużą wartością $\boldsymbol{\lambda}$, bo wynoszącą 0,551–0,683 W/mK, osiągającą wartość 22 razy większą niż $\boldsymbol{\lambda}$ powietrza, która osiąga 0,024–0,032 W/mK. Dlatego materiały budowlane zdolne do nasiąkania wodą tym bardziej przewodzą ciepło, im większa jest w nich zawartość wody. Jeszcze większy wpływ na przewodnictwo cieplne ma zamarzająca woda, bowiem współczynnik $\boldsymbol{\lambda}$ lodu osiąga wartość ok. 2,30 W/mK, czyli 4 razy większą niż wody i 88 razy większą niż powietrza. Z przedstawionych wzorów płyną więc ważne i praktyczne wnioski dla projektantów.

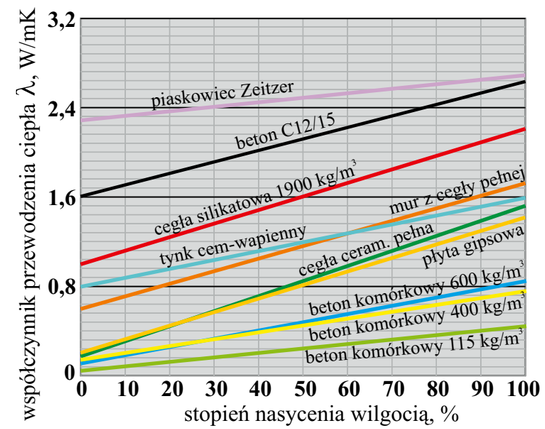
W elementach budynku, gdzie chcemy chronić wnętrze przed ucieczką ciepła zimą lub chronić wnętrze przed przegrzewaniem latem, należy uzyskiwać jak najmniejszą wartość $\boldsymbol{Q}$, czyli stosować materiały o dużej grubości $\boldsymbol{d}$ i małej wartości $\boldsymbol{\lambda}$ oraz przegrody o małej powierzchni $\boldsymbol{A}$. Takimi elementami są: ściany, dachy, podłogi na gruncie, tarasy, okna i drzwi.

W elementach budynku, gdzie zależy nam na intensywnym przepływie ciepła $\boldsymbol{Q}$, należy stosować materiały o małej grubości $\boldsymbol{d}$ i dużej wartości $\boldsymbol{\lambda}$ oraz przegrody o dużej powierzchni $\boldsymbol{A}$. Takimi elementami są: podłogi i ściany ogrzewane, grzejniki i nagrzewnice.

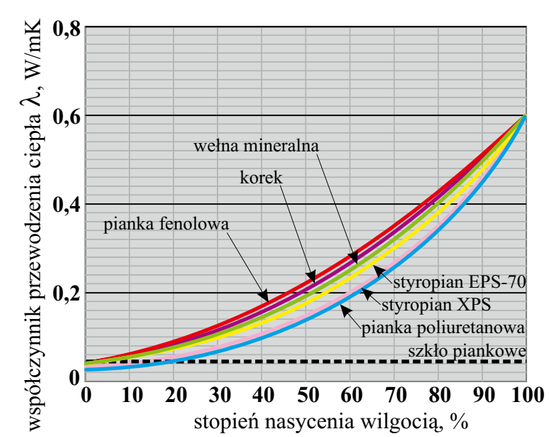
Materiały termoizolacyjne tylko wtedy spełniają swoje zadania, gdy stale przebywają w warunkach suchych, co oznacza, że należy tak projektować przegrody tracące



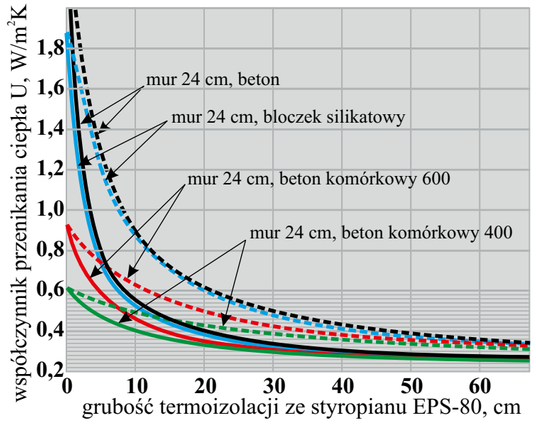
Rysunek 1.
Współczynnik przewodzenia ciepła $\boldsymbol{\lambda}$ drewna i materiałów drewnopochodnych w zależności od stopnia nasycenia wilgocią [1]



Rysunek 2
Współczynnik przewodzenia ciepła λ typowych materiałów budowlanych w zależności od stopnia nasycenia wilgocią [1]



Rysunek 3
Współczynnik przewodzenia ciepła λ podstawowych materiałów termoizolacyjnych w zależności od stopnia nasycenia wilgocią [1]



Rysunek 4
Zmiany wartości współczynnika przenikania ciepła ***U*** od grubości styropianu suchego i wilgotnego ocieplającego mury [1]

ciepło, by podczas eksploatacji budynków nie dochodziło do kondensacji pary wewnątrz warstw przegród. W przeciwnym razie dojdzie do niekontrolowanego zawilgocenia termoizolacji i zwiększenia strat ciepła zimą ponad projektowane. Efektem będzie albo chroniczne wychłodzenie pomieszczeń, albo znaczne zwiększenie kosztów ogrzewania. Ponadto mokre przegrody to zagrożenie pleśnią i zagrzybieniem.

Zmiany wartości współczynnika przewodzenia ciepła ***λ*** drewna i niektórych materiałów drewnopochodnych w zależności od ich wilgotności przedstawia *rysunek 1*, zaś wybranych materiałów budowlanych — *rysunek 2*. Niezwykle często podczas projektowania bezpodstawnie zakłada się stan suchy zabudowanych termoizolacji, co wiąże się potem z wysokimi kosztami usuwania tych błędów podczas użytkowania budynków. Warto więc wiedzieć, jak współczynnik ***λ*** termoizolacji zmienia się w zależności od jej zawilgocenia. Zmiany takie przedstawia *rysunek 3*.

Powszechnie uważa się, że najprostszym sposobem na ograniczenie strat ciepła przez przegrody budowlane jest zwiększenie grubości przegrody, a także grubości warstwy termoizolacyjnej. Warto więc przyjrzeć się, jak na wartość współczynnika przenikania ciepła ***U*** ścian wpływa zwiększanie grubości ***d*** styropianu EPS-80 — użytego do ocieplenia metodą BSO (Bezspoinowego Systemu Ociepleń). Wyniki otrzymane na podstawie wyżej podanego wzoru przedstawia *rysunek 4*. Dla porównania, przyjęto mury grubości 24 cm otynkowane od wewnątrz tynkiem gipsowym grubości 1 cm i od zewnątrz styropianem pokrytym warstwą szpachlową oraz wyprawą elewacyjną akrylową grubości 3 mm. Mury wykonane są z: betonu C16/20 (***λ***=1,0 W/mK), bloczków silikatowych (***λ***=0,87 W/mK), bloczków betonu komórkowego 600 (***λ***=0,21 W/mK) oraz bloczków betonu komórkowego 400 (***λ***=0,11 W/mK). Linie ciągłe przedstawiają zależności ***U=f(d)*** dla styropianu suchego, a linie przerywane przedstawiają te same zależności, ale dla styropianu w stanie 30% nasycenia wilgocią.

Z rysunku tego widać, że na zwiększanie grubości termoizolacji najbardziej wrażliwe są mury o wysokich wartościach ***λ***, to jest z betonu oraz bloczków silikatowych, bowiem grubość zaledwie 10 cm styropianu powoduje obniżenie wartości ***U*** około 6 razy dla betonu oraz około 5 razy dla bloczków silikatowych. W przypadku materiałów ściennych o mniejszych wartościach ***λ***, obniżenie wartości ***U*** jest nie tak silne i wynosi około 3 razy dla betonu komórkowego 600 oraz 2 razy dla betonu komórkowego 400. Widać też, że zwiększanie grubości styropianu ponad 30 cm nie ma większego znaczenia praktycznego (dla wszystkich ścian), ponieważ krzywe ciągłe są prawie płaskie i zmierzają do wartości ***U≈0,05*** W/mK.

Zwiększając grubość jakichkolwiek termoizolacji ponad 30 cm, nie można osiągnąć dalszych istotnych redukcji strat ciepła przez przenikanie.

Z rysunku 4 widać też, że zawilgocony styropian silnie traci zdolności izolacyjne. Grubość wilgotnego styropianu wynosząca 10 cm redukuje wartość ***U*** dwa razy gorzej niż w przypadku styropianu suchego dla ścian z betonu i silikatów. Jeszcze gorszą redukcję ***U*** mamy w przypadku ścian z materiałów o mniejszej wartości ***λ***, bo grubość wilgotnego styropianu 10 cm redukuje wartość ***U*** 1,5 razy gorzej niż w przypadku styropianu suchego. Zatem, dla uzyskania tej samej straty ciepła, jaką daje grubość 20 cm styropianu suchego, należy zastosować aż 50 cm styropianu wilgotnego. Wnioski te wskazują na podstawową zasadę projektowania wszystkich rodzajów zewnętrznych przegród budowlanych:

Projektowany zestaw warstw przegrody tracącej ciepło w budynkach musi mieć takie własności fizyczne i taki sposób zabudowy, by podczas eksploatacji nie doszło w nich do wzrostu wilgotności — ani od strony wewnętrznej, ani od zewnętrznej.

Przedstawiona analiza wpływu zwiększania grubości styropianu na straty ciepła dotyczy pojedynczych przykładowych ścian. Podobne relacje i wnioski zachodzą dla wszystkich pozostałych przegród budynku, tj. ścian, podłóg i dachu — w różnej intensywności i zależnej od stopnia przeszklenia. *Rysunek 5* przedstawia zmiany wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną ***EP***, wskaźnika zużycia energii końcowej (opłacanej przez użytkownika budynku) ***EK*** oraz mocy źródła ciepła ***Q*** dla przykładowego domu jednorodzinnego — od grubości ocieplenia styropianem EPS-80 ścian z betonu komórkowego 400 grubości 36,5 cm. Linią ciągłą oznaczono wyniki z wyposażeniem w wentylację grawitacyjną, zaś linią kropkowaną z wentylacją mechaniczną i rekuperacją.

Z rysunku tego widać, że zwiększanie grubości ocieplenia powyżej wartości 30 cm niemal nie zmienia wskaźników energetycznych domu. Widać też, że samym tylko zwiększaniem grubości termoizolacji można w tym domu obniżyć ***EP*** najwyżej do poziomu ok. 110 kWh/m²rok przy wentylacji grawitacyjnej oraz do około 90 kWh/m²rok przy wentylacji mechanicznej z rekuperacją. Mimo iż wartości współczynników ***U*** ścian spełniają aktualne wymagania techniczne, to nie uda się w ten sposób spełnić wymagań co do wartości ***EP***. Oznacza to, że projektant musi przeanalizować celowość i rentowność zastosowania systemów obniżających zużycie energii przez budynek, o czym będzie mowa w jednym z następnych numerów miesięcznika.

W przedstawionym równaniu określającym współczynnik przenikania ciepła ***U*** wartość ***h*** jest współczynnikiem przejmowania ciepła (W/m²K). Ujmuje on wymianę ciepła przez konwekcję oraz promieniowanie i obrazuje ilość ciepła (J), jaka przejmowana jest przez powierzchnię 1 m² w czasie 1 s — na skutek występowania różnicy temperatur 1 K powierzchni i otoczenia. Występujące w budownictwie płyny osiągają różne wartości tego współczynnika, na przykład para wodna przy skraplaniu uzyskuje 5×104–1,5×105 W/m²K, woda 120–1,2×104 W/m²K, para wodna przegrzana 12–500 W/m²K, zaś powietrze i inne gazy 1–60 W/m²K.

Przepływ ciepła w warstwie przyściennej powietrza odbywa się głównie na drodze przewodzenia, zaś w pewnym od niej oddaleniu tylko na drodze konwekcji. W praktyce, prądy konwekcji naturalnej są zniekształcane konwekcją wymuszoną, na przykład wiatrem, otwieraniem okien i drzwi, wentylacją oraz ruchem osób w pomieszczeniu. Na uwagę zasługuje fakt, iż średnia wartość współczynnika przejmowania ciepła ***h*** od strony wnętrza budynków przy przepływie ciepła przez ścianę pionową wynosi 7,7 W/m²K. Przy przepływie ciepła w dół przez podłogę wartość ***h*** wynosi 5,8 W/m²K, ale przy przepływie ciepła do góry przez strop jest większa, bo wynosi 10,0 W/m²K. Właśnie z tego powodu, stropy, stropodachy i dachy muszą mieć mniejszą wartość współczynnika przenikania ciepła ***U*** niż ściany czy podłogi. Oznacza to projektowanie większej grubości termoizolacji przegród nad głową niż przegród pod nogami. Co ciekawe, to projektowe wartości współczynników ***h*** od strony zewnętrznej wszystkich rodzajów przegród, są jednakowe i wynoszą aż 25,0 W/m²K — niezależnie od ich położenia i kształtu. Wynika to z działania wiatrów, dzięki którym ciepło jest bardzo intensywnie przejmowane na styku powierzchni omywanych przez wiatr.

Do projektanta należy właściwa ocena projektowanego elementu budynku i przyjęcie do obliczeń właściwych wartości ***h*** oraz wartości ***λ*** materiałów przegród budowlanych stykających się z powietrzem z normy [2], przegród stykających się z gruntem z normy [3], zaś stolarki okienno-drzwiowej z norm [4] i [5].

Założenia stacjonarnej wymiany ciepła przy obliczaniu wymiany ciepła są zasadne wyłącznie do zaprojektowania wymaganej mocy systemu zasilenia budynku w energię cieplną (kocioł, piec, pompa ciepła, węzeł cieplny) oraz do zaprojektowania elementów grzejnych w poszczególnych pomieszczeniach (grzejniki, nagrzewnice, podłogi ogrzewane, ściany lub sufity grzejne). Wskazane wzory zakładają jednorodność materiałów przegród. W budownictwie właściwie nie ma przegród jednorodnych fizycznie ani geometrycznie. Skutkuje to wymianą ciepła w warunkach niejednorodnych pól temperatury, co przy sporządzaniu projektów budowlanych wymaga uwzględnienia tzw. mostków cieplnych.

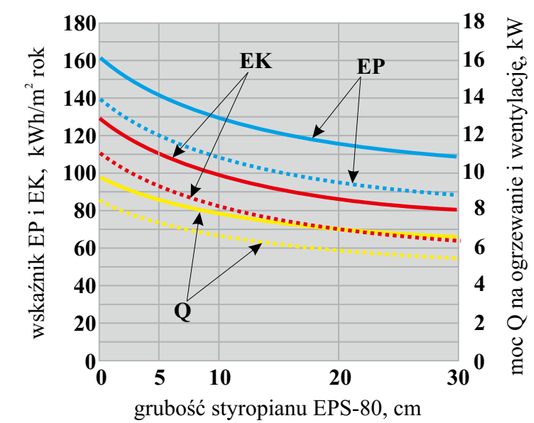
mgr inż. Jerzy Bogdan **ZEMBROWSKI**

fot: © Autor

Autor ponad 90 publikacji zawodowych. Od 30 lat prowadzi wykłady dokształcające dla architektów i inżynierów budownictwa w zakresie praktycznej fizyki budowli. Jest członkiem International Building Performance Simulation Association. Od roku 2007 prowadzi serwis budowlany www.bdb.com.pl Jest autorem książki poradnika „Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów" wydanej w roku 2017.

Bibliografia:

1. Zembrowski Jerzy Bogdan „Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów", BDB, Białystok 2017.
2. PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
3. PN-EN ISO 13370:2008 Cieplne właściwości użytkowe budynków. Przenoszenie ciepła przez grunt. Metody obliczania.
4. PN-EN ISO 10077-1:2006 Cieplne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynników przenikania ciepła. Część 1. Postanowienia ogólne.
5. PN-EN ISO 10077-2:2003 Cieplne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynników przenikania ciepła. Część 2. Metoda komputerowa dla ram.



Rysunek 5
Zmiany wartości wskaźnika zapotrzebowania nieodnawialnej energii pierwotnej EP, wskaźnika zapotrzebowania energii końcowej EK oraz wymaganej mocy Q źródła energii cieplnej dla przykładowego domu jednorodzinnego [1]