BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-B/2009
ZESZYT 5
ROK 106
ISSUE 5
YEAR 106

MACIEJ WESOŁOWSKI*, ALDONA SKOTNICKA-SIEPSIAK*,
ZYGMUNT WIERCIŃSKI**

ANALIZA ENERGII I EGZERGII DOMU NISKOENERGETYCZNEGO I PASYWNEGO

ENERGY AND EGZERGY ANALYSIS OF LOW ENERGY AND PASSIVE HOUSES

Streszczenie

W artykule porównano wyniki analizy energii i egzergii wykonane dla jednorodzinnego domu niskoenergetycznego i domu pasywnego o zbliżonych projektach. Analiza egzergii umożliwia ocenę sprawności energetycznej różnych obiegów cieplnych oraz określenie, gdzie w całym procesie przepływu energii, dochodzi do największych jej strat.

Słowa kluczowe: *bilans energii, bilans egzergii, dom niskoenergetyczny, dom pasywny*

Abstract

The paper presents the comparison of energy and exergy analysis conducted for low energy and passive houses of similar design. Exergy analysis enables the efficiency estimation of different heating systems. It also indicates where in the whole process of energy flow, the energy losses are the biggest.

Keywords: *energy balance, exergy balance, low energy house, passive house*

* Dr inż. Maciej Wesołowski, mgr inż. Aldona Skotnicka-Siepsiak, Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.
** Dr hab. inż. Zygmunt Wierciński, prof. UWM, Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie; Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Oznaczenia

B_d – egzergia substancji doprowadzanych do układu [J]
ΔB_u – przyrost egzergii układu [J]
$B_{\text{wuż}}$ – egzergia użyteczna wprowadzanych produktów użytecznych [J]
c – ciepło właściwe powietrza [J/kg deg]
L – praca mechaniczna lub elektryczna wykonana przez układ [J]
$F_{q,\text{room}}$ – współczynnik jakości powietrza w pomieszczeniu, temperatura termodynamiczna Carnota [–]
T_e – temperatura otoczenia [°K]
T_{in} – temperatura wewnątrz pomieszczenia [°K]
T_{ing} – temperatura zasilania grzejnika [°K]
T_{Ln} – średnia logarytmiczna temperatura [°K]
T_{ret} – temperatura powrotu w grzejniku [°K]
V – kubatura budynku [m^3]
Ex_{room} – strumień egzergii w pomieszczeniu [W]
ρ – gęstość powietrza [kg/m^3]
Φ_H – całkowite obciążenie cieplne budynku [W]
$\Sigma\Delta B_{\text{źr}}$ – przyrost egzergii zewnętrznego źródła ciepła działającego na osłonie kontrolnej układu [J]
δB_w, δB_z – odpowiednio wewnętrzna i zewnętrzna strata egzergii [J]

Analiza egzergii może być narzędziem analitycznym umożliwiającym ocenę sprawności energetycznej i egzergetycznej różnych obiegów cieplnych oraz określenie, gdzie w całym procesie przepływu energii dochodzi do największych jej strat. Celem artykułu jest porównanie wyników analizy energii i egzergii wykonanych dla jednorodzinnego domu niskoenergetycznego i domu pasywnego o zbliżonej kubaturze.

1. Pojęcia domu niskoenergetycznego i pasywnego

Dom niskoenergetyczny powinien zużywać 30% mniej energii w stosunku do domu tradycyjnego. W domu niskoenergetycznym o powierzchni użytkowej 150 m^2 zużycie energii na 1 m^2 w ciągu roku nie powinno przekraczać 35 kWh na cele grzewcze, 35 kWh na cele wentylacji pomieszczeń oraz 15 kWh na cele ogrzewania wody użytkowej.

Dom pasywny jest to obiekt, który podczas użytkowania nie wymaga aktywnego systemu grzewczego. Redukcja strat ciepła możliwa jest dzięki zastosowaniu maksymalnie ocieplonych przegród zewnętrznych i szczelnych okien, pasywnemu wykorzystaniu energii słonecznej oraz kontrolowanej wentylacji z odzyskiem ciepła z powietrza wywiewanego. Do wyrównania strat energii wystarczają tzw. pasywne źródła, w postaci energii słonecznej przenikającej przez okna, ciepła wytwarzanego przez mieszkańców i ciepła powstającego na skutek działania urządzeń AGD. Jedynie w okresie obniżonych temperatur stosuje się dodatkowe (zwykle proekologiczne) ogrzewanie uzupełniające, bazujące najczęściej na cieple dostarczanym przez instalację wentylacyjną. Ostatecznie budynek pasywny charakteryzuje się zapotrzebowaniem na energię cieplną nie przekraczającym 15 kWh/(m^2·r).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dalsze prace w kierunku zminimalizowania nakładów energetycznych w budownictwie wymagają posłużenia się nowymi metodami i narzędziami analitycznymi. Dotychczas stosowany bilans energii oparty na I zasadzie termodynamiki w jednakowy sposób traktuje różne postacie energii, nie uwzględniając ich różnej jakości i wartości praktycznej. Tym samym bilans taki nie daje możliwości oceny sprawności energetycznej obiegów cieplnych. Analiza egzergii może przyczynić się do określenia, gdzie w całym procesie przepływu energii dochodzi do największych strat, a w związku z tym, w jakim ogniwie należy poszukiwać dalszych usprawnień.

2. Pojęcie egzergii

Pojęcie egzergii oznacza maksymalną zdolność do wykonania pracy przez daną materię obliczoną z uwzględnieniem współudziału otoczenia. Egzergia może służyć do określenia praktycznej przydatności energetycznej materii. Do oceny tej przydatności konieczna jest znajomość łącznej ilość egzergii rozpatrywanego czynnika termodynamicznego oraz stosunek egzergii do objętości czynnika. Wielkość ta nazywana jest gęstością egzergii.

Jedną z najważniejszych różnic pomiędzy egzergią a energią jest to, że energia podlega prawu zachowania, natomiast prawo zachowania egzergii nie istnieje. Ponadto energia ma umowne poziomy odniesienia, zaś poziomy odniesienia w przypadku egzergii są narzucone przez przyrodę. Straty egzergii są nieuniknione i zarazem niepożądane, gdyż każda strata egzergii powoduje zmniejszenie efektu użyteczności danego procesu [1]. Z badań Gouya--Stodoli wynika, że strata egzergii jest bezpowrotna i nie może być nawet w części odzyskana. Właśnie ta cecha bezzwrotności egzergii różni ją od strat pracy wyznaczonych innymi metodami. Przy badaniu egzergii należy uwzględnić wzajemny związek zjawisk zachodzących w poszczególnych ogniwach procesu złożonego. Jeżeli w trakcie badań okaże się, że strata egzergii jest szczególnie wielka w jakimś ogniwie procesu złożonego, to należy zbadać możliwości zmniejszenia stopnia nieodwracalności przemian w obrębie tego ogniwa oraz przeanalizować możliwości zmiany przebiegu procesów we wcześniejszych etapach procesu.

Straty egzergii możemy podzielić na wewnętrzne i zewnętrzne. Straty spowodowane przez przemiany nieodwracalne, przebiegające w obrębie badanego urządzenia nazywamy stratami wewnętrznymi. Przyczynami wewnętrznych strat egzergii może być m.in. przepływ ciepła przy skończonej różnicy temperatur, przekazywanie pracy przy braku równowagi mechanicznej, mieszanie substancji o różnym składzie chemicznym lub też spadek ciśnienia płynu podczas przepływu spowodowany lepkością.

Natomiast destrukcję energii powodowaną nieodwracalnym zrównaniem parametrów czynników odpadowych z parametrami czynników otoczenia określa się mianem straty zewnętrznej. W większości energetycznych procesów termodynamicznych dochodzi do oddawania do otoczenia odpadowego czynnika termodynamicznego (np. odprowadzenie spalin z kotła). Parametry stanu składników czynnika odprowadzanego różnią się z reguły od parametrów otoczenia. Czynnik odpadowy ma jeszcze pewną niewykorzystaną egzergię. W otoczeniu następuje destrukcja tej egzergii. W związku z występowaniem wspomnianych strat egzergii równanie bilansu egzergii nie zamyka się. Różnica egzergii doprowadzonej i wyprowadzonej jest równa wewnętrznej stracie egzergii. Bilans egzergii można zatem zapisać następującym wzorem

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$$B_d = \Delta B_u + B_{\text{wuż}} + L + \Sigma\Delta B_{\text{źr}} + \delta B_w + \delta B_z \quad (1)$$

gdzie:

B_d – egzergia substancji doprowadzanych do układu [J],
ΔB_u – przyrost egzergii układu [J],
$B_{\text{wuż}}$ – egzergia użyteczna wprowadzanych produktów użytecznych [J],
L – praca mechaniczna lub elektryczna wykonana przez układ [J],
$\Sigma\Delta B_{\text{źr}}$ – przyrost egzergii zewnętrznego źródła ciepła działającego na osłonie kontrolnej układu [J],
δB_w, δB_z – odpowiednio wewnętrzna i zewnętrzna strata egzergii [J].

W najprostszym ujęciu równanie bilansu egzergii sprowadza się do postaci

$$\text{egzergia}_{\text{na wejściu}} - \text{egzergia}_{\text{zużyta}} = \text{egzergia}_{\text{na wyjściu}} \quad (2)$$

$$\text{egzergia}_{\text{zużyta}} = \text{temperatura}_{\text{otoczenia}} \cdot \text{entropia}_{\text{wytworzona}} \quad (3)$$

Przywołanie pojęcia entropii w tym bilansie pozwala wyjaśnić, co może być wykorzystywane, a co wytwarzane. Pojęcia egzergia używamy, by wyrazić, co jest zużywane, konsumowane, natomiast entropia opisuje, co jest usuwane. Egzergia oznacza możliwość energii do rozproszenia w trakcie jej przepływu przez układ, a entropia wyraża stan rozproszenia. W kontekście celu niniejszego artykułu istotne jest to, że teoria egzergii może mieć zastosowanie podczas oceny odwracalności i sprawności wszelkich procesów energetycznych, w których uczestniczy promieniowanie cieplne, a więc w przypadku urządzeń wykorzystujących energię promieniowania słonecznego oraz systemów ogrzewania działających przez promieniowanie.

Najistotniejszym celem analizy egzergetycznej jest wykrywanie i ocena ilościowa przyczyn niedoskonałości termodynamicznej procesów cieplnych i może być przyczynkiem do udoskonalenia tych procesów. Analiza ta może być bardzo użytecznym narzędziem w pracach badawczych zmierzających ku zwiększaniu energooszczędności budownictwa mieszkaniowego w zakresie utrzymania warunków komfortu cieplnego mieszkańców przy możliwie niskim zużyciu energii. Celem takich prac jest zaprojektowanie obiektów i systemów ogrzewania możliwie niskoegzergetycznych (czyli zmniejszających nakład egzergii przy wytwarzaniu i gospodarowaniu ciepłem). Niskoegzergetyczność systemu grzewczego obejmuje zwiększenie stopnia wykorzystania energii chemicznej paliw (lub zastąpienie paliw kopalnych urządzeniami wykorzystującymi odnawialne źródła energii), niskie zużycie ciepła w budynku oraz wykorzystywanie do celów grzewczych ciepła o niskiej temperaturze. Wszystko to powinno zaowocować zmniejszeniem zużycia paliw kopalnych oraz zmniejszeniem emisji zanieczyszczeń, odpadów i strat środowiskowych.

3. Metoda sporządzania bilansu egzergii w procesie ogrzewania domu

Jednym z efektów prac nad obniżaniem egzergii ogrzewania budynków mieszkalnych było stworzenie w ramach programu Annex37 arkusza kalkulacyjnego do analizy bilansu egzergii [2]. Arkusz jest podzielony na siedem modułów. W pierwszym z nich wprowadza się podstawowe dane dotyczące budynku, takie jak: kubatura, powierzchnia netto, temperatura zewnętrzna i wewnętrzna. Drugi moduł odnosi się do strat ciepła związanych z jego przesyłem. Uwzględniane są tutaj straty ciepła przez przegrody (na podstawie po-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wierzchni przegród i ich współczynników przenikania ciepła oraz różnicy temperatur zewnętrznej i wewnętrznej), a także straty na wentylację (obliczane m.in. na podstawie infiltracji powietrza, sprawności wymiennika i różnicy temperatur). Część trzecia i czwarta wyznaczają możliwe zyski ciepła. Ujmują one zyski od nasłonecznienia (uwzględniające powierzchnię okien i ich orientację względem stron świata) oraz zyski wewnętrzne (w postaci ciepła ciała mieszkańców, ciepła wytwarzanego przez sprzęty AGD). W module piątym odbywa się sumowanie strat i zysków. W części szóstej należy wybrać rodzaje instalacji, źródło energii. Na podstawie wyboru elementu systemu wytwarzającego ciepło, arkusz kalkulacyjny za pomocą poleceń „makro" opisuje sprawność, maksymalną temperaturę zasilania oraz stopień, w jakim układ korzysta z odnawialnych źródeł natury. Podobnie, przy wybieraniu systemu wydzielania ciepła arkusz dobiera wartości charakterystyczne dla danego typu instalacji, tj. temperaturę zasilania i powrotu, wydajność, energię dodatkową. Analiza egzergii wykonywana jest w ostatnim module. Przebiega ona kolejno, charakteryzując etapy przepływu ciepła: pokrycie budynku, powietrze w pomieszczeniu, wydzielanie ciepła, dystrybucję, zasobnik, wytwarzanie, przemiany podstawowe.

Należy zbilansować zyski energii budynku, czyli zyski: od nasłonecznienia, energii wewnętrznej, z energii odnawialnej oraz energię ze źródeł pierwotnych. Te zyski energii muszą się oczywiście bilansować ze stratami energii w procesach transformacji energii, na produkcję ciepłej wody użytkowej, na oświetlenie, straty ciepła w systemie, zapotrzebowanie energii na wentylację, przenikanie energii przez: ściany, podłogę na gruncie, dach i okna. Natomiast bilans egzergii obejmuje zarówno ilość egzergii dostarczonej: od nasłonecznienia, wewnętrznej, egzergii ze źródeł pierwotnych, jak i egzergię ze źródeł odnawialnych. Ta egzergia dostarczona musi bilansować zapotrzebowanie budynku na egzergię, czyli straty egzergii na przewodzenie, na podgrzanie powietrza w pomieszczeniu, na straty egzergii na etapie emisji egzergii, dystrybucji, w zasobniku, na etapie wytwarzania egzergii i straty egzergii pierwotnej. Zatem rozpoczynamy od obliczania energii i egzergii zawartej w paliwie pierwotnym oraz w formach odnawialnych energii, jak np. energia słoneczna. Dalej analizujemy bilans energii i egzergii na etapie wytwarzania ciepła dla budynku na etapie produkcji energii do ogrzewania budynku. Do wykonania takich bilansów stosujemy wzory znane ogólnie z termodynamiki, jak i wzory cechujące poszczególne elementy systemu ogrzewania.

W obliczeniach egzergii powietrza uwzględnia się tylko termiczny składnik egzergii, zaś nie uwzględnia się zmian egzergii związanych z różnicami ciśnienia atmosferycznego i ciśnienia powietrza w budynku. Podobnie w bilansie egzergii obliczanym za pomocą programu Exergy ver.7.7 nie uwzględnia się zmian egzergii związanych ze zmianą wilgotności powietrza w budynku, a także różnić wilgotności pomiędzy powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym. Zatem obliczenia te dotyczą termicznego składnika egzergii powietrza suchego. Według Sakulpipatsina [3], który rozważał bilans egzergii powietrza dla trzech różnych stref klimatycznych (morski, Lizbona; zimny klimat, Holandia; gorący i wilgotny klimat, Bangkok), w przypadku klimatu chłodnego prowadzić to może do 2–4 % błędu w obliczeniach egzergii. Znacznie większe błędy powstają przy takich uproszczeniach dla klimatu gorącego i wilgotnego.

Przykładowo, poniżej omówione zostaną obliczenia strat egzergii na etapie „pokrycia budynku", czyli przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne. Egzergia potrzebna na pokrycie strat ciepła w pomieszczeniu wyznaczana jest za pomocą współczynnika jakości powietrza w pomieszczeniu $F_{q,\mathrm{room}}$. Jest on wyznaczony na podstawie temperatury termody-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

namicznej Carnota (4), gdzie T_e oznacza temperaturę otoczenia, a T_{in} temperaturę powietrza wewnątrz budynku

$$F_{q,\text{room}} = 1 - \frac{T_e}{T_{\text{in}}} \ [-] \tag{4}$$

Zapotrzebowanie egzergii w pomieszczeniu Ex_{room} (5) wyrażone w [W] wyznacza się, wymnażając całkowite obciążenie cieplne budynku przez współczynnik jakości powietrza w pomieszczeniu (4)

$$Ex_{\text{room}} = \Phi_H \cdot F_{q,\text{room}} \tag{5}$$

gdzie:

Φ_H – całkowite obciążenie cieplne budynku [W],
$F_{q,\text{room}}$ – współczynnik jakości powietrza w pomieszczeniu,

Innym przykładem niech będzie strumień egzergii od grzejnika, gdzie wyznaczamy najpierw średnią temperaturę grzejnika według wzoru

$$T_{\text{heat}} = 0,5T_{\text{Ln}} + T_{\text{in}} \tag{6}$$

przy czym

$$T_{\text{Ln}} = \frac{\left(T_{\text{ing}} - T_{\text{in}}\right) - \left(T_{\text{ret}} - T_{\text{in}}\right)}{\ln\left(T_{\text{ing}} - T_{\text{in}}\right) - \ln\left(T_{\text{ret}} - T_{\text{in}}\right)} \tag{7}$$

jest średnią logarytmiczną temperaturą grzejnika, gdzie T_{ret} jest temperaturą powrotu, T_{ing} – temperaturą zasilania grzejnika, a T_{in} – temperaturą wewnątrz pomieszczenia.

Strumień egzergii od grzejnika będzie zatem dany poniższym wzorem

$$Ex_{\text{heat}} = \Phi_h \cdot F_{q,\text{heater}} \tag{8}$$

gdzie współczynnik $F_{q,\text{heter}}$ jest, podobnie jak poprzednio, współczynnikiem jakości powietrza (temperatury termodynamicznej Carnota) temperatury utworzonej tym razem z średniej temperatury grzejnika i temperatury otoczenia

$$F_{q,\text{heater}} = 1 - \frac{T_e}{T_{\text{heat}}} \tag{9}$$

Na koniec rozważymy też straty egzergii związane z wentylacją domu jednorodzinnego. W naszym przypadku zarówno dom pasywny, jak i niskoenergetyczny mają wentylację mechaniczną.

Straty energii na wentylację domu pasywnego (zapotrzebowanie na ciepło do podgrzania powietrza dostarczanego do budynku) obliczymy ze wzoru

$$\Phi_V = c\rho V n_d (1 - \eta_V)(T_{\text{in}} - T_e) \tag{10}$$

gdzie:

c – ciepło właściwe powietrza,
ρ – gęstość powietrza,
V – kubatura domu,
n_d – ilość wymian powietrza na godzinę (dla budynku pasywnego 0,6),

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

η_V – sprawność wymiennika ciepła (rekuperacji),
T_{in}, T_e – temperatura powietrza w budynku i temperatura zewnętrzna.

Dla wentylacji naturalnej zapotrzebowanie energii na ogrzanie powietrza wentylacyjnego można policzyć z poniższego wzoru, który różni się tylko czynnikiem $(1 - \eta_V)$ z powodu braku wymiennika ciepła rekuperacyjnego oraz inną wartością wymian powietrza n_d, gdyż dla domu pasywnego $n_d = 0{,}6$

$$\Phi_V = c\rho V n_d (T_{in} - T_e) \tag{11}$$

Tak obliczona strata energii cieplnej na wentylację (zapotrzebowanie ciepła na wentylację) wchodzi jako składnik wszystkich strat do wartości ogólnego obciążenia cieplnego budynku. Natomiast strata (zapotrzebowanie) egzergii na wentylację zostaje obliczona ze wzoru (5).

Jest jednak jeszcze dodatkowe obciążenie energetyczne i egzergetyczne systemu wentylacji, a mianowicie energia elektryczna potrzebna do napędu wentylatora w wymienniku regeneracyjnym systemu wentylacji, i z tym obciążeniem będzie też związana strata (zapotrzebowanie) egzergii, którą poniżej przedstawimy.

Energię elektryczną na napęd wentylatora obliczymy z następującego wzoru

$$P_V = p_V V n_d \tag{12}$$

gdzie:

p_V – zapotrzebowanie właściwe energii elektrycznej na wentylację w [kWh/m^3],
V – kubatura budynku,
n_d – ilość wymian powietrza na godzinę, jak uprzednio.

Ponieważ zawartość egzergii w energii elektrycznej wynosi 100%, to takie jest zapotrzebowanie egzergii do napędu wentylatora. Jednak energia elektryczna wytwarzana jest z energii pierwotnej (kopalnej), a sprawność wytwarzania energii elektrycznej z paliwa pierwotnego w elektrowni wynosi około 30–40%, to tak wytworzona energia elektryczna jest też obciążona stratami egzergii w kolejnych etapach jej wytwarzania. Tak więc rzeczywiste zapotrzebowanie egzergii z energii pierwotnej do napędu wentylatora jest większe. Jeśli dalej założyć, że część energii elektrycznej jest wytwarzana ze źródeł odnawialnych energii, to jedynie uzyskamy mniejsze zużycie egzergii z energii pierwotnej, co też jest oczywiście warte zachodu.

4. Wyniki obliczeń

Obliczenia wykonano dla domu pasywnego i tradycyjnego (ciepłego, niskoenergetycznego) według projektu Biura Projektowego Lipińscy Domy. Dom pasywny o ogrzewanej kubaturze 415,9 m^3 oraz powierzchni ogrzewanej 142,3 m^2 wybudowany został we Wrocławiu (druga strefa klimatyczna). Projekt opracowano we współpracy ze specjalistami z Instytutu Budynków Pasywnych przy Narodowej Agencji Poszanowania Energii z Warszawy. Uzyskał on pozytywną opinię Instytutu z Darmstadt i w dalszym etapie będzie przez ten Instytut certyfikowany. Zgodnie ze świadectwem energetycznym wykonanym przez powyższe instytucje jego zapotrzebowanie na moc cieplną ma wynosić 1,9 kW (13,5 W/m^2), roczne zużycie energii końcowej (ciepła) do ogrzania budynku 13,5 kWh/m^{2}rok oraz 4,7 kWh/m^{3}rok, a sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania tego budynku 1944 kWh/rok.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dom tradycyjny (ciepły) wykonany na podstawie podobnego projektu tego samego biura ma kubaturę ogrzewaną wynoszącą 456,1 m^3 oraz powierzchnię ogrzewaną – 153,7 m^2. Według świadectwa energetycznego, wykonanego dla drugiej strefy klimatycznej, jego zapotrzebowanie na moc cieplną ma wynosić 5,5 kW (35,8 W/m^2), roczne zużycie energii końcowej (ciepła) do ogrzania budynku 44,7 kWh/m^2rok oraz 15,1 kWh/m^3rok. Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania tego budynku wynosi 6886 kWh/rok.

Przyjęto warunki obliczeniowe dla Wrocławia (druga strefa klimatyczna): temperaturę wewnętrzną 20°C (293 K), zaś zewnętrzną – 18°C (255 K). W przypadku domu pasywnego temperatura powietrza nawiewanego za gruntowym wymiennikiem ciepła wynosiła 5°C (278 K). Współczynniki przenikania przegród wynosiły: dla ścian 0,1 W/m^2K, dla okien 0,7 W/m^2K, drzwi 0,8 W/m^2K, dachu 0,15 W/m^2K, podłogi na gruncie 0,11 W/m^2K. Zastosowano tutaj elektryczną instalację grzewczą i przygotowania ciepłej wody z użyciem zintegrowanego kompaktowego urządzenia Vitotres 343 firmy „Viessmann" (pompa ciepła typu powietrze–powietrze, centrala rekuperacyjna i zasobnik wody użytkowej podgrzewanej elektrycznie). Dom pasywny był również wyposażony w mechaniczną wentylację nawiewno-wywiewną z rekuperacją. Zamontowano także gruntowy wymiennik ciepła ogrzewający wstępnie powietrze zasilające pompę ciepła (powietrze–woda) oraz budynek. Pompa ciepła ogrzewała w wymienniku ciepła powietrze nawiewane do pomieszczeń po wyjściu z rekuperatora.

Dom tradycyjny (ciepły) o tych samych wymiarach charakteryzowały wyższe współczynniki przenikania ciepła: ścian 0,3 W/m^2K, okien 1,1 W/m^2K, drzwi zewnętrznych 1,2 W/m^2K, dachu 0,2 W/m^2K i podłogi na gruncie 0,39 W/m^2K. Instalacja grzewcza składała się z gazowego kotła kondensacyjnego i wodnej instalacji ogrzewczej wyposażonej w płytowe grzejniki konwekcyjne. Kocioł służył również do podgrzewania wody użytkowej. Zastosowano mechaniczną wentylację nawiewno-wywiewną z rekuperatorem, ale bez gruntowego wymiennika ciepła.

Tabela 1

Zestawienie zapotrzebowania na moc cieplną budynku tradycyjnego i pasywnego

Składowe w [W]	Dom niskoenergetyczny	Dom pasywny	Stosunek Dn/Dp
Straty mocy cieplnej przez przegrody	5905	2992	1,97
Straty mocy cieplnej na wentylację	697	326	2,13
Zyski od nasłonecznienia	262	262	1
Wewnętrzne zyski ciepła (od mieszkańców)	320	320	1
Wewnętrzne zyski ciepła (od sprzętów elektrycznych)	291	249	1,17
Pobór mocy energii elektrycznej na oświetlenie	307	284	1,08
Pobór mocy energii elektrycznej na wentylatory	123	52	2,36
Całkowite obciążenie cieplne	5421	2181	2,49
Zapotrzebowanie na moc cieplną na 1 m^2 pow. użytkowej	35,2	15,3	2,3

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń zapotrzebowania na moc cieplną budynku tradycyjnego i pasywnego przeprowadzonych za pomocą arkusza kalkulacyjnego Exergy ver. 7.7 wykonanego w ramach IEA ECBCS Annex 37 przez międzynarodową grupę naukowców [2].

W tabeli 2 przedstawiono wyniki bilansu egzergii wykonane dla domu tradycyjnego i pasywnego za pomocą arkusza kalkulacyjnego [2].

Tabela 2

Wyniki obliczeń egzergii

Składowe w [W]	Dom niskoenergetyczny	Dom pasywny	Stosunek strat Dn/Dp
Straty egzergii podczas przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne	702	282	2,48
Straty egzergii na przesyle grzejnik–powietrze (lub nawiewnik–powietrze)	1038	311	3,33
Straty egzergii w grzejniku w domu tradycyjnym (w domu pasywnym – w nawiewnikach ciepłego powietrza)	1400	363	3,85
Straty egzergii podczas transportu ciepła od magazynu energii do grzejnika (na przesyle)	96	16	6
Straty egzergii w zasobniku	75	23	3,2
Straty egzergii podczas wytwarzania ciepła na potrzeby c.o.	6517	786	8,29
Straty egzergii podczas wytwarzania ciepła na potrzeby c.w.u	782	673	1,16
Zapotrzebowanie mocy energii pierwotnej	10952	4546	2,41
Wykorzystanie mocy energii odnawialnej	0	1730	0
Całkowita egzergia włożona	10456	4546	2,3

5. Podsumowanie

Analiza porównawcza domu tradycyjnego i pasywnego wykazała, że całkowite obciążenie cieplne domu tradycyjnego jest około dwaipółkrotnie większe niż domu pasywnego. Natomiast straty egzergii na etapie wytwarzania ciepła dla potrzeb centralnego ogrzewania są w domu tradycyjnym ponad ośmiokrotnie większe w porównaniu z domem pasywnym. Do największych strat egzergii dochodzi w obrębie źródła ciepła (zwłaszcza kotła wodnego).

Duże straty egzergii zachodzą również na przesyle (dystrybucji) ciepła do grzejników (lub w kanałach powietrznych do nawiewników w domu pasywnym). W wypadku domu tradycyjnego straty egzergii na przesyle były sześciokrotnie większe ze względu na różnice temperatur zasilania układów wodnego 70°C, powietrza 35°C. Z tego względu wystąpiły w domu tradycyjnym około trzyipółkrotnie większe straty egzergii na przekazywaniu ciepła z elementów grzejnych do powietrza w pomieszczeniu oraz na samym przepływie ciepła w pomieszczeniu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Gorsza izolacyjność tradycyjnego budynku powodowała jedynie dwuipółkrotne zwiększenie strat egzergii na pokrycie strat ciepła przenikania przez przegrody zewnętrzne budynku (w porównaniu z – przypomnijmy – ponad ośmiokrotnie większymi stratami egzergii na wytwarzaniu ciepła w kotle).

Dziękujemy Państwu Lipińskim z Biura Projektowego Lipińscy z Wrocławia za udostępnienie danych projektowych budynków wykorzystanych do obliczeń przedstawionych w artykule.

Literatura

[1] Szargut J., Peleta R., *Egzergia*, WNT, Warszawa 1965.
[2] Schmidt D., Shukuya M. i in., *Arkusz kalkulacyjny IEA ECBCS Annex 37*, 2005.
[3] Sakulpipatsin P., *Exergy efficient building design*, PhD Thesis, University Delft, 2008.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ