

Wpływ głównych komponentów w budynkach na obniżenie emisji dwutlenku węgla

prof. dr hab. inż. Edward Szczechowiak, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

Budynki w czasie ich budowy i długoletniej eksploatacji zużywają energię i emitują do atmosfery substancje lotne, w tym dwutlenek węgla (CO₂). Z uwagi na to, że budynki zużywają około 40% rocznej produkcji energii w czasie eksploatacji, działania w celu redukcji tego zużycia oraz redukcji emisji zanieczyszczeń są ważne i priorytetowe.

Pierwsze działania w tym zakresie rozpoczęły się w latach 70. XX wieku – w okresie pierwszego kryzysu naftowego, co spowodowało zdefiniowanie i powstanie budynków energooszczędnych, a później pasywnych.

Ważnym działaniem instytucjonalnym była dyrektywa o charakterystyce energetycznej budynków z 2002 roku, później znowelizowana w roku 2010, czego efektem było wdrożenie świadectw charakterystyki budynków (od 2006 r., w Polsce od 2009 r.) oraz budynków niemal zeroenergetycznych (nZEB) w roku 2010 – z pełnym wdrożeniem do końca roku 2018/2020.

9 lipca 2018 r. opublikowana została Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. w ramach pakietu „Czysta energia dla wszystkich Europejczyków” zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej. Najważniejsze elementy wymienionych powyżej dyrektyw obejmują:

- wzmocnione długoterminowe strategie renowacji w państwach UE,
- budynki o niemal zerowym zużyciu energii,
- świadectwa charakterystyki energetycznej,
- kwestie dotyczące zdrowia i dobrostanu (zanieczyszczenie powietrza), elektromobilności (stacje ładowania samochodów elektrycznych) oraz inteligentnych technologii (inteligentne liczniki, urządzenia do samoczynnej regulacji) w nowych budynkach.

Dyrektywa ta wskazuje działania niezbędne do osiągnięcia celów pakietu klimatycznego. Zapisano w niej konieczność opracowania w krajach członkowskich długoterminowych strategii dotyczących renowacji budynków, które powinny zawierać zadania stałe oraz elastycznie dopasowywać się do zmieniających się z czasem warunków. Rokiem docelowym obowiązywania strategii ma być rok 2050, natomiast

koniecznym jest ujęcie w strategiach również punktów pośrednich, w których prowadzona będzie ocena oddziaływania strategii, a także możliwe będzie wprowadzanie modyfikacji celów pośrednich. Punkty te zostały wyznaczone na 2030 i 2040 rok. Celem opracowywanych strategii ma być przekształcenie istniejących budynków mieszkalnych i niemieszkalnych oraz publicznych i prywatnych w budynki niemal zero-energetyczne.

Pod koniec grudnia 2018 r. Unia Europejska uzgodniła szczegóły pakietu „Czysta energia dla wszystkich Europejczyków” (zwanego wcześniej „Pakiem zimowym”). Jest to zestaw 8 dyrektyw i rozporządzeń, które określają parametry nowego modelu energetyki zwanego unią energetyczną oraz stwarzają podstawy dla budowy jednolitego rynku energii UE. Wszystkie elementy pakietu weszły już w życie. Aktualnie trwa proces jego wdrażania przez państwa członkowskie UE. Pakiet wprowadza prawne ramy dla pięciu wymiarów unii energetycznej, takich jak:

- zwiększanie efektywności energetycznej,
- budowa jednolitego wewnętrznego rynku energii,
- dekarbonizacja,
- wzrost bezpieczeństwa energetycznego,
- większa innowacyjność i konkurencyjność europejskiego sektora energii.

W 2019 r. Komisja Europejska przedstawiła nową inicjatywę w zakresie polityki klimatycznej, którą jest Europejski Zielony Ład (EZŁ). Jest to dokument kompleksowy, w którego skład wchodzi wiele inicjatyw klimatycznych, środowiskowych, energetycznych, transportowych, przemysłowych oraz rolnych. Podstawowym celem EZŁ jest osiągnięcie do 2050 r. zerowego poziomu emisji gazów cieplarnianych netto (tzw. neutralność klimatyczna). Realizacja tego celu związana jest z podjęciem działań we wszystkich sektorach gospodarki, w oparciu o bardziej efektywne wykorzystanie zasobów, poprzez przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym. W ramach realizacji EZŁ wyznaczony został nowy cel redukcji emisji CO₂ o co najmniej 55% do 2030 r. – w porównaniu z poziomami z 1990 r.

W lipcu 2021 r. Komisja Europejska przyjęła pakiet wniosków (tzw. Fit for 55) dotyczących polityki klimatycznej, który ma pomóc w osiągnięciu redukcji emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 r. – w porównaniu z poziomami z 1990 r.

Dyrektywy europejskie są również wdrażane w Polsce, w przypadku budownictwa dotyczy to świadectw charakterystyki energetycznej (od 2009 r.) i budynków niemal zeroenergetycznych (2018/2020). Aktualnie ważny jest krajowy plan mający na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii (uchwałą RM z czerwca 2015 r.) oraz Polityka energetyczna Polski do roku 2040 (uchwałą RM z lutego 2021 r.).

Oznacza to potrzebę realizacji polityki redukcji zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej oraz obniżenia emisji CO₂, co wymaga działań zmieniających dotychczasowe podejście na etapie projektowania, budowy a później długoletniej eksploatacji budynków.

2. Budynki efektywne energetycznie

2.1. Dyrektywy dotyczące budownictwa

Polityka prowadzona przez Unię Europejską po roku 2000 w zakresie budownictwa wyraźnie wskazuje kierunek przyszłościowy, który jest związany z promocją budynków neutralnych dla środowiska, czyli oznacza to, że budynki mają być tak zbudowane i eksploatowane, aby w minimalnym stopniu zużywały zasoby środowiska i zasoby paliw pierwotnych nieodnawialnych. W zakresie tym bardzo ważna jest dyrektywa UE nr 2002/91/CE (+ 2010/31/EU) w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, wprowadzona w Unii Europejskiej w 2002 roku i znówelizowana 19 maja 2010 r. Dyrektywa nr 2002/91/CE (+2010/31/EU) promuje poprawę charakterystyki energetycznej budynków w krajach Unii Europejskiej, z uwzględnieniem lokalnych warunków klimatycznych oraz wymagań dotyczących klimatu wewnętrznego i opłacalności ekonomicznej. Dyrektywa ta określa generalne ramy dla określania charakterystyk energetycznych budynków. Metodologia obliczania uwzględnia następujące aspekty:

- charakterystykę termiczną budynku (obudowa i wewnętrzne rozplanowanie, szczelność powietrzna),
- instalacje grzewcze i ciepłej wody użytkowej, łącznie z charakterystyką izolacji termicznej,
- instalacje klimatyzacji (chłodzenia),
- wentylację naturalną i wentylację wymuszoną,
- instalacje oświetleniowe (zwłaszcza w budynkach użyteczności publicznej), położenie i orientacja budynków, włącznie z klimatem zewnętrznym i otoczeniem budynku,
- pasywne systemy słoneczne i ochrona przed promieniowaniem słonecznym,
- warunki klimatu wewnętrznego i sposób użytkowania. Ponadto dyrektywa ta silny nacisk kładzie na uwzględnienie:
- aktywnych systemów słonecznych i innych systemów grzewczych i produkcji energii elektrycznej w oparciu o zasoby energii odnawialnej,
- produkcji energii elektrycznej i ciepła w układach skojarzonych różnych wielkości (CHP),

- systemów ciepłowniczych i chłodniczych w oparciu o układy centralne lub blokowe (BCHP),
- naturalnych układów oświetlenia.

Wersja przekształcona dyrektywy z 19 maja 2010 (2010/31/EU) ustanawia wymagania w zakresie:

- wspólnych ram ogólnych dla metodologii obliczania zintegrowanej charakterystyki energetycznej budynków i modułów budynków,
- zastosowania minimalnych wymagań dotyczących charakterystyki energetycznej wobec nowych budynków i nowych modułów budynków,
- zastosowania minimalnych wymagań dotyczących charakterystyki energetycznej wobec: podlegających ważniejszej renowacji budynków istniejących, modułów lub elementów budynków, w tym stanowiących również część przegród; systemów technicznych budynków, jeżeli są one instalowane, wymieniane lub modernizowane,
- krajowych planów mających na celu zwiększenie liczby budynków o niemal zerowym zużyciu energii,
- niezależnych systemów kontroli świadectw charakterystyki energetycznej i sprawozdań z przeglądu.

Wersja przekształcona dyrektywy z 19 maja 2010 (2010/31/EU) wprowadza budynki o niemal zerowym zużyciu energii (*very low and close to zero energy buildings*). Budynki takie charakteryzują się bardzo dobrą charakterystyką energetyczną, określoną na podstawie obliczonej (lub faktycznej) zużytej) ilości energii w ciągu roku związanej z typowym użytkowaniem. Odzwierciedla ona zapotrzebowanie na energię dla ogrzewania i chłodzenia, wentylacji oraz zaspokojenia zaopatrzenia w ciepłą wodę. Niemal zerowa lub bardzo niska ilość wymaganej energii powinna pochodzić w bardzo wysokim stopniu z energii ze źródeł odnawialnych, w tym energii ze źródeł odnawialnych wytwarzanej na miejscu lub w pobliżu.

Ponadto ważny jest zapis (art. 9), że państwa członkowskie zapewnią aby:

- do 31 grudnia 2020 r. wszystkie nowe budynki były budynkami o niemal zerowym zużyciu energii,
- po 31 grudnia 2018 r. nowe budynki zajmowane przez władze publiczne oraz będące ich własnością były budynkami o niemal zerowym zużyciu energii.

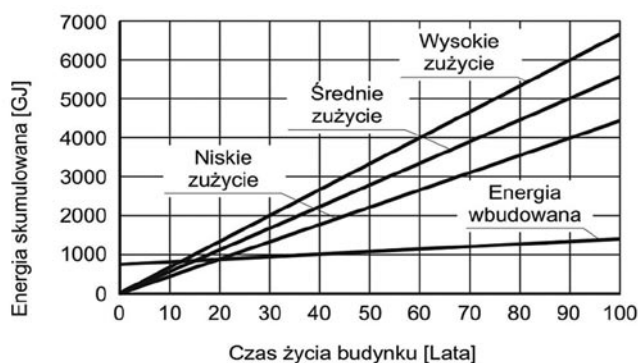
2.2. Wskaźniki określające efektywność energetyczną

Budynki jest traktowany jako system energetyczny, w którym jest zużywana energia w różnych postaciach. Zużycie energii jest związane z charakterystycznymi cyklami życia budynku (LCA).

- energia wbudowana – E_{EM} (skumulowana w budynku) w czasie wznoszenia, przebudowy i rozbiórki (embodied energy),
- energia zużyta w czasie eksploatacji – E_{OP} (operational energy),

Energia skumulowana jest oceniana w budynku nowym po wybudowaniu (as build) i do niej są dodawane

składniki powstałe w cyklu życia – związane z przebudową, zmianą funkcji, rozbiórką itp. Całkowite zużycie energii przez budynek w jego życiu jest sumą energii wbudowanej i zużytej w czasie eksploatacji. Początkowa energia wbudowana rośnie od zera do wartości maksymalnej po zakończeniu fazy budowy i oddaniu obiektu do eksploatacji. W czasie eksploatacji występuje również przyrost energii wbudowanej w wyniku remontów, przebudowy urządzeń lub pomieszczeń itp. Zmianę energii wbudowanej i zużytej do eksploatacji pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Zmiana energii wbudowanej i zużytej w czasie eksploatacji – jako funkcja czasu (przykład)

Energia wbudowana E_{EM} jest oceniana w jednostkach zużytej energii pierwotnej, niezbędnej do wyprodukowania materiałów i komponentów budowlanych, transportu i wzniesienia obiektu.

Parametry energetyczne i ekologiczne budynku po oddaniu do eksploatacji określają wskaźniki przeliczone na jednostkę powierzchni użytkowej:

- energetyczny budynek po wybudowaniu (as build) – $W_{EM(E)}$ [kWh/m²],
- ekologiczny budynek po wybudowaniu (emisja CO₂) – $W_{EM(CO_2)}$ [kg_{CO₂}/m²].

Zużycie energii w czasie eksploatacji E_{Op} można obliczać lub mierzyć w okresach rocznych lub w cyklu życia – dla poszczególnych rodzajów energii zużytej przez systemy technicznego wyposażenia. Efektywność energetyczną poszczególnych systemów: ogrzewania i wentylacji E_H , chłodzenia E_C , podgrzewania ciepłej wody użytkowej E_W , oświetlenia wbudowanego E_L określa się, obliczając energię użytkową niezbędną do utrzymania parametrów użytkowych i energię końcową dostarczoną przez odpowiedni system techniczny. Na końcu łańcucha obliczeniowego występuje energia dostarczona do budynku i jej konwersja – określana wskaźnikiem nieodnawialnej energii pierwotnej EP na jednostkę powierzchni o regulowanej temperaturze.

Jednostkowe zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej dla poszczególnych potrzeb oblicza się według jednolitej metodologii i przedstawia się jako wartości jednostkowe

na powierzchnię o regulowanej temperaturze:

- dla ogrzewania i wentylacji budynku – EP_H [kWh/m²a],
- dla podgrzewania ciepłej wody użytkowej – EP_W [kWh/m²a],
- dla chłodzenia budynku – EP_C [kWh/m²a],
- dla oświetlenia elektrycznego wbudowanego w budynku – EP_L [kWh/m²a].

Równoległe określa się emisję ditlenku węgla (CO₂) związaną z tymi samymi potrzebami:

- dla ogrzewania i wentylacji budynku – $E_{H(CO_2)}$ [kg_{CO₂}/m²a],
- dla podgrzewania ciepłej wody użytkowej – $E_{W(CO_2)}$ [kg_{CO₂}/m²a],
- dla chłodzenia budynku – $E_{C(CO_2)}$ [kg_{CO₂}/m²a],
- dla oświetlenia elektrycznego wbudowanego w budynku – $E_{L(CO_2)}$ [kg_{CO₂}/m²a].

Analizie podlega również udział energii odnawialnej, który powinien rosnąć.

2.3. Rozwój budynków efektywnych energetycznie

Kryzysy energetyczne w drugiej połowie XX wieku, wyczerpywanie się zasobów energii pierwotnej i ogólnosiątkowe dążenie do wdrożenia idei zrównoważonego rozwoju doprowadziły do rozwoju technologii prowadzących do budynków o małym zużyciu energii. Pierwsze sformułowanie dotyczące pojęcia „budynek niskoenergetyczny” (energooszczędny) pojawiło się w 1977 roku. Pierwsze takie budynki powstały w Korsgaard – Kopenhaga (1977 rok), Shick – Illinois, Elmroth – Stockholm.

Stąd też pierwsze budynki energooszczędne (lata 70. XX wieku) były efektem wzrostu cen paliw i energii:

- jako efekt pierwszego kryzysu naftowego (1974);
- wprowadzono maksymalne współczynniki przenikania ciepła przegród budynku;
- określono maksymalne zużycie energii użytkowej dla ogrzewania i wentylacji – mniej niż 70 kWh/(m²a). Wcześniej było to 150–270 kWh/(m²a) na jednostkę powierzchni użytkowej i rok.

Dalszy rozwój, jeszcze lepsze właściwości energetyczne, co doprowadziło do powstania budynków pasywnych (przełom lat 80/90 XX wieku):

- opracowanie podstaw: B. Adamson – 1988 (Lund Szwecja);
- pierwsza realizacja: W. Feist – 1991 (Niemcy) – dom szeregowy 4-segmentowy;
- określono standard budynku pasywnego (szczelność powietrzna – $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$, zużycie energii użytkowej dla ogrzewania i wentylacji – 15 kWh/(m²a), zużycie energii pierwotnej dla wszystkich potrzeb – 120 kWh/(m²a).

Działania instytucjonalne Unii Europejskiej na początku XX wieku spowodowały wdrożenie ważnej dla budownictwa dyrektywy:

- Directive 2002/91/EC od the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings (o charakterystyce energetycznej);

• efekt działań – wprowadzenie świadectw charakterystyki energetycznej budynków.

Świadectwa charakterystyki energetycznej wprowadziły istotne zmiany w budownictwie, gdyż spowodowały liczbową ocenę efektywności energetycznej budynków. Stąd też świadectwa charakterystyki energetycznej były:

- wymogiem dyrektywy 2002/91/EC on the energy performance of buildings,
- ważne w krajach UE od 01.2006,
- w Polsce ważne od 01.2009.

Zakres oceny energetycznej budynków obejmuje ocenę zużycia energii dla:

- ogrzewania i wentylacji,
- chłodzenia,
- podgrzewania ciepłej wody użytkowej,
- oświetlenia (budynki użyteczności publicznej).

Ważne są końcowe wskaźniki oceny, które obejmują trzy parametry:

- roczny wskaźnik zapotrzebowania nieodnawialnej energii pierwotnej,
- roczny wskaźnik emisji ditlenku węgla (CO₂),
- roczny udział energii odnawialnej.

Wykonane świadectwa charakterystyki energetycznej budynków nowych budowanych w latach 2006–2010 wykazały niezadowalającą efektywność energetyczną, stąd też nastąpiły dalsze działania związane z nowelizacją dyrektywy Unii Europejskiej o charakterystyce energetycznej budynków – Dyrektywa 2010/311/EU (nowelizacja maj 2010). Dyrektywa ta wprowadziła budynki niemal zeroenergetyczne, przy zastosowaniu jednolitej zasady obliczania parametrów energetycznych według cen i kosztów krajowych. Stąd też wartości zużytej energii dla poszczególnych krajów mogą się różnić. Wdrożenie budynków niemal zeroenergetycznych (nZEB) oraz +ZEB było następujące (w latach 2010–2021):

• opracowanie podstaw – Dyrektywa 2010/31/EU (maj 2010);

• wdrożenie końcowe: lata 2019/2021, przy czym

$EP = f(\text{minimalny koszt globalny})$;

• wybór rozwiązania – według minimalnego kosztu globalnego – K_{global} (koszt inwestycji i zdyskontowany koszt eksploatacji w czasie 20 lat – dla budynków niemieszkalnych i 30 lat dla budynków mieszkalnych).

Zasada wykonywania analiz jest związana z kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi oraz wartościami nieodnawialnej energii pierwotnej (EP) dla wybranych typów budynków. Czyli:

$$K_{global} = F(EP) \quad K_{global} (min) \rightarrow EP_{opt}$$

$$EP = f(PP, PO)$$

gdzie:

K_{global} – koszt globalny,

EP – nieodnawialna energia pierwotna,

PP – parametry projektowe,

PO – parametry operacyjne (eksploatacyjne).

Na podstawie tej jednolitej metodologii zostały wykonane analizy w krajach Unii Europejskiej, również w Polsce. Wymagania dla budynków niemal zeroenergetycznych są zawarte w warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowania (WT'13). Okres wdrożenia był podzielony na trzy etapy: 2014, 2017, 2019/2021, stąd też wdrożenie końcowe nastąpiło w latach 2019/2021.

Maksymalne dopuszczalne zapotrzebowanie nieodnawialnej energii pierwotnej dla budynków nZEB według WT'13 dla ogrzewania, wentylacji, chłodzenia, c.w.u. i oświetlenia wbudowanego dla poszczególnych rodzajów budynków jest następujące (począwszy od stycznia 2019/2021):

- budynki mieszkalne jednorodzinne
 $EP_{H+W} = 70 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$;
- budynki mieszkalne wielorodzinne
 $EP_{H+W} = 65 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$;
- budynki zamieszkania zbiorowego
 $EP_{H+W} = 75 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$,
 $EP_{H+W+C} = 100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$;
- budynki biurowe i administracyjne
 $EP_{H+W} = 45 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$,
 $EP_{H+W+C} = 70 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$,
 $EP_{H+W+C+L} = 45+25+25 = 95 \text{ kWh} (\text{m}^2\text{a})$;

gdzie:

H – ogrzewanie i wentylacja,

W – ciepła woda użytkowa,

C – chłodzenie,

L – oświetlenie.

Równolegle zostały określone również maksymalne współczynniki przenikania ciepła przegród zewnętrznych budynków, co jest zawarte również w WT'13.

Tabela 1. Wartości U_{max} [$W/(\text{m}^2\text{K})$] dla przegród w latach 2014–2021 według WT'13

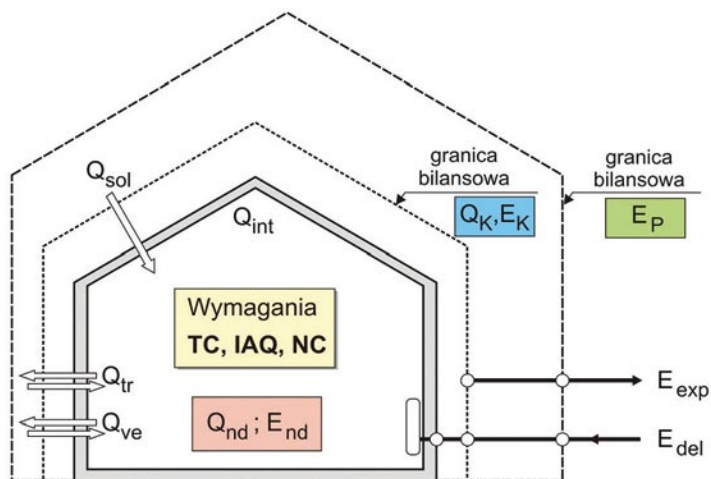
Rodzaj przegrody	2014	2017	2021
Ściana zewnętrzna	0,25	0,23	0,20
Stropodach/dach	0,20	0,18	0,15
Podłoga na gruncie	0,30	0,30	0,30
Okna	1,30	1,10	0,90
Okna połaciowe	1,50	1,30	1,10
Drzwi zewnętrzne	1,70	1,50	1,10

Wymogi podane w warunkach technicznych (WT'13) są podstawowymi parametrami, które należy spełnić w projektowaniu budynków nZEB w Polsce. Nie oznacza to, że nie należy projektować i realizować budynków o parametrach energetycznych lepszych, aby zbliżyć się do czołowych w tym zakresie krajów Unii Europejskiej.

3. Komponenty budynków wpływające na zużycie energii i emisję ditlenku węgla

Aby osiągnąć wymagane standardy, przy założeniu, że zapewnimy komfort cieplny i jakość powietrza w pomiesz-

Rys. 2. Założenia do bilansu energii w budynkach dla określenia charakterystyki energetycznej:
 TC – komfort cieplny, IAQ – jakość powietrza wewnętrznego, NC – komfort użytkowy (oświetlenie, ciepła woda), Q_{nd} , E_{nd} – potrzebne ciepło użytkowe lub energia użytkowa, E_K – energia końcowa, E_p – energia pierwotna, Q_{int} – wewnętrzne zyski ciepła, Q_{sol} – zyski ciepła od słońca, Q_{tr} – straty/zyski ciepła przez przegrody, Q_{ve} – straty/zyski ciepła dla powietrza wentylacyjnego



zeniach – zgodnie z odpowiednimi wymaganiami normowymi, niezbędne jest określenie wymagań dotyczących nie tylko współczynników przenikania ciepła przegród zewnętrznych budynku, ale także powierzchni okien, wskaźnika zwartości budynku A/V_e , wentylacji, akumulacyjności cieplnej użytych materiałów konstrukcyjnych i urządzeń technicznego wyposażenia, rozwiązań wykorzystujących promieniowanie słoneczne i wewnętrzne zyski ciepła. Na to wszystko nakłada się opłacalność ekonomiczna mierzona kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Funkcją celu będzie zazwyczaj zapewnienie komfortu cieplnego i jakości powietrza w pomieszczeniach, przy akceptowalnych kosztach eksploatacyjnych.

Budynek jest traktowany jako system energetyczny, w którym mamy przepływ energii związany z funkcjonowaniem budynku. W analizie ważne są następujące czynniki:

- wymagania projektowe:
 - funkcja użytkowa, estetyka, bezpieczeństwo,
 - środowisko wewnętrzne (komfort cieplny i jakość powietrza, komfort użytkowy),
 - standard energetyczny i ekologiczny,
 - koszty w cyklu życia;
- zakłócenia:
 - środowisko zewnętrzne – zmienność parametrów w czasie,
 - oddziaływanie użytkowników i wyposażenia;

- istotne komponenty budynku:
 - struktura wewnętrzna i konstrukcja,
 - budowa budynku (izolacyjność cieplna i dyfuzyjna, szczelność powietrzna, faktura),
 - techniczne wyposażenie i źródła energii (efektywność, energia odnawialna, ślad węglowy),
 - systemy sterowania i zarządzania budynkiem.

Bilanse wykonuje się dla określonej osłony bilansowej i poziomów bilansowych oraz rodzajów potrzeb energetycznych (rys. 2).

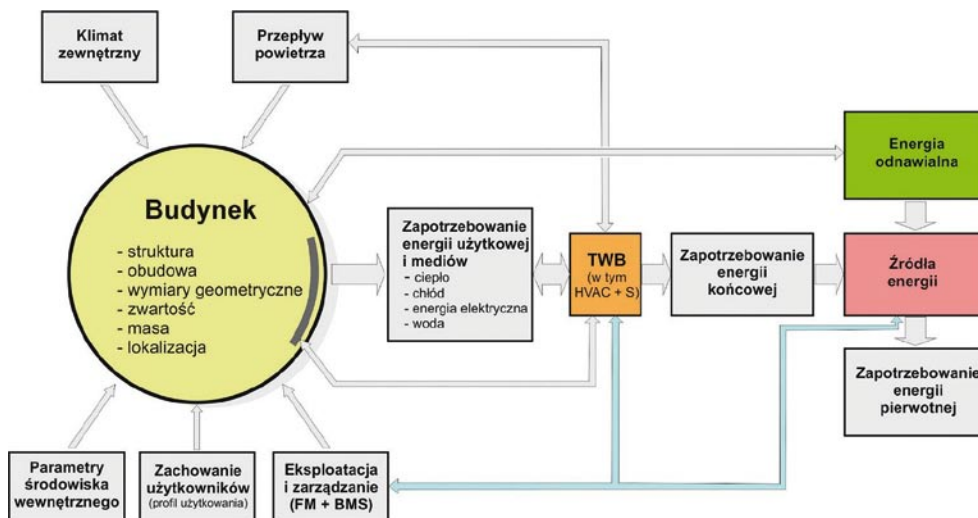
Jak wynika z rysunku 2, w analizie mamy trzy punkty kontrolne oceny energetyczno-ekologicznej w czasie eksploatacji:

- energia użytkowa,
- energia końcowa i emisja CO_2 ,
- nieodnawialna energia pierwotna.

Ocena rocznego zużycia energii i emisji przez układy techniczne ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, podgrzewania ciepłej wody oraz oświetlenia wbudowanego w budynkach jest dość złożona i wymaga wielu danych i analiz dla poszczególnych komponentów (rys. 3).

Prowadzi to w efekcie do zintegrowanej analizy trzech modułów:

Rys. 3. Komponenty w bilansowaniu energii: budynek, techniczne wyposażenie (TWB), doprowadzenie i konwersja energii (nieodnawialna, odnawialna)



- moduł 1 – budynek i jego właściwości cieplne (izolacja termiczna obudowy, szczelność powietrzna, przepływ powietrza, wykorzystanie energii promieniowania słonecznego w zimie, ochrona przed promieniowaniem słonecznym w lecie, wewnętrzne zyski ciepła, wewnętrzna pojemność cieplna) – energia użytkowa (Q_{nd} , E_{nd});
- moduł 2 – techniczne wyposażenie budynku odpowiedzialne za komfort cieplny i użytkowy, jakość powietrza oraz za oświetlenie (cechy – wysoka sprawność energetyczna) – energia końcowa (Q_{kr} , E_{kr});
- moduł 3 – efektywne wyprodukowanie i dostarczenie energii do budynku – nieodnawialna oraz odnawialna energia pierwotna (E_p).

W efekcie analizy projektowej stanów eksploatacyjnych istotne są wskaźniki jednostkowe oceny energetycznej, które decydują o jakości energetycznej i ekologicznej budynku oraz określają spełnienie oczekiwanych wymagań. Te wskaźniki to:

- energia użytkowa – E_U [kWh/(m²rok)],
- energia końcowa – E_K [kWh/(m²rok)],
- nieodnawialna energia pierwotna – E_p [kWh/(m²rok)],
- emisja ditlenku węgla (CO₂) – E_{CO_2} [kg_{CO_2}/(m² rok)],
- udział energii odnawialnej.

3.1. Przegrody budowlane i przepływ powietrza

Budynek i jego charakterystyka cieplna jest związana z potrzebami cieplnymi dla utrzymania komfortu cieplnego i jakości powietrza (moduł 1). Niezbędna ilość ciepła do tych potrzeb – to ciepło lub chłód użytkowy ($Q_{H,nd}$, $Q_{C,nd}$). Niezbędna ilość ciepła lub chłodu jest funkcją czterech podstawowych strumieni ciepła:

$$Q_{H,nd} = f(Q_{tr}, Q_{ve}, Q_{sol}, Q_{int}) \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$$

$$Q_{C,nd} = f(Q_{tr}, Q_{ve}, Q_{sol}, Q_{int}) \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$$

gdzie:

Q_{tr} – straty lub zyski ciepła przez przenikanie, zależne od U oraz różnicy temperatury,

Q_{ve} – zapotrzebowanie ciepła do podgrzewania (ochładzania) powietrza niezbędnego do wentylacji,

Q_{sol} – zyski ciepła do pomieszczeń przez przegrody przeszklone,

Q_{int} – wewnętrzne zyski ciepła w budynku,

U – współczynniki przenikania ciepła przez przegrody budynku.

W efekcie dalsze zależności są następujące:

$$Q_{tr} = f(U_i, A_i, \Delta\theta_{i-e}, \text{czas});$$

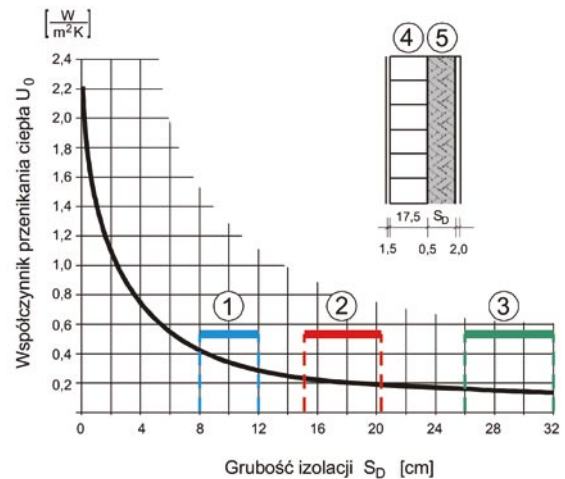
$$Q_{ve} = f(n_{z,m}, n_{inf}, \Delta\theta_{i-e}, \text{czas});$$

gdzie:

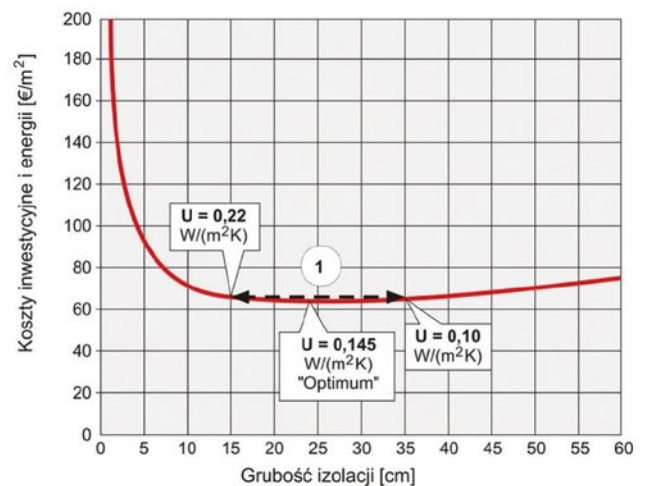
U_i – współczynnik przenikania ciepła i -tej przegrody budynku,

A_i – powierzchnia i -tej przegrody budynku,

$\Delta\theta_{i-e}$ – różnica temperatury w pomieszczeniu i na zewnątrz – zmienna w czasie,



Rys. 4. Ewolucja zmian współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych: 1 – standard ochrony cieplnej z roku 2000, 2 – budynku o niskim zużyciu energii, 3 – budynki pasywne, 4 – mur nośny (0,7 W/mK), 5 – izolacja termiczna (0,04 W/mK)



Rys. 5. Wpływ grubości izolacji na koszty globalne przegrody zewnętrznej (optimalny współczynnik $U = 0,145$ W/(m²K), izolacja termiczna (0,04 W/mK).

$n_{z,m}$ – zastępcza krotność wymian wynikająca z działania wentylacji mechanicznej,

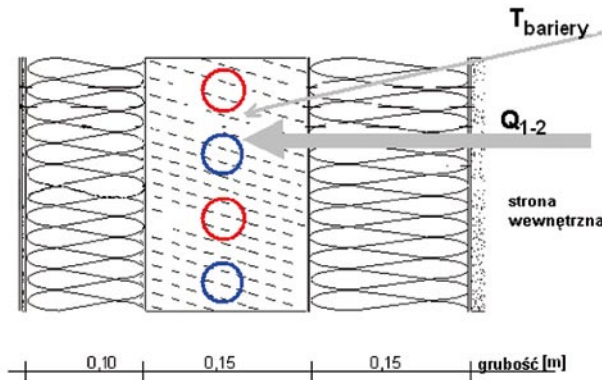
n_{inf} – krotność wymian powietrza wynikająca z infiltracji,

$$n_{inf} = f(n_{50}),$$

n_{50} – krotność wymian powietrza przy różnicy ciśnienia 50 Pa, mówiąca o szczelności powietrznej budynku.

Z ww. parametrów duże znaczenie dla bilansu ciepła mają współczynniki przenikania ciepła oraz urządzenia do odzysku ciepła i kontrola przepływu powietrza wentylacyjnego w ciągu roku. Odpowiedni dobór tych parametrów w istotny sposób wpływa na obniżenie ($Q_{H,nd}$, $Q_{C,nd}$), co pośrednio powoduje zmniejszenie zużycia energii i emisji CO₂ w czasie długoletniej eksploatacji. Ewolucje poprawy izolacji termicznej przegród pokazano na rysunku 4, natomiast na aktualne optimum współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych, biorąc pod uwagę koszty inwestycyjne i koszty energii – na rysunku 5.

Dalsza poprawa izolacji termicznej przegród przebiega w kierunku uaktywnienia przegród przez wewnętrzne źródła ciepła wykorzystujące energię odnawialną z otoczenia budynku. Taki przykład systemu ISOMAX pokazano na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Ściana z barierą cieplną systemu ISOMAX, co zmniejsza straty ciepła w zimie i zyski ciepła w lecie: styropian – 10 cm, beton z domieszkami – 15 cm, styropian 15 cm ($U_{ef} = 0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$) (czerwone i niebieskie koła oznaczają rurki węzownicy stanowiącej wewnętrzne źródło ciepła – tzw. bariera cieplna)



Rys. 7. Widok fragmentu ściany systemu ISOMAX przed zabetonowaniem

3.2. Technika budynku w zakresie ogrzewania, wentylacji i chłodzenia

Dostarczenie lub odprowadzenie z budynku wymaganej i zmiennej w czasie ilości ciepła zapewniają systemy ogrzewania, wentylacji i chłodzenia (moduł 2). Układy te dostarczają niezbędne ilości ciepła lub chłodu, które zależą od $Q_{H,nd}$ oraz $Q_{C,nd}$ i od sprawności odpowiednich układów technicznych. Energia dostarczana przez układy techniczne jest nazywana energią końcową i może być zmierzona

przez urządzenia pomiarowe: liczniki ciepła, chłodu lub energii elektrycznej. Energię końcową dla ogrzewania $Q_{k,H}$ i chłodzenia $Q_{k,C}$ można wyznaczyć z zależności:

$$Q_{k,H} = Q_{H,nd} / \eta_{H,tot} \text{ [kWh/(m}^2\text{a)]}$$

$$Q_{k,C} = Q_{C,nd} / \eta_{C,tot} \text{ [kWh/(m}^2\text{a)]}$$

gdzie:

$Q_{H,nd}$ – zapotrzebowanie ciepła użytkowego dla ogrzewania,

$Q_{C,nd}$ – zapotrzebowanie chłodu użytkowego dla chłodzenia,

$\eta_{H,tot}$ – całkowita efektywność systemu ogrzewania (regulacja, rozdział ciepła, akumulacja i konwersja energii w źródle),

$\eta_{C,tot}$ – całkowita efektywność systemu chłodzenia (regulacja, rozdział chłodu, akumulacja i konwersja energii w źródle chłodu).

Jak wynika z powyższych zależności, na końcowe zużycie energii ma wpływ efektywność układów technicznych oraz ich elastyczność i dopasowanie do profilu użytkowania pomieszczeń w budynku. Stąd też ważne są:

- parametry projektowe ogrzewania/chłodzenia:
 - temperatura operacyjna według ISO EN 7730,
 - zmienność temperatury zima/lato np. 21/25°C;
- cechy układów:
 - łączenie układu ogrzewania i chłodzenia,
 - układy ogrzewania niskotemperaturowe o wysokiej efektywności: 50/40°C; 40/30°C,
 - układy chłodzenia o wysokiej efektywności (w tym pasywne): 15/18°C; 18/21°C,
 - minimalizacja strat/zysków ciepła komponentów dystrybucji ciepła i chłodu,
 - osłabienie ogrzewania w nocy i wyłączenie chłodzenia,
 - regulacja pogodowa z korektą miejscową za pomocą termostatów,
 - chłodzenie według potrzeb – ważny profil użytkowania;
- parametry projektowe wentylacji/klimatyzacji:
 - uwzględnienie zasad normy ISO PN EN 13779,
 - jakość powietrza według kryterium CO_2 ,
 - wilgotność względna w przedziale 40–60%,
 - kontrola pyłów PM10, PM2,5; PM1,
- cechy układów:
 - centrale dopasowane do potrzeb – decentralizacja,
 - parametry operacyjne instalacji wentylacyjnej/klimatyzacyjnej:
 - a) przepływ powietrza zmienny w czasie (według kryterium obciążenia – np. poprzez pomiar ditlenku węgla i kontrolę wartości dopuszczalnej – VAV, DCV),
 - b) ograniczenie przepływu poza okresem użytkowania pomieszczeń (nawet do zera).

3.3. Źródła energii dla ogrzewania/chłodzenia

Dostarczenie lub odprowadzenie z budynku wymaganej i zmiennej w czasie ilości energii końcowej do budynku

wymaga odpowiednich układów konwersji energii, aby spełnić wymagania energetyczne i ekologiczne (moduł 3). Energia dostarczana do budynku może pochodzić ze źródeł nieodnawialnych (paliwa kopalne) lub ze źródeł odnawialnych (słońce, wiatr, biomasa, biogaz) lub też można wykorzystać energię odpadową z technologii przemysłowych. Potrzebną energię z zewnątrz odnosi się w obliczeniach do nieodnawialnej energii pierwotnej Q_p i można ją obliczyć dla ogrzewania $Q_{p,H}$ oraz chłodzenia $Q_{p,C}$ z następujących zależności:

$$Q_{p,H} = Q_{k,H} \cdot w_{EP,H} + E_{pom,H} \cdot w_{EP,el}$$

$$Q_{p,C} = Q_{k,C} \cdot w_{EP,C} + E_{pom,C} \cdot w_{EP,el}$$

gdzie:

$w_{EP,H}$ – wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla dostarczenia energii końcowej dla ogrzewania,

$w_{EP,C}$ – wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla dostarczenia energii końcowej dla chłodzenia,

$E_{pom,H}$ – energia elektryczna zużyta do działania urządzeń pomocniczych dla ogrzewania, $E_{pom,C}$ – energia elektryczna zużyta do działania urządzeń pomocniczych dla chłodzenia,

$w_{EP,el}$ – wskaźnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla energii elektrycznej.

Pochodzenie i konwersja energii ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia kluczowych celów, tj. obniżania zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej, obniżenia emisji CO₂ i zwiększania udziału energii odnawialnej.

Wprowadzany Europejski Zielony Ład wymaga obniżenia emisji CO₂ o 55% do roku 2030, w porównaniu z rokiem 1990. Budownictwo w każdym roku jest głównym konsumentem energii (40% całej produkcji), ale posiada duży potencjał redukcji tego zużycia – co należy pilnie wdrożyć dla budynków nowych i poddawanych renowacji (rewitalizacji). Stąd też podstawowe cechy układów konwersji energii pierwotnej powinny być następujące:

- wybór i efektywne wykorzystanie energii pierwotnej nieodnawialnej i odnawialnej (niski współczynnik nakładu),
- wykorzystanie energii promieniowania słonecznego i wiatru,
- wykorzystanie biopaliw, biomasy i innych źródeł energii odnawialnej np. geotermia,
- wykorzystanie pomp ciepła (PC),
- zwiększanie udziału energii odnawialnej.

Ważne są tutaj współczynniki nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej, które wskazują na efektywność zastosowanego źródła energii. Te współczynniki w_{EP} w Polsce są następujące (od 2016 r.):

- paliwa kopalne – 1,1;
- energia słoneczna, wiatru, geotermia – 0,0;
- biomasa – 0,2;
- ciepło z kogeneracji (węgiel, gaz) – 0,8;
- ciepło z kogeneracji (biomasa, biogaz) – 0,15;

- ciepło sieciowe z ciepłowni węglowej, gazowej – 1,3;
- energia elektryczna z sieci – 3,0.

W przypadku zasilania w energię elektryczną możemy wykorzystać sieć zewnętrzną lub źródła własne:

- sieć systemowa przesyła energię elektryczną, której parametry są wypadkową z wielu źródeł wytwórczych – aktualnie $w_{EP} = 3,0$, a $w_{CO_2} = 0,724 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$;
- źródła własne: energia odnawialna PV, wiatraki, ogniwa paliwowe (wodór) – współczynniki nakładu i emisja CO₂ są prawie zero.

Porównanie emisji CO₂ z sieci elektroenergetycznych w różnych krajach pokazuje, jak słabe są wskaźniki w tym zakresie w Polsce:

- Polska – 0,724 kg_{CO₂}/kWh;
- Unia Europejska – 0,264 kg_{CO₂}/kWh;
- Francja – 0,055 kg_{CO₂}/kWh;
- Szwecja – 0,013 kg_{CO₂}/kWh.

Wyżej podane wskaźniki nakładu nieodnawialnej energii wskazują, jaki powinien być kierunek konfigurowania źródeł ciepła i chłodu dla budynków. Przy konfiguracji źródeł ciepła i chłodu należy brać pod uwagę następujące kryteria:

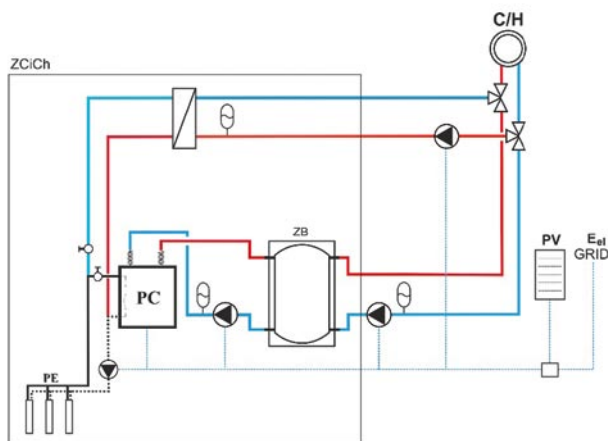
- minimalizacja współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej,
- wzrost udziału energii odnawialnej,
- minimalizacja emisji CO₂.

Przy wytwarzaniu ciepła i chłodu na potrzeby budynków możemy konfigurować źródła własne lub możemy korzystać z ciepła zdalczego. Wybór powinien uwzględniać ww. kryteria. Coraz ważniejsza jest kontrola emisji CO₂ i to powinno decydować o konfiguracji źródła ciepła i chłodu. Przykładowo jeżeli porównamy kocioł gazowy kondensacyjny z pompą ciepła, to uzyskujemy następujący efekt:

- kocioł gazowy kondensacyjny + energia elektryczna z sieci:
 - ciepło – 100% energii nieodnawialnej ($w_n = 1,1$);
 - emisja CO₂: 0,22–0,24 kg_{CO₂}/kWh;
 - energia elektryczna ($w_n = 3,00$);
 - emisja CO₂: 0,724 kg_{CO₂}/kWh;
- pompa ciepła COP 4,0 + kolektory PV:
 - ciepło – 75% energii odnawialnej ($w_n = 0,75$ – zasilanie z sieci);
 - emisja CO₂: 0,18 kg_{CO₂}/kWh;
 - ciepło – 75% energii odnawialnej ($w_n = 0,01$ – zasilanie z PV);
 - emisja CO₂: 0,01 kg_{CO₂}/kWh.

To porównanie wyraźnie pokazuje, że wykorzystanie PC i energii odnawialnej daje dużą przewagę w porównaniu z najlepszym kotłem gazowym i to jest kierunek rozwoju i zapewnienia istotnej redukcji emisji CO₂.

Działania przyszłościowe to łączenie układów ogrzewania i chłodzenia wsparte pompami ciepła i energią odnawialną. Przykładowo takie rozwiązanie dla budynku biurowego pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Zintegrowane źródło ciepła i chłodu (ZCiCh) z odnawialnym źródłem energii: PC – pompa ciepła, PE – pale energetyczne, ZB – zbiornik buforowy, C/H – obiegów grzewczo-chłodnicze w pomieszczeniach, Eel – energia elektryczna z sieci, PV – energia elektryczna z kolektorów słonecznych, $w_{PHC} = 0,1-0,5$

4. Podsumowanie

Jak wykazały przeprowadzone analizy, uzyskanie obniżenia emisji CO₂ przez budynki w czasie eksploatacji wymaga szerokiego wprowadzenia budynków niemal zeroenergetycznych (nZEB). Pozwala to na istotną redukcję zapotrzebowania na energię użytkową i końcową, co ma również wpływ na redukcję emisji CO₂. Wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań w źródłach ciepła i chłodu opartych o energię odnawialną pozwala na istotną redukcję emisji CO₂. Budynki efektywne energetycznie (nZEB) zarówno nowe, jak i modernizowane do tego standardu:

- są niezbędne dla rozwoju budownictwa,
- realizują ideę zrównoważonego rozwoju i zielonego ładu,
- poprawiają komfort cieplny i jakość powietrza w pomieszczeniach,
- pozwalają na istotne zwiększenie udziału energii odnawialnej i obniżenie zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej,

- pozwalają na istotne obniżenie emisji CO₂ (ślądu węglowego), na co pozwalają dopiero niezbędne zmiany w strukturach źródeł ciepła i chłodu,
- wpływają na obniżenie szkód substancji budowlanej i wzrost trwałości budynków,
- dają możliwość uzyskania niskich kosztów eksploatacyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adalberth K., Energy use during the Life Cycle of Buildings – a Method. Building and Environment 32/1997, str. 317–320
- [2] Feist W., Passivhäuser in Mitteleuropa. Dissertation, Gesamthochschule Kassel, 1993
- [3] Feist W., Das Niedrigenergiehaus. F.C. Müller Verlag Heidelberg, 1998
- [4] Feist W., Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser. Das Beispiel. Verlag PHI Darmstadt, 2001
- [5] Firląg S. (red.), Zrównoważone budynki biurowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017
- [6] Górzyński J., Podstawy metodyczne analizy energetyczno-ekologicznej obiektu budowlanego w pełnym cyklu istnienia, PN ITB, Warszawa, 2000
- [7] Jansen R., Towards Energy Efficient Buildings in Europe. EuroACI London, 2004
- [8] Kurnitzki J., How to calculate cost optimal nZEB energy performance? REHVA Journal, 11/2011
- [9] Marme W., Seeberger J., Der Primärenergieinhalt von Baustoffen. Bauphysik 4 (1982), 5 i 6
- [10] Reddy B. V. V., Jagadish K.S., Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. Energy and Buildings 35 (2003), str. 129–137
- [11] Rouvel L., Das Gebäude als Energiesystem. Stadt und Gebäudetechnik 3.1994, str. 27–32
- [12] Rubik M., Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej, Oficyna Wydawnicza Multico, Warszawa, 2011
- [13] Rubik M., Chłodnictwo i pompy ciepła, Wyd. Grupa Medium, 2020
- [14] Sowa J. (red), Budynki o niemal zerowym zużyciu energii, Wyd. NTNU, Warszawa, 2017
- [15] Szczechowiak E., Poprawa sprawności użytkowej układów klimatyzacji budynków. Ogrzewnictwo i Klimatyzacja 1/2000, str. 5–9, 2/2000, str. 5–9
- [16] Szczechowiak E., Efektywność energetyczna budynków, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe Nr LVIII 2006, str. 25–44
- [17] Szczechowiak E., Realizacja polityki energetycznej w budownictwie w świetle nowych rozporządzeń, Materiały Budowlane 1/2009, str. 8–12
- [18] Szczechowiak E., Budynki energooszczędne i pasywne. Czysta Energia – 3/2008, str. 22–26
- [19] Thormark C., A low energy building in a life cycle – its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. Building and Environment 37/2002, str. 429–435

Serdecznie zapraszamy do prenumeraty
„Przeglądu Budowlanego” na 2022 r.

- Prenumerata – 259,20 zł
- Ulgowa – 181,44 zł
- Elektroniczna – 125,40 zł

Ceny zawierają 8% VAT