

Analiza energetyczno-ekologiczna wytworzenia i użytkowania budynku jednorodzinnego w technologii tradycyjnej i pasywnej

Dr inż. Maciej Wesołowski

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych

Analiza energetyczno-ekologiczna danego produktu to ocena wpływu na środowisko, jaki jest wywierany na wszystkich etapach istnienia produktu: poczynając od pozyskania surowców, poprzez produkcję, dystrybucję i użytkowanie, na likwidacji (utylicacji) kończąc. W analizie tej uwzględnia się różne obszary, w których można zaobserwować taki wpływ (takie jak wykorzystanie zasobów naturalnych, oddziaływanie na ekosystem i zdrowie człowieka) oraz próbuje się oszacować wielkość takiego oddziaływania. Celem analiz energetyczno-ekologicznych jest ocena potencjalnych zagrożeń związanych z wytwarzaniem i użytkowaniem różnorodnych produktów oraz wskazanie materiałów i technologii najkorzystniejszych z punktu widzenia ochrony środowiska. Jest to ważna informacja dla inwestorów, projektantów i wykonawców w branży budowlanej i instalatorskiej. W artykule przedstawiono porównanie analiz energetyczno-ekologicznych wykonanych dla jednorodzinnego budynku mieszkalnego w technologii tradycyjnej oraz analogicznego obiektu pasywnego. W porównaniach uwzględniono nakłady energetyczne, surowcowe, zużycia wody i emisję CO_2 w procesach produkcyjnych oraz zużycie energii podczas eksploatacji.

BUDOWNICTWO TRADYCYJNE A PASYWNE – CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANYCH OBIEKTÓW

Analizy energetyczno-ekologiczne przeprowadzono dla budynku jednorodzinnego wykonanego w dwóch wariantach technologicznych: tradycyjnym oraz pasywnym. Przyjęto taki sam współczynnik kształtu, zbliżoną powierzchnię użytkową oraz kubaturę. W technologii tradycyjnej i pasywnej zastosowano odmienne rozwiązania konstrukcyjne, między innymi w posadowieniu domu, zaizolowaniu ścian zewnętrznych i połąci dachowych.

Dom w technologii tradycyjnej posadowiono na ławach oraz stopach fundamentowych. Ściany zewnętrzne stanowiły konstrukcję trójwarstwową zbudowaną z bloczków gazobetonowych odmiany 600 o grubości 0,24 m, ocieploną warstwą wełny mineralnej miękkiej o grubości 0,15 m i gęstości 60 kg/m^3 oraz ścianą osłonową z cegły ceramicznej o grubości 0,12 m. Współczynnik U przenikania ściany zewnętrznej wynosi $0,22 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Ściany działowe wymurowano z bloczków betonu komórkowego o grubości 0,12 m. W połąci dachowej zastosowano klasyczne rozwiązanie krokwiowo-jętkowe, przestrzenie między krokwiami wypełniono warstwą wełny mineralnej o grubości 0,2 m. Zastosowano okna i drzwi balkonowe z PCV (dwuszybowe z szybą zespoloną) o współczynniku przenikalności cieplnej U uwzględniającym mostki cieplne wynoszącym $1,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

System wentylacyjny w domu tradycyjnym obejmował naturalną wymianę powietrza. Nawiew świeżego powietrza przez

nieszczelności stolarki lub szczeliny nawiewników oraz odprowadzenie zużytego powietrza przez otwarte kanały wentylacyjne.

W domu pasywnym jako posadowienie zastosowano płytę żelbetonową o grubości 0,25 m izolowaną termicznie styropianem o grubości 0,25 m. Współczynnik U przenikania ciepła płyty fundamentowej wynosi: $0,121 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Ściany zewnętrzne są dwuwarstwowe: bloczki z betonu komórkowego odmiany 600 o grubości 0,24 m stanowią warstwę nośną, ocieplone od strony zewnętrznej warstwą płyt styropianowych o grubości 0,35 m. Współczynnik U przenikania ściany zewnętrznej wynosi $0,098 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Zaprojektowano drewniane szkieletowe ściany działowe usztywnione płytą OSB i wypełnione wełną mineralną. Dach zaprojektowano o konstrukcji krokwiowo-jętkowej, krokwie usztywnione płytami OSB. Izolację termiczną dachu stanowią dwie warstwy płyt styropianowych o łącznej grubości 0,25 m. Zastosowano dachowe panele styropianowe przygotowane pod krycie dachówką ceramiczną, rezygnując z tradycyjnych łat i kontrłat. Współczynnik U przenikania ciepła dla dachu wynosi $0,096 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Okna i drzwi balkonowe wykonane z PCV mają atesty budynków pasywnych o współczynniku $U = 0,71 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ dla ramy oraz dla szyby $U = 0,60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

System wentylacyjny w domu pasywnym stanowił układ wentylacji mechanicznej składający się z: centrali nawiewno-wywiewnej z rekuperatorem, kanałów nawiewnych i wywiewnych, gruntowego wymiennika ciepła, czepni i wyrzutni zużytego powietrza.

OBLICZENIA ZAPOTRZEBOWANIA CIEPŁA BUDYNKU¹

Różnice konstrukcyjne pomiędzy budownictwem tradycyjnym a pasywnym skutkują odmiennym zużyciem energii cieplnej podczas eksploatacji tych obiektów. W celu zaprezentowania tych różnic przeprowadzono obliczenia zapotrzebowania na ciepło. Obliczenia OZC wykonano przy zastosowaniu programu KAN OZC autorstwa Piotra Wereszczyńskiego. Założono, że obiekt zlokalizowany jest w IV strefie klimatycznej (stacja meteorologiczna – Olsztyn, stacja aktywnościowa – Mikołajki), co oznaczało przyjęcie projektowej temperatury zewnętrznej -22°C oraz średniej rocznej temperatury zewnętrznej $6,9^\circ\text{C}$. Wyniki obliczeń zapotrzebowania ciepła analizowanego budynku przedstawiono w tabl. 1.

Jak wynika z tabl. 1 przy porównywalnej powierzchni i kubaturze w budynku tradycyjnym zapotrzebowanie ciepłe jest

¹ Projekty budynków i obliczenia wykonano w ramach prowadzonego przez autora seminarium dyplomowego w Katedrze Inżynierii Środowiska na Wydziale Nauk Technicznych UWM. Szczególne podziękowania za zaangażowanie i wkład pracy składam Pani inż. Katarzynie Kula i Panu inż. Łukaszowi Popielarczykowi.

Tabl. 1. Porównawcze zestawienie obliczeń zapotrzebowania na ciepło dla budynku jednorodzinnego realizowanego w technologii pasywnej i tradycyjnej

Parametr obliczeń	Technologia pasywna	Technologia tradycyjna
Powierzchnia ogrzewana budynku A_h [m ²]	171,4	177,6
Kubatura ogrzewana budynku V_h [m ³]	432,4	456
Projektowa strata ciepła przez przenikanie Φ_T [W]	2 171	6 567
Projektowa wentylacyjna strata ciepła Φ_V [W]	269	3 574
Całkowita projektowa strata ciepła Φ [W]	2 449	10 116
Projektowe obciążenie cieplne budynku Φ_{HL} [W]	2 449	10 116
Projektowe obciążenie cieplne budynku Φ_{HL} odniesione do powierzchni $\Phi_{HL,A}$ [W/m ²]	14,3	56,9
Projektowe obciążenie cieplne budynku Φ_{HL} odniesione do kubatury $\Phi_{HL,V}$ [W/m ³]	5,7	22,2
Łączne zapotrzebowanie na energię z uwzględnieniem zysków ciepła i sprawności ich wykorzystania w ciągu roku Q_{HNd} [GJ/rok]	6,1	68,6

wielokrotnie większe niż w obiekcie pasywnym. W budynku tradycyjnym projektowa strata ciepła przez przenikanie trzykrotnie przewyższa analogiczną wielkość dla budynku pasywnego, wentylacyjna strata ciepła jest 13-krotnie wyższa, a obciążenie cieplne budynku prawie 5-krotnie. Łączne zapotrzebowanie na energię z modelu tradycyjnego jest ponad 10-krotnie wyższe. Oznacza to, że ogrzewanie obiektu pasywnego w znacznie mniejszym stopniu obciąża środowisko naturalne. Do budowy obiektu pasywnego konieczne są natomiast innego rodzaju produkty budowlane oraz większa ilość materiałów izolacyjnych. Ich wytworzenie oraz utylizacja po zużyciu stanowi istotne obciążenie środowiska. Przeprowadzenie szczegółowej analizy energetyczno-ekologicznej umożliwia porównanie obciążeń środowiska generowanych podczas produkcji i użytkowania tych dwóch rodzajów obiektów.

METODOLOGIA ANALIZY ENERGETYCZNO-EKOLOGICZNEJ

Charakterystyka energetyczno-ekologiczną wyrobu określa się zestawieniem wartości wybranych wskaźników kategorii oddziaływania na środowisko naturalne określających wyrób w pełnym cyklu istnienia. Można to przedstawić w postaci wzoru [3]:

$$\mathbf{F}^T(\mathbf{x}) = \left\{ \Omega_E, \Omega_M, \Omega_W, \Omega_{GWP}, \Omega_{ODP}, \Omega_{POCP}, \Omega_{AP}, \Omega_{EP}, \Omega_{HTP}, \Omega_{OTV}, \Omega_Q, \Omega_R \right\} \quad (1)$$

gdzie poszczególne elementy n -wymiarowego wektora kategorii oddziaływania na środowisko Ω są następujące:

- E – ubytek zasobów surowców energetycznych,
- M – ubytek zasobów abiotycznych,
- W – zużycie wody,
- GWP – globalny efekt cieplarniany,
- ODP – potencjał uszczuplania warstwy ozonowej,

$POCP$ – potencjał fotochemicznego utleniania w troposferze,

AP – potencjał zakwaszenia,

EP – potencjał eutrofizacji,

HTP – potencjał oddziaływania na ludzi,

OTV – potencjał wydzielania odorów w powietrzu,

Q – emisja ciepła do otoczenia,

R – emisja promieniowania jonizującego.

Obliczenia nakładów środowiskowych na produkcję różnego rodzaju materiałów oraz wyrobów budowlanych wykonały zespoły analityków według tzw. metodologii analizy w pełnym cyklu istnienia LCA (Life Cycle Assessment). W analizach tych uwzględniono między innymi procesy: wydobywania surowców (np. piasku, gliny, żwiru), transportu i przetwarzania surowców, obciążania związanego z funkcjonowaniem zakładów przetwórczych (np. produkcja ciepła, zużycie energii elektrycznej), zużycia wody, powstawania odpadów i ścieków. W celu wyznaczenia obciążenia środowiskowego dla konkretnego wyrobu budowlanego wykonywana jest szczegółowa inwentaryzacja jego procesu produkcyjnego. Ostateczne wyniki można znaleźć w opublikowanych zestawieniach tabelarycznych [3].

W dalszej części artykułu porównane będzie zużycie energii pierwotnej, wody oraz emisji CO₂ w procesach produkcji, a także eksploatacji budynku pasywnego i tradycyjnego.

WYNIKI ANALIZ

Rozpoczynając analizę energetyczno-ekologiczną interesującego nas obiektu, należy określić ilość materiałów potrzebnych do jego budowy. Następnie korzystając z tabel zawierających wskaźniki obciążenia środowiska [3] można obliczyć sumaryczne wielkości zużycia energii, ilości surowców mineralnych, zużycia wody, a także emisji CO₂ (tzw. potencjał cieplarniany) przy produkcji potrzebnej do budowy danego obiektu materiałów i wyrobów. Wyniki obliczeń dla domów w technologii pasywnej i tradycyjnej przedstawiono w tabl. 2 i 3.

Tabl. 2. Zestawienie nakładów energetyczno-ekologicznych budynku jednorodzinnego w technologii pasywnej

Rodzaj produktu	Kategorie oddziaływania				
	Ilość produktu w obiekcie	Zużycie energii pierwotnej [MJ]	Zużycie surowców mineralnych [kg]	Zużycie wody [dm ³]	Potencjał cieplarniany [kg CO ₂]
Wełna mineralna	727 kg	10 221,9	1187,2	7 706,4	1039,6
Ceramika	0 kg	0	0	0	0
Beton komórkowy	49 150,2 kg	39 025,3	44 235,18	33 815,3	6 546,8
Farba	305,6 kg	9 015,1	168,1	13 751,8	508,2
Zaprawa murarska	20 070,2 kg	24 485,6	22 017	14 811,8	3 725
Styropian	6 051 kg	496 181,4	18,2	1 062	15 248,5
Drewno budowlane	9 927,5 kg	4 963,8	198,6	118 137,2	-23 984,8
Cement	39 962,7 kg	51 951,5	43 958,9	27 973,9	36 765,7
Piasek	256 228,8 kg	87 117,8	266 990,4	0	512,5
Stal zbrojeniowa	3 641,4 kg	1 638,6	1 274,5	83 752,2	6 953,6
Pustak	21 006,1 kg	75 958	33 273,6	5 251,5	11 070,2
Okno PCV	30,6 m ²	63 270	2 222,6	22 518,8	2 077,3

Tabl. 3. Zestawienie nakładów energetyczno-ekologicznych budynku jednorodzinnego w technologii tradycyjnej

Rodzaj produktu	Kategorie oddziaływania				
	Ilość produktu w obiekcie	Zużycie energii pierwotnej [MJ]	Zużycie surowców mineralnych [kg]	Zużycie wody [dm ³]	Potencjał cieplarniany [kg CO ₂]
Wełna mineralna	5 396,9 kg	75 879,7	8 813,1	57 206,6	7 717,5
Ceramika	70 048 kg	255 855,3	112 076,8	17 652,1	37 355,6
Beton komórkowy	72 217,2 kg	57 340,5	64 955,5	49 685,4	9 619,3
Farba	233,8 kg	6 896,9	128,6	10 520,6	388,8
Zaprawa murarska	42 443,3 kg	51 780,9	46 560,3	31 323,2	7 877,48
Styropian	581 kg	47 647,7	1,74	102	1 464,3
Drewno budowlane	3 835,7 kg	1 917,9	76,7	45 644,8	-9 267,1
Cement	31 574,2 kg	41 046,3	34 731,5	22 101,9	29 048,2
Piasek	185 696,7 kg	63 136,9	193 496	0	371,4
Stal zbrojeniowa	1 285,5 kg	578,5	449,9	29 566,9	2 307,5
Pustak	17 570,5 kg	63 535	27 831,7	4 392,6	9 259,7
Okno PCV	26,6 m ²	48 518	1 622,6	15 670,3	1 660,1

Nakład środowiskowy na produkcję obiektu

Zestawienie porównawcze zużycia energii przy „produkcji” porównywanych obiektów przedstawiono w tabl. 4.

Zestawienie porównawcze zużycia energii przy eksploatacji porównywanych obiektów przedstawiono w tabl. 5.

Dane przedstawione w tabl. 4 i 5 opatrzyć należy następującym wyjaśnieniami. Zapotrzebowanie na energię podczas eksploatacji przedstawione w tabl. 5 wynika z bilansu cieplnego budynku uwzględniającego zyski ciepła od promieniowania

słonecznego, mieszkańców oraz straty ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne. Natomiast wartość ta nie uwzględnia sprawności systemu wytwarzania, transportu i akumulacji ciepła. Nie jest też brany pod uwagę wskaźnik energii pierwotnej, który zależy od rodzaju wykorzystywanego paliwa oraz stopnia wykorzystania energii odnawialnych. Szczegółowa analiza porównawcza nakładów energii przy zastosowaniu różnych systemów grzewczych w budownictwie pasywnym mogłaby stanowić przedmiot odrębnego opracowania.

Tabl. 4. Sumaryczne wartości oddziaływań na środowisko przy „produkcji” obiektów

Kategorie oddziaływania	Technologia		Różnica pasywna – tradycyjna wyrażona w (%)
	pasywna	tradycyjna	
Zużycie energii pierwotnej [MJ]	863 829	714 164	149 665 (17,3%)
Zużycie surowców mineralnych [kg]	415 544	490 787	-75 243 (-18%)
Zużycie wody [dm ³]	328 781	297 344	31 437 (9,6%)
Potencjał cieplarniany [kg CO ₂]	60 045	97 782	-37 737 (-62,8%)

Tabl. 5. Sumaryczne wartości oddziaływań na środowisko podczas rocznej eksploatacji obiektów

Kategorie oddziaływania	Technologia	
	pasywna	tradycyjna
Zapotrzebowanie na energię [MJ/rok]	6 080	68 580
Zapotrzebowanie na energię [kWh/rok]	1 688	19 050
Jednostkowe zapotrzebowanie na energię [kWh/m ² rok]	9,84	107

DYSKUSJA WYNIKÓW

Przy produkcji analizowanego przykładowego obiektu pasywnego zużycie energii pierwotnej okazało się o 17%, zaś zużycie wody o 10% wyższe niż w przypadku obiektu tradycyjnego. Natomiast w budynku pasywnym zużycie surowców mineralnych było o 18% niższe, a emisja dwutlenku węgla przy produkcji materiałów aż o 62% niższa. Szczegółowe dane dla poszczególnych materiałów budowlanych wykorzystywanych w obu obiektach zawarte w tabl. 2 i 3 pozwalają dokładniej przeanalizować te różnice. Stosunkowo wysokie zużycie energii pierwotnej oraz wysoka emisja CO₂ w budynku tradycyjnym wynika z zastosowania w nim ceramiki (cegły klinkierowej) jako trzeciej warstwy ścian zewnętrznych. Zastąpienie tego materiału innym, siatką i tynkiem strukturalnym, obniżyłoby obciążenie środowiska przy produkcji obiektu tradycyjnego.

W procesie produkcji materiałów dla zaprojektowanego budynku pasywnego ponad połowę energii pierwotnej wykorzystano do produkcji styropianu. Znaczny wpływ na wielkość strumienia końcowego energii miały również: piasek, pustak stropowy, a także specjalne okna pasywne. Niska emisja dwutlenku węgla przy produkcji budynku pasywnego wiąże się z większym w stosunku do budynku tradycyjnego wykorzystaniem drewna. Drewno jako materiał budowlany w analizie kosztu energetycznego wytworzenia charakteryzuje się ujemnym wskaźnikiem potencjału cieplarnianego wynoszącym – 2,416 kg CO₂/kg.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule analizy obrazują, jak złożona jest odpowiedź na pytanie o to, jaki rodzaj budownictwa jest przyja-

zny środowisku. Charakterystyką definiującą budownictwo pasywne jest niskie zapotrzebowanie na energię przy eksploatacji, jednakże produkcja niektórych wykorzystywanych w nim materiałów wyraźnie obciąża środowisko. W artykule porównano przykładowe projekty domu tradycyjnego i pasywnego, z których każdy zawierał materiały wyraźnie obciążające środowisko pod którymś z analizowanych względów (wysokiego zużycia energii pierwotnej, wody lub wysokiej emisji CO₂). W obu technologiach możliwy jest wybór projektów opartych na innych materiałach. Analiza energetyczno-ekologiczna jest przydatnym narzędziem w dokonywaniu takich wyborów.

LITERATURA

1. Górzyński J.: Obciążenia środowiska w produkcji wyrobów budowlanych. Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2004.
2. Górzyński J., Piasecki M.: Charakterystyki energetyczno-ekologiczne wyrobów budowlanych. Materiały budowlane, nr 8/2004.
3. Górzyński J.: Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów. Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2009.
4. Pogorzelski J.: Budownictwo ogólne fizyka budowli. Tom 2. Arkady, Warszawa 2009.
5. Prejzner H., Górzyński J.: Przyjazne dla środowiska wyroby budowlane istotnym składnikiem zrównoważonego rozwoju. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 9, 2002.
6. Wesołowski M., Skotnicka A., Wierciński Z.: Analiza Energii i Egzergii domu niskoenergetycznego i pasywnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, 2009.
7. Zbijowski K. (redakcja) Wydanie I : Świadełwa charakterystyki energetycznej budynku. Metodyka „Krok po kroku” część 1. Budynek mieszkalny.