

Robert OLENIACZ<sup>1</sup>  
Magdalena KASIECZUK<sup>2</sup>  
Mateusz RZESZUTEK<sup>3</sup>

## OCENA EFEKTÓW TERMOMODERNIZACJI BUDYNKÓW JEDNORODZINNYCH. 1. ZMNIEJSZENIE ZUŻYCIA CIEPŁA I EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ DO POWIETRZA

Jednym z działań pozwalających na ograniczenie emisji zanieczyszczeń do powietrza z sektora mieszkalnego jest zmniejszenie zapotrzebowania na energię, co najprościej można uzyskać poprzez przeprowadzenie jego termomodernizacji. W pracy przeanalizowano kilka możliwych wariantów termomodernizacji budynku mieszkalnego charakterystycznego dla budownictwa jednorodzinne z lat 70. i 80. XX wieku w Polsce (wymiana okien, docieplenie ścian zewnętrznych, docieplenie stropodachu i wszystkie ww. działania połączone z wymianą instalacji grzewczej). Każdy z rozpatrywanych wariantów oceniono pod kątem zapotrzebowania na ciepło oraz emisji podstawowych zanieczyszczeń powietrza. W ocenie uwzględniono zużycie ciepła na ogrzewanie, wentylację oraz przygotowanie ciepłej wody użytkowej przy założeniu, że analizowany budynek jest opalany węglem i znajduje się w III strefie klimatycznej (projektowa temperatura zewnętrzna - 20°C, średnia roczna temperatura zewnętrzna +7,6°C). W okresie pozagrzewczym przyjęto codzienne uruchamianie kotła na dwie godziny w celu wytworzenia ciepłej wody użytkowej. Obliczenia emisji zanieczyszczeń do powietrza wykonano dla SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, B(a)P i PCDD/F z wykorzystaniem odpowiednich wskaźników emisji rekomendowanych przez Europejską Agencję Ochrony Środowiska. Zmniejszenie całkowitego zapotrzebowania na ciepło w paliwie oraz emisji zanieczyszczeń do powietrza uzyskano na poziomie ok. 3 % w przypadku przeprowadzenia tylko wymiany okien, ponad 26 % w przypadku ocieplenia ścian zewnętrznych lub stropodachu oraz o ok. 59 % w przypadku realizacji wszystkich tych działań na raz w połączeniu z zastosowaniem bardziej sprawnego kotła.

**Słowa kluczowe:** budynek mieszkalny, termomodernizacja, poprawa efektywności energetycznej, kocioł małej mocy, spalanie węgla, redukcja niskiej emisji

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Robert Oleniacz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. + 48 12 6174503, e-mail: oleniacz@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Magdalena Kasieczuk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, e-mail: mkasiet@agh.edu.pl

<sup>3</sup> Mateusz Rzeszutek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, e-mail: rzeszut@agh.edu.pl

## 1. Wstęp

Zmniejszenie zapotrzebowania na energię w budownictwie jednorodzinym możliwe jest poprzez wzrost efektywności energetycznej budynku i stopnia wykorzystania energetyki prosumenckiej opartej na rozproszonych i dostępnych lokalnie odnawialnych źródłach energii [6]. W przypadku budynków o niskiej izolacyjności termicznej najlepsze efekty w tym zakresie uzyskiwane są poprzez przeprowadzenie ich kompleksowej termomodernizacji. Oprócz ewidentnych korzyści ekonomicznych przynosi to także poprawę mikroklimatu i komfortu cieplnego oraz dodatkowe efekty środowiskowe związane np. z ograniczeniem emisji zanieczyszczeń do powietrza [8, 20]. Znane są publikacje z tego zakresu, analizujące prace termomodernizacyjne z uwzględnieniem różnych aspektów zrównoważonego rozwoju i konkretnych efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych [1, 5, 10, 19] czy oceniające wpływ budynku jednorodzinnego na środowisko za pomocą analizy cyklu życia [7]. Z kolei w pracy [16] skoncentrowano się wyłącznie na porównaniu potrzeb energetycznych budynku mieszkalnego jednorodzinnego w zależności od jego izolacyjności cieplnej oraz przyjętych rozwiązań systemów grzewczych z uwzględnieniem całkowitego rocznego kosztu energii (cieplnej i elektrycznej) dostarczanej do budynku. Efekty ograniczenia niskiej emisji z sektora mieszkalnego przy pomocy zabiegów termomodernizacji nie były do tej pory jednak szczegółowo oceniane z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów systemu ogrzewania, warunków meteorologicznych i obliczeń dyspersji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym z wykorzystaniem zaawansowanego modelu.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki tego typu oceny, zmierzającej do określenia możliwego stopnia zmniejszenia zapotrzebowania na energię końcową i redukcji emisji zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego dla przykładowego budynku jednorodzinnego opalanego węglem kamiennym, cechującego się słabą izolacją termiczną. Ocenę tę przeprowadzono dla różnych założonych wariantów termomodernizacyjnych z uwzględnieniem emisji następujących substancji zanieczyszczających powietrze: dwutlenku siarki ( $\text{SO}_2$ ), dwutlenku azotu ( $\text{NO}_2$ ), tlenku węgla ( $\text{CO}$ ), pyłu drobnego  $\text{PM}_{10}$ , benzo(a)pirenu ( $\text{B(a)P}$ ) oraz polichlorowanych dibenzo-*p*-dioksyn i dibenzofuranów ( $\text{PCDD/F}$ ). Została ona następnie wykorzystana do oceny stopnia ograniczenia oddziaływania zespołu tego typu budynków na jakość powietrza w wyniku zastosowania poszczególnych wariantów. Wyniki tej oceny zamieszczono już jednak w osobnym artykule [9], stanowiącym drugą część niniejszego pracy.

W pracach [3 i 4] podobna metodyka obliczeniowa została zastosowana do kompleksowej oceny wielkości emisji pyłu drobnego  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2,5}$  w latach 2006-2007 ze źródeł ciepła małej mocy (stosowanych na potrzeby ogrzewania mieszkań) dla 241 gmin obszaru przygranicznego województw: śląskiego, opolskiego i dolnośląskiego, a także wpływu tej emisji na jakość powietrza w tym regionie. Zwrócono w nich uwagę m.in. na silny wpływ temperatury powietrza

atmosferycznego na zapotrzebowanie na ciepło (zwłaszcza w przypadku budynków słabo izolowanych termicznie) oraz istotny udział niskiej emisji w kształtowaniu sytuacji smogowych obserwowanych podczas niekorzystnych sytuacji meteorologicznych w rejonie niektórych stałych punktów pomiarowych monitoringu powietrza.

## 2. Charakterystyka obiektu badań i założonych wariantów termomodernizacyjnych

Jako obiekt badań wybrano przykładowy budynek mieszkalny jednorodzinny (zamieszkiwany przez rodzinę 4-osobową), murowany, dwukondygnacyjny, podpiwniczony, z dachem płaskim – o charakterystycznej bryle „kostki” typowej dla lat 70. i 80. XX wieku [15]. Przyjęte wymiary budynku to: wysokość – 8 m, długość – 10 m, szerokość – 11 m, wysokość kondygnacji w świetle – 2,5 m, całkowita – 2,7 m, kubatura wewnętrzna – 449,3 m<sup>3</sup>, kubatura zewnętrzna – 584,1 m<sup>3</sup>. Na parterze znajduje się wiatrołap, kuchnia z oknem, dwa pokoje, WC, pomieszczenie gospodarcze oraz garaż, natomiast na piętrze – trzy pokoje, łazienka z oknem i WC.

W budynku tym założono zastosowanie wodnego ogrzewania rurowego, zasilanego z kotła stalowego wodnego o sprawności 70 % i mocy nominalnej 24 kW, opalanego węglem kamiennym o wartości opałowej 24 MJ/kg. Przyjęto ponadto, że elementy grzejne stanowią grzejniki członowo-płytowe bez regulacji miejscowej, a instalacja grzewcza pełni również funkcję przygotowania ciepłej wody użytkowej z wykorzystaniem w charakterze urządzenia pomocniczego pompy obiegowej.

Z uwagi na niską pierwotną izolacyjność termiczną analizowanego budynku (nieocieplone ściany i stropodach, podwójne drewniane okna starego typu) zaproponowano kilka wariantów prac termomodernizacyjnych mających na celu istotne obniżenie zapotrzebowania na energię. Przykładowo w wariantcie  $W_1$  założono przeprowadzenie tylko wymiany stolarki okiennej, wariant  $W_2$  uwzględnił ocieplenie ścian zewnętrznych, a wariant  $W_3$  przewidywał docieplenie stropodachu. W najbardziej rozbudowanym wariantcie  $W_4$  zostały połączone ze sobą działania zaproponowane w wariantach  $W_1$ - $W_3$  i przewidziano dodatkowo wymianę instalacji grzewczej, w tym zastosowanie kotła węglowego o większej sprawności (82 %) i odpowiednio mniejszej mocy wynikającej ze zredukowanego zapotrzebowania na ciepło. W tabeli 1 scharakteryzowano stan początkowy i poszczególne przyjęte warianty prac termomodernizacyjnych w zakresie rodzaju stosowanych przegród i ich stopnia izolacyjności termicznej.

Tabela 1. Charakterystyka stanu początkowego i poszczególnych wariantów prac termomodernizacyjnych dla analizowanego budynku

Table 1. Characteristic of the baseline and individual variants of thermal renovation works for the analysed building

Wariant	Opis	Założenia dotyczące przegród	Współczynnik przenikania ciepła $U$ [W/m <sup>2</sup> ·K]
W <sub>0</sub>	stan początkowy	strop żelbetowy kanałowy ŻERAN o grubości 22 cm	1,8
		ściany z pustaków z betonu komórkowego typu SIPOREX o grubości 24 cm	1,2
		okna podwójne drewniane	2,6
		piwnica nieogrzewana	0,33
W <sub>1</sub>	wymiana okien	okna PCV z 3-komorowym systemem profili	1,4
W <sub>2</sub>	ocieplenie ścian	warstwa styropianu o grubości 12 cm	0,261
W <sub>3</sub>	docieplenie stropodachu	warstwa styropianu o grubości 15 cm	0,258
W <sub>4</sub>	stan końcowy	suma prac z zakresu wariantów W <sub>1</sub> -W <sub>3</sub> oraz wymiana instalacji grzewczej (w tym zastosowanie bardziej sprawnego i mniejszego kotła)	-

### 3. Ocena zmian zapotrzebowania na ciepło

Na potrzeby określenia emisji zanieczyszczeń do powietrza z analizowanego budynku i zmian tej emisji w wyniku zaproponowanych prac termomodernizacyjnych, najpierw obliczono roczne zapotrzebowanie na ciepło użytkowe dla poszczególnych rozpatrywanych wariantów. Obliczenia te wykonano częściowo z wykorzystaniem oprogramowania Audytor OZC 6.0 Pro, bazującego na metodzie wynikającej z rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku [18] z uwzględnieniem rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [17] oraz szereg norm krajowych i europejskich [11-14].

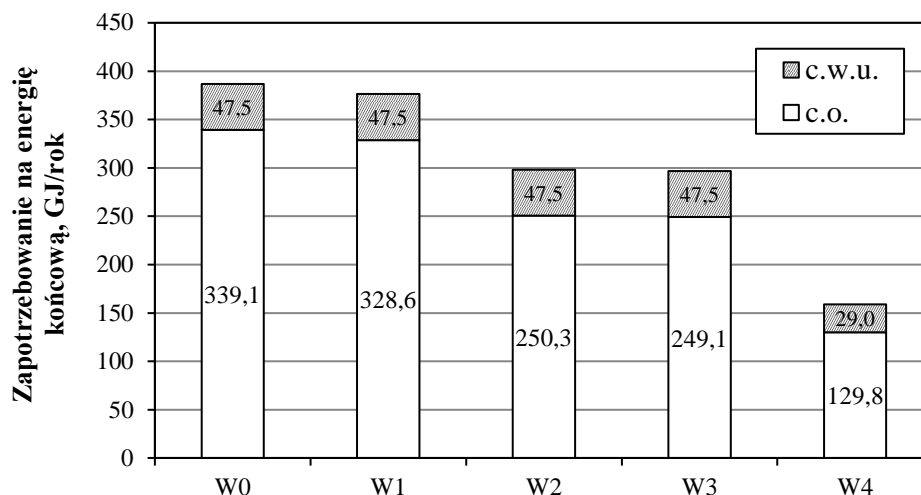
Zakres obliczeń obejmował m.in. roczne zapotrzebowanie na energię końcową bez urządzeń pomocniczych (z uwzględnieniem całkowitej sprawności instalacji) na cele centralnego ogrzewania i wentylacji (c.o.) oraz do przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). W obliczeniach zapotrzebowania na ciepło na cele c.o. uwzględniono geometrię budynku i przyjęte dla poszczególnych

wariantów parametry przegród budowlanych w celu określenia strat przez przenikanie i wentylację oraz zysków ciepła (wewnętrznych i od słońca), a także sprawności ich wykorzystania. Założono, że analizowane osiedle budynków znajduje się w III strefie klimatycznej, w przypadku której projektowa temperatura zewnętrzna wynosi  $-20^{\circ}\text{C}$ , natomiast średnia roczna temperatura zewnętrzna wynosi  $+7,6^{\circ}\text{C}$ .

W obliczeniach zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w. założono całoroczny okres użytkowania budynku. Zapotrzebowanie to jest dużo niższe w stosunku do potrzeb grzewczych, nie mniej jednak istotne. Przyjęto, że działania termomodernizacyjne zaproponowane w ramach wariantów  $W_1$ ,  $W_2$  i  $W_3$  nie wpływają na zmiany tego zapotrzebowania. Jedynie w przypadku wariantu  $W_4$ , w którym założono m.in. wymianę kotła na bardziej sprawny i o mniejszej mocy, uwzględniono pewną redukcję zapotrzebowania na energię końcową do przygotowania c.w.u. Z drugiej strony w okresie pozagrzewczym uwzględniono zmniejszenie całkowitej sprawności instalacji c.w. wynikające z konieczności codziennego krótkotrwałego użytkowania kotła (założono, że będzie on wówczas rozpalany na ok. 2 godziny dziennie). Zapotrzebowanie na energię w paliwie w okresie, w którym kocioł jest uruchamiany tylko w celu wytwarzania c.w. określono przy założeniu, że zużycie węgla wynosi 10 kg/dzień (warianty  $W_0$ - $W_3$ ) lub 5 kg/dzień (wariant  $W_4$ ). Skutkuje to większym rocznym zapotrzebowaniem na energię końcową niż wychodzi z obliczeń wykonywanych zgodnie z [18] przy założeniu ciągłej pracy kotła. Zwiększenie to wydaje się być jednak uzasadnione z uwagi na przyjęty sposób eksploatacji kotła (codzienne uruchamianie i wygaszanie).

Obliczone roczne zapotrzebowanie analizowanego budynku na energię końcową (na cele c.o. i c.w.u.) dla stanu początkowego (wariant  $W_0$ ) i poszczególnych wariantów termomodernizacyjnych porównano ze sobą na rys. 1. Zmienność średnich rocznych wskaźników jednostkowego zapotrzebowania na energię końcową na cele c.o. i c.w.u. (w odniesieniu do kubatury zewnętrznej budynku) uzyskano na poziomie odpowiednio od ok. 18,4 i 2,6  $\text{W}/\text{m}^3$  dla wariantu  $W_0$  do ok. 7,0 i 1,6  $\text{W}/\text{m}^3$  dla wariantu  $W_4$ .

Jak wynika z rys. 1, wymiana starych okien drewnianych na współczesne okna PVC (wariant  $W_1$ ) przynosi zmniejszenie zapotrzebowania na cele c.o. w stosunku do stanu początkowego jedynie o ok. 3 %. Zdecydowanie większą oszczędność (o nieco ponad 26 %) umożliwia ocieplenie ścian zewnętrznych (wariant  $W_2$ ) lub stropodachu (wariant  $W_3$ ). Wykonanie wszystkich tych prac termomodernizacyjnych oraz zastosowanie bardziej sprawnego kotła węglowego pozwala na osiągnięcie redukcji rocznego zapotrzebowania na energię końcową na cele c.o. o prawie 62 %, a na wytwarzanie c.w.u. o prawie 19 % w stosunku do stanu początkowego. Całkowite zmniejszenie rocznego zapotrzebowania na energię w paliwie oszacowano na poziomie ok. 59 %.



Rys. 1. Zmienność rocznego zapotrzebowania na energię końcową na cele centralnego ogrzewania i wentylacji (c.o.) i do przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) dla poszczególnych wariantów

Fig. 1. Variability of the annual final energy demand for the purposes of central heating and ventilation (c.o.) and for preparing domestic hot water (c.w.u.) for each variant

## 4. Obliczenie emisji zanieczyszczeń do powietrza

### 4.1. Emisja całkowita roczna

Obliczenia emisji zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego zostały przeprowadzone dla wybranych substancji charakterystycznych dla procesu spalania węgla z uwzględnieniem określonego w rozdziale poprzednim zapotrzebowania budynku na energię końcową oraz wskaźników emisji rekomendowanych przez Europejską Agencję Ochrony Środowiska (European Environment Agency – EEA) dla domowych kotłów małej mocy, opalanych węglem kamiennym [2]. Zestawienie tych substancji i przyjętych wskaźników emisji zamieszczono w tabeli 2.

Wyniki obliczeń całkowitych rocznych emisji rozpatrywanych zanieczyszczeń otrzymane dla poszczególnych wariantów przedstawiono w tabeli 3. Stopień redukcji tej emisji otrzymano na poziomie analogicznym, jak stopień redukcji sumarycznego zapotrzebowania na energię końcową na cele c.o. i c.w.u.

Tabela 2. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń przyjęte dla analizowanego kotła węglowego [2]

Table 2. Air pollutant emission factors adopted for the analyzed coal boiler [2]

Rodzaj substancji	SO <sub>x</sub> (SO <sub>2</sub> )	NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> )	CO	PM10	B(a)P	PCDD/F
Jednostka	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	mg/GJ	ngTEQ/GJ
Wskaźnik emisji	404	900*	110	4600	230	800

\* wskaźnik emisji odpowiadający 1,2% zawartości siarki w węglu, wartości opałowej węgla 24 MJ/kg oraz średniemu współczynnikowi zatrzymania siarki w popiele na poziomie 0,1

Tabela 3. Całkowite roczne emisje wybranych zanieczyszczeń do powietrza z rozpatrywanego budynku w zależności od wariantu

Table 3. Total annual emissions of selected pollutants into the air from the considered building depending on the variant

Wariant	Emisja całkowita						Emisja względna %
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	PM10	B(a)P	PCDD/F	
	kg/rok	kg/rok	kg/rok	kg/rok	g/rok	μgTEQ/rok	
W0	347,9	42,53	1778	156,2	88,92	309,3	100,0
W1	338,5	41,37	1730	151,9	86,50	300,9	97,3
W2	268,0	32,76	1370	120,3	68,49	238,2	77,0
W3	266,9	32,63	1364	119,8	68,22	237,3	76,7
W4	142,9	17,47	730	64,2	36,52	127,0	41,1

#### 4.2. Emisja średnia godzinna i jej zmienność w okresie roku

W celu określenia zmienności emisji zanieczyszczeń w sezonie grzewczym i pozagrzewczym, niezbędnej m.in. w obliczeniach ich dyspersji w powietrzu, całkowita emisja roczna poszczególnych substancji została odpowiednio rozłożona w czasie umownego roku w przyjętym okresie jej zachodzenia (okresie eksploatacji kotła) w zależności od temperatury zewnętrznej (intensywności ogrzewania). Uwzględniono tutaj następujące założenia (kryteria):

- w okresie grzewczym budynek jest ogrzewany co najwyżej w godzinach od 7:00 do 24:00 i tylko wtedy, gdy temperatura powietrza atmosferycznego jest mniejsza niż 10°C przez co najmniej 3 godziny; w tym czasie wytwarzana jest też ciepła woda użytkowa (kryterium K<sub>1</sub>),
- w okresie pozagrzewczym kocioł jest użytkowany tylko w godz. 18:00-20:00 w celu wytwarzania c.w.u. (kryterium K<sub>2</sub>).

Występowanie ww. kryteriów przeanalizowano w okresie umownego roku (rok 2012) z uwzględnieniem danych meteorologicznych dla rejonu Krakowa. Liczba dni w roku, dla których zostało spełnione kryterium K<sub>1</sub> wyniosła 212 (sezon grzewczy), a dla których zostało spełnione kryterium K<sub>2</sub> – 154 (sezon pozagrzewczy).

W celu uwzględnienia zmienności emisji w ciągu roku dla jednogodzinnego kroku obliczeniowego, wyznaczono zależność pomiędzy emisją uśrednioną dla okresu jednej godziny i temperaturą zewnętrzną ( $t_o$ ). Najpierw obliczono względny współczynnik obciążenia cieplnego budynku ( $n_{i,j}$ ) w funkcji przyjętych przedziałów temperatur, korzystając z zależności (1) i (2):

$$n_{i,j} = \frac{\Phi_{i,j}}{\Phi_{i,min}} \quad (1)$$

gdzie:  $n_{i,j}$  – względny współczynnik obciążenia cieplnego budynku dla  $i$ -tego wariantu i  $j$ -tego przedziału temperatur zewnętrznych,

$\Phi_{i,min}$  – średnie projektowe obciążenie cieplne budynku dla  $i$ -tego wariantu i najniższego przedziału temperatur zewnętrznych występującego w rozpatrywanym roku:  $-25^{\circ}\text{C} < t_o \leq -20^{\circ}\text{C}$  [kW],

$\Phi_{i,j}$  – średnie projektowe obciążenie cieplne budynku dla  $i$ -tego wariantu i  $j$ -tego przedziału temperatur zewnętrznych [kW]:

$$\bar{\Phi}_{i,j} = \frac{\Phi_{H,L,Tp} - \Phi_{H,L,Tk}}{2} \quad (2)$$

gdzie:  $\Phi_{H,L,Tp}$  – projektowe obciążenie cieplne dla zadanej temperatury początkowej przedziału [kW],

$\Phi_{H,L,Tk}$  – projektowe obciążenie cieplne dla zadanej temperatury końcowej przedziału [kW].

Współczynnik  $n_{i,j}$  obrazuje stopień zmniejszenia obciążenia cieplnego kotła i maksymalnej emisji jednogodzinnej w zależności od występującego przedziału temperatur zewnętrznych. Przyjmuje on wartość równą 1 dla najniższego przedziału temperatur ( $-25^{\circ}\text{C} < t_o \leq -20^{\circ}\text{C}$ ).

Następnie określono emisje jednogodzinne rozpatrywanych substancji dla poszczególnych przedziałów temperatur otoczenia, osobno dla kresu grzewczego (zgodnie z kryterium  $K_1$ ) i pozagrzewczego (zgodnie z kryterium  $K_2$ ). W tym celu wykorzystano następujące zależności:

$$E_{n,i,j,K1} = \frac{n_{i,j}}{\sum_{j=1}^j n_{i,j} \cdot \tau_j} \cdot (E_{n,c.o.,K1} + E_{n,c.w.u.,K1}) \quad (3)$$

$$E_{n,i,K2} = \frac{E_{n,c.w.u.,K2}}{\tau_{K2} \cdot \tau_d} \quad (4)$$



gdzie:  $E_{n,i,j,K_1}$  – emisja  $n$ -tej substancji w okresie grzewczym (zgodnie z kryterium  $K_1$ ) uśredniona w czasie jednej godziny dla  $i$ -tego wariantu i  $j$ -tego przedziału temperatur [kg/h],

$\tau_j$  – częstość występowania temperatury otoczenia w  $j$ -tym przedziale temperatur w rozpatrywanym okresie [h/rok],

$E_{n,c.o.,K_1}$  – całkowita roczna emisja  $n$ -tej substancji w okresie grzewczym (kryterium  $K_1$ ) wynikająca ze zużycia paliwa na cele c.o. [kg/rok],

$E_{n,c.w.u.,K_1}$  – całkowita roczna emisja  $n$ -tej substancji w okresie grzewczym ( $K_1$ ) wynikająca ze zużycia paliwa do przygotowania c.w.u. [kg/rok],

$E_{n,i,K_2}$  – emisja  $n$ -tej substancji w okresie pozagrzewczym (zgodnie z kryterium  $K_2$ ) uśredniona w czasie jednej godziny dla  $i$ -tego wariantu [kg/h],

$E_{n,c.w.u.,K_2}$  – całkowita roczna emisja  $n$ -tej substancji w okresie pozagrzewczym ( $K_2$ ) wynikająca ze zużycia paliwa do przygotowania c.w.u. [kg/rok],

$\tau_{K_2}$  – liczba dni w roku występowania okresu pozagrzewczego [d/rok],

$\tau_d$  – czas pracy kotła w ciągu doby w okresie pozagrzewczym [h/d].

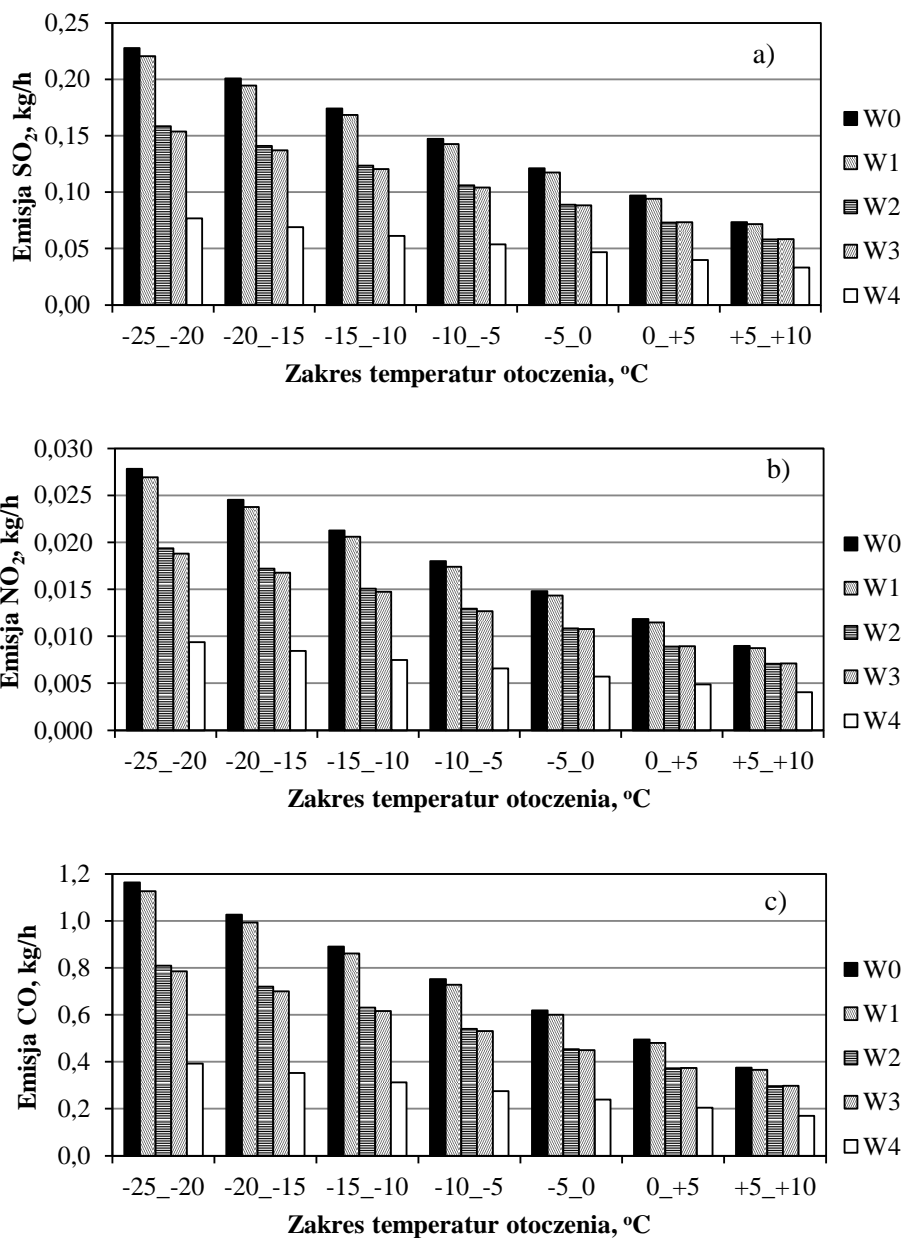
Czasy występowania przyjętych przedziałów temperatur zewnętrznych oraz względne współczynniki obciążenia cieplnego budynku dla poszczególnych wariantów przedstawiono w tabeli 4. Z kolei porównanie poszczególnych wariantów w zakresie jednogodzinnych emisji rozpatrywanych zanieczyszczeń w okresie grzewczym (obliczonych dla poszczególnych przedziałów temperatur otoczenia) przedstawiono na rys. 2 i 3.

Tabela 4. Zestawienie czasów występowania przyjętych przedziałów temperatur zewnętrznych oraz względnych współczynników obciążenia cieplnego budynku dla poszczególnych wariantów

Table 4. Comparison of times of occurrence of the adopted external temperature ranges and relative coefficients of heat load of a building for respective variants

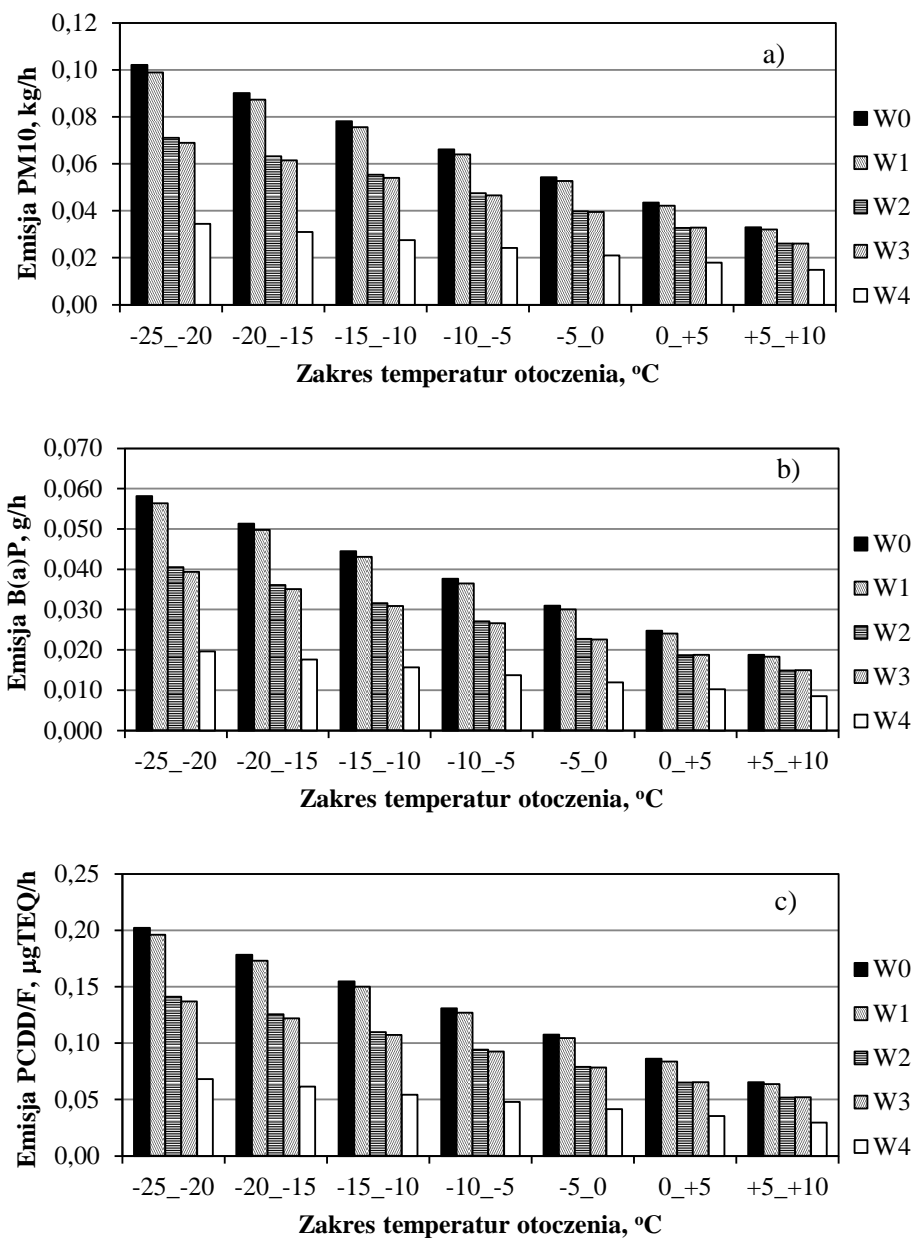
Temperatura otoczenia $t_o$ [°C]	Częstość występowania $\tau_j$ [h/rok] *	Współczynnik $n_{ij}$				
		$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$
$5 < t_o \leq 10$	968	0,323	0,324	0,366	0,379	0,432
$0 < t_o \leq 5$	1059	0,426	0,426	0,460	0,476	0,520
$-5 < t_o \leq 0$	485	0,532	0,533	0,560	0,573	0,609
$-10 < t_o \leq -5$	195	0,647	0,647	0,668	0,676	0,700
$-15 < t_o \leq -10$	206	0,765	0,764	0,779	0,784	0,797
$-20 < t_o \leq -15$	77	0,882	0,882	0,889	0,892	0,899
$-25 < t_o \leq -20$	9	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

\* w okresie grzewczym umownego roku w godzinach od 7:00 do 24:00 (zgodnie z kryterium  $K_1$ )



Rys. 2. Porównanie poszczególnych wariantów w zakresie średniej emisji jednogodzinnej SO<sub>2</sub> (a), NO<sub>2</sub> (b) i CO (c) do powietrza w okresie grzewczym

Fig. 2. Comparison of individual variants as regards average one-hour emission of SO<sub>2</sub> (a), NO<sub>2</sub> (b) and CO (c) into the air in the heating season



Rys. 3. Porównanie poszczególnych wariantów w zakresie średniej emisji jednogodzinnej PM10 (a), B(a)P (b) i PCDD/F (c) do powietrza w okresie grzewczym

Fig. 3. Comparison of individual variants as regards average one-hour emission of PM10 (a), B(a)P (b) i PCDD/F (c) into the air in the heating season

Z kolei średnie emisje jednogodzinne poszczególnych substancji towarzyszące eksploatacji kotła w okresie pozagrzewczym (w celu wytworzenia c.w.u.) określono na poziomie przedstawionym w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki obliczeń emisji zanieczyszczeń powietrza z rozpatrywanego budynku dla poszczególnych wariantów w sezonie pozagrzewczym

Table 5. Results of calculations of air pollutant emissions from the considered building for each variant outside of the heating season

Warianty	Emisja średnia w sezonie pozagrzewczym					
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	PM10	B(a)P	PCDD/F
	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	g/h	µgTEQ/h
W <sub>0</sub> -W <sub>3</sub>	0,1080	0,0132	0,552	0,0485	0,0276	0,0960
W <sub>4</sub>	0,0540	0,0066	0,276	0,0242	0,0138	0,0480

## 5. Podsumowanie

Budynki jednorodzinne opalane indywidualnie węglem kamiennym mogą stanowić istotne źródło emisji wielu zanieczyszczeń powietrza, w tym m.in. dwutlenku siarki, pył drobnego PM10 i benzo(a)pirenu. Jedną z najbardziej racjonalnych metod ograniczenia tej emisji (oprócz zmiany rodzaju spalanego paliwa) jest zmniejszenie zapotrzebowania budynku na ciepło użytkowe poprzez przeprowadzenie termomodernizacji.

Każdy z zaproponowanych wariantów prac termomodernizacyjnych odnoszących się do budynku typu „kostka” o niskiej izolacyjności termicznej przynosi pewne zmniejszenie tego zapotrzebowania w stosunku do stanu początkowego (wariant W<sub>0</sub>). Stosunkowo najmniejsze efekty w tym zakresie daje wymiana starych podwójnych okien drewnianych na klasyczne okna PCV z profilem 3-komorowym (wariant W<sub>1</sub>), a największe efekty – ocieplenie ścian zewnętrznych (wariant W<sub>2</sub>) lub stropodachu (wariant W<sub>3</sub>). W przypadku wykonania wszystkich tych prac jednocześnie oraz wymiany instalacji grzewczej, w tym zastosowania mniejszego i bardziej sprawnego kotła (wariant W<sub>4</sub>) można w przypadku tego typu budynku uzyskać redukcję rocznego zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń do powietrza o ok. 60 %.

*Praca powstała w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.008.*

## Literatura

- [1] Cwiężek M.: Audyt energetyczny wybranego obszaru miasta – metoda bilansowania potrzeb ciepłych oraz wyznaczania efektów energetycznych i ekologicznych wynikających z termomodernizacji, *Górnictwo i Środowisko*, z. 1, 2006, s. 73-95, Prace Naukowe GiG, Katowice, 2006.

- [2] EEA: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013, Technical report No 12/2013, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013> [dostęp: 31 marca 2014 r.].
- [3] Hławiczka S., Kliś Cz., Cenowski M., Strzelecka-Jastrząb E., Długosz J., Bronder J.: Nowe podejście do oceny niskiej emisji z ogrzewania mieszkań w kształtowaniu stężeń pyłu na obszarze gminy. I. Inwentaryzacja źródeł emisji i modelowanie emisji, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 47, 2011, s. 22-46.
- [4] Hławiczka S., Kliś Cz., Strzelecka-Jastrząb E., Cenowski M., Bronder J., Korszun K.: Nowe podejście do oceny niskiej emisji z ogrzewania mieszkań w kształtowaniu stężeń pyłu na obszarze gminy. II. Modelowanie stężeń pyłu, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 51, 2012, s. 22-46.
- [5] Jaworska-Michałowska M.: Ekologiczny aspekt termomodernizacji – wybrane zagadnienia, *Czasopismo Techniczne* z. 18 (rok 107), *Architektura* z. 8-A, 2010, s. 137-145, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
- [6] Kopietz-Unger J.: Zmniejszenie zapotrzebowania na energię poprzez wzrost efektywności energetycznej budynku i działania prosumenckie, *Przegląd Budowlany* nr 12, 2012, s. 44-52.
- [7] Król P., Firląg S., Węglarz A.: Zintegrowana ocena wpływu budynku jednorodzinnego na środowisko, *Rynek Instalacyjny*, nr 9, 2013, s. 21-25.
- [8] Norwicz J. (red.): *Termomodernizacja budynków dla poprawy jakości środowiska*, Biblioteka Fundacji Poszanowania Energii, Gliwice 2004.
- [9] Oleniacz R., Kasietczuk M., Rzesutek M.: Ocena efektów termomodernizacji budynków jednorodzinnych. 2. Zmniejszenie oddziaływania na jakość powietrza, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, t. XXXI, z. 61 (3/I/14), 2014, s. 197-215.
- [10] Piotrowska-Woroniak J., Woroniak G.: Efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne termomodernizacji budynku hotelowego w Białymstoku, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 3, nr 4, 2012, s. 185-194.
- [11] PN-B-02025: Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego, 2001.
- [12] PN-EN 12831: Instalacje ogrzewcze w budynkach - Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego, 2006.
- [13] PN-EN ISO 6946: Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania, 2008.
- [14] PN-EN ISO 13788: Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku - Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa - Metody obliczania, 2013.
- [15] *Podręcznik typologii budynków mieszkalnych z przykładami działań mających na celu zmniejszenie ich energochłonności*, Narodowa Agencja Poszanowania Energii SA, Warszawa 2011.
- [16] Siuta-Olcha A., Cholewa T. Guz Ł.: Analiza porównawcza potrzeb energetycznych jednorodzinnych budynków mieszkalnych o różnym standardzie wykonania. *Proceedings of ECOpole*, Vol. 5, No. 1, 2011, s. 287-292.

- [17] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2002, nr 75, poz. 690 z późn. zm.
- [18] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej, Dz.U. 2008, nr 201, poz. 1240 z późn. zm.
- [19] Ujma A., Lis A.: Elementy zrównoważonego rozwoju w termomodernizacji budynku wielorodzinnego, (w): Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, s. 376-389, praca zbior. pod red. T. Bobki, J. Rajczyka, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2010.
- [20] Zender-Świercz E., Piotrowski J.Z.: Thermomodernization a building and its impact on the indoor microclimate, Structure and Environment, vol. 5, No. 3, 2013, s. 37-40.

## ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF THERMAL RENOVATION OF DETACHED HOUSES. 1. REDUCTION OF HEAT CONSUMPTION AND POLLUTANT EMISSIONS INTO THE AIR

### Summary

One of the measures allowing to reduce the emissions of pollutants into the air from the housing sector is decrease in the energy demand, which can be most easily achieved by thermal renovations. This paper analyses some possible variants of thermomodernization of a residential building typical for single-family housing construction of the 1970s and 1980s in Poland (replacement of window frames, insulation of external walls, flat roof insulation and all of the above-mentioned measures together with heating system replacement). Each of the considered variants was assessed in respect to the heat demand and emission of basic pollutants into the air. The assessment also considered heat consumption for heating purposes, ventilation and preparation of domestic hot water assuming that the analysed building is coal-fired and situated in the 3rd climatic zone (the projected outside temperature  $-20^{\circ}\text{C}$ , the annual average outside temperature  $+7.6^{\circ}\text{C}$ ). It was assumed that outside of the heating season the boiler runs daily for two hours to produce domestic hot water. The calculations of pollutant emissions into the air were made for  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{B(a)P}$  and  $\text{PCDD/F}$  with the use of respective emission indicators recommended by the European Environment Agency. The achieved reduction in total heat demand in the fuel and in the emissions of pollutants into the air was at the level of ca. 3% for replacement of windows only, over 26% for insulation of external walls or the flat roof and ca. 59% for all of these measures done at the same time along with the use of a more efficient boiler.

**Keywords:** residential building, thermomodernization, improving energy efficiency, low-power boiler, coal combustion, low emission reduction

DOI:10.7862/rb.2014.55

*Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.*

*Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.*