

Anna LIS, Adam UJMA

Politechnika Częstochowska

## REDUKCJA EMISJI PYŁÓW ZAWIESZONYCH W WYNIKU POPRAWY IZOLACYJNOŚCI CIEPLNEJ PRZEGRÓD I ZMIANY NOŚNIKA ENERGII

W artykule przedstawiono problem emisji pyłów zawieszonych do atmosfery oraz ich wpływ na stan środowiska naturalnego i zdrowie człowieka. Na przykładzie wybranego budynku poddanego termomodernizacji, w którym dokonano poprawy izolacyjności cieplnej przegród oraz wymiany kotła węglowego na kocioł gazowy, zaprezentowano możliwość obniżenia emisji pyłu zawieszonego PM 2,5 i PM 10. Przedstawiono parametry charakterystyki energetycznej budynku przed i po termomodernizacji, a także oceniono wpływ działań mających na celu oszczędność energii na stan środowiska zewnętrznego.

**Słowa kluczowe:** pył zawieszony PM 2,5 i PM 10, ochrona atmosfery, izolacyjność cieplna przegród, nośniki energii, oszczędność energii

### WPROWADZENIE

Wdrażanie efektywności energetycznej w budownictwie wpływa na ograniczanie emisji szkodliwych substancji do atmosfery, pochodzących z procesu spalania paliw służących do wytwarzania energii. W chwili przystąpienia do Unii Europejskiej jakość powietrza w Polsce odbiegała w istotnym stopniu od standardów europejskich i na przestrzeni ostatnich lat nie poprawiła się w zadowalającym stopniu. W latach 2000-2013 w zakresie emisji gazów cieplarnianych odnotowano wzrost emisji dwutlenku węgla o 1% oraz prawie sześciokrotny wzrost emisji fluorowęglowodorów i dwukrotny wzrost emisji sześćfluorku siarki [1].

Na potrzeby oceny jakości powietrza wykonywane są analizy stężeń dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, tlenków azotu, ozonu, benzenu oraz tlenku i dwutlenku węgla, pyłu zawieszonego PM 10, a także zawartości w pyłe zawieszonym PM 10 ołowiu, arsenu, kadmu, niklu i benzo(a)pirenu. Dodatkowo w wybranych stacjach prowadzi się monitoring wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [1]. Przystosowując system pomiarów do wymogów Dyrektywy 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy, wprowadzono od 1 stycznia 2010 r. obowiązek mierzenia pyłu zawieszonego PM 2,5. W latach 2005-2009 odnotowano stały wzrost procentowego udziału stref zakwalifikowanych do strefy ochrony zdrowia C ze względu na przekroczenia poziomu dopuszczalnego pyłu zawieszonego PM 10 [1].

## 1. PYŁ ZAWIESZONY PM 2,5 I PM 10

Pył zawieszony to połączenie kropelek cieczy i cząstek stałych utrzymujących się w powietrzu. Składnikami tych cząstek mogą być metale ciężkie, dioksyny czy wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, a także różnorodne alergeny.

Pył zawieszony PM 2,5 zawiera cząstki o średnicy mniejszej niż 2,5 mikrometra, do atmosfery emitowany jest jako zanieczyszczenie pierwotne powstające w wyniku procesów antropogenicznych i naturalnych oraz jako zanieczyszczenie wtórne, powstające w wyniku przemian dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, amoniaku, lotnych związków organicznych i trwałych związków organicznych. Może on być transportowany na odległość do 2500 km, a sedymantacja i opady nie usuwają go z atmosfery. W powietrzu może pozostawać przez wiele tygodni.

Dyrektywa 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy określa wartości stężeń pyłów PM 2,5 docelowe i dopuszczalne oraz wprowadza odrębny wskaźnik dla terenów miejskich (wskaźnik średniego narażenia), a także nakazuje informowanie społeczeństwa o możliwych zagrożeniach [2]. Wartość dopuszczalna średniego rocznego stężenia od 1 stycznia 2015 roku wynosi  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a od 1 stycznia 2020 roku ma wynosić  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [2]. Przepisy w tym zakresie zgodne z wytycznymi Unii Europejskiej reguluje w Polsce Rozporządzenie Ministra Środowiska [3, 4]. Normy stężeń PM 2,5 zalecane przez WHO przedstawiono w tabeli 1.

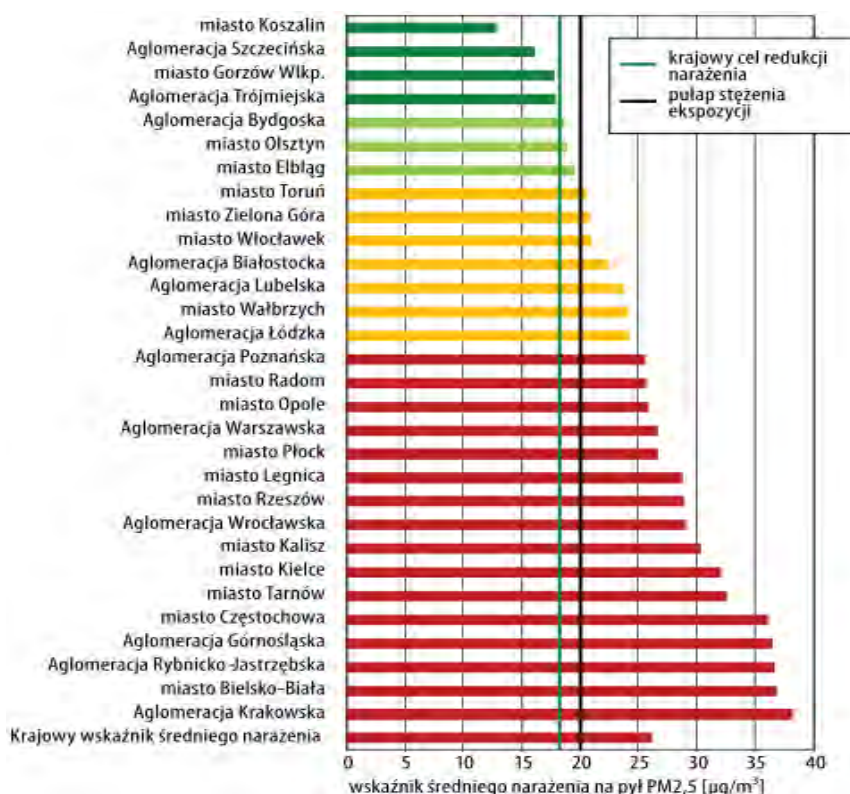
Tabela 1. Normy stężeń pyłu zawieszonego PM 2,5 i PM 10 zalecane przez WHO [5]

Rozpatrywany okres	Normy stężeń pyłu zawieszonego [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	
	PM 2,5	PM 10
Średnie dobowe stężenie	25	50
Średnie roczne stężenie	10	20

Pył zawieszony PM 10 zawiera cząstki o średnicy mniejszej niż 10 mikrometrów, które mogą docierać do górnych dróg oddechowych i płuc. Utrzymują się one w atmosferze do kilku godzin. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska, dopuszczalny dobowy poziom stężeń pyłu PM 10 wynosi  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  i nie może być przekroczony częściej niż 35 dni w roku. Poziom  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  to poziom informowania dla stężenia dobowego, a poziom  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  to poziom alarmowy. Średnia roczna wartość stężenia nie może przekraczać  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [3, 5]. Norma średniego rocznego stężenia pyłu PM 10 ustanowiona przez Światową Organizację Zdrowia jest ostrzejsza i wynosi  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tab. 1).

Pomimo obserwowanego zmniejszania emisji substancji wpływających na tworzenie się pyłów zawieszonych oraz działań podejmowanych na rzecz ich redukcji nadal obserwuje się znaczne przekroczenia norm. Na podstawie oceny jakości powietrza przeprowadzonej przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w roku 2012 pod kątem dobowego stężenia pyłu PM 10 stwierdzono jego przekroczenie aż w 38 strefach spośród 46 podlegających ocenie [6]. Liczba stref

z przekroczonym rocznym stężeniem była o ponad połowę mniejsza. Najwyższe średnie roczne stężenia pyłu PM 2,5, przekraczające  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , wystąpiły w województwach: śląskim, małopolskim i podkarpackim (rys. 1). Ogólnie przekroczenia stężenia rocznego tej substancji zanotowano w 22 strefach [6].



Rys. 1. Wskaźniki średniego narażenia na pył PM 2,5 dla poszczególnych miast i aglomeracji [6]

WHO opublikowała 12 maja 2016 roku raport dotyczący zanieczyszczenia powietrza w miastach w latach 2008-2015. Przy opracowaniu zestawienia brano pod uwagę roczny poziom pyłu PM 2,5 i PM 10. Jakość powietrza aż 80% miast na świecie przekraczała dopuszczalne normy. Zanieczyszczenie zwiększyło się w ciągu ostatnich pięciu lat o 8% [7]. Wśród 50 najbardziej skażonych pyłem PM 2,5 miast Unii Europejskiej 33 znajdują się w Polsce. Na pierwszym miejscu znalazł się Żywiec ( $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), po nim Pszczyna (2), a następnie Rybnik (4), Wodzisław Śląski (5), Opoczno (6), Sucha Beskidzka (7), Godów (8). Na liście znalazły się również: Kraków, Nowy Sącz, Katowice, Wadowice, Gliwice, Zduńska Wola, Sosnowiec, Kalisz, Tychy, Bielsko-Biała i Zakopane. Informacje o znacznym skażeniu obszaru Polski pyłami zawieszonymi potwierdza również raport Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) [8].

## 2. WPŁYW PYŁÓW ZAWIESZONYCH NA STAN ŚRODOWISKA I ZDROWIE LUDZI

Systematyczna emisja szkodliwych substancji do atmosfery wpływa niekorzystnie na jakość środowiska, pogarszając kondycję ekosystemów, prowadząc do negatywnych zmian klimatu oraz stwarzając istotne zagrożenie dla ludzkiego zdrowia. Relacje pomiędzy czynnikami środowiskowymi a zdrowiem są złożone, gdyż na organizm działa jednocześnie wiele szkodliwych czynników, które występują w stosunkowo niskich stężeniach, lecz ekspozycja na nie jest długotrwała. Według szacunków WHO, obciążenie chorobami środowiskowymi w regionie paneuropejskim odpowiada za prawie 20% wszystkich zgonów [9].

Pyły zawieszone wpływają na zanik warstwy ozonowej i dynamikę globalnego ocieplenia, a także mają związek z występowaniem kwaśnych deszczy [10]. Częstki o średnicach od 0,1 do 2,5  $\mu\text{m}$  najbardziej spośród wszystkich zawartych w atmosferze rozpraszają światło, dlatego wzrost ich stężenia wpływa na spadek widoczności. Zaobserwowano również bardzo silny ujemny wpływ na widoczność pyłu PM 10 [10]. Pył zawieszony PM 2,5 wraz z PM 10 oraz silnie rakotwórczym benzo(a)pirenem i trującymi związkami chemicznymi, takimi jak: tlenek węgla, tlenki azotu i siarki, metale ciężkie i sadza, wchodzi w skład smogu.

Cząstki pyłu PM 2,5 przedostają się do organizmu przez drogi oddechowe. Osiedlając na ściankach pęcherzyków płucnych utrudniają wymianę gazową, co powoduje zapalenie górnych dróg oddechowych, choroby alergiczne, astmę, nowotwory płuc, gardła i krtani. Przenikają też do naczyń krwionośnych i krwioobiegu, co ma istotny wpływ na przebieg chorób układu krążenia. PM 2,5 powoduje również podrażnienie naskórka i śluzówki, a prowadzone badania potwierdzają także jego wpływ na powikłania przebiegu ciąży oraz stan rozwijającego się płodu. Według WHO, długotrwałe narażenie na działanie pyłu zawieszonego PM 2,5 skutkuje skróceniem średniej długości życia, a krótkotrwała ekspozycja na wysokie jego stężenie powoduje wzrost liczby zgonów z powodu chorób układu oddechowego i krążenia oraz wzrost ryzyka nagłych przypadków wymagających hospitalizacji [9, 11, 12]. Oszacowano, że ekspozycja na pył PM 2,5 skraca życie przeciętnego mieszkańca Unii Europejskiej o ponad 8 miesięcy, a Polaka dodatkowo o 1-2 miesiące z uwagi na większe zanieczyszczenie pyłem w naszym kraju [7, 8].

Pył PM 10 przedostaje się do organizmu przez drogi oddechowe lub układ pokarmowy wraz z żywnością skażoną szczególnie metalami ciężkimi. Stwierdzono, że cząstki o średnicach większych od 10  $\mu\text{m}$  zatrzymują się w górnych odcinkach dróg oddechowych, skąd są wydalane. Pył zawieszony PM 10 jest absorbowany w górnych drogach oddechowych i oskrzelach. Przenikając do płuc może powodować kaszel, trudności z oddychaniem i zadyszkę, szczególnie w czasie wysiłku fizycznego. Przyczynia się także do zwiększenia zagrożenia infekcjami układu oddechowego, zmniejszenia sprawności i wydolności płuc, powstania i rozwoju przewlekłej obturacyjnej choroby płuc, jak również wzrostu ryzyka zachorowania na choroby nowotworowe oraz występowania zaostrzeń objawów chorób alergicznych, jak astmy, czy kataru siennego. Większe ziarna pyłu PM 10 mogą powodować stany zapalne spojówek oraz błony śluzowej nosa i gardła [9, 11, 12].

### 3. CHARAKTERYSTYKA BUDYNKU PRZYJĘTEGO DO ANALIZY PRZED I PO TERMOMODERNIZACJI

Do analizy wybrano budynek szkoły wzniesiony w 1966 roku, w którym jednocześnie z efektem ekonomicznym można było prześledzić efekt ekologiczny związany z przejściem z medium, jakim był węgiel na gaz, co ma niebagatelny wpływ na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, benzo(a)pirenu oraz pyłów zawieszonych PM 10 i PM 2,5. Budynek wzniesiono w technologii tradycyjnej jako jedno- i dwukondygnacyjny, częściowo podpiwniczony. Ściany wykonano z cegły pełnej, stropy międzykondygnacyjne płyty DZ-3 i DZ-4, stropodach pełny płyta DZ-4, ocieplenie z mat trzcinowych, pokrycie 2 x papa, okna z PCV oraz drewniane, podwójnie szklone. Drzwi wejściowe wykonano z profili aluminiowych, nieizolowanych, pozostałe drzwi zewnętrzne są drewniane.

Budynek poddano termomodernizacji w roku 2010, od 2011 roku prowadzono monitoring jej efektów. Parametry charakterystyki energetycznej budynku przed i po termomodernizacji, wyznaczone na podstawie przeprowadzonej analizy audytingowej, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry charakterystyki energetycznej budynku przed i po wykonaniu termomodernizacji

Parametr	Przed termomodernizacją	Po termomodernizacji
Współczynnik U ścian [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	1,40	0,22
Współczynnik U ścian w gruncie [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	1,39	1,39
Współczynnik U stropodachu [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	0,68	0,16
Współczynnik U podłogi na gruncie [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	1,27	1,27
Współczynnik U okien [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	2,6/3,0	1,3
Współczynnik U drzwi [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	6,0/3,5	1,9/1,5
Wskaźnik EU [ $kWh/(m^2 \cdot rok)$ ]	271,69	129,81
Wskaźnik EK [ $kWh/(m^2 \cdot rok)$ ]	512,07	134,58
Wskaźnik EP [ $kWh/(m^2 \cdot rok)$ ]	563,28	148,04

W celu poprawy izolacyjności cieplnej przegród wykonano docieplenie ścian i stropodachu, wymieniono stolarkę okienną i drzwiową oraz konstrukcję aluminiową wiatrołapu na nową z szybą zespoloną, w ramach modernizacji kotłowni zastąpiono wyeksploatowany kocioł węglowy kotłem gazowym o wysokiej sprawności, a także zastosowano elementy automatycznej regulacji i sterowania systemem. Przeprowadzono również modernizację systemu c.o. i c.w.u., zamontowano elementy grzejne o małej bezwładności cieplnej oraz zawory termostatyczne, założono otuliny na przewodach c.o., zastąpiono nieefektywne podgrzewacze elektryczne podgrzewem scentralizowanym z kotłowni własnej. Zwiększono przerwy w ogrzewaniu w ciągu dnia.

#### 4. OCENA MOŻLIWOŚCI OBNIŻENIA EMISJI PYŁÓW ZAWIESZONYCH W WYNIKU TERMOMODERNIZACJI BUDYNKÓW

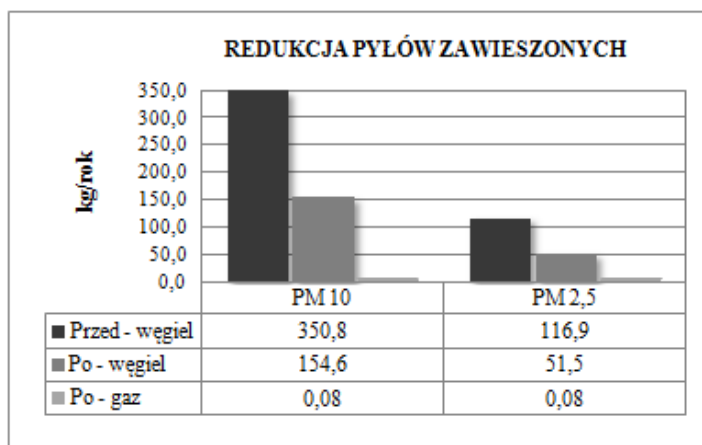
Pokażną ilość emisji pyłów zawieszonych oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, a także innych szkodliwych substancji do środowiska powoduje szczególnie spalanie węgla zwłaszcza w starych wyeksploatowanych kotłach i piecach. Poważnym problemem w przypadku palenisk indywidualnych jest powszechne, choć nielegalne spalanie różnego rodzaju odpadów, w tym tworzyw sztucznych czy gumowych. Dlatego też przekroczenia dopuszczalnych dobowych stężeń pyłów zawieszonych i tworzenie się smogu nasilają się w sezonie grzewczym.

Monitoring środowiskowych korzyści przeprowadzonej termomodernizacji budynku szkoły związanych z ograniczeniem emisji do atmosfery szkodliwych substancji pochodzących z procesu spalania paliw służących do wytwarzania energii w rozpatrywanym obiekcie objął m.in. analizę możliwości redukcji emisji pyłów zawieszonych PM 10 i PM 2,5 (tab. 3).

Tabela 3. Emisja bezpośrednia pyłów zawieszonych przed i po termomodernizacji

Rodzaj zanieczyszczenia	Ilość zanieczyszczeń [kg/rok]		Redukcja emisji pyłów	
	Przed	Po	[kg/rok]	[%]
PM 10	350,9	0,08	350,8	99,9
PM 2,5	116,9	0,08	116,8	99,9

Stwierdzono, iż szczególnie korzystne dla redukcji emisji pyłów zawieszonych było połączenie kompleksowej termomodernizacji budynku z wymianą źródła ciepła zasilanego węglem jako nośnikiem energii na źródło zasilane gazem (rys. 2). Wymiana kotła na sprawniejszy węglowy spowodowałaby 56% spadek emisji pyłów zawieszonych PM 10 i PM 2,5.



Rys. 2. Redukcja emisji PM 10 i PM 2,5 w przypadku zastosowania węgla i przejścia na gaz

Wysoki spadek zanotowano również w przypadku emisji do środowiska pozostałych zanieczyszczeń w związku ze zużyciem energii w rozpatrywanym budynku, po wykonaniu termomodernizacji i przejściu na paliwo gazowe. Analizowane zanieczyszczenia wchodzące m.in. wraz z pyłami zawieszonymi w skład smogu to rakotwórczy benzo(a)piren, tlenek węgla, tlenki azotu oraz dwutlenek siarki. W tabeli 4 przedstawiono redukcję emisji tych substancji przed i po termomodernizacji oraz oszacowano spadek emisji w przypadku pozostania przy węglu.

Tabela 4. Emisja bezpośrednia i jej redukcja dla wybranych substancji

Rodzaj zanieczyszczenia	Ilość zanieczyszczeń			Redukcja emisji			
	Przed	Po		Węgiel	Gaz	Węgiel	Gaz
	Węgiel	Węgiel	Gaz				
	[kg/rok]			[kg/rok]		[%]	
B(a)P	0,83	0,46	0,0	0,38	0,83	54,9	100,0
CO	4170,0	2289,3	3,9	1880,7	4166,7	54,9	99,9
NO <sub>x</sub>	133,4	73,3	1,7	60,2	131,7	54,9	98,7
SO <sub>2</sub>	600,5	329,7	0,4	270,8	600,1	54,9	99,7

## PODSUMOWANIE

W ostatnich latach szczególną wagę przykładą się do zeroemisyjności w budownictwie, jednak, jak wynika z opracowanych raportów [6-8], jakość powietrza w Polsce nie utrzymuje się nadal na zadowalającym poziomie. Największą liczbę przekroczeń wartości dopuszczalnych notuje się dla pyłów zawieszonych i benzo(a)pirenu. Dominującą przyczyną przekroczeń były m.in. emisje związane z indywidualnym ogrzewaniem, tzw. niska emisja, czyli emisja pochodząca ze spalania paliw stałych w piecach i kotłach domowych.

Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) uważa, że pyły zawieszone są najbardziej szkodliwe dla człowieka spośród zanieczyszczeń atmosferycznych, a szczególnie pył PM 2,5, gdzie w zasadzie każdy poziom jego stężenia w powietrzu oddziałuje niekorzystnie na ludzkie zdrowie, będąc przyczyną wielu chorób głównie układu oddechowego oraz układu krążenia. Grupami szczególnie narażonymi na negatywne oddziaływanie pyłów zawieszonych są oczywiście dzieci i osoby starsze oraz cierpiące na schorzenia w obrębie wymienionych układów.

Wraz ze zwiększeniem efektywności energetycznej istniejącej struktury budowlanej i jej wyposażenia technicznego spadnie zanieczyszczenie powietrza związane z powszechnym spalaniem śmieci w paleniskach indywidualnych oraz węgla. Termomodernizacja połączona z wymianą lokalnych źródeł ciepła o niskiej sprawności, zasilanych paliwem o wysokiej zawartości szkodliwych substancji emitowanych w procesie ich spalania, zakaz stosowania węgla w rejonach szczególnie zagrożonych, konsekwentne egzekwowanie zakazu palenia śmieci, a także zwiększenie

udziału odnawialnych źródeł energii w jej wytwarzaniu może znacząco ograniczyć emisję m.in. pyłu zawieszonego PM 2,5 i PM 10 oraz benzo(a)pirenu.

Celem strategicznym polityki państwa jest zwiększanie wykorzystania zasobów energii odnawialnej. Również w założeniach Narodowego Programu Rozwoju Gospodarki Niskoemisyjnej przyjętego przez Radę Ministrów w dniu 16 sierpnia 2011 roku jednym z głównych celów jest rozwój niskoemisyjnych źródeł energii [13].

## LITERATURA

- [1] Ochrona środowiska, Informacje i opracowania statystyczne, GUS, Warszawa 2015.
- [2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy.
- [3] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. 2012, poz. 1031.
- [4] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu, Dz.U. 2012, poz. 1032.
- [5] Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, WHO, Copenhagen 2006.
- [6] Stan środowiska w Polsce, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2014.
- [7] WHO's Global Urban Ambient Air Pollution database, WHO, Copenhagen 2016.
- [8] Air quality in Europe - report 2013 and 2015, EEA Report, No 9/2013 and No 5/2015.
- [9] Health aspects of air pollution, Results from the WHO project "Systematic review of health aspects of air pollution in Europe", WHO, Copenhagen 2004.
- [10] Rogula-Kozłowska W., Rogula-Kopiec P., Majewski G., Udokumentowane skutki oddziaływania aerozolu atmosferycznego na środowisko, Przegląd Naukowy - Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 2014, 65, 290-303.
- [11] Successes and Failures of Health Policy in Europe, Four Decades of Divergent and Converging challenges, Ed.: J.P. Mackenbach and M. McKee, Open University Press, New York 2013.
- [12] Air Pollution, Health and Environmental Impacts, Ed.: B.R. Gurjar, L.T. Molina, C.S.P. Ojha, CRC Press, New York 2010.
- [13] Nowa misja - niższa emisja, Gospodarka niskoemisyjna w gminach, Red.: A. Węglarz, Krajowe Stowarzyszenie Inicjatyw, Warszawa 2014.

## REDUCING OF PARTICULATE MATTER EMISSIONS AS A RESULT OF WALLS THERMAL INSULATION IMPROVEMENT AND ENERGY CARRIERS CHANGES

The article presents the problem of particulate matter emissions into the atmosphere and their impact on the environment and human health. For the example of thermal modernized building, in which the improvement of thermal insulation of partitions and the exchange of coal boiler to a gas boiler was done, the opportunity to reduce emissions of particulate matter PM 2.5 and PM 10 is presented. The parameters of the energy performance of the building before and after thermal modernization are showed and also the impact of energy saving activities on the state of the environment is assessed.

**Keywords:** particulate matter PM 2,5 i 10, protection of the atmosphere, thermal insulation of partitions, energy carriers, energy saving