



Analiza emisji zanieczyszczeń w wyniku wytwarzania energii cieplnej

*Tadeusz Noch, Wioleta Mikołajczewska,
Alicja Wesołowska, Aleksandra Friedberg
Gdańska Szkoła Wyższa*

1. Wstęp

Procesem badawczym objęto obiekt wytwarzający energię ciepłą zlokalizowany w Gdańsku Stogach. Energia ciepła do celów ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), jak i centralnego ogrzewania (c.o.) oraz para do kuchni dostarczane są z własnej kotłowni olejowej znajdującej się w oddzielnym wolnostojącym budynku. Obok kotłowni, w tym samym budynku w wydzielonym pomieszczeniu, usytuowane są zbiorniki na paliwo olejowe do kotłów. Na wyposażeniu są trzy baterie zbiorników po 4 szt. \times 3 m³ objętości każda.

Bilans masowy zużycia paliwa odgrywa istotną rolę w planowaniu procesu wytwarzania energii cieplnej. Badany obiekt posiada kotłownię olejową wodno-parową. W kotłowni tej znajdują się trzy kotły, w których średnioroczne zużycie oleju opałowego przedstawia tabela 1 (Małecki 2002).

Kotłownia wyposażona jest w dwa kotły firmy VISSMANN typ Paromat-Simplex z palnikami Weishaupt L5T D oraz jeden kocioł parowy firmy VISSMANN typ Paromat ER ND z palnikiem LLZ-6D. Wykazane kotły zostały objęte badaniem z uwzględnieniem ich parametrów. Przedstawiona charakterystyka poszczególnych kotłów jest wykorzystywana w dalszych pracach badawczych.

Tabela 1. Średnioroczne zużycie oleju opałowego
Table 1. Average annual heating oil consumption

Kwartał	Zużycie oleju opałowego [tys. dcm ³ /a]
I	84
II	64
III	33
IV	60
Łącznie	241

Kotły opalane są olejem opałowym Ekoterm o charakterystyce: wartość opałowa paliwa: $W^* = 41\,500 \text{ kJ/Nm}^3$ oraz zawartość siarki w paliwie: $S^c = \text{maks. } 0,3\%$. Pozostałość części stałych po spopieleniu $\leq 0,01\%$. Gęstość w temperaturze 20°C jest nie większa niż $0,88 \text{ kg/dcm}^3$.

Eksplloatowane kotły Paromat-Simplex (Małecki 2002) z palnikami Weishaupt L5T D posiadają następującą charakterystykę: wydajność cieplna kotła $Q = 2\,592 \text{ MJ/h}$ (720 kW); sprawność cieplna kotła $\eta = 0,913$; temperatura spalin na wylocie z kotła $T_k = 453 \text{ K}$. Spaliny z każdego z kotłów odprowadzane są do atmosfery oddzielnymi emitarami: E1 i E2 o parametrach: wysokość emitora $h = 20,0 \text{ m}$; średnica emitora $d = 0,4 \text{ m}$. Kotły w okresie zimowym dostarczają ciepłą wodę do instalacji centralnego ogrzewania (c.o.) i ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), natomiast w okresie letnim tylko ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). Czas pracy każdego z kotłów wynosi ok. 3000 h/a (wspólny: 1800 h/a). W sezonie grzewczym pracują 2 kotły (ze zmiennym obciążeniem).

Zainstalowany kocioł Paromat ER ND (Małecki 2002) z palnikiem Weishaupt L1Z-B; posiada następującą charakterystykę: wydajność cieplna kotła $Q = 1\,026 \text{ MJ/h}$ (285 kW); sprawność cieplna kotła $\eta = 0,92$; temperatura spalin za kotłem $T_k = 463 \text{ K}$. Spaliny z kotła odprowadzane są do atmosfery oddzielnym emitorem E3 o parametrach: wysokość emitora $h = 20,0 \text{ m}$; średnica emitora $d = 0,25 \text{ m}$. Czas pracy kotła wynosi ok. 3650 h/a (10 h/dobę). Kocioł przeznaczony jest do dostarczania pary technologicznej do kuchni.

W różnego rodzaju instalacjach technicznych występuje przepływ płynów w kanałach o szerokim zakresie średnic, od bardzo małych (w mini- lub mikroskali) do dużych (w makroskali). Postęp technologiczny w ostatnich dziesięcioleciach doprowadził do miniaturyzacji szeregu urzą-

dzeń technicznych we wszystkich działach przemysłu. Dotyczy to także wymienników ciepła tam występujących. Podczas wrzenia współczynniki przejmowania ciepła α są o rząd wielkości większe niż w warunkach jednofazowego, wymuszonego ruchu płynu i osiągają wartości około 10^5 W/m²K dla urządzeń konwencjonalnych (Trela i Kwidziński 2016).

2. Wpływ źródeł energii cieplnej na środowisko

2.1. Obliczenia wielkości i parametrów emisji

Parametry emisji dla kotłów Paromat-Simplex, emitory E1 i E2:

1. Ilość spalin z 1 kg oleju opałowego Ekoterm $L_t = 13,06$ m³/kg.
2. Nadmiar powietrza $\lambda = 1,17$.
3. CEMIS $\tau = 0,342$.
4. Objętość spalin w warunkach umownych przy 3% zawartości tlenu w spalinach dla jednego kotła $V_{3\%} = 886,7$ m³/h.
5. Objętość spalin w warunkach rzeczywistych dla jednego kotła $V_u = 1437,8$ m³/h.
6. Prędkość spalin na wylocie z emitora dla jednego kotła $v = 3,2$ m/s;
 $T_g = 443,0$ K.

Maksymalna emisja zanieczyszczeń dla jednego kotła:

$B_{pal\ max} = 67,9$ kg/h (maksymalne zużycie paliwa), $E_{SO_2} = 0,4074$ kg/h,
 $E_{NO_2} = 0,3858$ kg/h, $E_{CO} = 0,0463$ kg/h oraz $E_{pył} = 0,00154$ kg/h.

Roczna emisja zanieczyszczeń dla wszystkich kotłów:

$B_{pal\ a} = 212\ 080$ kg/a (roczne zużycie paliwa), $E_{SO_2} = 1272,5$ kg/a,
 $E_{NO_2} = 1205,0$ kg/a, $E_{CO} = 144,6$ kg/a oraz $E_{pył} = 4,82$ kg/a.

Parametry emisji dla kotła Paromat ER ND, emitor E3:

1. Ilość spalin z 1 kg oleju opałowego $L_t = 13,06$ m³/kg.
2. Nadmiar powietrza $\lambda = 1,17$.
3. CEMIS $\tau = 0,417$.
4. Objętość spalin w warunkach umownych przy 3% zawartości tlenu w spalinach dla jednego kotła $V_{3\%} = 351,0$ m³/h.
5. Objętość spalin w warunkach rzeczywistych dla jednego kotła $V_u = 582,0$ m³/h.
6. Prędkość spalin na wylocie z emitora dla jednego kotła $v = 3,3$ m/s;
 $T_g = 453$ K.

Rozkład maksymalnej emisji zanieczyszczeń dla jednego kotła:
 $B_{pal\ max} = 26,9$ kg/h (maksymalne zużycie paliwa), $E_{SO_2} = 0,1613$ kg/h,
 $E_{NO_2} = 0,1528$ kg/h, $E_{CO} = 0,02175$ kg/h oraz $E_{pył} = 0,00061$ kg/h.

2.2. Obliczenia sprawdzające

Obliczenia sprawdzające wykonano zgodnie z załącznikiem nr 1 do Rozporządzenia (2001). Stężenia zanieczyszczenia w spalinach przy 3% zawartości tlenu dla kotła Paromat-Simplex o mocy 720 kW (paliwo: olej opałowy Ekoterm):

- $V_{3\%} = 886,7$ m³/h,
- $S_{SO_2} = 0,4074/886,7 = 459,4$ mg/m³ < $S_{dop} = 850$ mg/m³,
- $S_{NO_2} = 0,3858/886,7 = 400$ mg/m³ = $S_{dop} = 400$ mg/m³,
- $S_{CO} = 0,0463/886,7 = 52,0$ mg/m³ < $S_{dop} = 150$ mg/m³.

2.3. Badania i obliczenia stężeń emitowanych zanieczyszczeń

Badania i obliczenia stężeń emitowanych zanieczyszczeń przeprowadzono dla kotłowni olejowej wodno-parowej, eksploatowanej przez obiekt zlokalizowany w Gdańsku Stogach. Obliczenia stanu zanieczyszczenia powietrza wywołanego emisją zanieczyszczeń z analizowanego obiektu wykonano przy pomocy komputera programem ATMO r. 98. Obliczenia wykonano zgodnie z przepisami Rozporządzenia (2002).

Dla wszystkich zanieczyszczeń: dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, tlenku węgla i pyłu zawieszonego wykonano obliczenia rozkładu stężeń na poziomie terenu. Nie wykonano obliczeń na poziomach różnych od $Z = 0$ m, z uwagi na to, że w okolicy nie występuje zabudowa wyższa od parterowej. Wyniki obliczeń rozkładu maksymalnych stężeń zanieczyszczeń na poziomie terenu $Z = 0$ m zestawione zostały w tabeli 2.

Rozkładem stężeń objęto obszar zakreślony siatką obliczeniową w kwadracie 700×600 m² o skoku 50 m. Wyniki obliczeń zebrano w powyższej tabeli. W całej siatce obliczeniowej nie stwierdzono przekroczeń przez wartości 99,8 procentyla wartości stężeń dyspozycyjnych dwutlenku siarki, tlenków azotu, tlenku węgla i pyłu zawieszonego. Nie zostały również przekroczone wartości maksymalne stężeń tych zanieczyszczeń. Są one wielokrotnie niższe od stężeń dyspozycyjnych. Wykonana analiza uciążliwości wykazała, że instalacja (kotłownia) znajdująca się na terenie badanego obiektu, wprowadzając do powietrza gazy i pyły spełnia wymagania norm ochrony powietrza.

Tabela 2. Wyniki obliczeń maksymalnych stężeń zanieczyszczeń (opr. własne)
Table 2. Calculation results of maximal pollution concentrations (own work)

Rodzaj zanieczyszczeń [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Receptory		Wartość stężeń	
	X [m]	Y [m]	S_{max} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$S \leq 99,8$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Dwutlenek siarki $S_{\text{dysp}} = 492$	1600 1750	1600 1650	105,11	97,42
Dwutlenek azotu $S_{\text{dysp}} = 488$	1600 1750	1600 1650	99,55	92,26
Tlenek węgla $S_{\text{dysp}} = 19800$	1600 1750	1600 1650	12,35	11,43
Pył zawieszony $S_{\text{dysp}} = 280$	1600 1750	1600 1650	0,20	0,18

Eksploatacja kotłowni nie wymaga posiadania pozwolenia na odprowadzanie gazów i pyłów do powietrza. Ze względu na łączną moc kotłowni ($Q = 1,725 \text{ MW}$) wymagane jest jedynie zgłoszenie (Rozporządzenie 2004).

Analiza uciążliwości wykazała, że instalacja znajdująca się na terenie badanego obiektu spełnia wymagania norm ochrony powietrza. Wymagania spełnione są zarówno pod względem nie przekraczania standardów emisyjnych, jak i też pod względem dotrzymywania dopuszczalnych poziomów zanieczyszczeń. Charakterystykę kotłowni i kotłów oraz emitorów zawarto w tabeli 3.

Przeprowadzono analizę emisji spalania kotłowni olejowej przez zainstalowane dwa kotły w badanym obiekcie. Pomiarów dokonano przyrządem firmy HRU typ 89/5 Vario dla każdego kotła i stopnia pracy palnika oddzielnie. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 4 (Pełka 2002).

Tabela 3. Parametry emitorów i dopuszczalne emisje zanieczyszczeń
(opr. własne)

Table 3. Parameters of emitters and permissible pollution emission (own work)

Emitor	E1, E2	E3	E1, E2, E3
Rodzaj zanieczyszczeń	Emisja		
	dopuszcz. [kg/h]	dopuszcz. [kg/h]	roczna [kg/a]
Dwutlenek siarki	0,4074	0,1613	1272,5
Dwutlenek azotu	0,3858	0,1528	1205,0
Tlenek węgla	0,0463	0,0218	144,6
Pył zawieszony	0,0015	0,0006	4,8

Tabela 4. Analiza emisji spalin kotłowni olejowej przez kocioł nr 1 i 2

Table 4. Analysis of oil boiler fume emission from boiler 1 and 2

Wyszczególnienie	Jedn.	Kocioł 1		Kocioł 2	
		I	II	I	II
Stopień pracy palnika					
Temperatura otoczenia	°C	21,1	21,0	20,6	20,5
Temperatura spalin	°C	151,0	176,8	153,8	177,0
Temperatura kotłowa	°C	75	75	80	70
Nadwyżka O ₂	%	4,7	3,4	4,4	3,8
Zawartość CO ₂	%	12,0	12,9	12,2	12,6
Straty kominowe	%	6,3	7,1	6,4	7,3
Sprawność	%	93,7	92,9	93,6	92,7
Zawartość CO	ppm	29	15	11	15
Zawartość NO	ppm	63	66	61	64
Zawartość NO _x	ppm	74	78	72	75
Lambda	–	1,28	1,19	1,26	1,22
Ciąg kominowy	hPa	-0,72	-0,96	-0,90	-0,96

Poprawa efektywności energetycznej istniejących systemów przygotowania ciepłej wody użytkowej jest zagadnieniem, które dotyczy zarówno odbiorców ciepłej wody, jej dostawców, jak i osób, które planują zmniejszyć zużycie ciepła kierowanego do tego typu systemu (Cholewa i in. 2016).

3. Wykorzystanie źródeł energii odnawialnej

Zapotrzebowanie na energię jest bezpośrednią pochodną rozwoju gospodarczego, stąd też w ciągu najbliższych kilkunastu lat przewidywany jest dalszy znaczny wzrost jej konsumpcji (Suszyński 2011, Ustawa 1997). Problemem współczesnej gospodarki jest zmniejszanie się zasobów surowców kopalnych oraz wzrost ich cen. Powoduje to, że należy podjąć działania związane z poszukiwaniem innych źródeł energii w celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego (Ropińska 2011). Problematyka odnawialnych źródeł energii zawarta jest w wielu aktach polskiego prawa. Podstawowym aktem jest Konstytucja RP (1997), której art. 74 mówi, że władze publiczne zapewniają bezpieczeństwo ekologiczne współczesnemu i przyszłym pokoleniom, a ochrona środowiska jest obowiązkiem władz publicznych wspierających działania obywateli na rzecz ochrony i poprawy środowiska (Gołębiowska 2010).

Energia ze źródeł odnawialnych może mieć postać przydatną do bezpośredniego wykorzystania (energia wiatru, energia wody, energia słoneczna, geotermia) lub pozwalającą na jej magazynowanie (biomasa, biopaliwa). Jej racjonalne wykorzystanie powoduje mniejsze oddziaływanie na środowisko (Organista 2002). Uzyskanie energii ze źródeł odnawialnych jest jedną z głównych opcji pozwalających zmniejszyć obecne uzależnienie od paliw kopalnych oraz zaspokoić stale rosnące w skali światowej zapotrzebowanie na energię. Zainteresowanie wdrożeniem technologii wykorzystania energii odnawialnej stale rośnie. Praktyczne ich zastosowanie zależy od kosztów energii ze źródeł odnawialnych w stosunku do kosztów energii ze źródeł konwencjonalnych. Przez sterowanie polityką ochrony środowiska w połączeniu z polityką fiskalną można wpływać na rozwój produkcji i wykorzystania odnawialnych źródeł energii (Jasiulewicz 2008). Konieczna jest jednak rozważa i uwzględnienie niekorzystnych efektów jak migracja energochłonnych segmentów produkcji do krajów o niższych kosztach energii.

Do źródeł energii odnawialnej zaliczamy między innymi:

1. źródła energii elektrycznej: ogniwa fotoelektryczne, elektrownie wodne i wiatrowe, biogazownie, układy kogeneracyjne spalające biomasę,
2. źródła ciepła: kolektory słoneczne, ciepło odpadowe, wody geotermalne, pompy ciepła korzystające z czystych źródeł energii elektrycznej,
3. biomasa, w tym: drewno, słoma, uprawy energetyczne i inne,
4. komunalna i przemysłowa biomasa odpadowa.

Jednym z ważnych zagadnień jest energetyczne wykorzystanie biomasy, w tym słomy, na którą zapotrzebowanie w gospodarce rolnej jest znacznie mniejsze niż jej produkcja. Spalanie słomy dałoby szansę na 5-procentowe pokrycie krajowego zapotrzebowania na energię pierwotną. W wyniku przeprowadzonych badań porównawczych z zastosowaniem kotła Pilewang Gizex – PM stwierdzono, że oddziaływanie spalania słomy na stan czystości powietrza atmosferycznego jest mniej negatywne niż spalania węgla (Reszkowski 1995). Zestawienie emisji zanieczyszczeń powstających przy spalaniu węgla i słomy w tabeli 5 uwzględnia poszczególne rodzaje dobowej emisji.

Tabela 5. Emisja dobowa zanieczyszczeń powstających przy spalaniu węgla I słomy (opr. własne na podst. Reszkowski 1995)

Table 5. Daily emission of pollution from coal and straw combustion (own work based Reszkowski 1995)

Rodzaj emisji	Kocioł na słomę [kg/doba]	Kocioł węglowy [kg/doba]	Porównanie kol. 2:3 [%]
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Dwutlenek siarki	0,152	4,104	3,70
Dwutlenek azotu	0,083	0,210	39,52
Tlenek węgla	0,245	11,544	2,12
Pyły	0,312	2,141	14,57

Analizując dane dotyczące emisji dobowej zanieczyszczeń powstających przy spalaniu węgla i słomy (tabela 5) stwierdzono, że w wyniku spalania słomy emisja dwutlenku siarki jest niższa o 3,95 kg/dobę,

tj. o 96,3% w stosunku do spalania węgla, a dwutlenku azotu o 60,5%. Natomiast emisja tlenku węgla jest niższa o 11,3 kg/dobę, tj. o 97,9% w stosunku do spalania węgla. Także przy spalaniu słomy emisja pyłów jest niższa o 1,83 kg/dobę, tj. o 85,4% w stosunku do spalania węgla.

Źródłem energii chemicznej biomasy są organiczne związki chemiczne. Związki te powstają dzięki procesom syntezy komórkowej z dwutlenku węgla i wody na skutek procesu fotosyntezy.



Biomasa zawierająca w swoim składzie chemicznym w różnych proporcjach ligninę, celulozę i hemicelulozę obejmuje szerokie spektrum roślin, które oprócz właściwości odżywczych (pokarmowych), są nośnikami energii. Energia zakumulowana w roślinie w wyniku asymilacji 1 mola CO_2 gromadzi w postaci węglowodanów 470 kJ energii chemicznej (Witaszek i in. 2015, Lewandowski i Ryms 2013). Zakłada się, że bilans emisji dwutlenku węgla podczas spalania biomasy jest zerowy, gdyż wytworzona jego ilość jest równoważna ilości CO_2 pobranej przez roślinę podczas jej wzrostu.

W skład biomasy wchodzi (Olsson 2006): węglowodany (cukry proste, dwucukry), skrobia składająca się z amylopektyny (80%) i amylozy (20%) oraz celuloza i lignina (biopolimer, w którego skład wchodzi nienasycone alkohole i fenole). Oprócz wymienionych głównych składników, biomasę roślinną tworzą również pektyny, tłuszcze i woski (Mironowski 2016).

W biogazowniach wykorzystywane mogą być: biomasa dedykowana jak również bioodpady czy ścieki komunalne. Odwadnianie osadów ściekowych jest kluczowym elementem procesu przeróbki osadów, które prowadzi do istotnego zmniejszenia objętości osadu, zmiany ich konsystencji, a tym samym stworzenia możliwości ich transportu, użytkowania, a także składowania (Ciborowski 2006). Odwadnianiem określa się rozdział osadu na placek o zawartości suchej masy 15-40% i ciecz osadową pozbawioną zawiesin. Osad o takiej zawartości suchej masy traci płynność, a swoją konsystencją zbliża się do konsystencji mokrej ziemi (Podedworna i Umiejewska 2007, 2008). Efektem ubocznym procesu odwadniania osadów ściekowych i nie tylko jest emisja nieprzyjemnych zapachów do środowiska, co powoduje dyskomfort osób pracujących na oczyszczalniach ścieków, jak i zamieszkujących tereny wokół

tych obiektów (Kowalczyk i Piecuch 2016). Ważnym zagadnieniem jest również wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do wspomaganie przygotowania ciepłej wody użytkowej (Pawłowski i Pawłowski 2008, Stefaniak 2013), w szczególności kolektorów słonecznych (Żukowski 2014, Żukowski i Radziejewska 2016).

4. Współpraca kotłowni z zespołem pomp ciepła

Praktyka eksploatacyjna i wyniki analizy warunków klimatycznych wskazują, że maksymalna moc grzewcza konieczna do zapewnienia potrzeb grzewczych centralnego ogrzewania w badanym obiekcie, $Q_s = 330$ kW, wymagana jest w ciągu 24 h/a.

W pracy przedstawiono oraz omówiono modelowy system grzewczy zapewniający wymienioną wyżej moc. Jest to tzw. system hybrydowy z wykorzystaniem istniejących kotłów oraz pomp ciepła o różnej mocy grzewczej. System hybrydowy uwzględnia różną moc zainstalowaną w pompach ciepła w granicach $Q_{pc} = 13,5-67,5$ kW. Konieczna moc szczytowa kotłów jest równa:

$$Q_{hybr.} = Q_s - Q_{pc} = 330 - 67,5 = 262,5 \text{ kW} \quad (2)$$

W obliczeniach zużycia energii pierwotnej (węgla w elektrowniach) i emisji dwutlenku węgla CO_2 uwzględniono sprawność przesyłową systemu elektroenergetycznego $\eta_{SE} = 0,88$ oraz sprawność elektrowni $\eta_{elektr} = 0,48$. Założono minimalną obliczeniową temperaturę otoczenia $T_{min.obl.} = -16^\circ C$.

Zużycie energii elektrycznej przez pompy ciepła (*loco* badany obiekt) zawiera się w zakresie $20,1 E_{eel} = \leq 100,3$ MWh/a. Danym tym odpowiada produkcja energii elektrycznej w elektrowniach $E_{wytw} = 22,8$ i 114 MWh/a. Przy założeniu, że jednostkowe zużycie paliwa w elektrowniach równe jest $b = 0,375$ kg/kWh (przy sprawności elektrowni $\eta_{elektr} = 0,48$ (Rocznik 2003) i wartości opałowej węgla $W_d = 20$ MJ/kg) zużycie węgla o wartości opałowej jest równe odpowiednio $B_{pal} = 8,6$ i $42,8$ Mg/a.

Występuje zmienność zużycia paliwa w elektrowniach na obsługę pomp ciepła w badanym obiekcie. Przyjęto założenie, że zużycie tego paliwa zmienia się liniowo ze zmianą mocy pomp ciepła. Rozpatrywane pompy ciepła mogą pracować w układzie kaskadowym.

Do obliczeń zużycia energii pierwotnej (paliwa) i emisji dwutlenku węgla (CO₂) uwzględniono sprawność badanej kotłowni $\eta_{PC} = 0,9$. Zużycie przez pompę ciepła 1 MWh energii elektrycznej powoduje emisję dwutlenku węgla w ilości 850 kg (Rocznik 2003).

Obliczenia emisji CO₂ dokonano dla zespołu pomp ciepła przy mocy: maksymalnej $Q_{PC} = 67,5$ kW oraz minimalnej $Q_{PC} = 13,5$ kW.

Wykonano obliczenia wskaźników eksploatacyjnych. W obliczeniach wykorzystano wartości opałowe oleju opałowego $WO = 40,19$ MJ/kg oraz wskaźnik emisji dwutlenku węgla dla oleju opałowego $WE_{CO_2} = 76,59$ kg/GJ (Wartości opałowe 2012). Uwzględniono ponadto:

- moc hybrydowa $Q_{hyb} = 316,5$ i $262,5$ kW,
- moc pomp ciepła $Q_{PC} = 67,5$ i $13,5$ kW,
- temperatura zasilania/powrotu $T_{zas}/T_{pow} = 70/50^\circ\text{C}$,
- temperatura kończąca sezon grzewczy $T_{grz} = 12^\circ\text{C}$.

Obliczenia wielkości emisji dwutlenku węgla ujęto w tabeli 6.

Tabela 6. Wielkość emisji dwutlenku węgla (CO₂) (opr. własne)

Table 6. Volume of carbon dioxide emission (CO₂) (own work)

Moc hybrydowa/ moc PC [kW]	Ciepło wytworzone [GJ/a]	Zamienne zużycie energii w elektrowni dla jednej i pięciu PC		Emisje CO ₂ i ich oszczędność [Mg/a]		
	Q_{PC}	E_{eel} energia elektr. [MWh/a]	B_{pal} paliwo [Mg/a]	B_K	B_{PC}	ΔB_{CO_2} kol. 5-6
1	2	3	4	5	6	7
262,5/67,5	1394	100,3	38,6	118,7	85,7	33
316,5/13,5	279	20,1	7,7	23,7	17,1	6,6

Zastosowanie pomp ciepła zmniejszy emisję CO₂. W nawiązaniu do danych liczbowych z tabeli 6 zauważa się, że:

1. Wzrost zainstalowanej mocy PC w zakresie od 13,5 do 67,5 kW powoduje proporcjonalny wzrost ciepła dostarczonego przez pompy ciepła w wartościach od 279 do 1394 GJ/a.

2. Proporcjonalny wzrost produkcji ciepła przez pompy ciepła spowoduje proporcjonalny wzrost emisji CO₂ w elektrowniach (B_{PC}) w zakresie od 17,1 do 85,7 Mg/a, jednak gdyby kotły wytwarzały tę ilość ciepła, jaką wytwarzają pompy ciepła, wyemitowałyby CO₂ (B_K) w przedziale od 23,7 do 118,7 Mg/a.
3. Te fakty wskazują na oszczędność emisji (ΔB_{CO_2}) 33 i 6,6 Mg/a dla układu z jedną i pięcioma pompami.

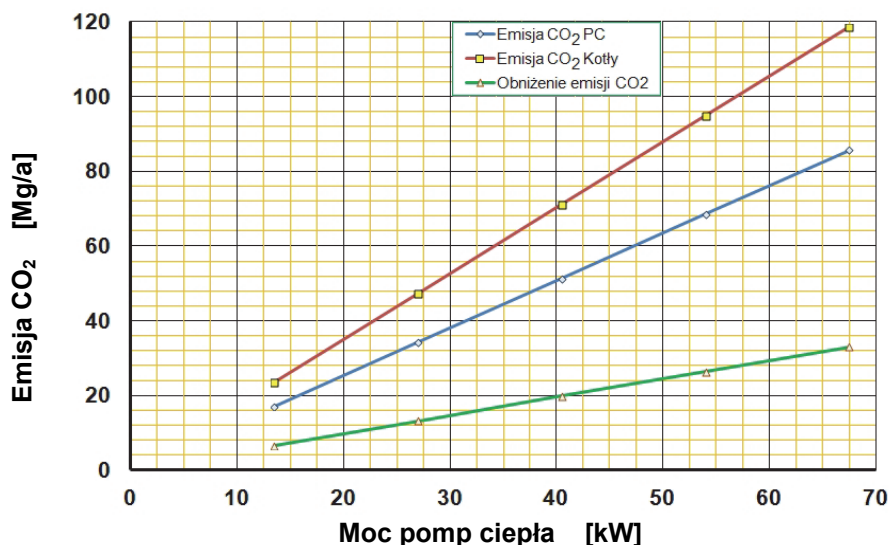
W zestawieniu tabeli 6 pokazano dla mocy pomp ciepła 67,5 i 13,5 kW wielkość emisji CO₂ odpowiednio $B_{PC} = 85,7$ i 17,1 Mg/a. Gdyby ilość ciepła dostarczoną przez pompy ciepła dostarczyła kotłownia olejowa, to roczne zużycie oleju opałowego wzrosłoby o 38,6 Mg przy zastąpieniu pracy pomp o mocy $Q_{PC} = 67,5$ kW albo 7,7 Mg paliwa przy zastąpieniu pracy pompy o mocy $Q_{PC} = 13,5$ kW.

Oznacza to zmniejszenie emisji CO₂ dla:

- $Q_{PC} = 67,5$ kW o $\Delta B_{CO_2} = 33$ Mg/a,
- $Q_{PC} = 13,5$ kW o $\Delta B_{CO_2} = 6,6$ Mg/a.

Rysunek 1 przedstawia obliczenia emisji dla szeregu pomp ciepła o mocy 13,5 kW. Można założyć, że emisja dwutlenku węgla spowodowana pracą pomp ciepła będzie wzrastać liniowo wraz z pracą pomp ciepła. Przyjmując założenie, że sprawność kotłów nie zmienia się ze zmianą ich obciążenia, emisja dwutlenku węgla z kotłów jest proporcjonalna do ilości wytwarzanego przez nie ciepła. Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia, sporządzono wykres zmian emisji CO₂ w funkcji mocy pomp ciepła, który przedstawiono na rysunku 1.

W dyskusji wyników dokonano opisu poszczególnych charakterystyk gdzie: wykres 1. od góry pokazuje zmianę emisji CO₂ spowodowaną pracą pomp ciepła; wykres 2. od góry pokazuje zmianę emisji CO₂ spowodowaną pracą kotłów (w zamian za pompy ciepła); wykres 3. od góry pokazuje zmniejszanie emisji CO₂ po zainstalowaniu pomp ciepła (różnica między wykresami 2 i 1).



Rys. 1. Zmiana emisji CO₂ w funkcji zainstalowanej mocy pomp ciepła w zakresie od 13,5 do 67,5 kW; $T_{zas}/T_{pow} = 70/50^{\circ}\text{C}$ (opr. własne)

Fig. 1. Change in CO₂ emission with a function of implemented heat pump within a range from 13,5 to 67,5 kW; flow temp./return temp. (T_{zas}/T_{pow}) = 70/50°C (own work)

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania w kotłowniach olejowych wodno-parowych dowodzą, że w wyniku ich eksploatacji powstają substancje szkodliwe. Substancje szkodliwe (pochodzące z łańcucha paliwowego) mające największy wpływ na środowisko naturalne i zdrowie człowieka to (Gradziuk i Gradziuk 1995):

- tlenki węgla (głównie CO i CO₂), tlenki siarki (SO₂, SO₃), tlenki azotu (NO, NO₂) i pyły,
- dioksyny i dioksynopochodne (np. PCB, PCDD, PCDF),
- amoniak (NH₃), metan (CH₄) i węglowodory aromatyczne (WWA),
- metale ciężkie oraz substancje radioaktywne.

Prawo ochrony środowiska w swych przepisach wyróżnia różne grupy gazów i pyłów. Organ ustalający wielkości dopuszczalnych emisji kieruje się różnymi kryteriami przy udzielaniu pozwoleń eksploatacji

instalacji ciepłowniczej w odniesieniu do przepisów Prawa ochrony środowiska (Ustawa 2001). Jednym z kryteriów jest ustalanie wielkości dopuszczalnych emisji gazów i pyłów do powietrza. W aktach wykonawczych zostały określone standardy emisyjne i dopuszczalne poziomy substancji w powietrzu. Wielkość dopuszczalnej emisji nie może przewyższać *normatywnej wielkości emisji* oraz powodować przekroczenia dopuszczalnych poziomów substancji w powietrzu oraz standardów zapachowej jakości powietrza (Siwa 2001).

Występują przypadki dotyczące substancji, dla których nie określono standardów i dopuszczalnych poziomów. W tym względzie organ wydający pozwolenie ustala ilość gazów i pyłów dopuszczalnych do wprowadzenia do powietrza na poziomie nie powodującym przekroczenia wartości odniesienia substancji w powietrzu. Dotyczy to również wartości odniesienia substancji zapachowych w powietrzu. W przepisach Prawa ochrony środowiska (Ustawa 1997) występuje kryterium, które organ uwzględnia przy określaniu wielkości dopuszczalnej emisji. Następuje to poprzez ustalenie tej wielkości na poziomie nie większym niż wynikający z prawidłowej eksploatacji instalacji dla poszczególnych wariantów funkcjonowania.

W przepisach Prawa ochrony środowiska (Ustawa 2001) zawarto kryteria, które winien uwzględniać organ administracyjny wydający pozwolenie. Pozwolenie dotyczy nie tylko procesu ustalania poziomu ilości emisji gazów lub pyłów dopuszczalnych na wprowadzenie do powietrza, ale głównie rodzajów gazów lub pyłów, których emisja zostaje określona w postanowieniach pozwolenia (Czech 2006).

Powierzchnia dostępnego terenu w badanym obiekcie wystarcza na zainstalowanie wymienników niskotemperaturowych do zasilania pomp ciepła do około 70 kW. Obiekt zlokalizowany jest na terenie Nadmorskiego Parku Krajobrazowego, z tego względu wskazane jest możliwie największe ograniczenie emisji zanieczyszczeń z kotłowni (dwutlenku węgla, tlenków siarki, tlenków azotu). Warianty obliczeniowe z najkrótszym czasem użytkowania mocy zainstalowanej kotłowni mają to uzasadnienie, że w czasie szczytowej pracy kotłów występuje najmniejsze zużycie paliwa (oleju opałowego), co jest korzystne z punktu widzenia lokalnych uwarunkowań ochrony środowiska.

Literatura

- Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., Anasiewicz, R. (2016). Analiza czynników wpływających na zużycie ciepła dostarczonego na potrzeby ciepłej wody użytkowej w budynkach wielorodzinnych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18(2), 169-180.
- Ciborowski, M. (2006). Możliwości zastosowania koagulantów nieorganicznych do kondycjonowania osadów ściekowych przed zagęszczaniem lub odwadnianiem. W: *Materiały do Seminarium Naukowo-Techniczne nt.: Wszelkieronność zastosowań chemikaliów na obiektach gospodarki wodno-ściekowej: nowe aplikacje 2005-2006*. Szczecin-Berlin-Poczdami-Brandenburg. 108-119.
- Czech, E.K. (red.). (2006). *Uwarunkowania ochrony środowiska*. Warszawa: Wyd. CDiI Difiin. 88-98.
- Gołębiowska, U.E. (2010). *Ekonomiczne uwarunkowania produkcji rzepaku na cele energetyczne*. Koszalin: Wyd. Uczel. Politechniki Koszalińskiej. 9-18.
- Gradziuk, B., Gradziuk, P. (1995). Energetyczne wykorzystanie biomasy. *Eko-partner*, 7/8, 38, 11-15.
- Jasiulewicz, M. (2008). Wykorzystanie biomasy w lokalnych centrach energetycznych – szansą rozwoju regionalnego. W: E. Rydz, A. Kowalak (red.). *Świadomość ekologiczna a rozwój regionalny w Europie Środkowo-Wschodniej*, Słupsk: Wyd. Naukowe Akademii Pomorskiej. 382-395.
- Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dn. 2 kwietnia 1997 r. Dz.U. Nr 78, poz. 483, z późn. zm.
- Kowalczyk, A., Piecuch, T. (2016). Zastosowanie olejku eterycznego jako substytutu flokulanta w procesie mechanicznego odwadniania komunalnych osadów ściekowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18(1), 414-444.
- Lewandowski, W.M., Rymś, M. (2013). *Biopaliwa*. Warszawa: Wyd. WNT.
- Małecki, G.J. (2002). *Analiza zanieczyszczenia powietrza*, Gdańsk: Wyd. FPU GEM. 7-9.
- Mirowski, T. (2016). Wykorzystanie biomasy na cele grzewcze a ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza z sektora komunalno-bytowego. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18(1), 466-477.
- Olsson, M. (2006). *Residential biomass combustion-emissions of organic compounds to air from wood pellets and other new alternatives*. Chalmers University of Technology.
- Organista, W. (2002). Analiza zastosowania paliw pochodzenia roślinnego oraz mieszanin z olejem opałowym lekkim do opalania urządzeń grzewczych. W: *Konferencja Naukowo-Techniczna ENERGETYKA 2002*. Wrocław: Wyd. ITCiMP Politechnika Wroclawska.

- Pawłowski, A., & Pawłowski, L. (2008). Sustainable development in contemporary civilisation. Part 1: The environment and sustainable development. *Problems of Sustainable Development, 1(3)*, 53-65.
- Pełka, A. (2002). Analiza spalin kotłowni olejowej, Borowo: Wyd. PPUH E & S. 3-5.
- Podedworna, J., Umiejewska, K. (2007). *Ćwiczenia laboratoryjne z technologii osadów ściekowych*. Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej.
- Podedworna, J., Umiejewska, K. (2008). *Technologia osadów ściekowych*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Reszkowski, E. (1995). Odnawialne źródła energii – nadzieja czy utopia. *Eko-partner 6(28)*, 12-15.
- Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej (2003). Warszawa: Wyd. GUS.
- Ropińska, B. (2011). Uwarunkowania pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych w województwie pomorskim. W: M. Jasiulewicz (red.). *Wykorzystanie biomasy w energetyce. Aspekty ekonomiczne i ekologiczne*. Koszalin: Wyd. PTE, Politechnika Koszalińska. 133-146.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 5 grudnia 2002 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu. Dz.U. z 2003 r., Nr 1 poz. 12.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 30 lipca 2001 r. sprawie wprowadzania do powietrza substancji zanieczyszczających z procesów technologicznych i operacji technicznych. Dz.U. Nr 87 poz. 957.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 22 grudnia 2004 r. w sprawie rodzajów instalacji, których eksploatacja wymaga zgłoszenia. Dz.U. Nr 283 poz. 2839.
- Siwa, D. (2001). Ochrona powietrza w świetle projektu ustawy Prawo ochrony środowiska. *Prawo i środowisko, 1(25)*, 100.
- Stefaniak, J. (2013). Chłodziarka absorpcyjna w solarnych układach klimatyzacyjnych jako przykład nowoczesnej technologii dla zrównoważonego rozwoju. *Rocznik Ochrona Środowiska 15*, 1216-1227.
- Suszyński, A. (2011). Ocena oddziaływania na środowisko naturalne energetycznego wykorzystania biomasy pochodzenia rolniczego. W: U. Gołębiowska (red.). *Ekonomiczne technologiczne i społeczne aspekty produkcji biomasy na cele energetyczne a zrównoważony rozwój rolnictwa i obszarów wiejskich*. Koszalin: Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. 95-109.
- Trela, M., Kwidziński, R. (2016). Analiza wrzenia i spadku ciśnienia przy przepływach dwufazowych w makrokanalach. *Zeszyty Naukowe Gdańskiej Szkoły Wyższej, 16*, 333-360.
- Ustawa z dn. 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. Dz.U. z 2018 r., poz. 755.
- Ustawa z dn. 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. Dz.U. z 2018 r., poz. 799.

Wartości opalowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2008 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2011. (2012). Pobrane z: http://www.kobize.pl/materialy/./WE_i_WO_2008_do_SHE_w_2011.pdf.

Witaszek, K., Pilarska, A.A., Pilarski, K. (2015). Wybrane metody wstępnej obróbki surowców roślinnych stosowanych do produkcji biogazu. *Ekonomia i Środowisko*, 2(53), 130-144.

Żukowski, M. (2014). Optymalny kąt nachylenia kolektorów słonecznych i paneli fotowoltaicznych. *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja*, 45/69, 335-337.

Żukowski, M., & Radziejewska, P. (2016). Optymalny rozstaw kolektorów słonecznych. *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja*, 47/1, 8-11.

Analysis of Emission of Pollution Resulting from Thermal Energy Production

Abstract

The research is related to thermal energy production and related air pollutions. As a result of this process, emission of pollution to the atmosphere occurs. The effect of pollution depends on the sort and amount of combusted fuel. Technical and technological parameters of thermal energy installations, which have been used in the research process, have been presented. In the building there are two Paromat-Simplex boilers with Weishaupt L5T D burners. In addition to this, a boiler Paromat ER ND with Weishaupt L1Z-B burner is installed. The boilers characteristics are discussed. The influence of thermal energy sources on the environment has been taken into account. Calculations of the volume and parameters of emission have been conducted.

The research also concerns the use of renewable energy. As a result of the comparative research with the application of Pilewang Gizex – PM boiler it was found that the influence of straw combustion on the quality of air is less negative than coal combustion. Carbon dioxide emission of biomass combustion is neglected because its amount equals the amount of CO₂ absorbed by a plant during its growth.

The analysis includes also the hybrid system of a boiler with a set of heat pumps in the power range $Q_{pc} = 13,5-67,5$ kW. Maximum power of boilers is $Q_{hybr.} = 262,5$ kW. The application of heat pumps reduces carbon dioxide emission: for $Q_{PC} = 67,5$ kW reduction is $\Delta B_{CO_2} = 33$ Mg/a and for $Q_{PC} = 13,5$ kW it correspond to $\Delta B_{CO_2} = 6,6$ Mg/a. Due to the fact that the object being the subject of the research is located in the Coastal Landscape Park (pol. *Nadmorski*

Park Krajobrazowy) it is advisable to significantly reduce emission of pollution from boilers (carbon dioxide, sulfur oxides, nitrogen oxides). The application of renewable sources of energy by local thermal power engineering is favorable for the protection of the environment.

Streszczenie

W opracowaniu przedmiotem badań jest wytwarzanie energii cieplnej. W wyniku tego zjawiska następuje emisja zanieczyszczeń do atmosfery. Wielkość emisji uzależniona jest od rodzaju i ilości spalane go paliwa. W pracy przedstawiono parametry techniczno-technologiczne urządzeń energetyki cieplnej wykorzystywane w procesie badawczym. W obiekcie eksploatowane są dwa kotły Paromat-Simplex z palnikami Weishaupt L5T D oraz jeden kocioł Paromat ER ND z palnikiem Weishaupt L1Z-B. W pracy dokonano obliczeń wielkości i parametrów emisji. Przeprowadzono badania i obliczenia stężeń emitowanych zanieczyszczeń dla kotłowni olejowej wodno-parowej, eksploatowanej przez obiekt zlokalizowany w Gdańsku Stogach.

Badania dotyczą również wykorzystania źródeł energii odnawialnej. W wyniku przeprowadzonych badań porównawczych z zastosowaniem kotła Pilewang Gizex – PM stwierdzono, że oddziaływanie spalania słomy na stan czystości powietrza atmosferycznego jest mniej negatywne niż spalania węgla. Bilans emisji dwutlenku węgla podczas spalania biomasy jest zerowy, gdyż wytworzona jego ilość jest równoważna ilości CO₂ pobranej przez roślinę podczas jej wzrostu.

Analizą objęto również współpracę kotłowni z zespołem pomp ciepła. System hybrydowy uwzględnia różną moc zainstalowaną w pompach ciepła w granicach $Q_{pc} = 13,5-67,5$ kW. Moc szczytowa kotłów jest równa $Q_{hybr.} = 262,5$ kW. Zastosowanie pomp ciepła zmniejszy emisję dwutlenku węgla, odpowiednio dla $Q_{PC} = 67,5$ kW o $\Delta B_{CO_2} = 33$ Mg/a oraz dla $Q_{PC} = 13,5$ kW o $\Delta B_{CO_2} = 6,6$ Mg/a. Z uwagi na to, że badany obiekt zlokalizowany jest na terenie Nadmorskiego Parku Krajobrazowego, wskazane jest możliwie największe ograniczenie emisji zanieczyszczeń z kotłowni (dwutlenku węgla, tlenków siarki, tlenków azotu). Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii przez lokalną energetykę ciepłą jest korzystne dla ochrony środowiska.

Słowa kluczowe:

energetyka cieplna, środowisko, spalanie, emisja zanieczyszczeń, olej opałowy, kotłownia, moc, pompa ciepła, OZE, ochrona środowiska

Keywords:

thermal power engineering, environment, emission of pollution, heating oil, boiler, power, heat pump, renewable energy, environment protection