

Badania energetyczno-emisyjne podczas przeciw i współprądowej realizacji procesu spalania w kotłach komorowych różnych konstrukcji

Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla

Krakowski Alarm Smogowy

2017

**Niniejsze sprawozdanie można powielać i cytować
wyłącznie w całości.**

Cytowanie wyłącznie z podaniem źródła.

**Wykorzystanie fragmentów tekstu, grafik oraz danych
wyłącznie na podstawie pisemnej zgody
Stowarzyszenia Krakowski Alarm Smogowy.**

Działanie realizowane w ramach projektu „Wdrażanie Programu ochrony powietrza dla województwa małopolskiego – Małopolska w zdrowej atmosferze” LIFE14 IPE PL 021/LIFE IP MAŁOPOLSKA. Raport przedstawia wyłącznie poglądy autora, a Komisja Europejska nie ponosi odpowiedzialności za żadne ewentualne wykorzystanie zawartych w nim informacji.



SPIS TREŚCI

1	CEL I ZAKRES BADAŃ.....	5
1.1	Cel badań	5
1.2	Rodzaje kotłów c.o.....	5
1.3	Zakres badań	7
1.4	OPIS URZĄDZEŃ W KTÓRYCH PROWADZONO TESTY SPALANIA.....	7
2	PRZEBIEG TESTÓW ENERGETYCZNO-EMISYJNYCH SPALANIA PALIW .	12
3	WYNIKI BADAŃ.....	14
4	WNIOSKI Z BADAŃ.....	29

1 CEL I ZAKRES BADAŃ

1.1 *Cel badań*

Celem pracy było sprawdzenie tezy stawianej przez część środowisk związanych z działaniami na rzecz poprawy jakości powietrza w Polsce, oraz przewijającej się debacie publicznej na temat zanieczyszczenia powietrza, że bez względu na rodzaj stosowanego urządzenia grzewczego z ręcznym zasypem paliwa stałego, stosowanie techniki rozpalania złoża paliwa od góry, będzie powodowało znacznie niższą emisję zanieczyszczeń do atmosfery, niż w przypadku tradycyjnego prowadzenia procesu, a więc zasypu kolejnych porcji paliwa na żar. Zwolennicy tej tezy prezentują „rozpał od góry” jako panaceum na problem zanieczyszczenia powietrza w naszym kraju. Celem niniejszych badań jest zweryfikowanie tego założenia.

Praca nie koncentruje się jedynie wokół sprawdzenia wartości emisji zanieczyszczeń emitowanych podczas zastosowania obu wspomnianych technik spalania. Poza aspektem środowiskowym, sprawdzeniu podlegały również takie parametry jak: sprawność, moc oraz temperatura i ciśnienie spalin. W sposób pośredni lub bezpośredni decydują one o cenie i stopniu uzyskiwanego komfortu cieplnego oraz o zmianie parametrów eksploatacyjnych urządzeń grzewczych. Te ostatnie mają wpływ nie tylko na stan techniczny urządzenia i jego żywotność, a także na ewentualne zagrożenia dla osób je obsługujących, jakie mogą wystąpić w trakcie eksploatacji nieprzewidzianej w DTR czy instrukcji obsługi, czyli niezłożonych w trakcie procesu konstrukcji czy wykonania kotła c.o. czy pieca.

Podstawą opracowania jest zlecenie do Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla z dn. 31.08.2016 r. z Krakowskiego Alarmu Smogowego, 31-104 Kraków, ul. Felicjanek 10/6. Zlecenie dotyczyło wykonania badań energetyczno-emisyjnych podczas przeciw i współprądowej realizacji procesu spalania w kotłach komorowych różnych konstrukcji. Prace rozpoczęto 31.08.2016, a zakończono 30.09.2016 roku.

1.2 *Rodzaje kotłów c.o.*

Kotły c.o. o mocy do 500 kW zasilane paliwami stałymi ze względu na rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne można generalnie podzielić na układy z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa. Patrząc od strony procesowej, kotły dzieli się na urządzenia, w których proces spalania przebiega współprądowo lub przeciwprądowo. Podział ten wynika z

kierunku przepływu paliwa i powietrza do spalania. Jeśli paliwo podawane jest współprądowo z powietrzem, powstałe w strefie odgazowania zanieczyszczenia przechodzą do strefy żaru, gdzie ulegają dopaleniu. Taka organizacja procesu spalania ma miejsce w kotłach retortowych. Przy dostarczaniu paliwa z przeciwnej strony złoża w stosunku do doprowadzanego strumienia powietrza mamy do czynienia ze spalaniem przeciwprądowym. Taki proces jest zazwyczaj realizowany w kotłach z rusztem stałym, z ręcznym zasypem, na paliwa grube (węgiel kamienny sortyment orzech, drewno kawałkowe). W kotłach tych zasyp paliwa następuje na wcześniej wytworzoną warstwę żaru. Nie jest to najwłaściwsze rozwiązanie. Po zasypie porcji paliwa na warstwę żaru następuje jego odgazowanie, a jego produkty (tlenek węgla, węglowodory, itd.) przechodzą bezpośrednio do strefy suszenia, gdzie ulegają ochłodzeniu i nie dochodzi do ich spalania.

Istnieje grupa kotłów c.o. komorowych - tzw. szybowych, gdzie na ruszt zasypywane jest złożo paliwa, którego rozpalanie następuje od góry. Kotły te ze względu na swoją specyfikę wymagają cyklicznego rozpału, wyposażone są też w specjalne kanały doprowadzające powietrze do całej wysokości złoża, uniemożliwiające tworzenie się stref przebiegu gwałtownych reakcji (wybuchu, spalania detonacyjnego, itp.). Idea pracy takiego kotła wygląda następująco. Rozpala się górną część złoża paliwa, od której nagrzewają się stopniowo niższe warstwy, uzyskując szybko temperaturę początku odgazowania. W miarę spalania się wydzielanych gazów, warstwa żaru przesuwana się w dół, aż do rusztu. W rzeczywistości wypalające się stopniowo paliwo odsłania dysze kanałów powietrza, które wychładza produkty spalania, co negatywnie wpływa na sprawność urządzenia i emisję związków szkodliwych (np. WWA, w tym B(a)P).

W porównaniu do tradycyjnych kotłów komorowych średnia emisja zanieczyszczeń z kotłów szybowych jest jednak niższa. Wadami tych kotłów jest m.in. wysoka emisja zanieczyszczeń podczas rozpalania, wychładzanie spalin powietrzem dostarczanym nad żar (co powoduje spadek sprawności i wzrost emisji zanieczyszczeń), ograniczone możliwości sterowania procesem spalania oraz konieczność stosowania miału o odpowiedniej wilgotności (suche paliwo może powodować zagrożenie wybuchem pomimo dodatkowych kanałów powietrznych, w jakie wyposażone są kotły szybowe).

1.3 Zakres badań

Zakres prac badawczych obejmował:

- wybór urządzeń grzewczych do testów energetyczno-emisyjnych,
- wybór paliw stałych do testów,
- przeprowadzenie analizy fizykochemicznej próbek paliw:
 - oznaczenie zawartości wilgoci W_t^r , W^a , popiołu A^a , części lotnych V^a , V^{daf} ,
 - oznaczenie ciepła spalania Q_s^a , wartości opałowej Q_i^a , Q_f^f ,
 - wykonanie analizy składu elementarnego: C_t^a , H_t^a , N^a , S_t^a , S_A^a , S_C^a , O_d^a ,
- podpięcie i opomiarowanie kotłów c.o. na stanowisku atestacji urządzeń grzewczych i paliw w Laboratorium Technologii Spalania i Energetyki IChPW,
- przeprowadzenie testów energetyczno-emisyjnych przy obciążeniu nominalnym w kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „na żar” (komorowy, zasypowy, z wentylatorem nadmuchowy, będący na wyposażeniu LTSiE), kotle c.o. „szybowym” z ręcznym zasypem paliwa (będący na wyposażeniu LTSiE), kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „na żar” (komorowy, zasypowy, z wentylatorem nadmuchowym, dostarczony przez KAS), kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „na żar” (komorowy, zasypowy, bez wentylatora nadmuchowego, dostarczony przez KAS) oraz piecu typu „KOZA” podczas przeciw i współprądowej realizacji procesu spalania,
- wyznaczenie podczas jednego zasypu bilansowego stężeń takich zanieczyszczeń jak: CO, CO₂, SO₂, NO_x, pył, TOC (zanieczyszczenia organiczne), suma 16 WWA wg EPA w tym B(a)P oraz O₂,
- analizę wyników badań.

1.4 OPIS URZĄDZEŃ W KTÓRYCH PROWADZONO TESTY SPALANIA

Testy energetyczno-emisyjne spalania próbek paliw (węgla kamiennego sort orzech, miął i drewna kawałkowego) przeprowadzono w: kotle c.o. typu KSW PLUS o mocy nominalnej 20 kW, z ręcznym zasypem paliwa, kotle c.o. „szybowym” typu GENERATOR o mocy 35 kW, z ręcznym zasypem paliwa, kotle c.o. typu MODERATOR o mocy nominalnej 25 kW, z ręcznym zasypem paliwa, kotle c.o. typu SKI o mocy nominalnej 17,5 kW, z ręcznym zasypem paliwa, piecu typu „KOZA”, z ręcznym zasypem paliwa.

Kocioł c.o KSW PLUS o mocy 20 kW z ręcznym zasypem paliwa (rys. 1) jest przedstawicielem typoszeregu niskotemperaturowych, stalowych kotłów wodnych, przeznaczonych do układów otwartych, przystosowanych do spalania węgla kamiennego sortyment orzech, sortyment groszek oraz drewna kawałkowego. W jednostkach tych paliwo zasypywane jest do komory załadowniczej na ruszt wodny. Komora załadownicza jest zamknięta drzwiczkami zasypowymi. Na drzwiczkach zasypowych umieszczona jest przepustnica powietrza wtórnego. Nad drzwiczkami zasypowymi znajdują się drzwiczki wyczystne umożliwiające dostęp do wymiennika. Pod ruszt podawany jest strumień powietrza pierwotnego, za pomocą wentylatora nadmuchowego, umieszczonego na górnej części kotła. Spaliny po przejściu przez wymiennik ciepła spaliny-woda, przechodzą przez czopuch kotła do komina. Regulacja wydajności cieplnej kotła realizowana jest przez elektroniczny sterownik. Sterownik ten steruje pracą wentylatora powietrza i pompą obiegową c.o. dążąc do utrzymania zadanej temperatury wody wychodzącej z kotła. Jednostka wyposażona jest również w mechaniczny przegarniacz rusztu. Kocioł izolowany jest wełną mineralną osłoniętą blachą stalową.



Rys. 1. Widok kotła c.o. typu KSW PLUS o mocy 20 kW

Kocioł c.o. typu GENERATOR o mocy 35 kW z ręcznym zasypem paliwa (rys. 2.) jest przedstawicielem typoszeregu niskotemperaturowych, stalowych kotłów wodnych, przeznaczonych do układów otwartych, przystosowanych do spalania węgla kamiennego sortyment miał. W jednostkach tych paliwo zasypywane jest do komory załadowniczej. Rozpał paliwa następuje w górnej warstwie paliwa. Następnie rozpalona warstwa paliwa spala się w dół. Powietrze do spalania

dostarczane jest wentylatorem poprzez dysze umieszczone na różnych wysokościach komory spalania. Regulacja wydajności cieplnej kotła realizowana jest przez elektroniczny sterownik temperatury. Sterownik ten steruje pracą wentylatora powietrza i pompą obiegową c.o.



Rys. 2. Widok kotła c.o. typu GENERATOR o mocy 35 kW

Kocioł c.o. MODERATOR o mocy 25 kW z ręcznym zasypem paliwa (rys. 3) jest przedstawicielem typoszeregu niskotemperaturowych, stalowych kotłów wodnych, przeznaczonych do układów otwartych, przystosowanych do spalania drewna kawałkowego oraz węgla kamiennego sortyment orzech i sortyment groszek. W jednostkach tych paliwo zasypywane jest do komory załadowniczej na ruszt wodny. Komora załadownicza jest zamknięta drzwiczkami zasypowymi. Pod ruszt podawany jest strumień powietrza pierwotnego, za pomocą wentylatora nadmuchowego, umieszczonego w dolnej części kotła. Spaliny po przejściu przez wymiennik ciepła spaliny-woda, przechodzą przez czopuch kotła do komina. Regulacja wydajności cieplnej kotła realizowana jest przez elektroniczny sterownik. Sterownik ten steruje pracą wentylatora powietrza i pompą obiegową c.o. dążąc do utrzymania zadanej temperatury wody wychodzącej z kotła. Jednostka wyposażona jest również w mechaniczny przegarniacz rusztu. Kocioł izolowany jest wełną mineralną osłoniętą blachą stalową.



Rys. 3. Widok kotła c.o. typu MODERATOR o mocy 25 kW

Kocioł c.o. SKI o mocy 17,5 kW z ręcznym zasypem paliwa (rys. 4) jest przedstawicielem typoszeregu niskotemperaturowych, stalowych kotłów wodnych, przeznaczonych do układów otwartych, przystosowanych do spalania koksu i węgla kamiennego sortyment orzech. W jednostkach tych paliwo zasypywane jest do komory załadowniczej na ruszt wodny. Komora załadownicza jest zamknięta drzwiczkami zasypowymi. Na drzwiczkach popielnikowych umieszczona jest przepustnica powietrza pierwotnego regulowana za pomocą miarkownika ciągu w zależności od zadanej temperatury wody zasilającej układ c.o. W drzwiczkach zasypowych umieszczona jest przepustnica powietrza wtórnego. Spaliny po przejściu przez wymiennik ciepła spaliny-woda, przechodzą przez czopuch kotła do komina. Regulacja wydajności cieplnej kotła realizowana jest przez miarkownik ciągu. Kocioł izolowany jest wełną mineralną ostoniętą blachą stalową.



Rys. 4. Widok kotła c.o. typu SKI o mocy 17,5 kW

Piec typu „KOZA” z ręcznym zasypem paliwa (rys. 5) jest przystosowany do spalania drewna i węgla kamiennego sortyment orzech. W jednostkach tych paliwo zasypywane jest do komory załadowniczej na ruszt. Komora załadownicza jest zamknięta drzwiczkami zasypowymi. Pod drzwiczkami umieszczona jest przepustnica powietrza pierwotnego.



Rys. 5. Widok pieca typu „KOZA”

2 PRZEBIEG TESTÓW ENERGETYCZNO-EMISYJNYCH SPALANIA PALIW

Testy energetyczno-emisyjne spalania próbek paliwa prowadzono na stanowisku badawczym w Laboratorium Technologii Spalania i Energetyki działającym w strukturze Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze. Testy spalania każdej z próbek paliw w kotle c.o. obejmowały jeden zasyp paliwa.

Do pomiaru składu spalin wykorzystano analizator mobilny firmy SIEMENS. W skład analizatora wchodzi analizatory ULTRAMAT 23 umożliwiające pomiar CO w zakresie 0÷5%, CO₂ w zakresie 0÷25%, SO₂ w zakresie 0÷1000 ppm i analizator NO o zakresie 0÷1000 ppm. Analizatory te umożliwiają pomiar z wykorzystaniem referencyjnej metody NDIR. Pomiar stężenia O₂ w gazach spalinowych odbywa się za pomocą analizatora typu OXYMAT 61, działającego w oparciu o referencyjną metodę wykorzystującą zjawisko paramagnetyzmu. Analizator ten posiada zakres 0÷25% O₂.

Poboru próbek spalin do analizy dokonywano w sposób ciągły, w punkcie pomiarowym zlokalizowanym w kominie. Do tego celu wykorzystano układ składający się z sondy grzanej z filtrem ceramicznym, węża grzanego oraz układ kondycjonowania gazu.

Pobór próbki spalin do oznaczenia stężenia pyłu i zanieczyszczeń organicznych był realizowany za pomocą układu składającego się z sondy połączonej z ogrzewanym separatorem pyłu, chłodnicy, systemu rurek z materiałem sorpcyjnym: żywicą XAD-2 oraz węglem aktywnym oraz aspiratora gazu.

W trakcie testów spalania rejestrowano parametry pracy kotła takie jak: temperaturę spalin w czopuchu kotła, temperatury wody dolotowej i wylotowej z kotła, przepływ wody przez kocioł oraz ciąg kominowy.

Badania energetyczno-emisyjne przeprowadzono w oparciu o wytyczne następujących akredytowanych procedur i norm obowiązujących w Laboratorium Technologii Spalania i Energetyki:

- Q/LS/01/B:2012 „Oznaczenie sprawności energetycznej”,
- Q/LS/02/B:2012 „Oznaczenie stężeń związków emitowanych w gazach odlotowych i technologicznych”,

- PN-EN 303-5:2012 „Kotły grzewcze -- Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW -- Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie”,
- PN-ISO 10396: 2001 „Emisja ze źródeł stacjonarnych. Pobieranie próbek do automatycznego pomiaru stężenia składników gazowych”.

3 WYNIKI BADAŃ

Właściwości fizykochemiczne próbek paliw oznaczono zgodnie z normami oraz procedurami obowiązującymi w akredytowanym Laboratorium Paliw i Węgla Aktywnych IChPW w Zabrze:

Badane obiekty / Grupa obiektów	Badane cechy i metody badawcze/pomiarowe	Normy i/lub udokumentowane procedury badawcze
Biomasa stała	Ciepło spalania Zakres: (5 000 - 40 000) kJ/kg Metoda kalorymetryczna	Procedura Q/LP/12/A:2011 DIN 51900-2:2003 PN-EN 14918:2010
	Wartość opałowa (z obliczeń)	
	Zawartość wilgoci całkowitej Zakres: (0,4 - 80,0)% Metoda wagowa	Procedura Q/LP/05/A:2011 DIN 51718:2002 PN-EN ISO 18134-1:2015-11 PN-EN ISO 18134-2:2015-11
	Zawartość wilgoci w próbce analitycznej Zakres: (0,4 - 15,0)% Metoda wagowa	Procedura Q/LP/05/A:2011 DIN 51718:2002 PN-EN ISO 18134-3:2015-11
	Zawartość popiołu Zakres: (0,1 - 40,0)% Metoda wagowa	Procedura Q/LP/06/A:2011 DIN 51719:1997 PN-EN ISO 18122:2016-01
	Zawartość części lotnych Zakres: (50,00 - 85,00)% Metoda wagowa	Procedura Q/LP/07/A:2011 PN-EN ISO 18123:2016-01
	Zawartość wilgoci w próbce analitycznej Zakres: (0,4 - 15,0) % Metoda termogravimetryczna	Procedura Q/LP/27/A:2011 PN-EN ISO 18134-3:2015-11
	Zawartość popiołu Zakres: (0,1 - 40,0)% Metoda termogravimetryczna	Procedura Q/LP/27/A:2011 PN-EN ISO 18122:2016-01
	Zawartość siarki całkowitej Zakres: (0,02 - 3,00)% Metoda chromatografii jonowej (IC)	PN-EN ISO 16994:2015
	Zawartość węgla i wodoru Zakres: węgiel:(20-60,0)% wodór:(0,01-8,00)% Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR	Procedura Q/LP/09/A:2012 PN-EN ISO 16948:2015

	Zawartość azotu Zakres: (0,05 - 10,00)% Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją TC	
	Zawartość siarki popiołowej Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR Zakres: (0,02 - 10,00)%	Procedura Q/LP/10/B:2016
	Zawartość siarki palnej (z obliczeń)	
Badane obiekty / Grupa obiektów	Badane cechy i metody badawcze/pomiarowe	Normy i/lub udokumentowane procedury badawcze
Paliwa stałe: - węgiel kamienny - węgiel brunatny - koks z węgla kamiennego Przetworzone paliwa stałe	Zawartość wilgoci przemijającej Zakres: (0,1 - 60,0)% Metoda wagowa	PN-80/G-04511
	Zawartość wilgoci w próbce analitycznej Zakres: (0,1-18,0)% Metoda wagowa	
	Zawartość wilgoci całkowitej Zakres: (0,1 – 60,0)% Metoda wagowa	PN-80/G-04511 p.2.3.2
	Zawartość popiołu Metoda wagowa Zakres: (0,1 - 50,0)%	PN-80/G-04512+Az1:2002 PN-ISO 1171:2002
	Zawartość części lotnych Metoda wagowa Zakres: (0,10 - 50,00)%	PN-G-04516:1998 ISO 562:2010
	Zawartość wilgoci w próbce analitycznej Zakres: (0,1-18,0)% Metoda termograwimetryczna	PN-G-04560:1998
	Zawartość popiołu Zakres:(0,1-50,0)% Metoda termograwimetryczna	
	Ciepło spalania Metoda kalorymetryczna Zakres: (5000 - 40 000) kJ/kg	Procedura Q/LP/03/A:2001 PN-81/G-04513 ISO 1928:2009
	Wartość opałowa (z obliczeń)	
	Zawartość siarki całkowitej i popiołowej Zakres: (0,01 - 8,00)% Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR	PN-G-04584:2001

	Zawartość siarki palnej (z obliczeń)	
	Zawartość siarki całkowitej Zakres: (0,01 - 4,00)% Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR	ISO 19579:2006
	Zawartość węgla i wodoru Zakres: węgiel (20 - 100)% wodór (0,01 - 8,00)% Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR	PN-G-04571:1998 ISO 29541:2010
	Zawartość azotu Zakres:(0,05 - 2,00)% Metoda wysokotemperaturowego spalania z detekcją TC	

Wyniki oznaczeń przedstawiono w Tabelicy 1.

Tablica 1. Wyniki analizy fizykochemicznej próbek paliw wykorzystanych do testów spalania

Parametr	Symb.	Jedn.	Węgiel kamienny sort. orzech	Węgiel kamienny sort. miał	Drewno kawałkowe	
Analiza techniczna	Wilgoć całkowita	W_t^r	%	4,4	20,0	16,1
	Wilgoć analityczna	W^a	%	2,7	2,7	4,4
	Popiół	A^a	%	4,8	4,2	0,3
	Popiół	A^r	%	4,7	3,5	0,3
	Zaw. części lotnych	V^a	%	32,60	31,72	81,42
	Zaw. części lotnych	V^{daf}	%	35,24	34,07	85,44
Analiza elementarna	Węgiel	C_t^a	%	77,8	78,4	48,7
	Wodór	H_t^a	%	4,39	4,42	5,46
	Siarka całkowita	S_t^a	%	0,58	0,52	<0,02
	Siarka całkowita	S_t^r	%	0,57	0,43	<0,02
	Siarka popiołowa	S_a^a	%	0,31	0,21	<0,02
	Siarka palna	S_c^a	%	4,39	0,30	<0,02

	Azot	N^a	%	1,21	1,26	0,08
	Tlen (obliczony)	O_d^a	%	8,84	8,72	41,04
	Ciepło spalania	Q_s^a	kJ/kg	31138	31442	19098
	Wartość opałowa	Q_i^a	kJ/kg	30114	30411	17799
	Wartość opałowa	Q_i^f	kJ/kg	29545	24570	15321

W tablicach 2-11 przedstawiono wyniki testów energetyczno-emisyjnych spalania próbek paliw. Tabele podają dane dotyczące stężeń zanieczyszczeń w spalinach w: procentach, miligramach lub mikrogramach na metr sześcienny w warunkach umownych w warunkach pomiaru (pierwsza kolumna w części tabeli: stężenia zanieczyszczeń) i w przeliczeniu na 10% O₂ (druga kolumna w części tabeli: stężenia zanieczyszczeń) oraz w przeliczeniu na: kilogramy, gramy lub miligramy na kilogram i na gigadzul spalonego paliwa. Do porównań brane są pod uwagę wartości w przeliczaniu na 10% O₂, gdyż jest to spójne z wymaganiami zawartymi w rozporządzeniu ekoprojektu.

Tablica 2. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „szybowym” typu GENERATOR o mocy 35 kW podczas spalania węgla kamiennego sortyment miał w sposób tradycyjny i „zasyp na żar”

Opis		Symb.	Jedn.	węgiel kamienny sortyment miał rozpał od góry		węgiel kamienny sortyment miał zasyp na żar	
Wielkości cieplne	Moc kotła	Q	kW	34,6		21,5	
	Sprawność kotła	η _k	%	85,5		85,6	
	Temperatura spalin	t _{sp}	°C	160,9		125,6	
Ciąg kominowy		p _k	Pa	-25,1		-25,2	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z _{CO2}	%	14,97	9,03*	9,62	9,03*
	O ₂	z _{O2}	%	2,77	10,00	9,28	10,00
	CO	C _{CO}	mg/m ³ _u	21478,7	12960,8	11160,2	10478,1
	SO ₂	C _{SO2}	mg/m ³ _u	801,2	483,5	659,5	619,2
	NO _x	C _{NOx}	mg/m ³ _u	245,7	148,2	186,5	175,1
	Pył	C _{pył}	mg/m ³ _u	212,0	127,9	3150,0	2957,5
	Zanieczyszcz. organiczne	C _{org}	mg/m ³ _u	155,0	93,5	2760,0	2591,3
	16 WWA	C _{WWA}	μg/m ³ _u	6850,0	4133,5	2600,0	2441,1
B(a)P	C _{B(a)p}	μg/m ³ _u	801,0	483,3	205,0	192,5	
Wskaźni ki emisji	CO ₂	E _{CO2}	kg/kg	2,2		2,2	
	CO	E _{CO}	g/kg	155,9		126,0	
	SO ₂	E _{SO2}	g/kg	5,8		7,4	

NO _x	E _{NOx}	g/kg	1,8	2,1
Pył	E _{pył}	g/kg	1,5	35,6
Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/kg	1,1	31,2
16 WWA	E _{WWA}	mg/kg	49,7	29,4
B(a)P	E _{B(a)P}	mg/kg	5,8	2,3
CO ₂	E _{CO2}	kg/GJ	87,4	87,4
CO	E _{CO}	g/GJ	6346,7	5129,6
SO ₂	E _{SO2}	g/GJ	236,7	303,1
NO _x	E _{NOx}	g/GJ	72,6	85,7
Pył	E _{pył}	g/GJ	62,6	1447,8
Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/GJ	45,8	1268,6
16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	2024,1	1195,0
B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	236,7	94,2

*wartość przeliczone na 10 % O₂

W przypadku spalania miału w kotle szybowym przy metodzie palenia "od góry" odnotowano: znaczny spadek stężenia pyłu oraz znaczny wzrost stężenia benzo[a]pirenu. Moc kotła była większa przy technice rozpału od góry. Za szczególnie niekorzystny w warunkach polskich należy uznać wzrost stężenia benzo[a]pirenu. Jest to substancja rakotwórcza i mutagenna. Polskie miejscowości borykają się z bardzo wysokimi stężeniami benzo[a]pirenu. Nawet przy metodzie rozpału "od góry", stężenia pyłu były niestety kilkukrotnie wyższe niż maksymalne stężenia dozwolone dla kotłów z automatycznym podawaniem paliwa klasy 5 czy spełniających wymogi Ekoprojektu – a więc 40 μg/m³.

Tablica 3. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „szybowym” typu GENERATOR o mocy 35 kW podczas spalania drewna kawałkowego w sposób tradycyjny i „zasyp na żar”

Opis		Symb.	Jedn.	Drewno kawałkowe rozpał od góry		Drewno kawałkowe zasyp na żar	
Wielkości cieplne	Moc kotła	Q	kW	24,4		26,2	
	Sprawność kotła	η _k	%	86,7		87,2	
	Temperatura spalin	t _{sp}	°C	146,7		154,4	
Ciąg kominowy		p _k	Pa	-25,0		-24,9	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z _{CO2}	%	9,45	10,10*	12,67	9,79*
	O ₂	z _{O2}	%	10,70	10,00	6,77	10,00
	CO	C _{CO}	mg/m ³ _u	3678,9	3930,4	8386,6	6483,8
	SO ₂	C _{SO2}	mg/m ³ _u	0,0	0,0	0,0	0,0
	NO _x	C _{NOx}	mg/m ³ _u	196,8	210,2	203,4	157,3
	Pył	C _{pył}	mg/m ³ _u	97,9	104,6	142,0	109,8
	Zanieczyszcz. organiczne	C _{org}	mg/m ³ _u	48,9	52,2	235,0	181,7
	16 WWA	C _{WWA}	μg/m ³ _u	341,0	364,3	517,0	399,7

	B(a)P	C _{B(a)P}	µg/m ³ _u	51,3	54,8	81,6	63,1
Wskaźniki emisji	CO ₂	E _{CO2}	kg/kg	1,5		1,4	
	CO	E _{CO}	g/kg	28,8		47,6	
	SO ₂	E _{SO2}	g/kg	0,0		0,0	
	NO _x	E _{NOx}	g/kg	1,5		1,2	
	Pył	E _{pył}	g/kg	0,8		0,8	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/kg	0,4		1,3	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/kg	2,7		2,9	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/kg	0,4		0,5	
	CO ₂	E _{CO2}	kg/GJ	95,5		92,7	
	CO	E _{CO}	g/GJ	1881,7		3104,9	
	SO ₂	E _{SO2}	g/GJ	0,0		0,0	
	NO _x	E _{NOx}	g/GJ	100,7		75,3	
	Pył	E _{pył}	g/GJ	50,1		52,6	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/GJ	25,0		87,0	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	174,4		191,4	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	26,2		30,2	

*wartość przeliczone na 10 % O₂

W przypadku zastosowania drewna kawałkowego nie odnotowano znaczących różnic między rozpałem od góry, a zasypem na żar. Stężenia pyłu oraz benzo[a]pirenu są niższe podczas rozpału od góry niż w przypadku zasypu na żar, choć nie są to różnice duże. W każdym przypadku stężenia pyłu są wyższe niż dla kotłów na drewno kawałkowe z ręcznym zasypem paliwa spełniających wymogi klasy 5 czy Ekoprojektu, a więc 60 µg/m³.

Tablica 4. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „komorowym” typ KSW PLUS o mocy 20 kW podczas spalania węgla kamiennego sortyment orzech w sposób tradycyjny i „od góry”

Opis		Symb.	Jedn.	węgiel kamienny sortyment orzech zasyp na żar		węgiel kamienny sortyment orzech rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc kotła	Q	kW	20,9		12,4	
	Sprawność kotła	η _k	%	76,9		72,5	
	Temperatura spalin	t _{sp}	°C	249,9		199,0	
Ciąg kominowy		p _k	Pa	-25,0		-22,1	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z _{CO2}	%	9,36	8,78*	5,75	9,02*
	O ₂	z _{O2}	%	9,27	10,00	13,99	10,00
	CO	C _{CO}	mg/m ³ _u	9530,1	8937,0	5207,5	8171,1
	SO ₂	C _{SO2}	mg/m ³ _u	310,6	291,3	293,6	460,6
	NO _x	C _{NOx}	mg/m ³ _u	220,5	206,8	237,3	372,4
	Pył	C _{pył}	mg/m ³ _u	1410,0	1322,3	178,0	279,3

	Zanieczyszcz. organiczne	C _{org}	mg/m ³ _u	1360,0	1275,4	48,2	75,6
	16 WWA	C _{WWA}	μg/m ³ _u	6228,0	5840,4	538,8	845,4
	B(a)P	C _{B(a)P}	μg/m ³ _u	347,0	325,4	54,8	86,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E _{CO2}	kg/kg	2,3		2,5	
	CO	E _{CO}	g/kg	118,4		116,5	
	SO ₂	E _{SO2}	g/kg	3,9		6,6	
	NO _x	E _{NOx}	g/kg	2,7		5,3	
	Pył	E _{pył}	g/kg	17,5		4,0	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/kg	16,9		1,1	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/kg	77,4		12,1	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/kg	4,3		1,2	
	CO ₂	E _{CO2}	kg/GJ	83,7		86,1	
	CO	E _{CO}	g/GJ	4310,8		3943,3	
	SO ₂	E _{SO2}	g/GJ	140,5		222,3	
	NO _x	E _{NOx}	g/GJ	99,7		179,7	
	Pył	E _{pył}	g/GJ	637,8		134,8	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/GJ	615,2		36,5	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	2817,1		408,0	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	157,0		41,5	

*wartość przeliczone na 10 % O₂

W przypadku spalania „od góry” węgla sortyment orzech w kotle komorowym zaobserwowano bardzo niekorzystne zjawisko znacznego spadku mocy kotła - niemal dwukrotna różnica. Odnotowano znaczny spadek stężeń pyłu oraz benzo[a]pirenu przy rozpale od góry - choć jeśli weźmiemy pod uwagę różnicę w mocy kotła to różnice w stężeniach tych zanieczyszczeń będą mniejsze. Stężenia dwutlenku siarki były niższe w przypadku zasypu na żar. Niemniej jednak, w przypadku tego kotła zasilanego węglem kamiennym, stężenia pyłu nadal są kilkukrotnie wyższe niż w przypadku kotłów z automatycznym podawaniem paliwa klasy 5 oraz spełniających wymogi Ekoprojektu - które można uznać za najlepszą dostępną na polskim rynku technologię jeśli chodzi o kotły na węgiel (40 μg/m³).

Tablica 5. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle c.o. z ręcznym zasypem paliwa „komorowym” typ KSW PLUS o mocy 20 kW podczas spalania drewna kawałkowego w sposób tradycyjny i „od góry”

Opis		Symb.	Jedn.	Drewno kawałkowe zasyp na żar		Drewno kawałkowe rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc kotła	Q	kW	17,4		17,3	
	Sprawność kotła	η_k	%	75,0		72,3	
	Temperatura spalin	t_{sp}	°C	236,0		251,0	
Ciąg kominowy		p_k	Pa	-25,1		-24,1	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z_{CO_2}	%	9,07	8,40*	9,98	10,08*
	O ₂	z_{O_2}	%	9,12	10,00	10,11	10,00
	CO	C_{CO}	mg/m ³ _u	12674,5	11740,2	7751,6	7827,8
	SO ₂	C_{SO_2}	mg/m ³ _u	0,0	0,0	0,0	0,0
	NO _x	C_{NO_x}	mg/m ³ _u	96,2	89,1	176,7	178,5
	Pył	$C_{pył}$	mg/m ³ _u	254,0	235,3	180,0	181,8
	Zanieczyszcz. organiczne	C_{org}	mg/m ³ _u	512,0	474,3	206,0	208,0
	16 WWA	C_{WWA}	μg/m ³ _u	1720,1	1593,3	2397,4	2421,0
B(a)P	$C_{B(a)P}$	μg/m ³ _u	27,5	25,5	520,0	525,1	
Wskaźniki emisji	CO ₂	E_{CO_2}	kg/kg	1,2		1,5	
	CO	E_{CO}	g/kg	86,1		57,5	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/kg	0,0		0,0	
	NO _x	E_{NO_x}	g/kg	0,7		1,3	
	Pył	$E_{pył}$	g/kg	1,7		1,3	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/kg	3,5		1,5	
	16 WWA	E_{WWA}	mg/kg	11,7		17,8	
	B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/kg	0,2		3,9	
	CO ₂	E_{CO_2}	kg/GJ	79,5		95,4	
	CO	E_{CO}	g/GJ	5620,6		3750,0	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/GJ	0,0		0,0	
	NO _x	E_{NO_x}	g/GJ	42,7		85,5	
	Pył	$E_{pył}$	g/GJ	112,6		87,1	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/GJ	227,1		99,7	
	16 WWA	E_{WWA}	mg/GJ	762,8		1159,8	
	B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/GJ	12,2		251,6	

*wartość przeliczone na 10 % O₂

W przypadku spalania drewna kawałkowego w kotle komorowym zaobserwowano bardzo wysoki wzrost stężenia benzo[a]pirenu przy rozpale metodą "od góry". Stężenia pyłu przy rozpale od góry były niższe choć nie była to bardzo duża różnica. Natomiast moc kotła nie uległa zmianie i była na takim samym poziomie przy wykorzystaniu obydwu metod. Znaczny wzrost benzo[a]pirenu należy

uznać za zjawisko wysoce niekorzystne. Benzo[a]piren to zanieczyszczenie o udokumentowanym wpływie rakotwórczym i mutagennym. Niestety Polska należy do krajów UE o najwyższych stężeniach tej substancji w powietrzu. Dlatego do czynnika tego należy przykładać znaczną wagę. Emisja pyłu przy rozpale „od góry” była trzykrotnie wyższa niż w urządzeniach spełniających wymagania Ekoprojektu ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tablica 6. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle komorowym typu MODERATOR o mocy 25 kW podczas spalania drewna kawałkowego z zasypem na żar i od góry

Opis		Symb.	Jedn.	Drewno kawałkowe zasyp na żar		Drewno kawałkowe rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc ogrzewacza	Q	kW	17,1		16,5	
	Sprawność kotła	η_k	%	78,2		77,4	
	Temperatura spalin	t_{sp}	°C	218,4		239,4	
Ciąg kominowy		p_k	Pa	28,8		26,5	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z_{CO_2}	%	10,94	9,9*	10,77	10,0*
	O ₂	z_{O_2}	%	8,68	10,0	9,13	10,0
	CO	C_{CO}	mg/m^3_u	15820,4	14364,1	12503,4	11589,1
	SO ₂	C_{SO_2}	mg/m^3_u	0,0	0,0	0,0	0,0
	NO _x	C_{NO_x}	mg/m^3_u	137,8	125,1	137,6	127,6
	Pył	$C_{pył}$	mg/m^3_u	584,0	530,0	427,0	396,0
	Zanieczyszcz. organiczne	C_{org}	mg/m^3_u	690,0	626,0	381,0	353,0
	16 WWA	C_{WWA}	$\mu\text{g}/\text{m}^3_u$	8130,0	7381,6	13900,0	12883,5
	B(a)P	$C_{B(a)P}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3_u$	440,0	399,0	998,0	925,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E_{CO_2}	kg/kg	1,4		1,5	
	CO	E_{CO}	g/kg	105,4		85,0	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/kg	0,0		0,0	
	NO _x	E_{NO_x}	g/kg	0,9		0,9	
	Pył	$E_{pył}$	g/kg	3,9		2,9	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/kg	4,6		2,6	
	16 WWA	E_{WWA}	mg/kg	54,1		94,5	
	B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/kg	2,9		6,8	
	CO ₂	E_{CO_2}	kg/GJ	94,0		94,5	
	CO	E_{CO}	g/GJ	6876,8		5549,4	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/GJ	0,0		0,0	
	NO _x	E_{NO_x}	g/GJ	59,9		61,1	
	Pył	$E_{pył}$	g/GJ	253,9		189,5	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/GJ	299,9		169,1	
	16 WWA	E_{WWA}	mg/GJ	3533,9		6169,3	
	B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/GJ	191,3		442,9	

*wartość przeliczone na 10 % O₂

W przypadku spalania drewna kawałkowego w kotle komorowym typu MODERATOR mamy do czynienia z nieznacznym spadkiem stężenia pyłu w przypadku rozpału "od góry". Stężenie w trakcie zastosowania metody "od góry" było około 7-krotnie wyższe niż maksymalne dopuszczalne stężenia dla kotłów z ręcznym podawaniem paliwa (drewna kawałkowego) spełniających wymogi Ekoprojektu ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Natomiast emisja benzo[a]pirenu jest dwukrotnie wyższa w przypadku rozpału "od góry" niż w przypadku zasypu na żar. W świetle bardzo wysokich stężeń benzo[a]pirenu w Polsce zwiększoną emisję tego zanieczyszczenia należy postrzegać jako czynnik negatywny.

Tablica 7. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle komorowym typu MODERATOR o mocy 25 kW podczas spalania węgla kamiennego sortyment orzech z zasypem na żar i od góry

Opis		Symb.	Jedn.	węgiel kamienny sortyment orzech zasyp na żar		węgiel kamienny sortyment orzech rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc ogrzewacza	Q	kW	21,8		22,4	
	Sprawność kotła	η_k	%	75,8		76,4	
	Temperatura spalin	t_{sp}	°C	247,1		246,1	
Ciąg kominowy		p_k	Pa	32,9		34,7	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z_{CO_2}	%	8,76	8,6*	7,70	9,6*
	O ₂	z_{O_2}	%	9,72	10,0	12,14	10,0
	CO	C_{CO}	mg/m^3_u	8339,5	8129,9	3194,1	3965,7
	SO ₂	C_{SO_2}	mg/m^3_u	425,4	414,7	358,8	445,5
	NO _x	C_{NO_x}	mg/m^3_u	249,7	243,4	233,3	289,6
	Pył	$C_{pył}$	mg/m^3_u	709,0	692,0	321,0	398,0
	Zanieczyszcz. organiczne	C_{org}	mg/m^3_u	641,0	625,0	174,0	216,0
	16 WWA	C_{WWA}	$\mu\text{g}/\text{m}^3_u$	15000,0	14622,9	4660,0	5785,7
	B(a)P	$C_{B(a)P}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3_u$	1170,0	1140,6	293,0	364,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E_{CO_2}	kg/kg	2,4		2,7	
	CO	E_{CO}	g/kg	116,0		56,5	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/kg	5,9		6,4	
	NO _x	E_{NO_x}	g/kg	3,5		4,1	
	Pył	$E_{pył}$	g/kg	9,9		5,7	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/kg	8,9		3,1	
	16 WWA	E_{WWA}	mg/kg	208,6		82,5	
	B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/kg	16,3		5,2	
	CO ₂	E_{CO_2}	kg/GJ	81,8		91,2	
	CO	E_{CO}	g/GJ	3924,5		1913,7	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/GJ	200,2		215,0	
	NO _x	E_{NO_x}	g/GJ	117,5		139,8	
	Pył	$E_{pył}$	g/GJ	333,6		192,3	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/GJ	301,6		104,2	

16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	7058,9	2791,9
B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	550,6	175,5

*wartość przeliczone na 10 % O₂

W przypadku spalania węgla sortyment orzech w kotle komorowym typu MODERATOR odnotowano spadek stężenia pyłu oraz benzo[a]pirenu w metodzie rozpału "od góry", w porównaniu z metodą zasypu na żar. W dalszym ciągu stężenie pyłu przy stosowaniu rozpału "od góry" jest niemal dziesięciokrotnie wyższe niż dopuszczalne dla kotłów z automatycznym podawaniem paliwa 5 klasy (40 µg/m³). Moc kotła była taka sama przy obydwu próbach.

Tablica 8. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w żeliwnym ogrzewaczu pomieszczeń podczas spalania drewna kawałkowego w z zasypem na żar i od góry

Opis		Symb.	Jedn.	Drewno kawałkowe zasyp na żar		Drewno kawałkowe rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc ogrzewacza	Q	kW	12,7		15,1	
	Sprawność ogrzewacza	η _k	%	74,4		69,9	
	Temperatura spalin	t _{sp}	°C	305,4		272,0	
Ciąg kominowy		p _k	Pa	12,8		16,8	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z _{CO2}	%	9,72	10,3*	6,92	10,3*
	O ₂	z _{O2}	%	10,59	10,0	13,59	10,0
	CO	C _{CO}	mg/m ³ _u	4770,0	5038,4	3986,1	5918,5
	SO ₂	C _{SO2}	mg/m ³ _u	0,0	0,0	0,0	0,0
	NO _x	C _{NOx}	mg/m ³ _u	117,7	124,3	89,8	133,4
	Pył	C _{pył}	mg/m ³ _u	179,0	189,0	258,0	383,0
	Zanieczyszcz. organiczne	C _{org}	mg/m ³ _u	304,0	321,0	409,0	607,0
	16 WWA	C _{WWA}	µg/m ³ _u	1490,0	1573,8	2370,0	3518,9
	B(a)P	C _{B(a)p}	µg/m ³ _u	66,9	70,7	226,0	336,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E _{CO2}	kg/kg	1,5		1,5	
	CO	E _{CO}	g/kg	37,0		43,4	
	SO ₂	E _{SO2}	g/kg	0,0		0,0	
	NO _x	E _{NOx}	g/kg	0,9		1,0	
	Pył	E _{pył}	g/kg	1,4		2,8	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/kg	2,4		4,5	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/kg	11,5		25,8	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/kg	0,5		2,5	
	CO ₂	E _{CO2}	kg/GJ	97,2		97,3	
	CO	E _{CO}	g/GJ	2414,0		2834,0	
	SO ₂	E _{SO2}	g/GJ	0,0		0,0	
	NO _x	E _{NOx}	g/GJ	59,5		63,9	

Pył	$E_{pył}$	g/GJ	90,4	183,0
Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/GJ	154,0	291,0
16 WWA	E_{WWA}	mg/GJ	753,0	1680,0
B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/GJ	33,9	161,0

*wartość przeliczone na 10 % O₂

Przy spalaniu drewna kawałkowego w żeliwnym ogrzewaczu pomieszczeń typu "KOZA" zaobserwowano wyższe stężenia pyłu przy spalaniu "od góry" w porównaniu do tradycyjnej metody palenia. Podobnie w przypadku benzo[a]pirenu, "zasyp na żar" powoduje kilkukrotnie mniejsze emisje niż rozpał "od góry". Zatem po raz kolejny mamy do czynienia ze zwiększoną emisją benzo[a]pirenu w przypadku rozpału "od góry". Moc ogrzewacza była porównywalna przy obydwu metodach spalania.

Tablica 9. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w żeliwnym ogrzewaczu pomieszczeń podczas spalania węgla kamiennego sortyment orzech z zasypem na żar i od góry

Opis		Symb.	Jedn.	węgiel kamienny sortyment orzech zasyp na żar		węgiel kamienny sortyment orzech rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc ogrzewacza	Q	kW	21,2		22,5	
	Sprawność ogrzewacza	η_k	%	54,9		49,8	
	Temperatura spalin	t_{sp}	°C	245,1		224,2	
Ciąg kominowy		p_k	Pa	24,8		25,0	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	Z_{CO_2}	%	3,56	8,5*	2,88	8,6*
	O ₂	Z_{O_2}	%	16,39	10,0	17,32	10,0
	CO	C_{CO}	mg/m ³ _u	2738,5	6530,4	2098,4	6276,4
	SO ₂	C_{SO_2}	mg/m ³ _u	252,8	602,8	164,0	490,4
	NO _x	C_{NO_x}	mg/m ³ _u	202,5	482,8	191,0	571,3
	Pył	$C_{pył}$	mg/m ³ _u	344,0	821,0	284,0	848,0
	Zanieczyszcz. organiczne	C_{org}	mg/m ³ _u	418,0	997,0	324,0	958,0
	16 WWA	C_{WWA}	μg/m ³ _u	1360,0	3243,1	738,0	2207,4
	B(a)P	$C_{B(a)P}$	μg/m ³ _u	102,0	244,0	39,9	119,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E_{CO_2}	kg/kg	2,4		2,4	
	CO	E_{CO}	g/kg	93,2		89,4	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/kg	8,6		7,0	
	NO _x	E_{NO_x}	g/kg	6,9		8,1	
	Pył	$E_{pył}$	g/kg	11,7		12,1	
	Zanieczyszcz. organiczne	E_{org}	g/kg	14,2		13,8	
	16 WWA	E_{WWA}	mg/kg	46,3		31,5	
	B(a)P	$E_{B(a)P}$	mg/kg	3,5		1,7	
	CO ₂	E_{CO_2}	kg/GJ	81,0		82,1	
	CO	E_{CO}	g/GJ	3153,3		3026,9	
	SO ₂	E_{SO_2}	g/GJ	291,1		236,6	

NO _x	E _{NOx}	g/GJ	233,2	275,5
Pył	E _{pył}	g/GJ	396,1	409,7
Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/GJ	481,3	467,4
16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	1566,0	1064,5
B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	117,4	57,6

*wartość przeliczone na 10 % O₂

Przy spalaniu węgla sortyment orzech w żeliwnym ogrzewaczu pomieszczeń typu "KOZA" zaobserwowano nieznacznie wyższe stężenia pyłu przy metodzie palenia „od góry” (względem metody zasypu na żar). Należy zaznaczyć, że stężenia przy rozpale "od góry" i na żar były wielokrotnie wyższe niż maksymalne wskaźniki emisji dla urządzeń spełniających wymogi Ekoprojektu (50 µg/m³). Stężenia benzo[a]pirenu były niższe około dwukrotnie w przypadku palenia "od góry". Moc ogrzewacza była porównywalna przy wykorzystaniu obu metod.

Tablica 10. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle komorowym typu SKI o mocy 17,5 kW podczas spalania drewna kawałkowego z zasypem na żar i od góry

Opis		Symb.	Jedn.	Drewno kawałkowe zasyp na żar		Drewno kawałkowe rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc kotła	Q	kW	14,3		11,5	
	Sprawność kotła	η _k	%	77,3		77,9	
	Temperatura spalin	t _{sp}	°C	225,5		242,8	
Ciąg kominowy		p _k	Pa	31,5		27,9	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	z _{CO2}	%	10,95	9,7*	9,62	10,0*
	O ₂	z _{O2}	%	8,58	10,0	10,39	10,0
	CO	C _{CO}	mg/m ³ _u	18008,3	15948,7	5017,9	5203,5
	SO ₂	C _{SO2}	mg/m ³ _u	0,0	0,0	0,0	0,0
	NO _x	C _{NOx}	mg/m ³ _u	218,3	193,3	209,2	216,9
	Pył	C _{pył}	mg/m ³ _u	1370,0	1213,3	219,0	227,0
	Zanieczyszcz. organiczne	C _{org}	mg/m ³ _u	1330,0	1177,9	216,0	224,0
	16 WWA	C _{WWA}	µg/m ³ _u	11200,0	9919,1	2930,0	3038,4
	B(a)P	C _{B(a)p}	µg/m ³ _u	1630,0	1443,6	158,0	164,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E _{CO2}	kg/kg	1,4		1,5	
	CO	E _{CO}	g/kg	117,0		38,2	
	SO ₂	E _{SO2}	g/kg	0,0		0,0	
	NO _x	E _{NOx}	g/kg	1,4		1,6	
	Pył	E _{pył}	g/kg	8,9		1,7	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/kg	8,6		1,6	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/kg	72,8		22,3	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/kg	10,6		1,2	
	CO ₂	E _{CO2}	kg/GJ	91,8		94,4	
	CO	E _{CO}	g/GJ	7638,7		2491,6	

SO ₂	E _{SO2}	g/GJ	0,0	0,0
NO _x	E _{NOx}	g/GJ	92,6	103,9
Pył	E _{pył}	g/GJ	581,1	108,7
Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/GJ	564,2	107,3
16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	4750,8	1454,9
B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	691,4	78,5

*wartość przeliczone na 10 % O₂

Przy spalaniu drewna kawałkowego w kotle komorowym typu SKI odnotowano duży spadek stężenia pyłu oraz benzo[a]pirenu przy paleniu „od góry”. Moc kotła była niższa w przypadku rozpału "od góry". Warto podkreślić, że wartości emisji poszczególnych zanieczyszczeń z kotła c.o., nawet przy zastosowaniu "górnego" spalania, nadal plasują to urządzenie wśród kotłów pozaklasowych. W porównaniu z kryteriami klasy 5 wartości emisji zanieczyszczeń były niemal 4 krotnie wyższe.

Tablica 11. Wyniki badań energetyczno - emisyjnych przeprowadzonych w kotle komorowym typu SKI o mocy 17,5 kW podczas spalania węgla kamiennego sortyment orzech z zasypem na żar i od góry

Opis		Symb.	Jedn.	węgiel kamienny sortyment orzech zasyp na żar		węgiel kamienny sortyment orzech rozpał od góry	
Wielkości cieplne	Moc kotła	Q	kW	11,3		6,9	
	Sprawność kotła	η _k	%	74,3		69,6	
	Temperatura spalin	t _{sp}	°C	209,4		172,9	
Ciąg kominowy		p _k	Pa	27,1		26,2	
Stężenia zanieczyszczeń	CO ₂	Z _{CO2}	%	6,59	9,3*	4,14	9,2*
	O ₂	Z _{O2}	%	13,16	10,0	16,04	10,0
	CO	C _{CO}	mg/m ³ _u	3989,3	5598,1	1832,9	4063,1
	SO ₂	C _{SO2}	mg/m ³ _u	356,7	500,6	122,7	272,0
	NO _x	C _{NOx}	mg/m ³ _u	210,0	294,7	242,9	538,5
	Pył	C _{pył}	mg/m ³ _u	584,0	819,0	246,0	547,0
	Zanieczyszcz. organiczne	C _{org}	mg/m ³ _u	406,0	569,0	232,0	515,0
	16 WWA	C _{WWA}	μg/m ³ _u	11200,0	15716,6	1890,0	4189,7
	B(a)P	C _{B(a)p}	μg/m ³ _u	1100,0	1543,6	97,8	217,0
Wskaźniki emisji	CO ₂	E _{CO2}	kg/kg	2,6		2,6	
	CO	E _{CO}	g/kg	79,8		58,0	
	SO ₂	E _{SO2}	g/kg	7,1		3,9	
	NO _x	E _{NOx}	g/kg	4,2		7,7	
	Pył	E _{pył}	g/kg	11,7		7,8	
	Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/kg	8,1		7,3	
	16 WWA	E _{WWA}	mg/kg	224,0		59,8	
	B(a)P	E _{B(a)P}	mg/kg	22,0		3,1	

CO ₂	E _{CO2}	kg/GJ	88,2	87,6
CO	E _{CO}	g/GJ	2701,1	1961,6
SO ₂	E _{SO2}	g/GJ	241,5	131,3
NO _x	E _{NOx}	g/GJ	142,2	260,0
Pył	E _{pył}	g/GJ	395,4	263,3
Zanieczyszcz. organiczne	E _{org}	g/GJ	274,9	248,3
16 WWA	E _{WWA}	mg/GJ	7583,3	2022,7
B(a)P	E _{B(a)P}	mg/GJ	744,8	104,7

*wartość przeliczone na 10 % O₂

Przy spalaniu „od góry” węgla kamiennego sortyment orzech w kotle komorowym typu SKI odnotowano spadek stężenia pyłu, a także bardzo znaczny spadek stężenia benzo[a]pirenu. Jednak, w tym samym czasie odnotowano negatywne zjawisko polegające na zmniejszeniu mocy kotła - aż o 40%, za czym mogą iść znaczne problemy z utrzymaniem komfortu cieplnego. Warto podkreślić, że emisja zanieczyszczeń z badanego kotła nawet przy zastosowaniu "górnego" spalania, nadal plasuje to urządzenia wśród kotłów pozaklasowych. W porównaniu z kryteriami klasy 5 dla kotłów z automatycznym podawaniem paliwa emisja zanieczyszczeń podczas „górnego spalania” była 14 razy wyższa.

4 Wnioski z badań

Głównym wnioskiem, jaki nasuwa się po analizie jest fakt, że technika rozpału „od góry” jest techniką o nieprzewidywalnym wpływie na emisyjność. Nie jest prawdą, że stosowanie jej przekłada się na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń powietrza w każdym przypadku, bez względu na typ urządzenia czy paliwa, które spalamy. Wyniki z przeprowadzonych 20 prób (5 urządzeń, dwa rodzaje paliwa w każdym, dwa sposoby rozpału) wskazują, że są przypadki kiedy to odnotowujemy spadek, czasem nawet znaczny, w emisji pyłu czy benzo[a]pirenu. Jednak, takie wyniki uzyskano jedynie dla części prób. W wielu przypadkach nie odnotowano znacznych spadków, wręcz przeciwnie, zauważono wzrost emisji zanieczyszczeń, w tym rakotwórczego benzo[a]pirenu – i to zarówno w przypadku węgla jak i drewna. Wzrost emisji benzo[a]pirenu jest zjawiskiem szczególnie niekorzystnym, gdyż normy dla stężenia tego zanieczyszczenia są przekroczone na praktycznie wszystkich stacjach pomiarowych w Polsce, a w wielu miejscach przekroczenia te są wielokrotne. W części prób nie odnotowano praktycznie żadnej różnicy jeśli chodzi emisję pyłu i benzo[a]pirenu. Zatem prezentowanie metody palenia „od góry” jako szybkiego i bezinwestycyjnego remedium na zanieczyszczenie powietrza w naszym kraju niestety należy uznać za nieuzasadnione.

Warto podkreślić, że w żadnej próbie z przeprowadzonych 20, nie uzyskano emisyjności porównywalnej z emisyjnością urządzeń spełniających klasę 5 lub wymagania Ekoprojektu. Średnia uzyskana emisyjność pyłu dla węgla spalanego w badanych czterech kotłach (średnia dla czterech urządzeń) wynosi $338 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a emisyjność urządzeń spełniających wymagania Ekoprojektu to $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dla drewna średnia z czterech kotłów to: $228 \mu\text{g}/\text{m}^3$ natomiast maksymalna emisyjność dla urządzeń spełniających wymogi Ekoprojektu spalających drewno kawałkowe to $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Widać zatem ogromną przepaść między stosowaniem metody rozpału „od góry”, a stosowaniem nowoczesnych kotłów na paliwa stałe – dla węgla różnica ta jest ponad ośmiokrotna, a dla drewna niemal czterokrotna. Jak wskazują analizy prowadzone na potrzeby programów ochrony powietrza (np. w Małopolskim Programie Ochrony Powietrza) jedynie zredukowanie emisyjności do poziomu wymagań Ekoprojektu lub klasy 5 daje gwarancję znaczącej poprawy jakości powietrza i spełnienia norm jakości powietrza zdefiniowanych w prawie. Dlatego też uchwały antysmogowe zakładają wymianę urządzeń grzewczych właśnie na kotły spełniające wymogi klasy 5 lub Ekoprojektu. Metoda górnego spalania nie stanowi zatem rozwiązania, które

pozwole znacząco poprawić jakość powietrza na terenie Polski. Nie umożliwi również spełnienia norm jakości powietrza określonych prawem.

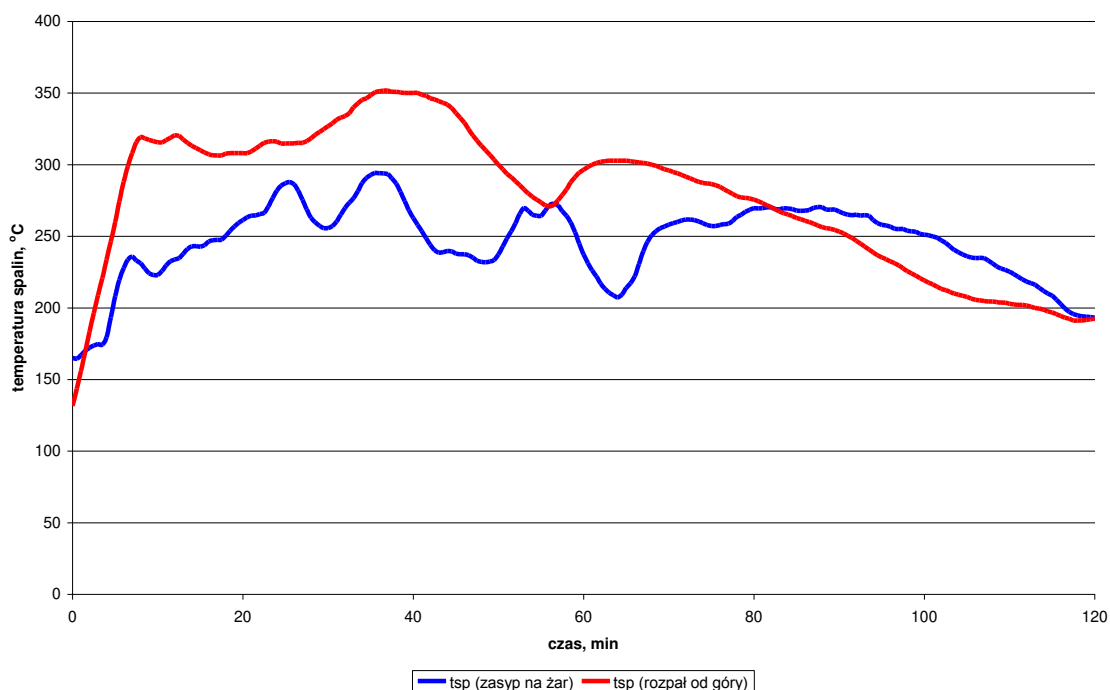
Jeśli przeanalizujemy wszystkie 20 cykli przeprowadzonych na potrzeby niniejszego badania, okazuje się, że w przypadku pyłu na 10 prób w 3 przypadkach stężenia pyłu znacznie mniejsze przy „górnym” rozpale niż zasypie na żar (różnica większa niż 50%), podobne stężenia (różnica mniejsza niż 50%) odnotowano w 6 przypadkach, a w 1 przypadku stężenia pyłu przy „górnym” rozpale były znacznie wyższe niż przy zasypie na żar. Dla benzo[a]pirenu jedynie w jednym przypadku stężenia były podobne, w 5 były znacznie niższe przy technice rozpału „od góry”, a w 4 przy zasypie na żar. Można zatem podsumować, że górne spalanie przynosi znaczną redukcję w mniej niż połowie przypadków. Powstaje więc pytanie czy zasadnym będzie lokowanie znacznych zasobów finansowych, kadrowych oraz organizacyjnych w promocję tego rozwiązania. Szczególnie też biorąc pod uwagę, że w każdej z 20 prób emisyjność przy zastosowaniu rozpału od „góry” wciąż pozostawała na poziomie kotła pozaklasowego i była przynajmniej kilkukrotnie, a czasami nawet kilkunastokrotnie, wyższa niż najlepszej dostępnej na rynku technologii – czyli urządzenia 5 klasy lub spełniającego wymogi Ekoprojektu.

Stężenia pyłu	
Znacznie mniej pyłu przy „górnym”	3 przypadki
Różnica mniejsza niż 50%	6 przypadków
Znacznie mniej pyłu przy „zasypie na żar”	1 przypadek
Stężenia benzo[a]pirenu	
Znacznie mniej b[a]p przy „górnym”	5 przypadków
Różnica mniejsza niż 50%	1 przypadek
Znacznie mniej b[a]p przy „zasypie na żar”	4 przypadki

Jak wykazano poprzez przeprowadzane badania energetyczno-emisyjne, w kotłach c.o. „szybwych” zarówno paliwa podstawowe jak i zastępcze powinno się spalać rozpalając złożę paliwa od góry. Tego typu prowadzenie procesu spalania, w urządzeniach z doprowadzeniem powietrza pod ruszt oraz wielopunktowo do komory spalania daje stosunkowo najlepsze parametry energetyczne (moc, sprawność) jak i stosunkowo najniższą emisję zanieczyszczeń.

Badania przeprowadzone na typowym kotle c.o. komorowym podczas spalania drewna wskazują na gwałtowny wzrost temperatury spalin w pierwszej fazie procesu spalania drewna

rozpalanego od góry. Jednoznacznie świadczy to o niedopasowaniu warunków procesu do możliwości odbioru ciepła przewidzianych przez konstruktora kotła. W tej fazie mamy do czynienia z największymi naprężeniami materiałów, ponieważ wszystkie elementy kotła wygrzewają się od temperatury otoczenia, do temperatury osiągananej podczas standardowej pracy kotła. Obserwowany na wylocie spalin szybki wzrost temperatury jest odzwierciedleniem znacznych prędkości i wzrostów temperatur w strefie komory spalania. W dłuższej eksploatacji będzie to skutkowało znacznie szybszym zużyciem urządzenia grzewczego, a także prawdopodobnie awarią polegającą na rozszczelnieniu się wymiennika ciepła. Ponieważ komora spalania w kotłach komorowych zamykana jest drzwiczkami, wyższe temperatury mogą powodować ich wypaczenie, co w konsekwencji spowoduje obniżenie szczelności obiegu spalin i wydostawanie się części gazów spalinowych do pomieszczenia, w którym dane urządzenie grzewcze stoi. Niebezpieczna stanie się również eksploatacja takiego urządzenia, ponieważ elementy, które dotyka się podczas użytkowania kotła będą miały wyższą temperaturę i może dojść do poparzenia.



Rys. 6. Temperatura spalin mierzona na wylocie z kotła (w czopuchu) podczas spalania drewna w kotle komorowym

Należy również wspomnieć, że stosowanie techniki spalania „od góry” nie jest możliwe we wszystkich urządzeniach grzewczych. Większość pieców kaflowych ma na tyle niską komorę spalania, że zastosowanie w tych urządzeniach takiej techniki spalania byłoby bardzo kłopotliwe.

Kolejną niedogodnością stosowania techniki spalania „od góry” może być jej jest czasochłonność. Za każdym bowiem razem należy takie żłoże rozpalić, bądź też wyjąć pozostały żar z urządzenia, umieścić na ruszcie wymaganą porcję paliwa, na górze umieszczając wyjęty uprzednio żar. Tego typu operacje nawet z wykorzystaniem popielnika niosą za sobą zagrożenie poparzenia osoby obsługującej urządzenie oraz zagrożenie zapruszenia ognia i pożaru. Są też źródłem znacznej emisji zanieczyszczeń w kotłowni.

W Polsce mamy bardzo dużą ilość wszelakich konstrukcji kotłów c.o. komorowych z ręcznym zasypem paliwa. Wybrane do badań kotły c.o. są typowymi urządzeniami grzewczymi stosowanymi w sektorze ogrzewnictwa indywidualnego, nie są jednak próbką reprezentatywną, a więc przedstawione w pracy wyniki badań nie powinny być bezpośrednio przypisywane do innych, podobnych konstrukcji. Na pewno, w niektórych istnieje możliwość prowadzenia procesu spalania „od góry” podobnie jak ma to miejsce w kotłach c.o. szybowych i będzie to skutkowało pozytywnym efektem ekologicznym. Jednak oceny bezpieczeństwa prowadzenia takiego procesu nie powinno się dokonywać w kotłowni użytkownika, nieprzystosowanej do badań i niezabezpieczonej przed ewentualnymi skutkami niepowodzenia próby.

Należy pamiętać, że każdy użytkownik kupując urządzenie grzewcze powinien je eksploatować w sposób zgodny z dołączoną przez producenta instrukcją obsługi. Inna eksploatacja może stwarzać zagrożenie dla zdrowia i życia użytkownika oraz być przyczyną awarii czy utraty gwarancji udzielonej na kocioł c.o.