

PRACE NAUKOWE – RESEARCH PAPERS

Wojciech CICHY, Jacek PAWŁOWSKI

WSPÓLSPALANIE WĘGLA KAMIENNEGO I ODPADÓW DRZEWNYCH NA URZĄDZENIACH ENERGETYCZNYCH MAŁEJ MOCY

Celem pracy było poznanie wpływu właściwości materiałów drzewnych zanieczyszczonych chemicznie na przebieg podstawowych parametrów procesu ich współspalania z węglem kamiennym w urządzeniu kotłowym małej mocy. Dla realizacji założonego celu przygotowano mieszanki paliwowe z trocin tartacznych, poużytkowych odpadów drzewnych i węgla kamiennego. W pracy dokonano oceny przygotowanych stałych paliw wtórnych oraz przeprowadzono próby ich spalania na laboratoryjnej instalacji grzewczej małej mocy. Pozytywne wyniki badań dają nadzieję na zastąpienie dotychczas stosowanych paliw drzewnych pochodzenia leśnego stałymi paliwami wtórnymi wytwarzanymi z odpadów drzewnych.

Słowa kluczowe: odpady drzewne, stałe paliwa wtórne, gospodarka odpadami, termiczne przekształcanie odpadów z odzyskiem energii, współspalanie materiałów drzewnych z węglem kamiennym, emisje gazowych produktów spalania

Wstęp

W ostatnim okresie obserwuje się w naszym kraju olbrzymie zainteresowanie biomasą drzewną stanowiącą nośnik tzw. energii odnawialnej. Taki stan rzeczy w dużej mierze wynika z międzynarodowych zobowiązań Polski w tej dziedzinie zawartych m.in. w protokole z Kioto. Zapotrzebowanie to może zostać niezaspokojone wobec niskiej podaży drewna na krajowym rynku oraz ograni-

Wojciech CICHY, Instytut Technologii Drewna, Poznań, Polska

e-mail: W_Cichy@itd.poznan.pl

Jacek PAWŁOWSKI, Instytut Technologii Drewna, Poznań, Polska

e-mail: J_Pawlowski@itd.poznan.pl

czeń prawnych w stosowaniu drewna leśnego w przemyśle energetycznym [Rozporządzenie 2008]. Cytowane przepisy wymuszają stopniowe odchodzenie od biopaliw stałych pochodzenia leśnego przy produkcji energii elektrycznej i ciepła na korzyść biopaliw stałych pochodzących z upraw, odpadów rolniczych oraz odpadów komunalnych. Taki stan rzeczy powoduje, iż nowego znaczenia nabierają wydzielone z odpadów komunalnych drzewne odpady użytkowe.

Jednym z podstawowych kierunków wytwarzania energii elektrycznej i ciepła ze źródeł odnawialnych jest współspalanie paliw konwencjonalnych (głównie węgla) z paliwami z biomasy. W takiej sytuacji zastąpienie czystej biomasy pochodzenia leśnego użytkowymi odpadami drzewnymi może być bardzo ciekawym rozwiązaniem. Dodatkowo znalezienie alternatywnego wobec drewna leśnego, odnawialnego nośnika energii mogłoby, chociaż w części, rozwiązać problem niedoboru biomasy przeznaczonej do wytwarzania energii.

Badania przeprowadzone w latach 2002–2003 w Instytucie Technologii Drewna w Poznaniu pokazały skalę tego zjawiska. Jak wynika z opublikowanych danych [Ratajczak i in. 2003] w samym tylko roku 2002 wytworzono w Polsce około 5 mln m³ drewna użytkowego. Co prawda jedynie nieznaczna część tej masy odpadów trafiła na składowiska odpadów komunalnych. Większość z nich po nieznacznym przysposobieniu została wykorzystana w charakterze paliwa w wielu gospodarstwach domowych.

W dostępnej literaturze brak jest informacji na temat zachowania się mieszanek paliwowych składających się węgla i odpadów drzewnych zanieczyszczonych chemicznie w trakcie energetycznego spalania [Ściężko, Zuwała, Pronobis 2007; Rybak 2006; Wandrasz, Wandrasz 2006]. Dlatego też niezbędne jest przeprowadzenie pogłębionych badań mających na celu poznanie zjawisk zachodzących w rzeczywistym palenisku, a mogących wywierać znaczący wpływ zarówno na sam proces spalania stałych paliw wtórnych otrzymanych z użytkowych odpadów drzewnych wraz z węglem, jak i na tworzenie się niebezpiecznych dla środowiska produktów procesu ich spalania.

Cel pracy

Celem pracy było poznanie wpływu właściwości materiałów drzewnych zanieczyszczonych chemicznie na przebieg podstawowych parametrów procesu ich współspalania z węglem kamiennym w urządzeniu kotłowym małej mocy.

Zakres pracy

Opisane badania stanowią kontynuację wcześniejszych prac [Cichy 2004, 2007a,b; Cichy, Pawłowski 2007, 2008a,b] prowadzonych w Instytucie Technologii Drewna w Poznaniu. Przedstawione prace doświadczalne polegały na

energetycznym przetworzeniu przygotowanych mieszanek paliwowych uzyskanych z materiałów drzewnych i węgla kamiennego. Do przygotowania mieszanek paliwowych wykorzystano:

- meble użytkowe, nazywane niekiedy „starymi” meblami,
- węgiel kamienny,
- trociny tartaczne z drewna iglastego.

Wytypowane materiały poddano analizom laboratoryjnym w celu oceny ich właściwości paliwowych takich jak zawartość popiołu, wartość opałowa, skład elementarny paliwa (C, H, N, S).

W zasadniczej części pracy przeprowadzono badania na stanowisku badawczym składającym się z urządzenia kotłowego małej mocy przystosowanego do spalania drewna. Stanowisko zostało szczegółowo opisane we wcześniejszych pracach [Cichy, Pawłowski 2007, 2008a,b]. W trakcie doświadczeń prowadzonych przy optymalnych parametrach pracy urządzeń kotłowych kontrolowano temperatury panujące wewnątrz paleniska badawczego oraz wydajność cieplną urządzenia kotłowego. Czynnikiem obserwowanym był skład gazów spalinywych emitowanych poprzez komin do atmosfery.

Metodyka pracy

Surowce do badań

Do prac doświadczalnych użyto dwóch rodzajów odpadów drzewnych (mebli użytkowych, trocin iglastych) oraz paliwa konwencjonalnego – węgla. Wybrane materiały cechowały następujące właściwości:

- meble użytkowe rozdrobnione do postaci drobnych zrębków i wiórów; materiał do badań otrzymano poprzez rozdrobnienie wycofanych z użytkowania mebli skrzyniowych – wykonanych z płyt wiórowych, drewna litego z udziałem sklejk lub płyty pilśniowej. Okres użytkowania tych mebli wynosił około 40 lat,
- trociny tartaczne – z przetarcia i strugania drewna iglastego,
- węgiel kamienny – o nazwie handlowej „Ekogroszek”, konfekcjonowany w workach o masie 25 kg i gwarantowanych przez dostawcę właściwościami:
 - granulacja $5 \div 25$ mm,
 - węgiel kamienny energetyczny; typ 31.2,
 - wartość opałowa > 26 MJ/kg,
 - zawartość popiołu do 10%,
 - zawartość siarki $< 0,6\%$.

Przygotowanie próbek do badań

Wytypowane do badań materiały rozdrobniono do odpowiedniej postaci:

- pyłu i drobnych trocin do analiz laboratoryjnych,
- drobnych zrębków i „grubych” wiórów do badań procesów spalania.

W przypadku ekogroszku rozdrabniano jedynie materiał przeznaczony do analiz laboratoryjnych.

Przygotowanie próbek do badań ćwierćtechnicznych

Wstępnie pocięte odpadowe materiały drzewne rozdrabniano przy pomocy rozdrabniacza mechanicznego. Ze względu na odpowiednią dla badań ćwierćtechnicznych granulację, trocin tartacznych nie rozdrabniano. Nie rozdrabniano również paliwa węglowego.

Wytypowane materiały mieszano w ustalonych proporcjach zestawionych w tabeli 1. Szczególnie interesujące dla autorów było poznanie wpływu udziału substancji balastowych na wielkość emisji gazowych produktów spalania, mających wpływ na ewentualne zagrożenia dla środowiska. Zastosowanie w przygotowanym paliwie 1% udziału obciążonych chemicznie odpadów wynikało z obowiązujących w Polsce uregulowań prawnych pozwalających na spalanie odpadów innych niż niebezpieczne w ilości nie większej niż 1% w mieszance z konwencjonalnym paliwem na typowych instalacjach energetycznych.

Tabela 1. Skład przygotowanych do badań mieszanek paliwowych

Table 1. The content of fuel mixtures prepared to investigation

L.p. No.	Meble użytkowe <i>Post-consumer furniture</i>	Węgiel kamienny <i>Hard coal</i>	L.p. No.	Trociny iglaste <i>Softwood sawdust</i>	Węgiel kamienny <i>Hard coal</i>
	[%]			[%]	
1.	100	0	8.	100	0
2.	50	50	9.	50	50
3.	25	75	10.	25	75
4.	15	85	11.	15	85
5.	5	95	12.	5	95
6.	1	99	13.	1	99
7.	0	100	14.	0	100

Próbki kierowano do analiz laboratoryjnych po wstępnym wysuszeniu do uzyskania średnicy ziaren mniejszych niż 0,008 mm.

Analizy elementarne

Analizy w zakresie zawartości węgla, wodoru, azotu i siarki prowadzono z użyciem analizatora typu Flash EA 1112 Series firmy Thermo Electron Corporation. Zakres pracy aparatu wynosił 0,01÷100%. Analizowane próbki suszono do stałej masy w temperaturze 103°C. Do analiz przygotowano naważki o masie około 3 mg. Wzorcem stosowanym przy kalibracji był sulfanilamid.

Oznaczenia podstawowych właściwości paliwowych

Oznaczenia wilgotności prowadzono metodą suszarkowo-wagową, zgodnie z procedurą opisaną w normie [PN-93/Z-15008/02].

Oznaczenia zawartości popiołu prowadzono, posługując się procedurą przedstawioną w normie [PN-93/Z-15008/03].

Oznaczenia ciepła spalania i wyznaczenie wartości opałowej przeprowadzono posługując się procedurą opisaną w normie [PN-93/Z-15008/04; PN-81/G-04513] przy wykorzystaniu kalorymetru laboratoryjnego typu KL 12 Mn firmy Precyzja-BIT.

Obliczenia wartości opałowej mieszanek paliwowych dokonano w oparciu o procedurę opisaną w literaturze [Wandrasz, Wandrasz 2006].

Próby spalania mieszanek paliwowych w skali ćwierćtechnicznej

Próby spalania w skali ćwierćtechnicznej przeprowadzono w oparciu o własną procedurę opracowaną w trakcie wcześniejszych prac badawczych [Cichy 2004; Cichy 2007a; Cichy, Pawłowski 2008].

Charakterystyka stanowiska badawczego

Podstawowym elementem stanowiska badawczego było urządzenie energetyczne małej mocy przeznaczone do spalania paliw stałych, głównie drewna. W pracy wykorzystano kocioł typu Futura Bio 25 o wydajności cieplnej 25 kW, firmy CHT-Cichewicz.

Szczegółowy opis stanowiska wraz z parametrami technicznymi poszczególnych wchodzących w jego skład urządzeń przedstawiono we wcześniejszych pracach [Cichy, Pawłowski 2008b, 2009].

Pomiary prowadzone w trakcie badań procesów spalania

Analiza gazów spalinowych odbywała się przy wykorzystaniu automatycznego analizatora spalin Lancom Series II firmy Land Combustion, umożliwiającego pomiar składu gazów spalinowych w zakresie zawartości tlenu, tlenku i ditlenku węgla, tlenku i ditlenku azotu, ditlenku siarki i węglowodorów.

Pomiaru temperatur panujących wewnątrz paleniska badawczego dokonywano w odstępach 2-minutowych przy użyciu czujnika temperatury (termopary typu K) i cyfrowego miernika temperatury.

Pomiary parametrów energetycznych urządzeń kotłowych prowadzono z użyciem ciepłomierza elektronicznego typu CE 3 firmy PoWoGaz S.A, rejestrując m.in. energię medium grzewczego (GJ) i moc chwilową (kW). Parametry rejestrowano w odstępach dwóch minut.

Przebieg badań

Opracowana procedura badawcza składała się z następujących elementów:

- rozpalanie paliwa w palenisku i spalanie paliwa pod kotłem do momentu uzyskania optymalnych parametrów procesu spalania,
- okres dochodzenia do stabilnych warunków procesu (3 godziny),
- stabilizacja procesu przy założonych warunkach pracy (około 1 godziny),
- analiza procesu spalania:
 - pomiar temperatur panujących wewnątrz paleniska,
 - pomiar stężenia gazów spalinowych,
 - pomiar parametrów spalania,
 - pomiar parametrów energetycznych procesu,
- wygaszanie paleniska.

Badania prowadzono na czynnej instalacji. W tym czasie urządzenia kotłowe utrzymywały moc cieplną zbliżoną do 75% mocy znamionowej. W trakcie całego okresu pomiarów nie występowały wahania średniej wartości parametrów. Cykl pomiarowy składał się co najmniej z 30 analiz. W praktyce przez co najmniej 60 min w odstępach 2 min wykonywano po około 10 analiz, co dawało w efekcie 50÷70 serii wyników¹. Taka procedura była podyktowana programem pomiarowym zainstalowanym w pamięci analizatora spalin oraz informacjami zaczerpniętymi z literatury² [Fodemski i in. 2001]. Uzyskane wyniki emisji kominowych analizowanych gazów przeliczono na warunki normalne oraz na 11% zawartość tlenu, zgodnie z przepisami obowiązującymi w Polsce [PN-ISO 8756:2000].

Wyniki badań i ich omówienie

Właściwości paliwowe materiałów poddanych badaniom

Przed rozpoczęciem prób spalania dokonano oceny właściwości paliwowych począwszy od określenia podstawowego składu chemicznego materiałów zastosowanych w badaniach. Wyniki oznaczeń składu elementarnego przygotowanych mieszanek paliwowych przedstawiono w tabeli 2.

¹ Seria pomiarów składała się następujących danych: data i dokładny czas pomiaru; temperatury: otoczenia i spalin; zawartości: CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂, NO_x, C_xH_y, O₂; sprawność spalania, nadmiar powietrza.

² Przy analizie spalin częstość pomiarów nie powinna być mniejsza niż 15 min.

Tabela 2. Zawartość podstawowych pierwiastków w badanych mieszankach paliwowych**Table 2. Content of basic elements in tested fuel mixtures**

Skład mieszanki <i>Mixture composition</i>		Zawartość pierwiastka <i>Element content</i>				
		Węgiel <i>Carbon</i>	Wodór <i>Hydrogen</i>	Azot <i>Nitrogen</i>	Siarka <i>Sulfur</i>	Tlen ^{*)} <i>Oxygen</i>
[%]						
Meble użytkowe <i>Post-consumer furniture</i>	Węgiel kamienny <i>Hard coal</i>					
100	0	48,43	6,80	3,19	n.w. <i>n.d.</i>	40,30
50	50	61,58	6,06	2,34	0,34	25,47
25	75	68,16	5,69	1,92	0,51	18,06
15	85	70,79	5,54	1,75	0,58	15,09
5	95	73,42	5,39	1,58	0,65	12,12
1	99	74,47	5,33	1,51	0,67	10,94
0	100	74,73	5,32	1,49	0,68	1,64
Trociny iglaste <i>Softwood sawdust</i>	Węgiel kamienny <i>Hard coal</i>					
100	0	50,68	6,84	0,24	n.w. <i>n.d.</i>	41,92
50	50	62,71	6,08	0,87	0,34	26,28
25	75	68,72	5,70	1,18	0,51	18,46
15	85	71,12	5,55	1,30	0,58	15,33
5	95	73,53	5,40	1,43	0,65	12,20
1	99	74,49	5,34	1,48	0,67	10,95
0	100	74,73	5,32	1,49	0,68	1,64
) wartość wyznaczona z obliczeń <i>) value determined by calculation</i>		n.w. – nie wykryto <i>n.d. – not detected</i>				

Z przedstawionych danych wynika, że materiały drzewne wybrane do badań różniły się w zasadniczy sposób jedynie w odniesieniu do zawartości azotu. Największe ilości tego pierwiastka stwierdzono w meblach użytkowych (3,19%), co wynikało ze znacznego udziału płyt wiórowych i sklejek w ogólnej masie tych odpadów, przy produkcji których stosowano żywice aminowe. Różnice zawartości węgla i wodoru w tych materiałach były konsekwencją wyższej zawartości azotu. Skład elementarny węgla kamiennego charakteryzował się wyższą zawartością pierwiastkowego węgla (74,73%), siarki (0,68%) i tlenu (1,64%).

Z opisanych powyżej materiałów palnych przygotowano mieszanki paliwowe, które posłużyły do dalszych badań. Autorzy zamierzali wykazać różnice pomiędzy

współspalaniem czystej biomasy drzewnej w porównaniu z materiałami drzewnymi niosącymi pewien ładunek syntetycznych substancji chemicznych.

W tabeli 3 ukazano wpływ zmiany składu ocenianych mieszanek paliwowych na ich właściwości paliwowe. Z przedstawionych danych wynika, że poddane badaniom materiały paliwowe cechowały się stosunkowo niską wilgotnością ($8,78 \div 15,68\%$) i wysoką zawartością części lotnych ($78,61 \div 79,39\%$) dla paliw drzewnych, a tylko $33,2\%$ dla węgla. Oceniane paliwa cechowała także zróżnicowana zawartość popiołu – stosunkowo niska dla trocin iglastych ($0,32\%$), nieco wyższa dla mebli użytkowych ($1,24\%$) i relatywnie wysoka dla węgla kamiennego ($7,14\%$). Nieco wyższą zawartość niepalnych substancji mineralnych w próbkach mebli użytkowych można tłumaczyć obciążeniem ocenianych materiałów substancjami balastowymi (np. mineralne pigmenty w okleinach, resztki metalowych okuć i łączników w meblach użytkowych). Udział popiołu w zastosowanym do badań węglu kamiennym był stosunkowo niewysoki ($7,14\%$). Jak wynika z danych literaturowych [Kucowski, Laudyn, Przekwas 1994] zawartość części niepalnych w krajowych węglach kamiennych waha się w zakresie $20 \div 27\%$.

Tabela 3. Podstawowe właściwości paliwowe mieszanek przygotowanych do badań
Table 3. Basic fuel properties of mixtures prepared to investigation

Skład mieszanki <i>Mixture composition</i>		Rodzaj oznaczenia <i>Determination type</i>			
Meble poużytkowe <i>Post-consumer furniture</i>	Węgiel kamienny <i>Hard coal</i>	Wilgotność <i>Moisture con- tent</i>	Popiół <i>Ash</i>	Części lotne <i>Volatile com- ponents</i>	Wartość opałowa <i>Calorific value</i>
[%]					MJ/kg
100	0	8,78	1,24	78,61	17,070
50	50	7,53	4,19	55,91	22,276
25	75	6,90	5,65	44,55	24,879
15	85	6,65	6,26	40,01	25,920
5	95	6,40	6,85	35,47	26,961
1	99	6,30	7,08	33,65	27,378
0	100	6,27	7,14	33,20	27,482
Trociny iglaste <i>Softwood sawdust</i>	Węgiel kamienny <i>Hard coal</i>				
100	0	15,68	0,32	79,39	16,096
50	50	10,98	3,73	56,30	21,789
25	75	8,62	5,44	44,75	24,636
15	85	7,68	6,12	40,13	25,774
5	95	6,74	6,80	35,51	26,913
1	99	6,36	7,07	33,66	27,368
0	100	6,27	7,14	33,20	27,482

Analizując wyniki oznaczeń wartości opałowej (w stanie roboczym) stwierdzić można, że zanieczyszczenia chemiczne zawarte w analizowanych próbkach mebli poużytkowych nie wpłynęły w radykalny sposób na kaloryczność spalanych materiałów. Wartość opałowa zmieniała się w nieznaczny sposób od 16,096 do 17,070 MJ/kg, a w przypadku węgla kamiennego wynosiła 27,482 MJ/kg. Powyższe dane odnoszą się do substancji wyjściowych. Mieszanki paliwowe uzyskane przez zmieszanie materiałów wyjściowych w przedstawionych proporcjach stanowią wypadkową parametrów tych materiałów. Stwierdza się jednocześnie, że oceniane materiały charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami, umożliwiającymi zastosowanie ich w charakterze mieszanek paliwowych paliw kopalnych z udziałem materiałów biomasowych.

Próby spalania badanych materiałów drzewnych

Laboratoryjna instalacja kotłowa posłużyła do przeprowadzenia prób spalania mieszanek paliwowych przygotowanych z materiałów drzewnych i paliwa konwencjonalnego, jakim był węgiel kamienny. Zasadnicze badania poprzedzono wstępnymi próbami, w których ustalono warunki spalania optymalne dla danego rodzaju paliwa. Ustalone parametry procesu spalania to:

- granulacja paliwa – ustalona w trakcie rozdrabniania próbek,
- ilość dozowanego powietrza – regulowana nastawami w skali 0–5 (–) na panelu sterującym,
- ilość dozowanego paliwa – regulowana czasem pracy dozownika i wielkością przerwy pomiędzy cyklami pracy (s).

Po doprowadzeniu kotła do optymalnych, podanych przez producenta parametrów pracy, do zasobnika kotła zasypywano odmierzoną ilość badanego paliwa, rozpoczynając jednocześnie rejestrowanie mierzonych parametrów. Do parametrów tych zaliczono:

- wielkość emisji do atmosfery gazowych produktów spalania (CO, CO₂, NO, NO₂, C_xH_y, O₂),
- sprawność procesu spalania,
- współczynnik nadmiaru powietrza.

Równolegle rejestrowano parametry cieplne wytworzone w trakcie pracy laboratoryjnego układu kotłowego, do których zaliczono:

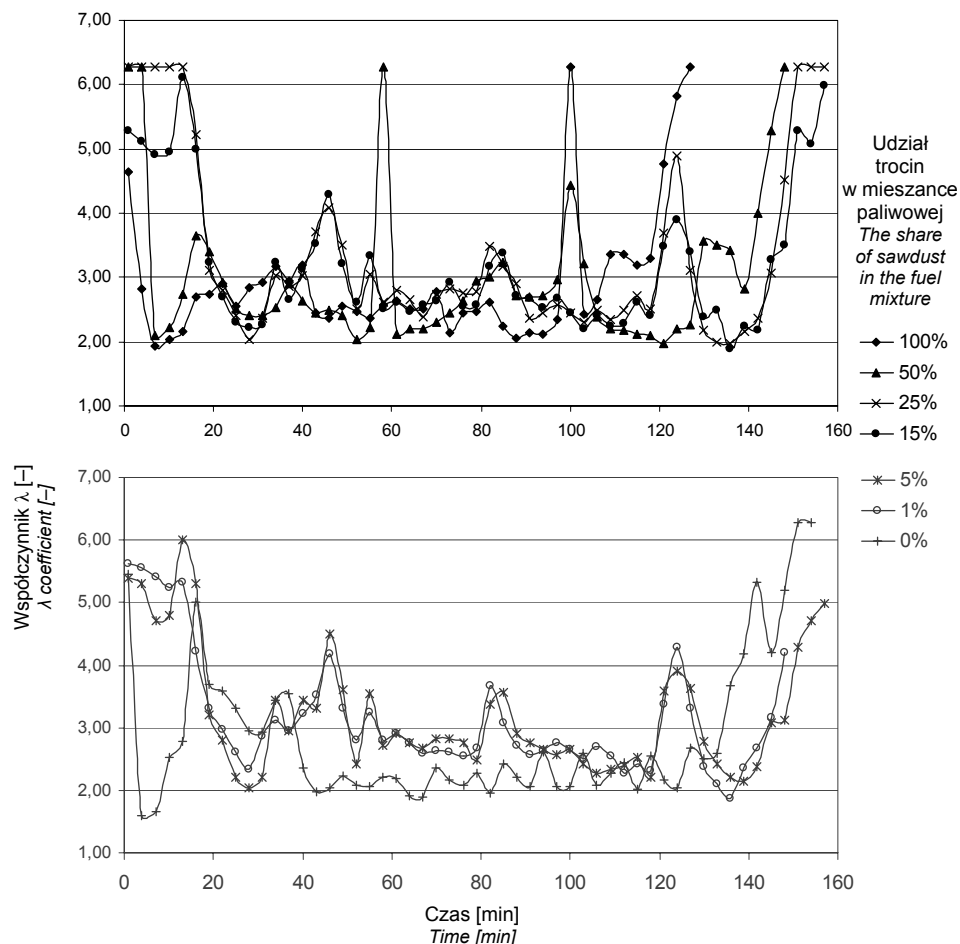
- jednostkową ilość ciepła wytworzonego przez układ,
- całkowitą ilość ciepła wytworzoną przez układ w trakcie spalania określonej ilości badanego paliwa.

Uzyskane wyniki po przeliczeniu zestawiono na wykresach.

Spalanie mieszanek paliwowych otrzymanych z trocin iglastych i węgla kamiennego

Ograniczona forma publikacji uniemożliwiła przedstawienie wszystkich obserwowanych czynników zmiennych. Zostały one szczegółowo omówione w niepublikowanych materiałach [Cichy, Pawłowski 2008].

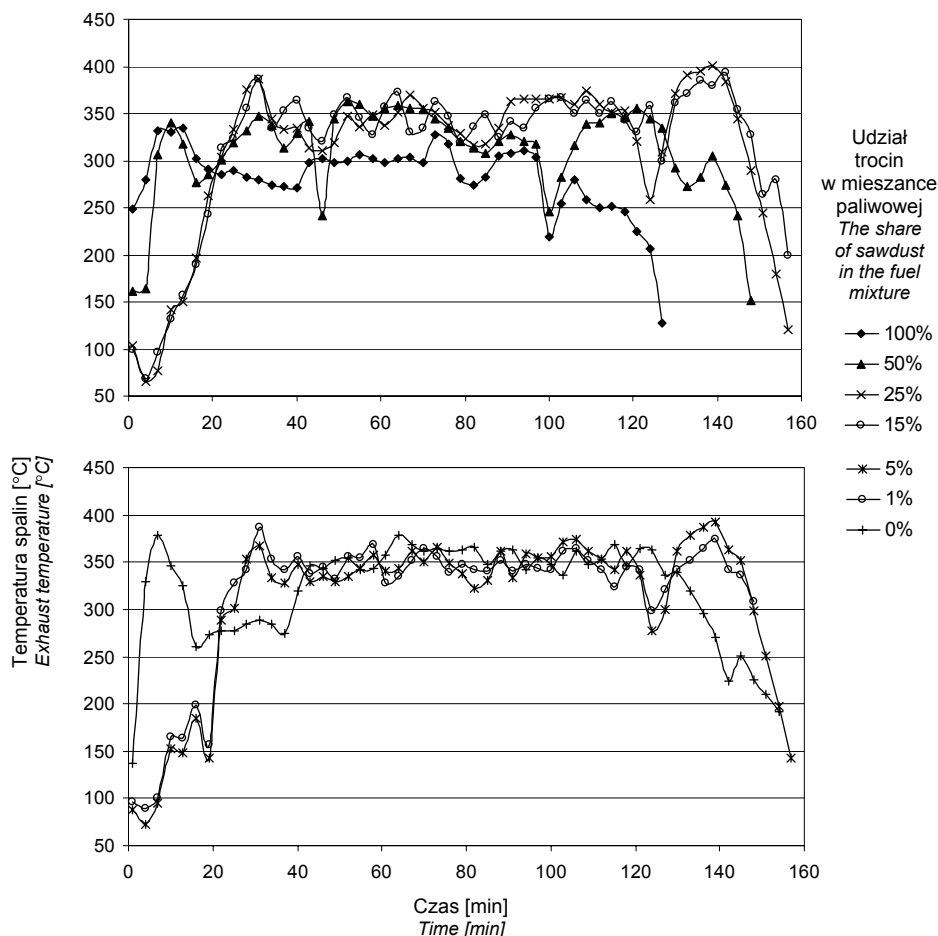
Rys. 1÷6 przedstawiają zestawione dane dla paliw uzyskanych z odpadów czystego drewna (trociny iglaste) i tworzyw drzewnych (meble użytkowe). Na rys. 1 pokazano zmiany współczynnika nadmiaru powietrza λ w trakcie spalania



Rys. 1. Wielkość współczynnika nadmiaru powietrza w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny iglaste – węgiel kamienny

Fig. 1. The value of air surplus coefficient during combustion of fuel mixtures made from softwood sawdust and hard coal

analizowanych mieszanek paliwowych. Z zestawionych danych wynika, iż parametr ten wahał się w przedziale od 2,00 do 4,00. Jedynie w kilku momentach procesu spalania wartości te zostały przekroczone. Związane to było generalnie z zaburzeniami w procesie dozowania paliwa, obserwowanymi na początku cyklu pomiarowego oraz na jego końcu. Chwilowy wzrost współczynnika λ w kilku przypadkach (mieszanki z udziałem 100, 50 i 25% drewna) wynikał ze zmian chwilowego składu mieszanek paliwowych, spowodowanych różnicami ich gęstości. Pomimo bardzo dobrego wymieszania składników przed rozpoczęciem testów, w zasobniku paliwa następowało ich częściowe rozdzielanie, co



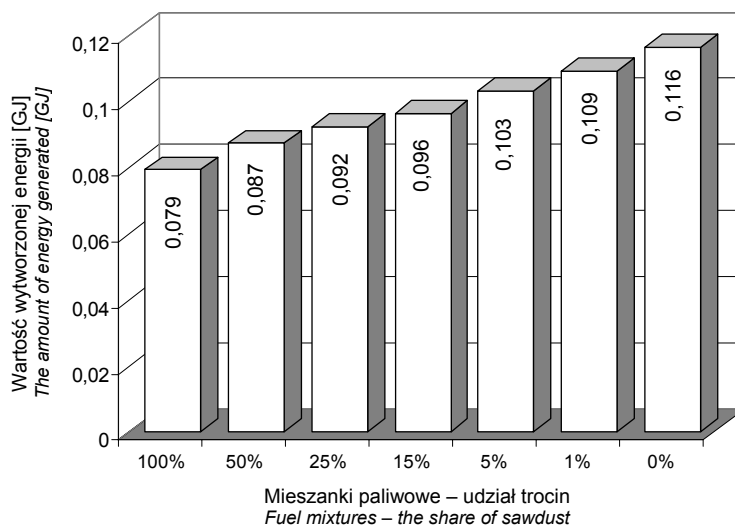
Rys. 2. Zmiany temperatur gazów spalinowych w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny iglaste – węgiel kamienny

Fig. 2. Changes in temperatures of combustion gases during combustion of fuel mixtures made from softwood sawdust and hard coal

w efekcie zaowocowało nie do końca równą pracą paleniska. Nie stwierdzono, by skład spalanych na ruszcie paleniska paliw wpływał bezpośrednio na wartość współczynnika nadmiaru powietrza (λ).

Rys. 2 ukazuje przebieg zmian temperatury spalin mierzonych w przewodzie kominowym. W trakcie testów temperatura zmieniała się w zakresie 100÷400°C, przyjmując najczęściej wartości z przedziału 250÷370°C. Porównując uzyskane dane z wartościami współczynnika nadmiaru powietrza (λ), można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury gazów spalinowych spada wartość współczynnika λ ; i odwrotnie: spadek temperatury spalin obserwuje się jako wzrost współczynnika nadmiaru powietrza. Z powyższego wynika, że przy stałej ilości paliwa dozowanego do spalania czynnikiem wpływającym na zmianę współczynnika λ i temperatury spalin może być ilość (porcja) paliwa spalana w danym momencie na ruszcie paleniska. Podobnie jak w poprzednim przypadku, nie stwierdzono, by skład analizowanych paliw miał bezpośredni wpływ na wysokość temperatur mierzonych w przewodzie paliwowym w trakcie procesu spalania.

Na kolejnym wykresie (rys. 3) pokazano wartości energii wytworzonej przez instalację ciepłą w trakcie prób spalania przygotowanych mieszanek paliwowych. Z przedstawionych danych wynika, iż przy spalaniu tej samej masy paliwa w zbliżonych warunkach procesu termicznego, wartość wytworzonej energii rosła wraz ze spadkiem udziału trocin w spalanej mieszance paliwowej

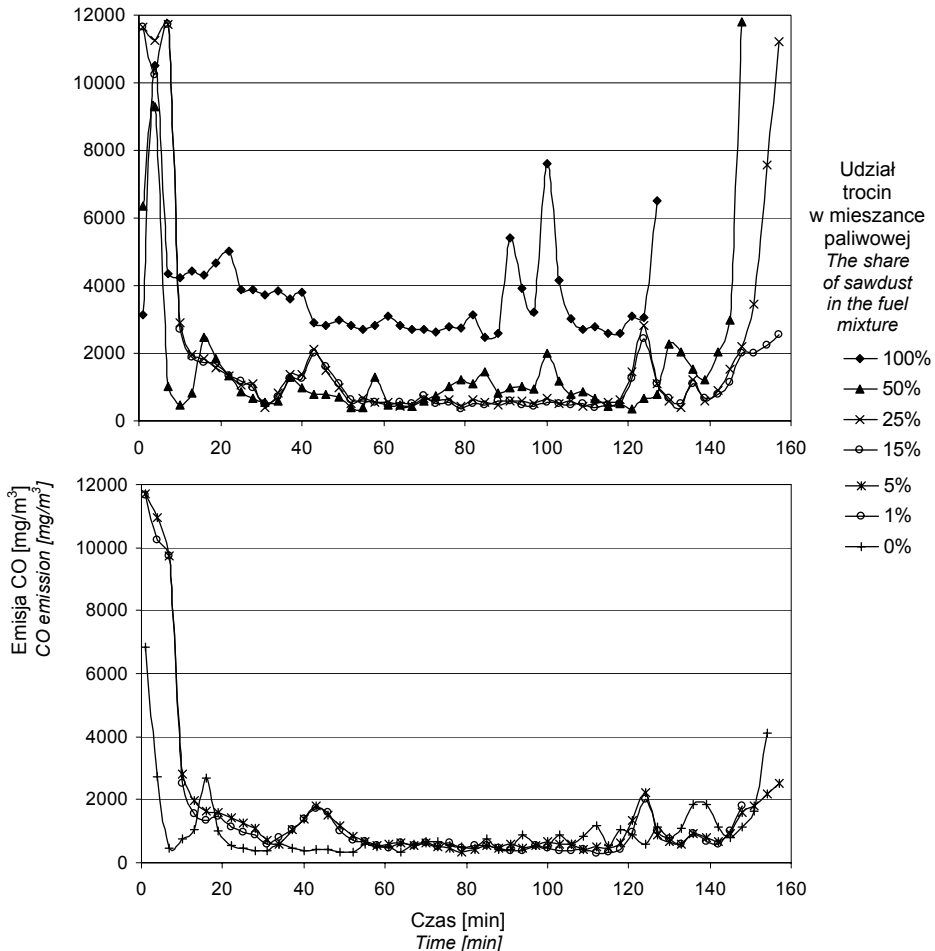


Rys. 3. Wartość wytworzonej energii cieplnej w instalacji kotłowej w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny iglaste – węgiel kamienny

Fig. 3. The value of thermal energy generated in the boiler installation during combustion of fuel mixtures made from softwood sawdust and hard coal

od 79 MJ dla paliwa ze 100% udziałem trocin do 116 MJ dla paliwa składającego się w 100% z węgla. Należy przypomnieć, iż oba składniki mieszanki paliwowej różniły się znacznie – wartość opałowa węgla wynosiła 27,5 MJ/kg, a trocin 16,1 MJ/kg. W takiej sytuacji stosunkowo niewielka różnica wytworzonej energii z obu składników mieszanki wynikała zapewne z różnego przebiegu spalania obu tych materiałów.

Na kolejnych rysunkach (rys. 4÷6) przedstawiono wielkość emisji gazowych produktów procesu w trakcie prób spalania analizowanych mieszanek paliwo-



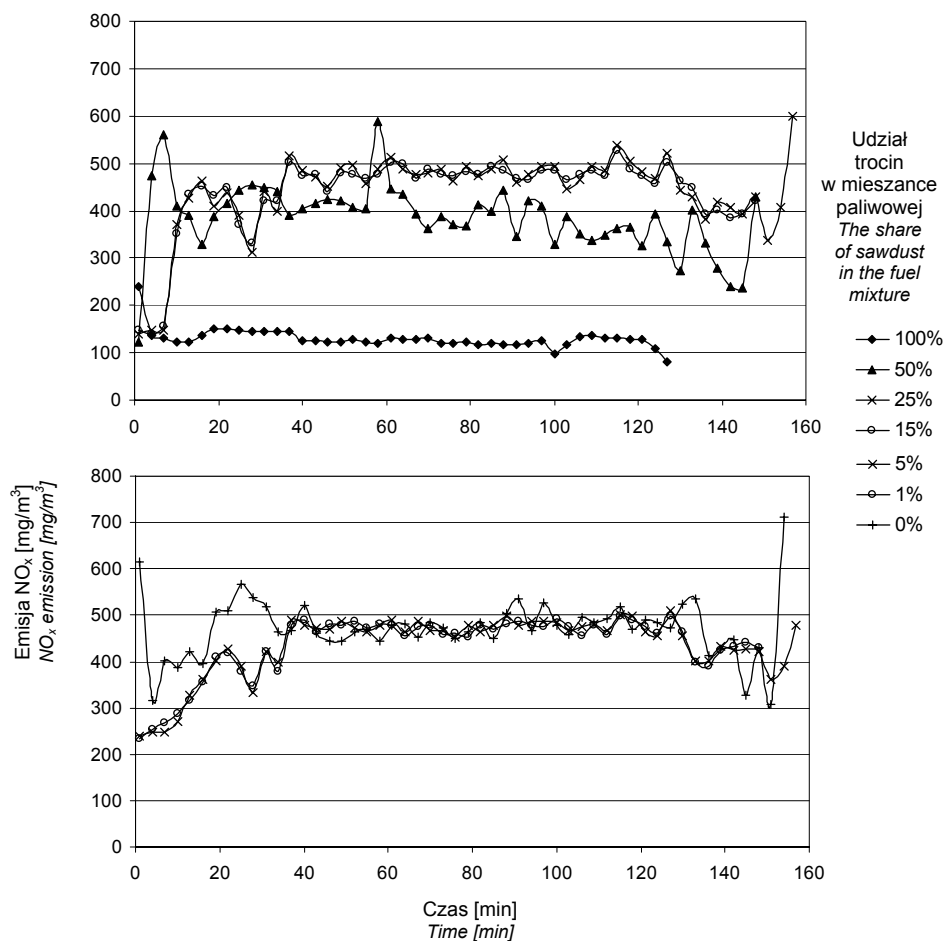
Rys. 4. Emisja tlenku węgla w przeliczeniu na 11% O₂ w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny iglaste – węgiel kamienny

Fig. 4. Carbon oxide emission converted into 11% O₂ during combustion of fuel mixtures made from softwood sawdust and hard coal

wych otrzymanych z trocin iglastych i węgla kamiennego. Na rys. 4 pokazano zmiany wielkości emisji tlenu węgla w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny – węgiel kamienny. Z przedstawionych danych wynika, że wraz ze wzrostem temperatury w palenisku spadała wielkość emisji CO z około 12 g/m^3 w początkowym (rozpławkowym) okresie pracy paleniska do około $1\div 4 \text{ g/m}^3$ w głównym okresie pomiarowym. Jak się wydaje, podstawowym czynnikiem wpływającym na wielkość emisji tego gazu jest temperatura panująca w danym momencie w palenisku. Niska wartość tego parametru, około $200\div 400^\circ\text{C}$, powodowała, że proces utleniania wytworzonych w palenisku parogazów przebiegał ze stosunkowo niską wydajnością. Wzrost temperatury do poziomu $700\div 1000^\circ\text{C}$ sprawiał, że znaczna część wytworzonych gazów ulegała dopaleniu. Wzrost temperatury w palenisku w późniejszym okresie cyklu spowodowany został przez wydzieloną energię pochodzącą ze spalania tlenu węgla i węglowodorów. Analizując skład mieszanek paliwowych, zaobserwowano różnicę w poziomach emisji CO pochodzących ze spalania węgla i trocin drzewnych. Najwyższy średni poziom emisji (około $3,5 \text{ g/m}^3$) stwierdzono przy spalaniu paliwa ze 100% udziałem węgla. Wraz ze wzrostem zawartości drewna w paliwie odnotowano wyraźny spadek emisji tego gazu do poziomu około 450 mg/m^3 .

Przebieg zmian emisji tlenków azotu (NO_x) w trakcie spalania analizowanych mieszanek paliwowych przedstawiono na rys. 5. Uzyskane w trakcie pomiarów wyniki emisji tlenu (NO) i ditlenku azotu (NO_2) przeliczono na ditlenek azotu (NO_2) zgodnie ze stosownymi procedurami. Następnie otrzymane dane przeliczono na 11% zawartość O_2 w gazach spalinowych. Przedstawione na wykresie dane (rys. 5) pokazują, że poziom emisji NO_x był związany ze składem mieszanek paliwowych, a w szczególności z udziałem w nich węgla kamiennego. Dane zamieszczone w tabeli 2 pokazują, że zawartość azotu w ocenianych mieszankach zmieniała się w zakresie od 0,24% w paliwie z 100% udziałem trocin iglastych do 1,49% w paliwie o 100% zawartości węgla kamiennego. Jak należało się spodziewać, najwyższy poziom emisji NO_x stwierdzono w spalinach powstałych przy spalaniu paliwa zawierającego 100% węgla. Uzyskane dane oscylowały wokół wartości 480 mg NO_x w 1 m^3 gazów spalinowych. Podobnie wyglądała sytuacja w przypadku mieszanek z $1\div 25\%$ udziałem trocin w spalinowym paliwie. Dla pozostałych paliw poziomy emisji tlenków azotu wynosiły: 50% trocin – około 380 mg/m^3 , 100% trocin – 130 mg/m^3 .

Znaczne wahania wartości emisji NO_x , widoczne szczególnie na początku i na końcu cyklu pomiarowego, wynikały z przeliczenia niskich relatywnie wartości emisji na 11% O_2 przy niskiej zawartości gazowych produktów w spalinach (zawartość O_2 zbliżona do 20,9%). Nierówny przebieg procesu spalania uwidocznił zjawisko opisane we wcześniejszych pracach [Cichy 2004] – reakcje utleniania i redukcji, przebiegające z udziałem tlenu węgla i tlenków azotu.



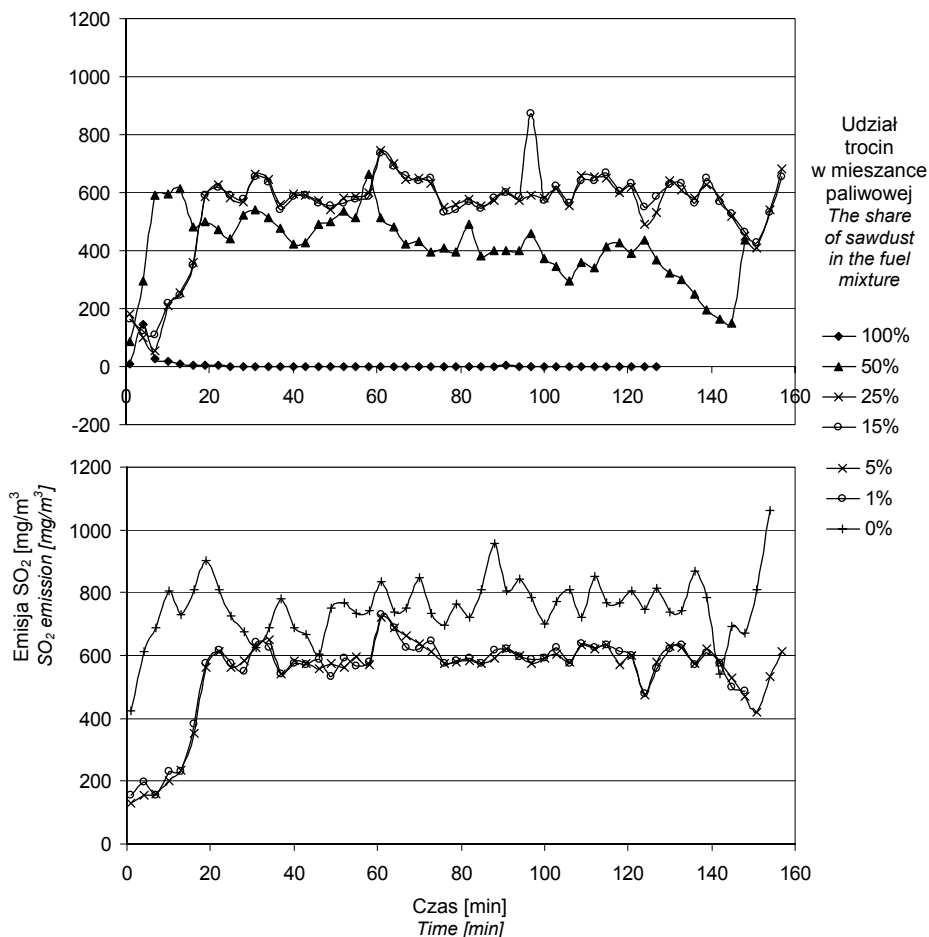
Rys. 5. Emisja tlenków azotu w przeliczeniu na NO₂ w odniesieniu do 11% O₂ w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny iglaste – węgiel kamienny
Fig. 5. Emission of nitrogen oxides converted into NO₂ with reference to 11% O₂ during combustion of fuel mixtures made from softwood sawdust and hard coal

Efektom tego procesu jest z jednej strony redukcja tworzących się paliwowych tlenków azotu, a z drugiej – utlenianie produktu niepełnego spalania paliwa organicznego – tlenku węgla. Z powyższego wynika, że ograniczenie emisji tlenków azotu metodami pierwotnymi (stopniowanie dozowania powietrza do paleniska) jest również możliwe w paleniskach małej mocy o bardzo uproszczonej konstrukcji.

Podczas prób spalania mieszanek paliwowych trociny tartaczne – węgiel kamienny nie stwierdzono obecności węglowodorów w spalinach powyżej

poziomu oznaczalności zastosowanej metody analitycznej, tj. około 0,01%. Nie należy stąd wyciągać wniosku, że przy spalaniu tego rodzaju mieszanek paliwowych lekkie węglowodory w spalinach nie występują. Z zaistniałej sytuacji wynika jedynie, że spalanie przebiega ze stosunkowo dużą sprawnością, a wprowadzenie dodatkowego stopnia spalania umożliwiłoby zapewne dopalenie wytworzonego tlenku węgla i jeszcze większe podniesienie sprawności procesu.

Na rys. 6 pokazano przebieg zmian emisji ditlenku siarki w trakcie spalania mieszanek paliwowych z udziałem trocin iglastych i węgla kamiennego. Podob-



Rys. 6. Emisja ditlenku siarki w odniesieniu do 11% O₂ w trakcie spalania mieszanek paliwowych trociny iglaste – węgiel kamienny

Fig. 6. Emission of sulfur dioxide with reference to 11% O₂ during combustion of fuel mixtures made from softwood sawdust and hard coal

nie jak w przypadku NO_x , uzyskane w trakcie pomiarów wyniki przeliczono na 11% zawartość tlenu w paliwie. Z przedstawionych danych jednoznacznie wynika, iż wraz ze zmniejszeniem ilości trocin w ocenianych mieszankach paliwowych wzrastała emisja ditlenku siarki od zera, dla paliwa składającego się w 100% z trocin iglastych do około 770 mg/m^3 dla węgla kamiennego. Tak duże zróżnicowanie poziomów emisji SO_2 wynikało bezpośrednio z udziału związków siarki w spalanych mieszankach paliwowych. Dane zamieszczone w tabeli 2 pokazują, iż zawartość siarki w ocenianych paliwach zmieniała się w zakresie od 0,00% dla trocin iglastych do 0,68% dla węgla kamiennego.

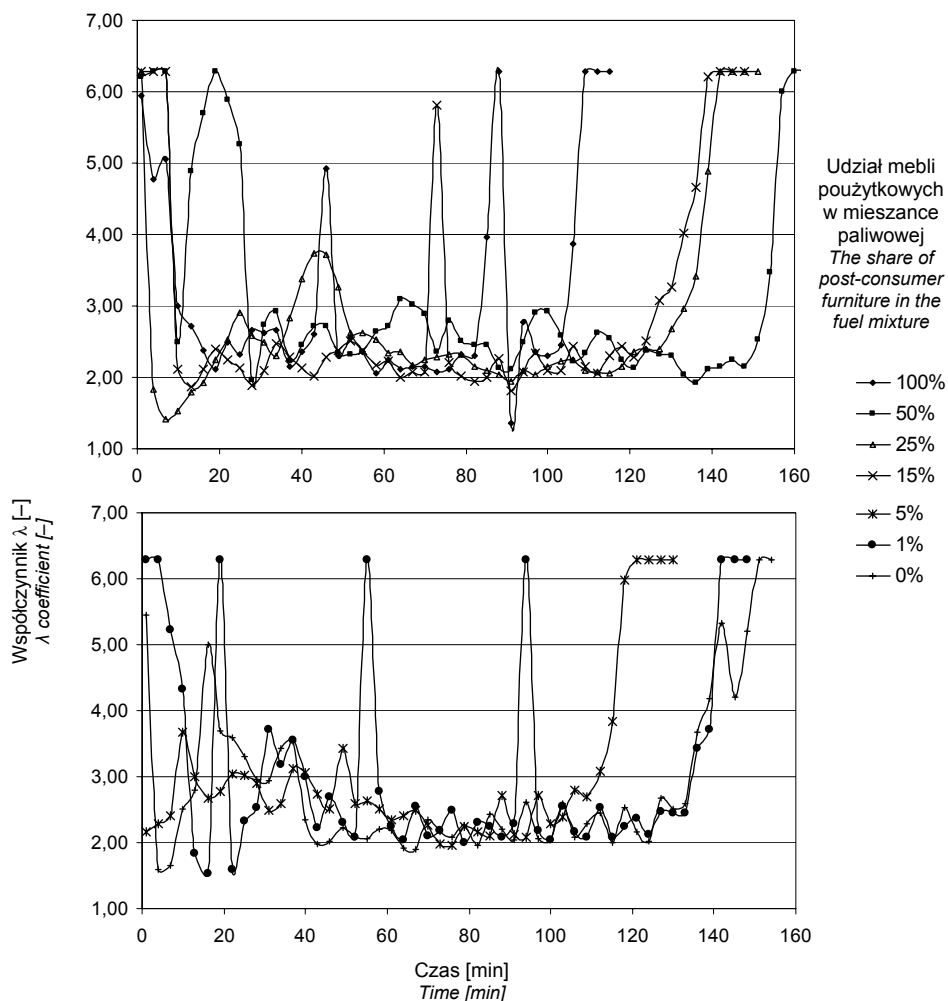
Spalanie mieszanek paliwowych otrzymanych z użytkowych mebli i węgla kamiennego

W drugiej części pracy przeprowadzono próby spalania mieszanek paliwowych sporządzonych z rozdrobnionych mebli użytkowych oraz węgla kamiennego o nazwie handlowej „Ekogroszek”.

Proces spalania mieszanek paliwowych: meble użytkowe – węgiel kamienny prowadzono przy takich samych parametrach pracy urządzeń kotłowych jak dla mieszanek trociny tartacznej – węgiel kamienny. Uzyskane w trakcie prób spalania wyniki pomiarów zestawiono na wykresach (rys. 7÷12).

Zmiany współczynnika nadmiaru powietrza λ przedstawiono na rys. 7. Zestawione wyniki pokazują, że w głównym stadium procesu spalania wartość współczynnika λ zmieniała się w zakresie 2,0÷3,8. Zasadnicze odchylenia od tych wartości odnotowano w początkowym i końcowym okresie cyklu pomiarowego. Taki stan rzeczy związany był z nierównomiernym wypełnieniem paleniska, co miało miejsce zarówno na początku okresu pomiarowego, kiedy paliwo do paleniska trafiało w mniejszych porcjach, jak i pod jego koniec, kiedy objętość podajnika ślimakowego nie wypełniała się już w całości paliwem. Pewną niedogodnością wpływającą na wzrost współczynnika λ było niejednorodne uziarnienie spalanych surowców. Zawartość cząstek różnej wielkości i gęstości w ogólnej masie paliwa powodowała, że porcje paliwa dozowane do paleniska różniły się masą substancji palnych. Zauważalne odchylenia od wartości średnich wywołane były incydentalnymi zaburzeniami procesu spalania wywołanymi tymi właśnie czynnikami. Nie stwierdzono natomiast istotnego wpływu składu mieszanek paliwowych na wielkość współczynnika nadmiaru powietrza podczas analizowanych cykli pomiarowych.

Rys. 8 przedstawia zmiany temperatury gazów spalinowych zachodzące w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble użytkowe – węgiel kamienny. Jak wynika z zestawionych danych, temperatura spalin w głównym okresie pomiarowym zmieniała się w zakresie od około 290°C do około 380°C . Podobnie, jak w przypadku współczynnika λ , niższe wartości temperatur spalin odnotowano na początku i końcu cyklu pomiarowego, co wynikało z konieczności

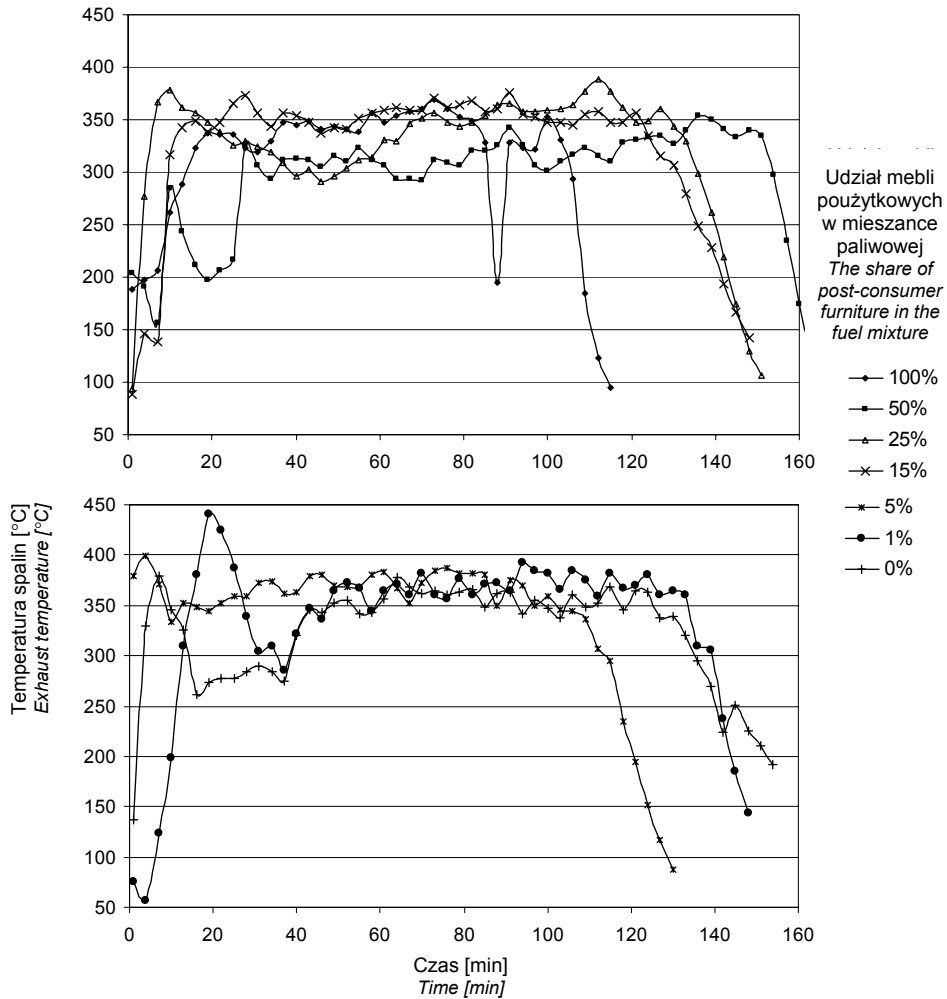


Rys. 7. Wielkość współczynnika nadmiaru powietrza w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny

Fig. 7. The value of air surplus coefficient during combustion of fuel mixtures made from post-consumer furniture and hard coal

rozgrzania instalacji kotłowej (początek cyklu) i obniżenia porcji paliwa trafiającego na ruszt paleniska (koniec cyklu pomiarowego). Pomimo pewnego zróżnicowania nie było możliwe jednoznaczne stwierdzenie wpływu składu mieszanek paliwowych na wartość temperatury spalin w analizowanych cyklach pomiarowych.

Kolejnym rejestrowanym w trakcie pomiarów czynnikiem, przedstawionym na rys. 9, była wielkość wytworzonej przez układ kotłowy energii w trakcie

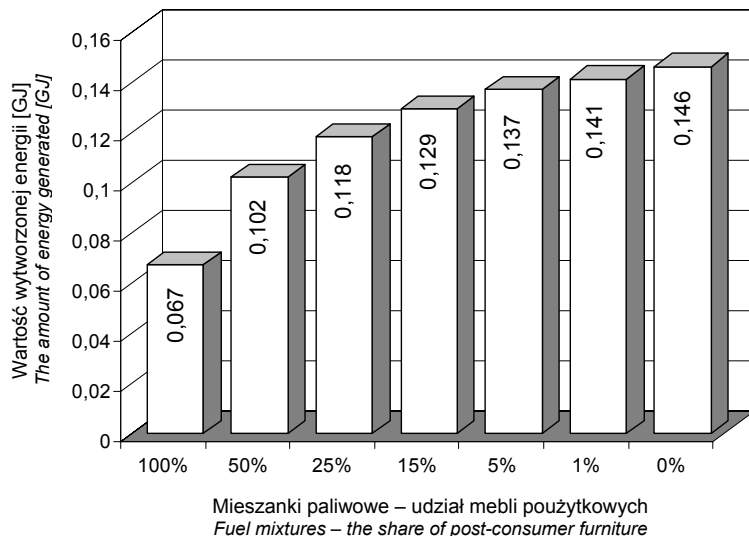


Rys. 8. Zmiany temperatur gazów spalinowych w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny

Fig. 8. Changes in temperatures of combustion gases during combustion of fuel mixtures made from post-consumer furniture and hard coal

spalania ocenianych mieszanek paliwowych. Jak z powyższego zestawienia wynika, wartości wytworzonej energii różniły się. Różnica pomiędzy skrajnymi wartościami (mieszanki z 100% i 0% udziałem mebli poużytkowych) wynosiła około 54%. Jak się wydaje, istotny wpływ na zróżnicowanie wartości tego czynnika odgrywała zawartość węgla kamiennego w spalanej paliwie. Materiał ten cechował się znacznie wyższą wartością opałową w porównaniu do paliwa

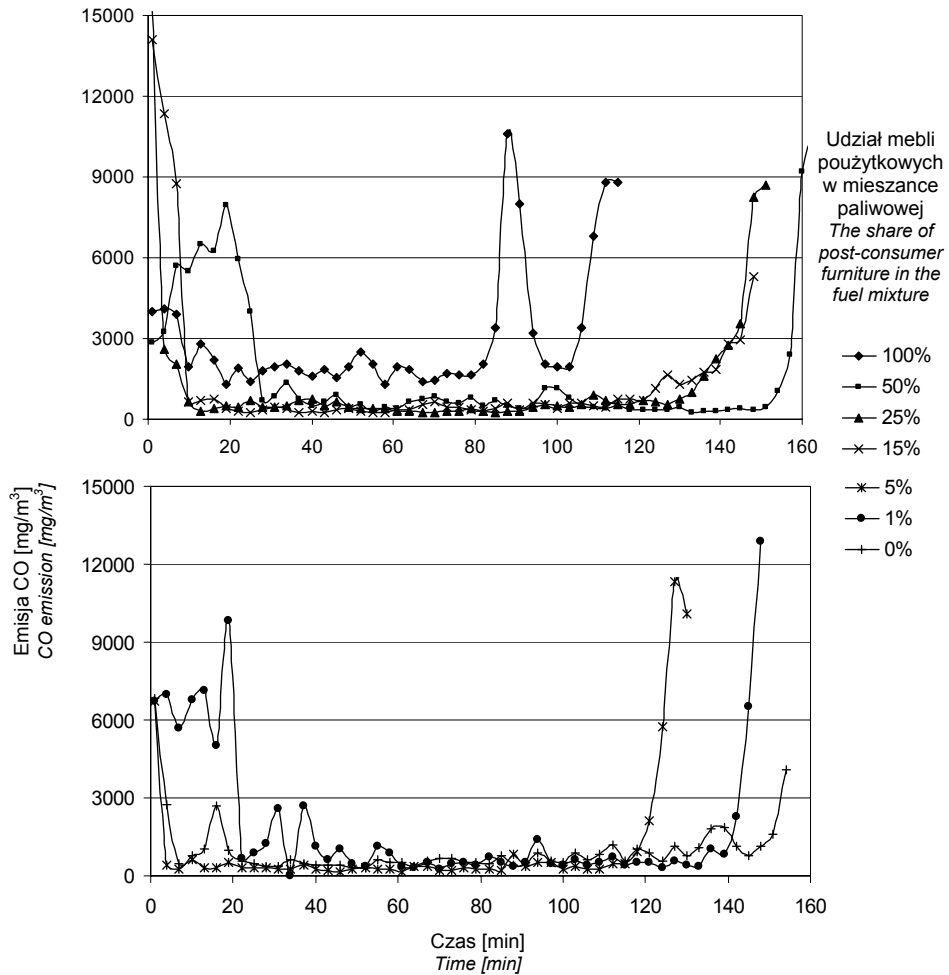
biomasowego, co w trakcie energetycznego spalania spowodowało wytworzenie większej ilości energii przy wyższej jego zawartości w spalanej mieszance.



Rys. 9. Wartość wytworzonej energii cieplnej na instalacji kotłowej w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble użytkowe – węgiel kamienny

Fig. 9. The value of thermal energy generated in the boiler installation during combustion of fuel mixtures made from post-consumer furniture – hard coal

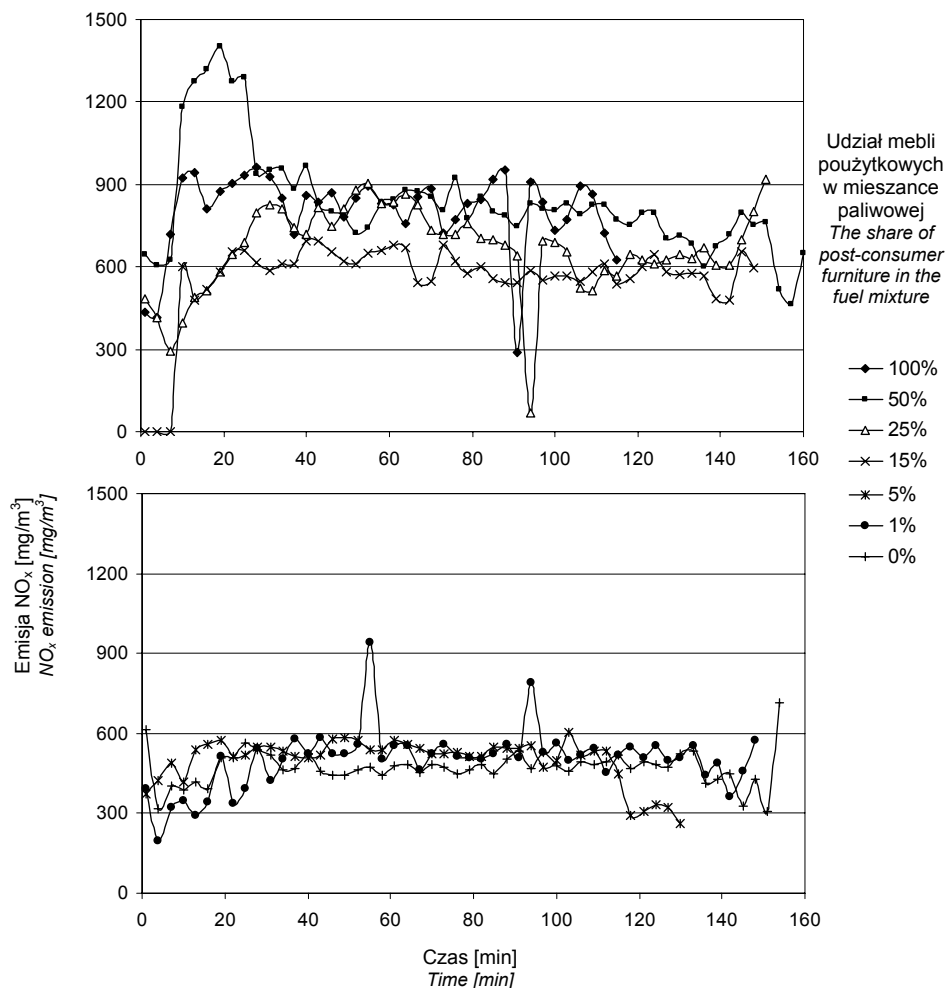
Na rys. 10 zestawiono wyniki pomiarów emisji tlenku węgla w trakcie spalania mieszanek paliwowych uformowanych z mebli użytkowych i węgla kamiennego w przeliczeniu na 11% zawartość tlenu w spalinach. Zestawione dane pokazują, że dla wszystkich analizowanych próbek zawartość CO w spalinach zmieniała się w zakresie od około 500 do 10500 mg/m³. Najwyższe wartości emisji tlenku węgla przy spalaniu ocenianych paliw występowały na początku i na końcu okresu badawczego, co związane było z rozpoczęciem i zakończeniem cyklu badań. Stwierdzone w tym okresie bardzo wysokie emisje CO w praktyce nie miały miejsca. Wysoka zawartość tlenku węgla spowodowana była efektem przeliczeń na 11% udział tlenu w spalinach. Emisja tlenku węgla przy spalaniu ocenianych mieszanek paliwowych w zasadniczej części cyklu pomiarowego kształtowała się na podobnym poziomie i wynosiła około 0,5÷1,5 g/m³. Analiza przedstawionych wyników nie wykazała wpływu składu mieszanek paliwowych na zawartość tlenku węgla w gazach spalinowych w analizowanych warunkach procesu spalania.



Rys. 10. Emisja tlenku węgla w przeliczeniu na 11% O₂ w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny

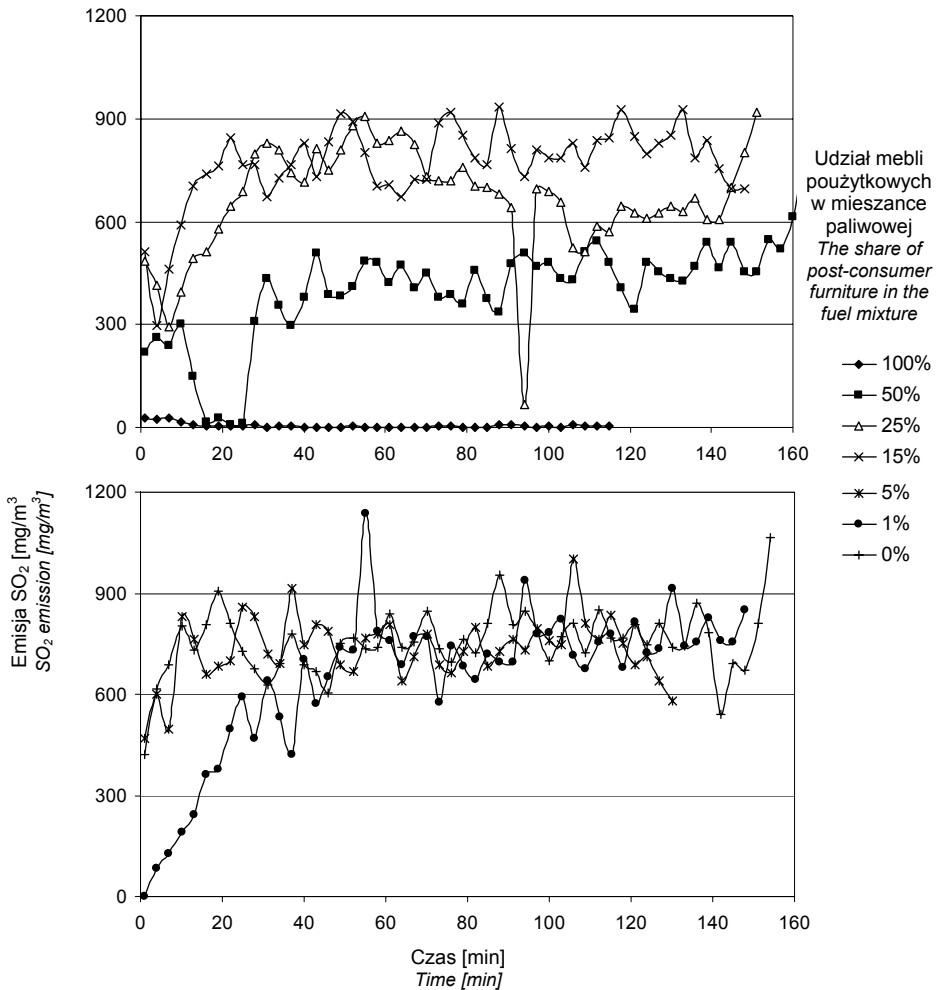
Fig. 10. Carbon oxide emission converted into 11% O₂ during combustion of fuel mixtures made from post-consumer furniture and hard coal

Rys. 11 pokazuje zmiany emisji tlenków azotu przedstawionych jako ditlenek azotu po przeliczeniu na 11% zawartość tlenu w spalinach w trakcie spalania badanych mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny. Przedstawione dane pokazują, że wielkość emisji NO_x zmieniała się w zakresie od około 200 do 1400 mg/m³. Najwyższą zawartość tlenków azotu obserwowano w trakcie spalania mieszanek paliwowych z najwyższym (100% i 50%) udziałem mebli poużytkowych, które kształtowały się na poziomie



Rys. 11. Emisja tlenków azotu w przeliczeniu na NO₂ w odniesieniu do 11% O₂ w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny
Fig. 11. Emission of nitrogen oxides converted into NO₂ with reference to 11% O₂ during combustion of fuel mixtures made from post-consumer furniture and hard coal

750÷1400 mg/m³. Nieco mniejsze ilości tych substancji (od około 300 do 700 mg/m³) występowały w gazowych produktach spalania mieszanek zawierających od 25% do 0% mebli poużytkowych. Oceniane mieszanki paliwowe różniły się w pewnym stopniu zawartością azotu elementarnego (tabela 2) i, jak się wydaje, w wielkości tego parametru należy upatrywać przyczynę różnic w średnich poziomach emisji NO_x.



Rys. 12. Emisja ditlenku siarki w odniesieniu do 11% O₂ w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny
Fig. 12. Sulfur dioxide emission converted into 11% O₂ during combustion of fuel mixtures made from post-commercial furniture and hard coal

Na kolejnym rysunku (rys. 12) pokazano przebieg zmian emisji ditlenku siarki w trakcie spalania mieszanek paliwowych meble poużytkowe – węgiel kamienny. Jak wynika z danych ukazanych na tych wykresach, wielkość emisji SO₂ była mocno związana z udziałem węgla kamiennego w badanych mieszankach paliwowych. W paliwie składającym się w 100% z odpadów drzewnych stwierdzono jedynie śladowe ilości tego związku. Dodatek węgla kamiennego do biomasy drzewnej powodował znaczący wzrost ditlenku węgla w spalinach,

który w skrajnym przypadku (paliwa z 99% i 100% zawartością węgla) sięgały poziomu $900\div 1100\text{ mg/m}^3$. Opisana sytuacja jest ściśle powiązana ze składem elementarnym składników badanych mieszanek paliwowych. Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 2, w badanych meblach użytkowych nie stwierdzono zawartości siarki na poziomie oznaczalności zastosowanej metody analitycznej. Natomiast poddany badaniom węgiel kamienny („Ekogroszek”) charakteryzował się udziałem siarki na poziomie 0,68%.

Podsumowanie

Porównując właściwości mieszanek paliwowych otrzymanych przez zmieszanie trocin iglastych i węgla kamiennego oraz mebli użytkowych i węgla kamiennego, a także przebieg procesu ich spalania stwierdzono szereg różnic i podobieństw pomiędzy nimi.

Wszystkie analizowane drzewne składniki paliw cechowały się zbliżonym składem elementarnym w zakresie zawartości węgla, wodoru, azotu i siarki, co wynikało z przekraczającego 99% udziału naturalnego drewna w ogólnej ich masie. Istotne różnice stwierdzono jedynie w zawartości azotu w meblach użytkowych w porównaniu z trocinami iglastymi. W tym przypadku udział mebli użytkowych w mieszance przekładał się bezpośrednio na zawartość azotu w ocenianym paliwie, co z kolei powodowało wzrost zawartości tlenków azotu w gazach spalinowych. W przypadku paliwa węglowego dodatkowym czynnikiem powodującym wzrost emisji toksycznych produktów spalania był stosunkowo wysoki udział azotu (1,49%) i siarki (0,68%) w analizowanym materiale. Efektem działania tych niekorzystnych czynników były zwiększone (w odniesieniu do naturalnego drewna) emisje toksycznych produktów spalania – tlenków azotu i ditlenku siarki.

Porównując właściwości paliwowe przygotowanych paliw z odpadów, stwierdzono występowanie znaczących różnic w odniesieniu do ich wartości opałowych, zawartości „części lotnych” oraz zawartości popiołu. Dodatek biomasy drzewnej (mebli użytkowych lub trocin) do paliwa węglowego powodował obniżenie wartości opałowej i zawartości popiołu oraz wzrost zawartości „części lotnych”, co należy odnotować jako korzystne zjawisko z punktu widzenia technologii energetycznego spalania.

Nie stwierdzono znaczących różnic przy porównaniu warunków procesu spalania. Pomimo niewielkich rozbieżności proces ten przebiegał w podobny sposób przy spalaniu mieszanek węgla z trocinami iglastymi i węgla z meblami użytkowymi. Pierwszym kryterium oceny było porównanie współczynnika nadmiaru powietrza λ (–) dla obu rodzajów spalanych mieszanek. W obu przypadkach współczynnik ten przybierał wartości z zakresu $2,00\div 2,5$ z niewielkimi odchyleniami wynikającymi z jednostkowych zaburzeń procesu spalania.

Na stosunkowo zbliżonym poziomie odnotowano temperatury rejestrowane przez czujniki umiejscowione wewnątrz paleniska badawczego. Można z tego wysnuć wniosek, iż różnice między drzewnymi składnikami paliw nie wpływały w znaczący sposób na dynamikę procesu spalania. Potwierdzają to niewielkie różnice w odnotowanych efektach energetycznych procesu, co jest szczególnie widoczne przy porównaniu wartości wytworzonej energii dla poszczególnych mieszanek paliwowych.

Brak znaczących różnic w rejestrowanych efektach energetycznych procesu spalania ocenianych mieszanek paliwowych nie przekładał się natomiast na poziom rejestrowanych emisji gazowych produktów spalania ocenianych mieszanek paliwowych.

Poziom emisji tlenu węgla był niższy dla mieszanek paliwowych zawierających meble użytkowe. Przy ocenie zawartości tlenków azotu w spalinach stwierdzono występowanie emisji na wyższym poziomie (około $400\div 900$ mg/m^3) dla paliw z udziałem mebli użytkowych. W tym jednak przypadku przyczyną wielokrotnie wyższych emisji NO_x był znaczący udział azotu w odpadach mebli użytkowych w porównaniu do wolnych od zanieczyszczeń chemicznych trocin iglastych. Dodatkowo, stosunkowo wysoka zawartość azotu w węglu kamiennym powodowała występowanie zwiększonych emisji NO_x w porównaniu do paliw uzyskanych w 100% z materiałów drzewnych.

Ciekawe zjawisko odnotowano przy porównaniu emisji ditlenku siarki w trakcie spalania ocenianych mieszanek paliwowych. Stwierdzono występowanie nieco wyższych emisji SO_2 przy spalaniu mieszanek paliwowych z udziałem mebli użytkowych. Ponieważ żaden z drzewnych składników mieszanek paliwowych nie zawierał siarki, przyczynę wyższych emisji ditlenku siarki można upatrywać w inhibicyjnym działaniu „czystego” drewna. Niewielki ładunek zanieczyszczeń chemicznych, głównie pod postacią żywic aminowych, jak widać znacznie ogranicza to działanie powodując zwiększenie emisji SO_2 w odniesieniu do „czystych” trocin iglastych.

Możliwość praktycznego wykorzystania wyników badań – spalanie mieszanek paliwowych przygotowanych z materiałów drzewnych i węgla kamiennego

Mieszanki paliwowe zawierające do 1% rozdrobnionych mebli użytkowych nie wykazywały odchylenia od zawartych w przepisach standardów emisyjnych (w analizowanym zakresie). Takie paliwa mogą być spalane na większości instalacji energetycznych przeznaczonych do spalania paliw stałych.

Paliwa, zawierające w swoim składzie powyżej 1% rozdrobnionych mebli użytkowych, nie spełniały wymagań standardów emisyjnych w zakresie dozwolonej emisji tlenków azotu (do 400 mg/m^3). Równocześnie w trakcie prób ćwierćtechnicznych stwierdzono przekroczenie emisji tlenu węgla i ditlenku siarki. Jak wynika z doniesień literaturowych [Juszczak 2002] oraz własnych

doświadczeń [Cichy 2004], ograniczenie emisji tych substancji metodami pierwotnymi (CO i NO_x) nie powinno sprawiać większych problemów. Takie postępowanie wpłynąć może korzystnie na wielkość emisji tlenków azotu, na poprawę efektywności procesu spalania, a także w pewnym stopniu na redukcję ditlenku siarki. Działania te możliwe są do przeprowadzenia jedynie na dużych instalacjach przemysłowych. Jeszcze lepsze efekty redukcji zanieczyszczeń można uzyskać przy zastosowaniu tzw. wtórnych metod ograniczenia emisji tlenków siarki azotu [Marutzky, Seeger 1999], do których zalicza się m.in. katalityczny i niekatalityczny sposób ich redukcji.

Wnioski

Opisane doświadczenia oraz przeprowadzone na ich podstawie rozważania pozwoliły na sformułowanie następujących stwierdzeń i wniosków:

1. W trakcie spalania mieszanek paliwowych otrzymanych z mebli użytkowych i węgla kamiennego oraz trocin iglastych i drewna kamiennego zostaje wytworzona znacząca ilość energii cieplnej możliwej do wykorzystania. Wzrost udziału biomasy drzewnej w mieszankach nie wpływa znacząco na ilość wytworzonej energii.
2. Spalaniu mieszanek paliwowych z udziałem węgla kamiennego i drewna mebli użytkowych oraz trocin iglastych na urządzeniu energetycznym małej mocy towarzyszą emisje gazowych produktów spalania (tlenku węgla, ditlenku siarki i tlenków azotu) stanowiące zagrożenie dla środowiska.
3. Bezpośredni wpływ na wielkość emisji tlenków azotu w trakcie spalania mieszanek paliwowych z udziałem mebli użytkowych na instalacjach energetycznych małej mocy wywierał azot zawarty w tym paliwie pod postacią żywic aminowych. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym emisję NO_x był azot zawarty w paliwie węglowym.
4. Spalanie na stanowisku badawczym mieszanek paliwowych wytworzonych z udziałem węgla kamiennego oraz mebli użytkowych i trocin iglastych powodowało następujące efekty:
 - 1% udział odpadów meblowych w mieszankach paliwowych nie powodował znaczących reperkusji w postaci podwyższonych emisji tlenków azotu z instalacji,
 - przy udziale mebli użytkowych na poziomie wyższym od 1% emisje NO_x znacznie przekraczały standardy emisyjne,
 - stwierdzono występowanie zwiększonych emisji ditlenku siarki w odniesieniu do paliw drzewnych, których przyczyną było utlenianie związków siarki zawartych w paliwie węglowym.
5. Odnotowano wysoki poziom emisji tlenku węgla znacznie przekraczający obowiązujące standardy emisyjne dla spalanych odpadów.

Literatura

- Cichy W.** [2004]: Badania wpływu składu chemicznego odpadów przemysłu drzewnego w procesie termicznego rozkładu na emisję substancji szkodliwych do środowiska. Rozprawa doktorska., (Maszynopis). Akademia Rolnicza im. A.Cieszkowskiego, Poznań
- Cichy W.** [2007a]: Badania właściwości biopaliw stałych otrzymywanych z poużytkowych odpadów drzewnych. (Maszynopis). Instytut Technologii Drewna, Poznań
- Cichy W.** [2007b]: Biopaliwa stałe na bazie odpadów drzewnych – możliwości otrzymywania, wykorzystanie, ograniczenia stosowania. W: *Technologia drewna wczoraj, dziś i jutro. Studia i szkice na Jubileusz Profesora Ryszarda Babickiego*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Drewna, Poznań
- Cichy W., Pawłowski J.** [2007]: Spalanie paliw formowanych uzyskanych z odpadowych tworzyw drzewnych w sposób bezpieczny dla środowiska. (Maszynopis). Instytut Technologii Drewna, Poznań,
- Cichy W., Pawłowski J.** [2008a]: Stałe paliwa wtórne otrzymywane z odpadów drzewnych zanieczyszczonych chemicznie. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Postęp w badaniach surowców lignocelulozowych i produktów ich konwersji”. Poznań – Zielonka
- Cichy W., Pawłowski J.** [2008b]: Spalanie mieszanek paliwowych uzyskanych z odpadowych materiałów drzewnych i paliw konwencjonalnych. (Maszynopis). Instytut Technologii Drewna, Poznań
- Cichy W., Pawłowski J.** [2009]: Combustion of solid recovered fuels made from post consumer wood waste in a power installation of low power. *Drewno-Wood*, vol. 52 [182]: s. 25–63
- Fodemski T.R.** (Red.) [2001]: *Pomiary Ciepłne. Cz. II. Badania ciepłne maszyn i urządzeń*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
- Juszczak M.** [2002]: Ekologiczne spalanie odpadów drzewnych. Badania przemysłowe ograniczania emisji tlenu węgla i tlenu azotu. *Rozprawy nr 368*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań
- Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.** [1994]: *Energetyka a ochrona środowiska*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa
- Marutzky R., Seeger K.** [1999]: *Energie aus Holz und anderer Biomasse*. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- PN-ISO 8756:2000** Jakość powietrza. Postępowanie z danymi dotyczącymi temperatury, ciśnienia i wilgotności
- PN-81/G-04513** Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej
- PN-93/Z-15008/02** Odpady komunalne stałe. Badania właściwości paliwowych. Oznaczanie wilgotności całkowitej
- PN-93/Z-15008/03** Odpady komunalne stałe. Badania właściwości paliwowych. Oznaczanie zawartości części palnych i niepalnych
- PN-93/Z-15008/04** Odpady komunalne stałe. Badania właściwości paliwowych. Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej
- Ratajczak E., Szostak A., Bidzińska G.** [2003]: *Drewno użytkowe w Polsce*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Drewna, Poznań
- Rozporządzenie** [2008] Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonego

rzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii. Dz.U.2008.156.969

Rybak W. [2006]: Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław

Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. (Red.) [2007]: Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce. Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Politechniki Śląskiej, Zabrze-Gliwice

Wandrasz J.W., Wandrasz A.J. [2006]: Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa

CO-BURNING OF HARD COAL AND WOOD WASTE IN LOW POWER ENERGY INSTALLATIONS

Summary

This publication is an effect of experiments carried out at a test station consisting of low power boiler adapted to wood combustion. During the experiments conducted at optimum parameters of boiler operation the temperatures inside the test hearth and calorific effect were controlled. The observed factor was the composition of combustion gases emitted to the atmosphere by the funnel.

The aim of the study was to identify the influence of the properties of chemically contaminated wood materials on the course of basic parameters of the process of co-burning of these materials with hard coal in a low power boiler.

Based on previous experiments the authors planned tests consisting in energy processing of prepared fuel mixtures obtained from post-consumer wood waste and hard coal. Three kinds of materials used as fuel were taken for the tests: post-consumer furniture, hard coal, and industrial waste – sawmill softwood sawdust.

In obtained mixtures basic fuel properties were defined (calorific value, ash content and moisture content) and the content of primary elements was determined (C, H, N and S). Prepared fuels were burnt in the laboratory boiler installation. During tests the following information was recorded: boiler work parameters, central heating installation parameters and amount of emission of gaseous products of combustion.

Nitrogen in the form of amine resins contained in post-consumer furniture had a direct influence on the amount of nitrogen oxides emission during combustion of fuel mixtures with a share of post-consumer furniture. An additional factor increasing NO_x emission was nitrogen contained in coal fuel. Combustion of tested fuel mixtures caused the following results: a 1% share of furniture waste in evaluated fuel did not cause any significant repercussions in the form of elevated emissions of nitrogen oxides from the installation; when the share of post-consumer furniture was higher than 1% NO_x emissions exceeded the emission standards considerably; emissions of sulphur dioxide higher

than in the case of wood fuel without a share of coal were observed as well – the reason for that was oxidation of sulphur compounds contained in coal fuel. The authors noted a high level of carbon oxide emission that significantly exceeded effective emission standards for burnt waste.

Obtained results may be a starting point for further research on the use of post-consumer and industrial wood waste as alternative fuels in the power industry.

Keywords: chemically contaminated wood materials, co-burning, low power boiler, emissions

