

Janusz DĄBROWSKI*, Tadeusz PIECUCH**

Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych wraz z osadami ściekowymi

STRESZCZENIE. W publikacji przedstawiono wyniki badań nad możliwością termicznego przekształcania mieszanek wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych z osadami ściekowymi, jako możliwość utylizacji zarówno odpadów, jak i osadów ściekowych. Do badań spalania i współspalania wyodrębniono osady ściekowe, pobrane z Oczyszczalni Ścieków „Jamno”, Koszalin, oraz odpady tworzyw sztucznych (PET – politereftalan etylenu, PCW – polichlorek winylu, PP – polipropylen).

W badaniach procesu spalania i współspalania materiałów użytych do badań, jako parametry niezależne (zmiennie) przyjęto: temperaturę w strefie spalania pieca T , współczynnik nadmiaru powietrza λ , wskaźnik masy materiału m oraz procentowy udział masy osadów ściekowych w mieszance paliwowej U . Natomiast parametrami zależnymi (wynikowymi) w tych badaniach były: stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2} , stężenie tlenków azotu c_{NO_x} oraz stężenie tlenku węgla(II) c_{CO} .

Zmiany parametrów procesowych, dotyczących zarówno warunków spalania, jak i współspalania osadów ściekowych i odpadów gumowych, i ich wpływ na emisję zanieczyszczeń (SO_2 , NO_x , CO), pozwoliły stwierdzić, że wzrost temperatury spalania poprawia jakość spalania, zmniejszając stężenia tlenku węgla(II), ale jednocześnie zwiększa emisję tlenku siarki(IV) oraz tlenków azotu NO_x . Wzrost zawartości tlenu wraz z powietrzem dostarczanym do komory spalania powoduje znaczną obniżkę stężenia tlenku węgla(II) i dużo mniejszą obniżkę tlenku siarki(IV), przy równoczesnym wzroście emisji tlenków azotu NO_x . Zależności te zaobserwowano dla wszystkich badanych materiałów.

* Dr inż., ** Prof. dr hab. inż. – Katedra Techniki Wodno-Mułowej i Utylizacji Odpadów, Politechnika Koszalińska; e-mail: janusz.dabrowski@tu.koszalin.pl

Analiza właściwości energetycznych mieszanin osadów ściekowych i odpadów typowych tworzyw sztucznych wykazała, że wysoka wartość ciepła spalania tworzyw sztucznych pozwala na maksymalny udział suchej masy tych osadów ściekowych w mieszance paliwowej nawet do 50%.

Ostatecznie, dysponując określonymi wynikami poszczególnych etapów badań, opracowano model matematyczno-empiryczny, tworzący kryterium określające warunki parametryczne spalania i współspalania wybranych grup odpadów w odniesieniu do głównych składników zanieczyszczeń spalin.

SŁOWA KLUCZOWE: odpady tworzyw sztucznych, osady ściekowe, termiczna utylizacja, współspalanie

Wprowadzenie

Od wielu lat obserwuje się nieustanny wzrost ilości odpadów tworzyw sztucznych. Pochodzą one z różnych dziedzin przemysłu, gospodarki i życia codziennego. Ze względu na różnorodność tych odpadów, ich objętość i duży czas degradacji, utrzymywanie ich na składowiskach jest niekorzystne. Przetwarzanie tych odpadów i wprowadzenie segregacji jest szansą na ich ograniczenie, ale wciąż przecież odpady będą trafiać na składowiska.

Jednocześnie, w obliczu rosnących ilości osadów powstających w procesie oczyszczania ścieków, unieszkodliwianie tych osadów stało się aktualnie jednym z najpoważniejszych problemów ekologicznych. Unieszkodliwianie osadów ściekowych może być realizowane poprzez przyrodnicze wykorzystanie, bądź ich termiczne przekształcanie (Bień, Wystalska 2009).

Wprowadzenie termicznych technologii utylizacji odpadów, jak i osadów ściekowych, daje możliwość wydłużenia czasu eksploatacji istniejących składowisk, których w Polsce jest obecnie ponad 1000 (Krajowy plan... 2010), a także ich wykorzystania jako cennych surowców energetycznych.

Przez termiczne przekształcanie odpadów rozumie się procesy ich utleniania (spalanie) lub inne procesy termiczne (piroliza, zgazowanie) prowadzone w przeznaczonych do tego instalacjach lub urządzeniach (m.in. spalarniach odpadów) (Jarosiński 1996; Piecuch i in. 2002; Piecuch 1998; Piecuch 2006).

Forma przekształcania odpadów, jaką jest spalanie, ma tę przewagę nad uporządkowanym składowaniem, że pod budowę spalarni nie trzeba wielkich terenów, natomiast ciepło, które powstaje podczas spalania w nowoczesnych zakładach wykorzystywane jest do wytwarzania energii elektrycznej i ogrzewania budynków.

Jednak spalanie odpadów jest nadal bardzo dyskusyjne, ze względu na emisję zanieczyszczeń, stanowiących bezpośrednie zagrożenie dla ludzi; jest to problem tak w skali regionalnej jak i globalnej.

Głównymi produktami spalania paliw (kopalnych i odpadowych) są przede wszystkim CO₂ i H₂O. Ale paliwa pochodzenia organicznego, oprócz węgla i wodoru, zawierają wiele

innych pierwiastków, np. tlen, azot, siarkę i chlor. Z tego względu, wśród zanieczyszczeń znajdujących się w gazach spalinowych, wyróżnia się zanieczyszczenia spowodowane obecnością w paliwach pierwiastków elementarnych (głównie SO_2) i N_2 z powietrza (NO_x) oraz pośredni produkt niedoboru powietrza do spalania (CO).

Katedra Techniki Wodno-Mułowej i Utylizacji Odpadów Politechniki Koszalińskiej od wielu lat zajmuje się problematyką termicznej utylizacji odpadów (Piecuch i in. 2000, 2003, 2008, 2009). Badania w Katedrze prowadzone są nad wieloma grupami odpadów, m.in. tworzyw sztucznych i osadów ściekowych. Stąd zainteresowanie problemem możliwości współspalania wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych oraz osadów ściekowych.

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań nad możliwością termicznego przekształcania mieszanek wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych z osadami ściekowymi, jako możliwość utylizacji zarówno odpadów, jak i osadów ściekowych.

1. Metodyka badań

1.1. Materiały użyte do badań

Do badań spalania i współspalania użyto osady ściekowe oraz tworzywa sztuczne, wśród których wyodrębniono tworzywa uznawane za reprezentatywną próbkę, a mianowicie:

- ✧ PET – politereftalan etylenu (etylenowy), jako przedstawiciel grupy poliestrów,
- ✧ PCW – polichlorek winylu, jako przedstawiciel grupy polimerów winylowych,
- ✧ PP – polipropylen, jako przedstawiciel grupy poliolefin.

Wstępnym etapem badań było wykonanie analizy technicznej materiałów użytych do badań, polegających na określeniu podstawowych wskaźników charakteryzujących paliwa stałe, mianowicie: oznaczanie zawartości wilgoci (W^a), popiołu (A^a), części lotnych (V^a), ciepła spalania (Q_s^a) dla paliw stałych. Analizy te wykonywano zgodnie procedurami opisanymi w Polskich Normach (PN-ISO 1213-2:1999; PN-80/G-04511; PN-ISO 1171:2002; PN-80/G-04512; PN-G-04516:1998; PN-ISO 1928:2002). Wyniki analizy badanych materiałów przedstawia tabela 1.

Komunalne osady ściekowe, jako paliwo odpadowe użyte do badań, pobrano z Oczyszczalni Ścieków „Jamno”, która jest obiektem eksploatowanym przez Spółkę z o.o. Miejskie Wodociągi i Kanalizacja w Koszalinie. Wyniki wskazują na wysoką zawartość wilgoci (ponad 60%), która mogła wpływać negatywnie na efektywność procesu spalania. Dlatego osady wysuszono do uzyskania wilgotności około 10% i następnie rozdrobiono do wielkości ziaren około 1 mm, w celu ujednoczenia wielkości ziaren osadów z rozmiarem ziaren innych materiałów użytych do badań. Ułatwia to dozowanie i mieszanie osadów z innymi paliwami w procesie współspalania.

TABELA 1. Zestawienie zbiorcze wyników analizy technicznej badanych materiałów

TABLE 1. Summary of results of technical analysis of tested materials

Uziarnienie [mm]	Zawartość wilgoci W^a , %	Zawartość popiołu A^a , %	Zawartość części lotnych V^a , %	Ciepło spalania $Q_{a_s}^a$, MJ/kg
Osady ściekowe (w stanie suchym)				
0,125–1,25	10,6	32,3	54,3	13,57
PET – politereftalan etylenu				
1,0–2,0	0,3	2,6	42,6	23,11
PCW – polichlorek winylu				
0,35–1,25	0,2	5,3	49,7	25,76
PP – polipropylen				
0,5–2,0	0,8	3,1	58,4	42,02

1.2. Zakres badań

Zakres badań obejmował dwa etapy:

- 1) badania procesu indywidualnego spalania osadów ściekowych i wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych,
- 2) badania procesu współspalania mieszanek osadów ściekowych i odpadów tworzyw sztucznych w wybranych proporcjach masowych.

W badaniach procesu spalania materiałów użytych do badań, jako parametry niezależne (zmiennie) przyjęto:

- ✧ T – temperatura w strefie spalania pieca [K], – parametr ten zmieniano w zakresie: 873,15–1443,15K, zwiększając go co 100K, przy czym graniczną wartością była temperatura 1443,15K, gdyż właśnie maksymalnie taką można było uzyskać w strefie spalania,
- ✧ λ – współczynnik nadmiaru powietrza – parametr określany jako iloraz ilości powietrza dostarczonej do spalania i ilości powietrza teoretycznie potrzebnej do spalania; parametr ten zmieniano w przedziale: 1,3–2,0,
- ✧ m – wskaźnik masy materiału [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – parametr określający wielkość próbki badanego paliwa, jako wsadu do pieca, w odniesieniu do objętości komory spalania tego pieca; wartości tego parametru wynosiły: 1,2, 2,4 i 3,6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

W pierwszej serii badań procesu spalania parametr T został przyjęty jako zmienny parametr niezależny, natomiast jako parametry niezależne na stałym poziomie przyjęto: współczynnik $\lambda = 1,8$ i wskaźnik $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

W kolejnym etapie tych badań, parametrami niezależnymi na stałym poziomie były: $T = 1273,15\text{K}$ oraz $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Następny rozpatrywany parametr, tj. λ , był parametrem zmiennym niezależnym.

W trzecim etapie badań procesu spalania, parametrami niezależnymi na stałym poziomie były: $T = 1273,15\text{K}$ i $\lambda = 1,8$. W etapie tym zmieniano wskaźnik m .

W badaniach procesu współspalania materiałów użytych do badań, jako parametry niezależne (zmienne) przyjęto: udział masowy osadów ściekowych w spalanej mieszance U [%], współczynnik nadmiaru powietrza λ oraz temperaturę spalania T [K].

Parametr U zmieniano w zakresie 0–50%. Zakres ten został określony po przeprowadzeniu serii badań i analizie właściwości energetycznych spalanych mieszanek z udziałem osadów ściekowych.

TABELA 2. Zmiany wartości ciepła spalania mieszanki osadów ściekowych i odpadów tworzyw sztucznych w zależności od procentowego udziału osadów ściekowych w mieszance

TABLE 2. Changes of calorific value of mixtures of sewage sludge and plastic waste depending on percentage share of sewage sludge in the mixture

Udział osadów ściekowych w mieszance U_o [%]	Ciepło spalania Q_s [MJ/kg]	Obniżka wartości Q_s ΔQ_s [%]
Mieszanka osadów ściekowych i odpadów poliestrowych (PET)		
0	23,11	0,00
25	22,45	2,86
40	21,82	5,58
50	20,16	12,77
75	17,84	22,80
100	13,57	41,28
Mieszanka osadów ściekowych i odpadów poliolefinowych (PP)		
0	42,02	0,00
25	38,16	9,19
40	35,81	14,78
50	32,53	22,58
75	21,36	49,17
100	13,57	67,71
Mieszanka osadów ściekowych i odpadów poliwinylowych (PCW)		
0	25,76	0,00
25	22,24	13,66
40	21,71	15,72
50	19,50	24,30
75	15,38	40,30
100	13,57	47,32

Zmiany wartości ciepła spalania w zależności od udziału osadów ściekowych w spalanych mieszankach użytych do badań przedstawiono w tabeli 2.

Analiza wyników tego etapu badań pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem udziału w mieszance osadów ściekowych spadała wartość ciepła spalania wszystkich mieszanek. Spadek wartości ciepła spalania w całym zakresie jest stały i zależny od udziału osadów w mieszance, osiągając ponad 40% przy 100% udziale osadów ściekowych we wszystkich badanych mieszankach.

Analiza tych wyników pozwala również zauważyć, że maksymalny udział osadów ściekowych w spalanej mieszance nie powinien przekraczać 50%; to pozwala utrzymać wartości Q_s na stosunkowo dużym poziomie około 20 MJ/kg. Dlatego parametr U zmieniano w zakresie 0–50%.

Pozostałe dwa parametry zmienne niezależne zmieniano w takich samych przedziałach, jak w przypadku procesu spalania.

W pierwszej serii badań procesu współspalania, jako parametry niezależne na stałym poziomie zostały przyjęte: $\lambda = 1,8$ i $T = 1273,15\text{K}$, podczas gdy jako zmienny parametr niezależny przyjęto wskaźnik U .

W kolejnej serii tych badań, parametrami niezależnymi na stałym poziomie były: $U = 10\%$ oraz $T = 1273,15\text{K}$, natomiast trzeci rozpatrywany parametr zmienny niezależny, tj. λ , zmieniano w przedziale: 1,3–2,0.

W serii trzeciej badań procesu spalania, parametrami niezależnymi na stałym poziomie określono parametr $U = 10\%$ i $\lambda = 1,8$. W serii tej zmiennym parametrem był parametr T , który zmieniano w zakresie: 1073,15–1443,15K, zwiększając go co 100K.

Parametry zależne (wynikowe) w badaniach procesu spalania i współspalania to:

- ✧ c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$],
- ✧ c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$],
- ✧ c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Przed rozpoczęciem głównych prac badawczych wykonano badania rozpoznawcze jako pełne doświadczenia laboratoryjne dla wszystkich trzech parametrów zmiennych niezależnych, zarówno procesu spalania, jak i współspalania, celem określenia efektów głównych i interakcji pomiędzy tymi parametrami. Wyniki zestawiono w formie macierzy rzędu 2^3 . Doświadczenia wykonano w układzie bloków kompletnie zrandomizowanych (przy pełnej kombinacji), przy czym ilość bloków w każdym ćwiczeniu wynosiła $k = 4$, gdzie ilość doświadczeń objętych blokiem była $2^3 = 8$, zatem suma wyników w pełnej serii pomiarów dla każdej z analizowanych zmiennych zależnych wynosiła $n = 3 \times 8 = 24$.

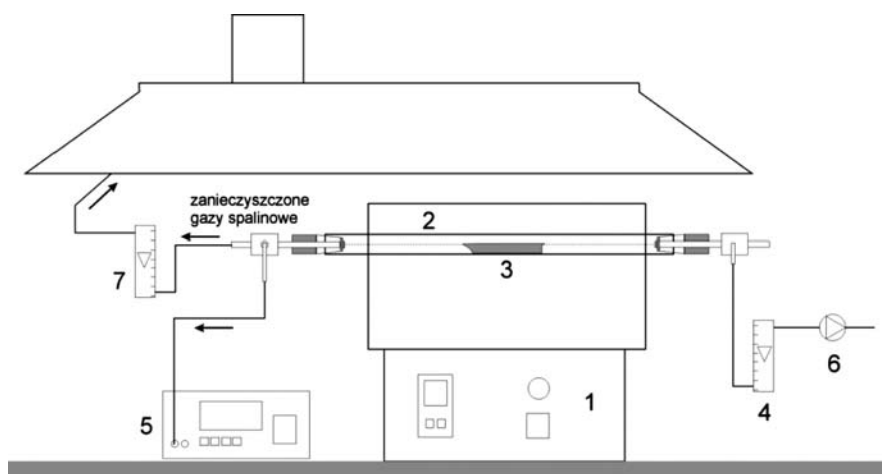
Wykonano obliczenia efektów głównych i interakcji metodą Yatesa. Następnie na podstawie testu istotności Fishera określono szczegółową analizę wariancji dla określenia istotności poszczególnych efektów i interakcji. Przykładowo, analiza efektów głównych dla badań wpływu zmian parametrów niezależnych na stężenie tlenku siarki(IV) c_{SO_2} w procesie spalania osadów ściekowych wskazuje, że najbardziej istotnymi – spośród badanych efektów – były efekty wartości temperatury spalania T i wskaźnik masy materiału m . Natomiast współczynnik nadmiaru powietrza λ , wg testu Fischera, okazał się w badanym przedziale zmian mniej istotnym. Zwracając uwagę na mało istotne efekty interakcyjne (na co wskazują wyniki obliczeń analizy wariancji), a także na to, że wartości istotności

czynników głównych są wyraźnie większe od wartości interakcji tych czynników, można było założyć w dalszych badaniach pominięcie tych interakcji, przyjmując jako najistotniejsze tylko czynniki główne.

1.3. Opis stanowiska badawczego

Pomiary ciepła spalania materiałów przeznaczonych do spalania i współspalania wykonano w niniejszej pracy przy zastosowaniu mikroprocesorowego kalorymetru KL-11 „Mikado”. Kalorymetr przeznaczony jest do pomiaru ciepła spalania paliw stałych zgodnie z zasadami, które reguluje norma PN-ISO 1928:2002.

Badania procesu spalania i współspalania poprowadzone zostały w instalacji badawczej przedstawionej schematycznie na rysunku 1. Zasadniczymi elementami instalacji był piec rurowy (1) oraz analizator spalin (5). Piec PRC 20 HM to laboratoryjny jednostrefowy piec rurowy z poziomym układem grzejnym o maksymalnej temperaturze pracy ciągłej równej 1473K. Proces spalania przeprowadzany był w atmosferze powietrza, które doprowadzano do układu pompką przeponową (6) poprzez rotametr stołowy ROS-06 (4) mierzący natężenie jego przepływu w zakresie $0,5\text{--}8,5\text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Strumień gazów spalinowych wydostający się z reaktora pieca, którego natężenie przepływu mierzył rotametr stołowy ROS-06 (7), poddawany był analizie za pomocą analizatora spalin typu MADUR GA-21 plus (5). Dla ułatwienia orientacji i możliwości porównywania wyników wszystkie stężenia zanieczyszczeń gazów spalinowych przeliczano na standardowe warunki umowne spalania przy zawartości 11% O_2 w spalinach.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do procesu spalania odpadów
1 – piec rurowy, 2 – reaktor, 3 – kuweta ceramiczna, 4, 7 – rotametry stołowe, 5 – analizator spalin,
6 – pompka przeponowa

Fig. 1. Diagram of experimental stand for investigations of waste incineration process
1 – pipe furnace, 2 – reactor, 3 – ceramic dish, 4, 7 – rotameter, 5 – combustion gas analyser,
6 – small diaphragmatic pump

2. Omówienie wyników badań

2.1. Proces spalania osadów ściekowych i wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych

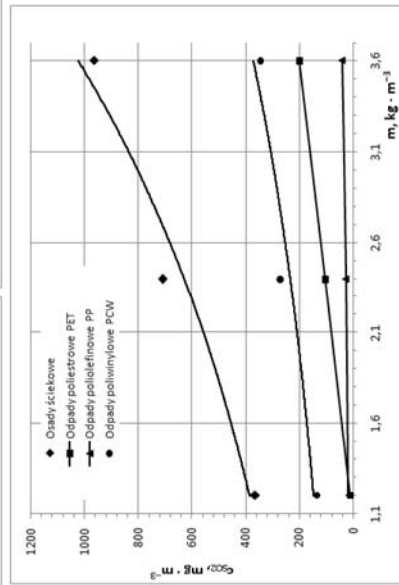
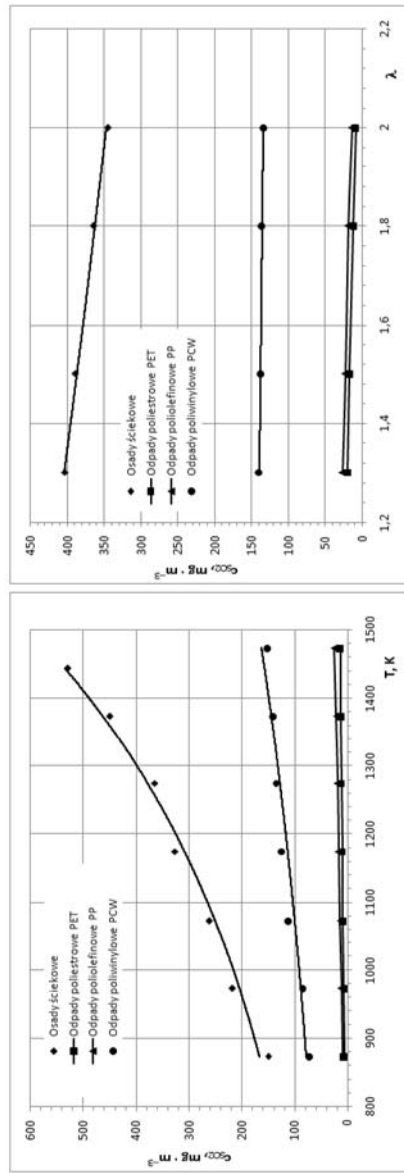
Stężenie tlenku siarki(IV)

Wpływ zmian temperatury w strefie spalania T , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania badanych materiałów przedstawiono na rysunku 2.

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie SO_2 powstałego w procesie spalania badanych odpadów, potwierdza przewidywanie, że wzrost temperatury spalania powoduje wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych materiałów.

Emisja tlenków siarki w największym stopniu zależy od rodzaju spalanego paliwa, gdyż źródłem tlenków siarki w spalinach są prawie wyłącznie procesy utleniania siarki zawartej w paliwie, domieszkach i dodatkach. Zawarta w paliwach siarka podczas spalania jest w ponad 95% utleniana do SO_2 i tylko w nieznacznej części do SO_3 (Jarosiński 1996; Kordylewski i in. 2008; Kowalewicz 2000). Dlatego różnic w zakresach zmian stężenia SO_2 dla poszczególnych badanych materiałów należy szukać w ich analizie elementarnej. Największe wartości stężeń tlenku siarki(IV) w spalinach zaobserwowano w procesie spalania osadów ściekowych. W przypadku tych palnych substancji odpadowych maksymalne stężenia SO_2 (przy spalaniu w najwyższej temperaturze (1443,15K) i największej w badanym zakresie masie wsadu do pieca) osiągało wartości powyżej $500,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Z wyników literaturowych analizy elementarnej widać wyraźnie, że to właśnie osady ściekowe charakteryzują się największą zawartością siarki paliwowej (około 1,7%).

Natomiast, ze względu na bardzo małą (około 0,2%) zawartość siarki elementarnej w odpadach tworzyw sztucznych, można zauważyć bardzo niski zakres zmian wartości c_{SO_2} w przypadku spalania plastomerów (odpadów poliolefinowych PP, poliestrowych PET). Wartości tych stężeń osiągają maksymalne wartości rzędu $30,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jednakże interesujący jest zakres zmian wartości stężeń tlenku siarki(IV) w spalinach zaobserwowany w procesie spalania odpadów z PCW. Pomimo minimalnej zawartości siarki elementarnej w tym paliwie, zaobserwowano stosunkowo duży wzrost stężeń (od około $70,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ do około $150,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ w całym zakresie zmian temperatury spalania, przy wskaźniku $m = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Można to wyjaśnić tym, że prawdopodobną przyczyną tak wysokich, jak na ten materiał paliwowy, wartości stężeń SO_2 jest dodawany w przetwórstwie PCW i jego kopolimerów, stabilizator termiczny i środek smarny w ilości 1–2%. Dodatek ten charakteryzuje się stosunkowo dużą zawartością siarki. Ze względu na zawartość siarki nie powinien być używany razem ze stabilizatorami zawierającymi ołów lub kadm. Zawarta w tych środkach siarka podczas spalania może być utleniana do SO_2 i stąd większe stężenia tych gazów w spalinach podczas spalania odpadów z PCW niż w przypadku innych tworzyw sztucznych.



Rys. 2. Wpływ temperatury w strefie spalania T , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie spalania badanych materiałów w strefie spalania w procesie spalania badanych materiałów

Analiza zmian wartości stężeń tlenku siarki(IV) w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza (przy stałych wartościach temperatury w komorze spalania równej 1273,15K i stałej masie wsadu paliwa do tej komory), wskazuje jednoznacznie, że w procesie spalania wszystkich badanych materiałów następował nieznaczny (kilku lub kilkunastoprocentowy) spadek stężeń tlenku siarki(IV). Wynika to z tego, że wzrost zawartości tlenu z dostarczanego powietrza powodował szybsze utlenianie związków siarkowych do SO_3 niż SO_2 . Zaobserwowano znacznie większe wartości c_{SO_2} w przypadku badania procesu spalania osadów ściekowych niż pozostałych badanych materiałów. Oczywiście zależność ta jest efektem znacznie większej zawartości siarki paliwowej w osadach ściekowych. W przypadku pozostałych badanych materiałów liniowość zależności stężeń c_{SO_2} od współczynnika nadmiaru powietrza, podobnie jak temperatury spalania, oznacza stałą utlenialność siarki paliwowej w badanym zakresie, a wpływ tych parametrów jest nieznaczny.

Wyniki badań wpływu wskaźnika masy materiału na wartości stężeń tlenku siarki(IV) wskazują na oczywisty fakt, że wzrost masy wsadu badanych odpadów do komory pieca powodował wzrost stężeń c_{SO_2} w przypadku spalania wszystkich tych materiałów. Jest to wzrost stały w całym zakresie zmian badanego parametru m . I w tym przypadku – podobnie jak w poprzednich analizach zmian stężeń tlenku siarki(IV) – istotny wpływ na wielkość tych stężeń ma zawartość siarki paliwowej w badanym materiale.

Stężenie tlenków azotu

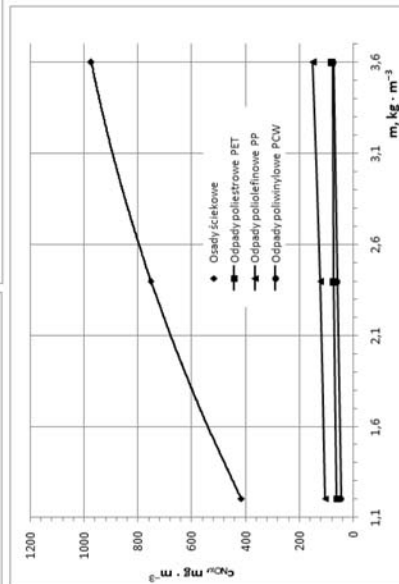
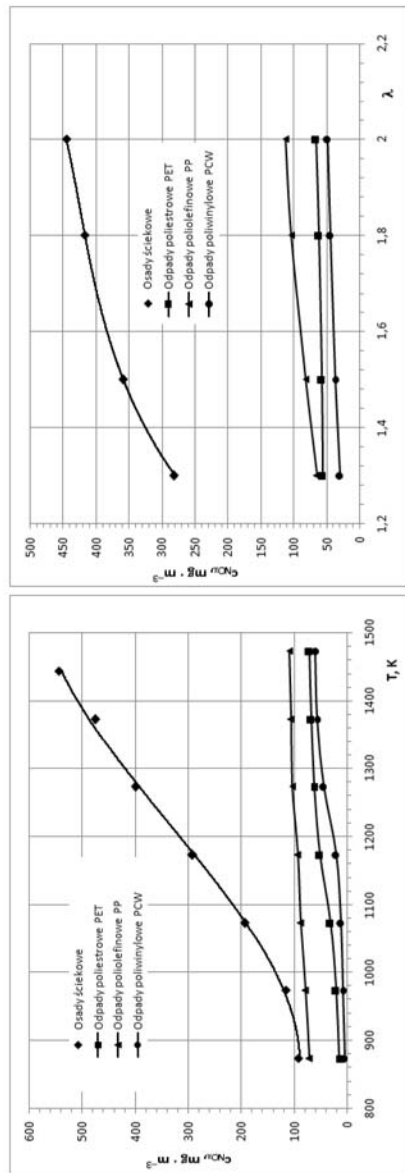
Wpływ zmian temperatury w strefie spalania T , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania badanych materiałów przedstawiono na rysunku 3.

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie tlenków azotu, powstałych w procesie spalania badanych odpadów wskazuje, że wzrost temperatury spalania powoduje wzrost stężenia sumy tlenków azotu NO_x w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych materiałów.

Należy podkreślić, że podwyższenie temperatury zawsze wywiera korzystny wpływ na szybkość reakcji utleniania. Produktem bezpośredniej reakcji syntezy tlenu – zawartego w dostarczonym do komory spalania powietrzu – z azotem zawartym w paliwie (a także w powietrzu) jest tlenek azotu(II). Powstaje on we wszystkich procesach wysokotemperaturowych. Im wyższa temperatura, tym reakcja ta jest intensywniejsza. Reakcja powstawania tlenku azotu(IV) przebiega wyłącznie w niższych temperaturach w obecności powietrza. Szybkość tej reakcji jest największa w temperaturze około 372,15 K. Dlatego też w warunkach prowadzenia badań (873,15–1443,15 K) udział reakcji utleniania NO do NO_2 był znikomy.

W procesie spalania osadów ściekowych największy udział w wysokich wartościach c_{NO_x} miały tlenki paliwowe, zarówno ze względu na ilość azotu elementarnego w paliwie, jak i ze względu na stosunkowo wysoki współczynnik nadmiaru powietrza ($\lambda = 1,8$), jako parametr niezależny będący parametrem stałym w badaniach wpływu temperatury spalania. Tlenki termiczne pojawiały się dopiero w wysokich temperaturach (powyżej 1000,15 K).

Wynikiem spalania odpadów z tworzyw sztucznych było powstawanie stosunkowo niskich wartości stężeń NO_x , głównie tlenków termicznych, gdyż „czysty” polimer nie



Rys. 3. Wpływ temperatury w strefie spalania T , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenków azotu w procesie spalania badanych materiałów

Fig. 3. Effect of temperature in the combustion zone T , the excess air number λ , and material weight indicator m on the concentration of nitrogen oxides NO_x in the incineration process of tested materials

zawiera azotu elementarnego. Mimo wszystko mogą powstawać w małym stopniu również NO_x paliwowe, ze względu na antystatyki – substancje dodatkowe, dodawane w celu wyeliminowania zjawiska elektryzowania się powierzchni tworzyw sztucznych. Najczęściej stosowane antystatyki to związki zawierające azot. Prawdopodobnie właśnie z dodatków w produkcji tworzyw sztucznych powstają pewne ilości azotu elementarnego w odpadach z tych materiałów. Związki chemiczne, polepszające właściwości tworzyw sztucznych, z reguły znacznie utrudniają ich utylizację, a szczególnie ich termiczny rozkład, powodując wzrost emisji szkodliwych gazów, np. NO_x .

Ze względu na mechanizm powstawania tlenków azotu (tlenki termiczne i paliwowe) należy porównać zmiany stężeń NO_x w zależności od temperatury spalania i ilości powietrza dostarczanego do komory spalania. W przypadku procesu spalania wszystkich badanych materiałów przy stałej temperaturze w komorze spalania (wysokiej – 1273,15K) i stałej masie wsadu paliwa do tej komory, obserwowano wzrost stężeń NO_x wraz ze wzrostem przepływu powietrza dostarczanego do reaktora pieca. Wzrost c_{NO_x} posiadał charakter liniowy i zmieniał się w stosunkowo niewielkich zakresach w przypadku wszystkich badanych odpadów. Analiza wyników wskazała na największe wartości stężenia NO_x w przypadku procesu spalania osadów ściekowych, co potwierdza poprzednią analizę wyników zmian temperaturowych procesu, gdzie w przypadku tego materiału największy udział w wysokich wartościach c_{NO_x} miały tlenki paliwowe. Ich ilość zależy od zawartości azotu w paliwie oraz stężenia tlenu dostarczanego do procesu spalania.

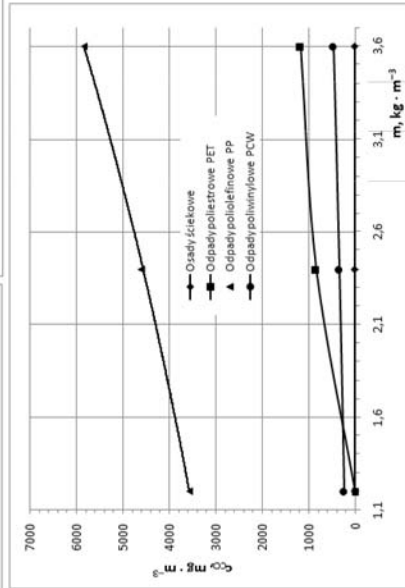
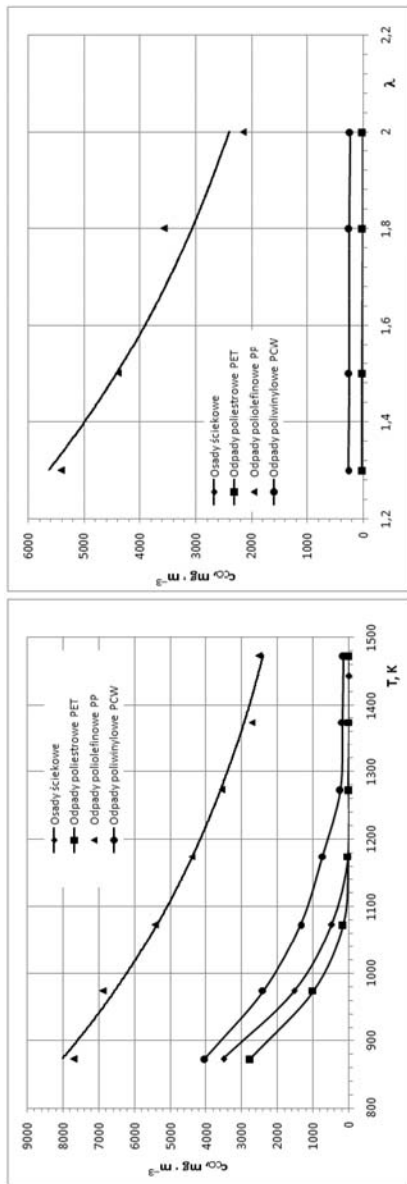
Stężenie tlenku węgla(II)

Wpływ zmian temperatury w strefie spalania T , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania badanych materiałów przedstawiono na rysunku 4.

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie tlenku węgla(II), powstałego w procesie spalania badanych materiałów wskazuje, że wzrost temperatury spalania powoduje spadek wartości stężenia CO w gazach spalinowych. Spadek ten zaobserwowano dla wszystkich badanych odpadów przy stałym wskaźniku masy paliwa i powietrza dostarczanego do komory spalania.

Proces tworzenia tlenku węgla(II) jest pośrednim etapem utleniania do tlenku węgla(IV) (węgiel C, jako pierwiastek zawarty w paliwie, spalając się przechodzi przez stadium CO, który powstaje w bardzo szybkich procesach spalania, podczas gdy utleniany jest do tlenku węgla(IV) stosunkowo wolniej) (Jarosiński 1996; Kordylewski i in. 2008; Kowalewicz 2000). Jednakże im wyższa temperatura tym jest większa prędkość utleniania CO. Stąd w analizie wyników badań wpływu temperatury procesu spalania na stężenia tlenku węgla(II), przy stałym dopływie powietrza do komory spalania (niezmienny współczynnik nadmiaru powietrza), obserwuje się spadek c_{CO} przy wzroście temperatury w komorze spalania.

W wysokich temperaturach spalania zachodzi reakcja: $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$, a zatem o możliwości przereagowania CO decyduje poziom rodników hydroksylowych OH w spalinach. Jak podaje Kordylewski i in. (2008) stężenie rodników OH gwałtownie maleje wraz ze spadkiem temperatury. Powoduje spowolnienie utleniania tlenku węgla(II) do tlenku



Rys. 4. Wpływ temperatury w strefie spalania T , współczynnika nadmiaru powietrza λ , oraz wskaźnika masy materiału m na stężenie tlenku węgla(II) w procesie spalania badanych materiałów

Fig. 4. Effect of temperature in the combustion zone T , the excess air number λ , and material weight indicator m on the concentration of carbon oxide (II) in the incineration process of tested materials

węgla(IV), który jest już obojętny toksycznie. W niskich temperaturach zachodzi proces utleniania CO zgodnie z reakcją: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Reakcja ta jest reakcją dużo wolniejszą. Dlatego wysiłki, mające na celu zmniejszenie zawartości CO w spalinach, zmierzają raczej do przyspieszenia jego utlenienia do ditlenku węgla CO_2 niż zapobiegania jego tworzeniu się w procesie spalania.

Jak wykazała analiza wyników, w przypadku procesu spalania osadów ściekowych, najwyższe wartości stężeń tlenu węgla(II) (nawet ponad $3500,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) wystąpiły przy najniższych wartościach temperatury spalania (873, 15 K). Następnie zaobserwowano gwałtowny spadek wartości c_{CO} dla ww. badanych materiałów osiągając dla temperatury 1173 K bardzo niskie wartości (około $20,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Wynikiem procesu spalania osadów ściekowych w temperaturach powyżej 1373,15 K było stężenie tlenu węgla(II) bliskie wartości zerowej.

W przypadku procesu spalania plastomerów (PET, PP, PCW) analiza wyników badań tego procesu wyraźnie wykazała bardzo wysokie (osiągające nawet wartości kilku tysięcy $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) stężenia CO. Prawdopodobnie źródła tak wysokich wartości należy szukać w sposobie przygotowania materiałów do badań. Wiadomym jest, że tworzywa sztuczne są materiałami heterogenicznymi, wieloskładnikowymi, w których w matrycy polimeru rozproszone są środki pomocnicze, takie jak: wypełniacze, dodawane w celu polepszenia właściwości mechanicznych i chemicznych tworzywa oraz obniżenia kosztów produkcji, zmiękczacze (plastyfikatory), stabilizatory, antyutleniacze, barwniki i pigmenty. Wszystkie te dodatki (np. barwniki i pigmenty) mogą powodować w procesie przygotowania paliwa nierównomierną jego strukturę i w procesie spalania niejednolite cząstki tworzą lokalne zamknięte źródła deficytu tlenu, co w konsekwencji powoduje wzrost wartości stężeń tlenu węgla(II).

Analiza wyników badań wpływu nadmiaru powietrza dostarczanego do procesu spalania badanych odpadów na stężenie tlenu węgla(II) potwierdza fakt, że przy stałej temperaturze spalania wzrost współczynnika λ powoduje spadek stężenia CO w gazach spalinowych. Spadek ten zaobserwowano dla wszystkich badanych materiałów przy stałym wskaźniku masy paliwa i temperaturze w komorze spalania. W przypadku osadów ściekowych, spadek był równy wartości około 50%. W przypadku spalania w stałej temperaturze odpadów z tworzyw sztucznych, również zaobserwowano obniżkę c_{CO} wraz ze wzrostem dopływu powietrza do reaktora pieca, ale wartości te były znacznie większe. Przykładowo, w przypadku spalania odpadów poliolefinowych (zawierających duże ilości dodatków pomocniczych), wartości stężenia ditlenku węgla, w wysokiej temperaturze 1273,15 K, obniżyły się z ponad $5000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ dla $\lambda = 1,3$ do około $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ dla $\lambda = 2,0$, czyli do wartości c_{CO} nadal bardzo wysokich.

Równania aproksymacyjne wyznaczone na podstawie wyników badań przyjęły następującą postać:

✧ Proces spalania osadów ściekowych

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,62 \cdot T - 82,25 \cdot \lambda + 250,01 \cdot m - 568,54 \quad (3.1)$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 0,933 \cdot T + 100,73 \cdot \log(-1,13 + \lambda) + 232,76 \cdot m - 1014,06 \quad (3.5)$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = \exp(15,80 - 0,01 \cdot T) - 10,94 \cdot \lambda + \exp(-0,17 + 0,70 \cdot m) - 81,26 \quad (3.9)$$

✧ Proces spalania odpadów poliestrowych

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,01 \cdot T - 2615,60 \cdot \log(166,71 + \lambda) + 78,65 \cdot m + 5724,55 \quad (3.2)$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 121,75 \cdot \log(T) + \exp(-0,99 + 1,83 \cdot \lambda) + 13,37 \cdot \log(m) - 328,04 \quad (3.6)$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = \exp(20,27 - 0,01 \cdot T) - 4,88 \cdot \lambda + 1204,74 \cdot \ln(m) - 211,81 \quad (3.10)$$

✧ Proces spalania odpadów poliolefinowych

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 0,02 \cdot T - 17,25 \cdot \lambda + 9,12 \cdot m + 5,85 \quad (3.3)$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = 0,06 \cdot T + 72,69 \cdot \log(-0,54 + \lambda) + 19,22 \cdot m - 9,92 \quad (3.7)$$

$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = \exp(10,47 - 0,002 \cdot T) - 17,26 \cdot \lambda + 945,88 \cdot m - 2638,60 \quad (3.11)$$

✧ Proces spalania odpadów poliwinylowych

$$c_{\text{SO}_2}(T, \lambda, m) = 154,65 \cdot \log(T) - 8,83 \cdot \lambda + 191,30 \cdot \log(m) - 363,31 \quad (3.4)$$

$$c_{\text{NO}_x}(T, \lambda, m) = \exp(2,26 + 0,01 \cdot T) + 43,03 \cdot \log(\lambda) + 11,66 \cdot m - 55,63 \quad (3.8)$$

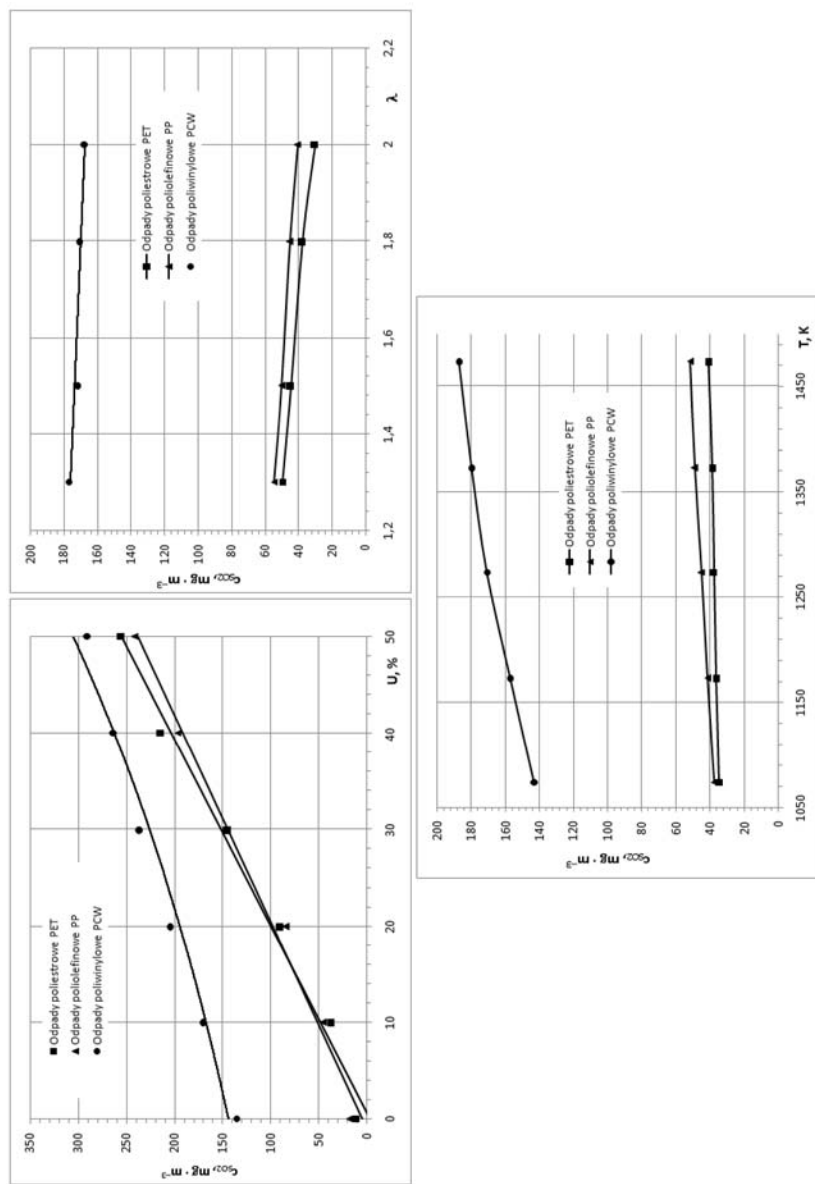
$$c_{\text{CO}}(T, \lambda, m) = -31,45 \cdot T + 0,01 \cdot T^2 - 33,93 \cdot \lambda + 93,59 \cdot m + 22889,88 \quad (3.12)$$

gdzie: c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 T – temperatura w strefie spalania [K],
 λ – współczynnik nadmiaru powietrza,
 m – wskaźnik masy materiału [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

2.2. Proces współspalania wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych wraz z osadami ściekowymi

Stężenie tlenku siarki(IV)

Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania badanych osadów ściekowych z odpadami tworzyw sztucznych przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku siarki(IV) w procesie współspalania badanych osadów ściekowych z odpadami tworzyw sztucznych

Fig. 5. Effect of changes of the mass fraction of sewage sludge in the fuel mixture U , the excess air number λ and the temperature in combustion zone of the furnace T on concentrations of sulphur oxide (IV) in the process of co-incineration of sewage sludge and plastic waste

Analiza wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w spalanej mieszance na stężenie SO_2 powstałego w procesie spalania badanych materiałów w temperaturze 1273,15 K i przy współczynniku $\lambda = 1,8$ pozwala stwierdzić, że wzrost tego udziału powoduje bardzo wysoki wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych dla wszystkich odpadów tworzyw sztucznych. Przykładowo, w przypadku mieszanek z udziałem odpadów z grupy poliolefin, wzrost wskaźnika U do wartości 10% powodował wzrost stężenia SO_2 o ponad 100%. Związane jest to z wielkością stężeń tlenu siarki(IV) poszczególnych składników mieszanek badanych w procesie spalania przy ww. stałych parametrach – dużo mniejsza emisja tlenu siarki(IV) w procesie spalania tych odpadów w porównaniu z wynikami spalania osadów ściekowych. Oczywiście pośrednio jest to spowodowane zawartością siarki paliwowej w odpadach.

Na podstawie wyników badań zmian wartości stężeń tlenu siarki(IV) w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza (przy stałych wartościach temperatury w komorze spalania równej 1273,15 K i stałym (10%) udziale osadów ściekowych we wsadzie paliwa do tej komory), można stwierdzić jednoznaczną obniżkę wartości c_{SO_2} w miarę zwiększania ilości doprowadzanego tlenu z powietrza dla wszystkich badanych materiałów (potwierdza to zależność jaką zaobserwowano w przypadku spalania badanych odpadów). Obniżka wartości stężeń tlenu siarki(IV) (przy wzroście współczynnika λ w granicach 1,3–2,0) okazała się zróżnicowaną w zależności od badanych składników mieszanek. Obniżka ta zmieniała się od 5% dla mieszanek osadów ściekowych z odpadami poliwinylowymi (PCW), do około 40% dla mieszanek z odpadami poliestrowymi (PET); w przypadku mieszanek osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi (PP) obniżka ta wyniosła około 25%.

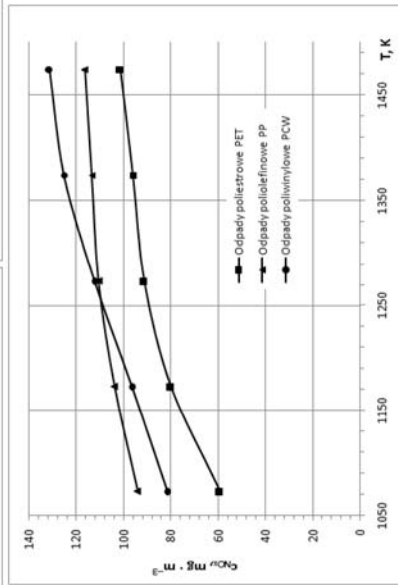
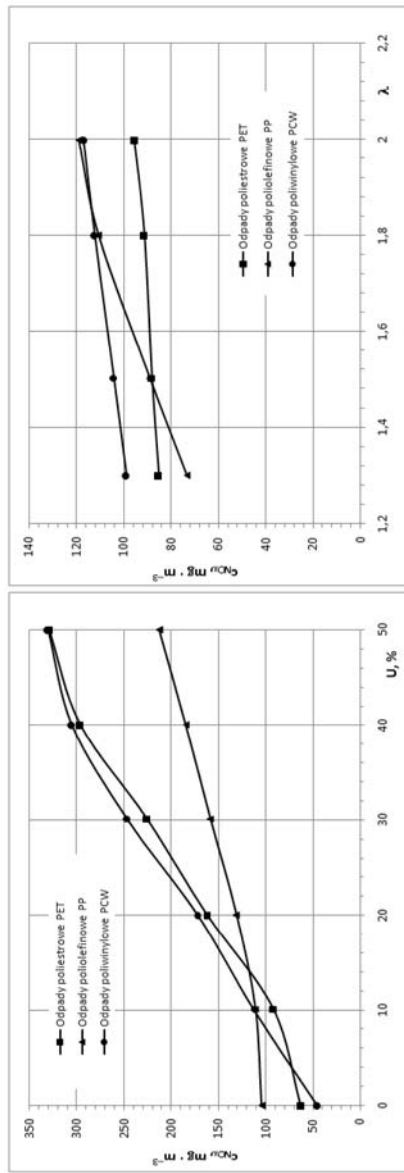
Analiza przebiegu krzywych zmienności stężeń tlenu siarki(IV) pozwala stwierdzić, że wpływ współczynnika nadmiaru powietrza, w przypadku 10% udziału osadów ściekowych w spalanej mieszance, można określić jako stosunkowo niewielki, podczas gdy wielkość tych wartości zależna jest od wartości jakie zaobserwowano w przypadku spalania badanych materiałów.

Analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie SO_2 powstałego w procesie współspalania badanych mieszanek, potwierdza analizę wyników spalania składników tych mieszanek, że wzrost temperatury spalania powoduje wzrost stężenia ditlenku siarki w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych termoplastów – był to wzrost około 35% w badanym zakresie temperatury spalania.

Stężenie tlenków azotu

Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania badanych osadów ściekowych z odpadami tworzyw sztucznych przedstawiono na rysunku 6.

Analiza wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w mieszance na stężenie powstałych w procesie spalania badanych materiałów tlenków azotu NO_x wskazuje, że wzrost udziału osadów ściekowych w badanym zakresie (0–50%) powoduje wzrost stężenia NO_x w gazach spalinowych. Wzrost ten zaobserwowano dla wszystkich badanych



Rys. 6. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w strefie spalania pieca T na stężenie tlenków azotu w procesie współspalania badanych osadów ściekowych z odpadami tworzyw sztucznych

Fig. 6. Effect of changes of the mass fraction of sewage sludge in the fuel mixture U , the excess air number λ , and the temperature in combustion zone of the furnace T on concentrations of nitrogen oxides NO_x in the process of co-incineration of sewage sludge and plastic waste

mieszanek osadów ściekowych z wybranymi grupami tworzyw sztucznych. Analiza krzywych ilustrujących te przebiegi wyraźnie wskazuje na bardzo duży wpływ tego udziału na wartość stężeń NO_x , co spowodowane jest dużą różnicą zawartości azotu paliwowego w badanych materiałach – zgodnie z wynikami literaturowymi, dla osadów ściekowych wartość ta wynosi około 4%, podczas gdy w badanych tworzywach sztucznych procentowa ilość azotu jest praktycznie niewielka. Konsekwencją zaobserwowanych w badaniach procesu spalania osadów ściekowych – dużo wyższa wartość stężeń tlenków azotu w porównaniu do wartości tych stężeń w przypadku procesów spalania odpadów tworzyw sztucznych – jest fakt, że już przy 10% udziale osadów ściekowych w mieszance obserwuje się znaczny wzrost c_{NO_x} w gazach spalinowych. Przykładowo, 10% dodatek osadów ściekowych do spalanej mieszanki z odpadami poliwinylowymi i poliestrowymi powoduje ponad 100% wzrost stężeń tlenków azotu c_{NO_x} .

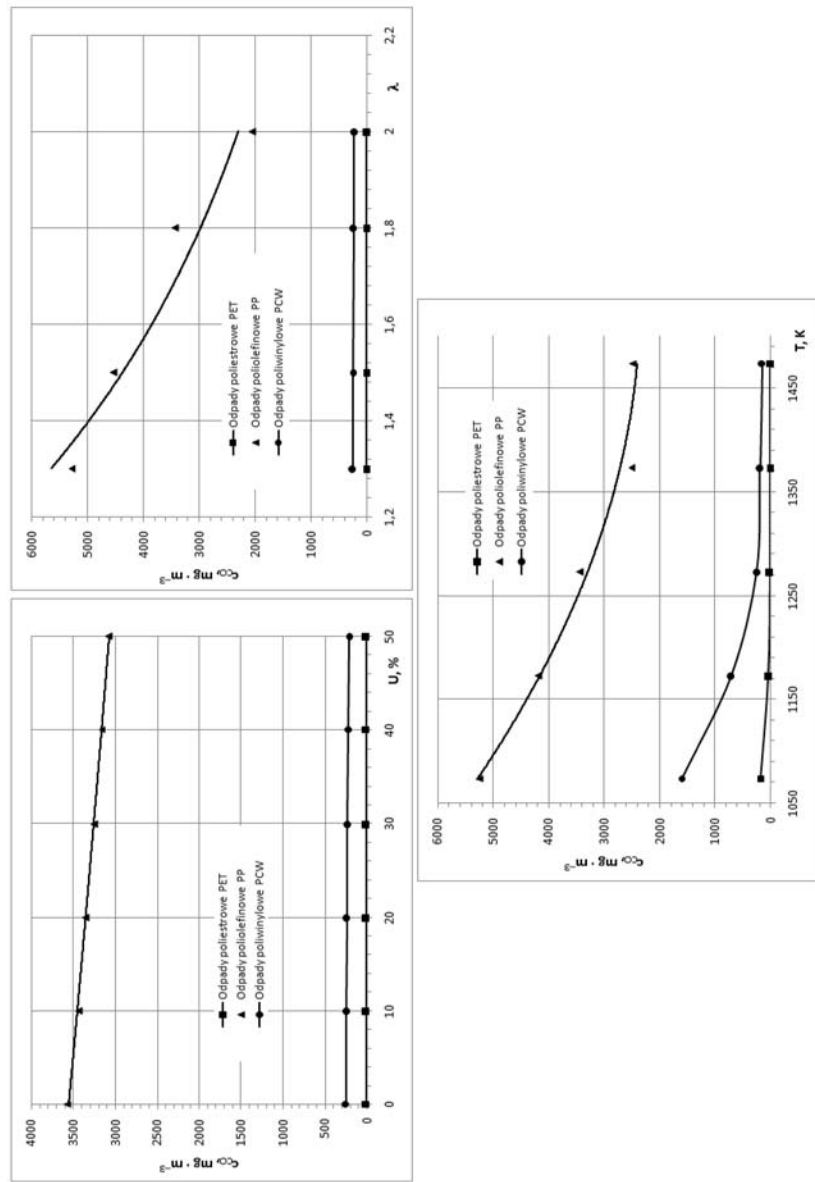
W procesie współspalania osadów ściekowych przyczyną wysokich wartości c_{NO_x} były zarówno tlenki paliwowe (ze względu na ilość azotu elementarnego w osadach ściekowych i stosunkowo wysoki współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,8$), jako parametr niezależny będący parametrem stałym w badaniach procesu współspalania, jak i tlenki termiczne, które pojawiały się w wysokich temperaturach badań procesu spalania mieszanek (1273,15K).

Stężenie tlenku węgla(II)

Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania badanych osadów ściekowych z odpadami tworzyw sztucznych przedstawiono na rysunku 7.

Analiza wyników badań wpływu udziału osadów ściekowych w mieszance na stężenie CO powstałego w procesie spalania badanych materiałów w temperaturze 1273,15 K i przy współczynniku $\lambda = 1,8$ pozwala stwierdzić, że udział osadów ściekowych w spalanej mieszance powoduje dużo mniejsze zmiany stężeń tlenku węgla(II) niż miało to miejsce w przypadku poprzednio analizowanych gazów spalinowych (SO_2 i NO_x). Wzrost parametru U w pełnym zakresie badań (0–50%) powodował nieprzekraczające 20% zmiany stężeń CO, podczas gdy analizując 10% wzrost udziału osadów ściekowych w mieszance zaobserwowano niewielkie (np. około 2% dla mieszanek z odpadami poliwinylowymi) zmiany tych stężeń.

Mimo wysokiej wartości stałego parametru niezależnego badań udziału osadów ściekowych w mieszance, jakim była temperatura procesu spalania tych mieszanek (1273 K), wartości stężeń tlenku węgla(II) powstającego w wyniku procesu współspalania osadów ściekowych z odpadami poliolefinowymi były bardzo wysokie. Wynika to z faktu porównywalnie wysokich stężeń tego gazu spalinowego w przypadku spalania samych odpadów poliolefinowych. Wzrost udziału osadów ściekowych o 50% w mieszance z tymi odpadami powodował około 15% spadek wartości stężenia CO. Natomiast analizując wyniki badań spalania mieszanek osadów ściekowych z odpadami poliestrowymi zauważono, że wzrost parametru U powodował niewielki wzrost c_{CO} w gazach spalinowych z procesu spalania tych mieszanek. Wartości c_{CO} powstałe w wyniku spalania osadów ściekowych były wyższe



Rys. 7. Wpływ zmian udziału masowego osadów ściekowych w mieszance paliwowej U , współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w strefie spalania pieca T na stężenie tlenku węgla(II) w procesie współspalania badanych osadów ściekowych z odpadami tworzyw sztucznych

Fig. 7. Effect of changes of the mass fraction of sewage sludge in the fuel mixture U , the excess air number λ , and the temperature in combustion zone of the furnace T on concentrations of carbon oxide (II) in the process of co-incineration of sewage sludge and plastic waste

od c_{CO} zaobserwowanych przy spalaniu odpadów poliestrowych. Dlatego w procesie współspalania osadów ściekowych w mieszance z tymi odpadami nastąpił wzrost stężeń tlenu węgla(II), ale był on niewielki (kilkuprocentowy przy 10% wzroście udziału osadów ściekowych w mieszance), gdyż różnice stężeń CO powstałych po procesie spalania tych odpadów i osadów ściekowych również były niewielkie.

Analiza wyników badań wpływu nadmiaru powietrza dostarczanego do procesu spalania mieszanek osadów ściekowych z badanymi odpadami na stężenie tlenu węgla(II), potwierdza fakt wynikający z analizy procesu spalania tych materiałów: jeżeli rośnie wartość współczynnika nadmiaru powietrza, to z reguły obserwuje się spadek udziału tlenu węgla(II) w spalinach.

Również analiza wyników badań wpływu temperatury w strefie spalania na stężenie tlenu węgla(II), powstałego w procesie współspalania badanych odpadów, potwierdza fakt wynikający z analizy procesu spalania tych materiałów: wzrost temperatury spalania powoduje spadek wartości stężenia CO w gazach spalinowych. Obniżkę c_{CO} zaobserwowano dla wszystkich badanych mieszanek przy stałym wskaźniku masy paliwa i powietrza dostarczanego do komory spalania.

Równania aproksymacyjne wyznaczone na podstawie wyników badań przyjęły następującą postać:

✧ Proces współspalania odpadów poliestrowych wraz z osadami ściekowymi

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = \exp(6,13 + 0,01 \cdot U) - 26,95 \cdot \lambda + 0,02 \cdot T - 435,05 \quad (3.13)$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = 5,75 \cdot U + \exp(0,96 + 1,01 \cdot \lambda) + 46,76 \cdot \ln(-806,49 + T) - 272,26 \quad (3.16)$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = 0,06 \cdot U - 5,32 \cdot \lambda + \exp(23,08 - 0,02 \cdot T) + 11,44 \quad (3.19)$$

✧ Proces współspalania odpadów poliolefinowych wraz z osadami ściekowymi

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = \exp(5,87 + 0,01 \cdot U) - 19,35 \cdot \lambda + 0,04 \cdot T - 362,29 \quad (3.14)$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = \exp(4,26 + 0,02 \cdot U) + 68,74 \cdot \ln(-0,58 + \lambda) + 13,89 \cdot \ln(-979,91 + T) - 60,95 \quad (3.17)$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = -9,64 \cdot U - 4467,90 \cdot \lambda + \exp(11,42 - 0,003 \cdot T) + 8222,12 \quad (3.20)$$

✧ Proces współspalania odpadów poliwinylowych wraz z osadami ściekowymi

$$c_{SO_2}(U, \lambda, T) = 3,09 \cdot U + \exp(6,29 - 3,04 \cdot \lambda) + 140,70 \cdot \ln(T) - 870,62 \quad (3.15)$$

$$c_{NO_x}(U, \lambda, T) = 7,83 \cdot U - 0,04 \cdot U^2 + 25,79 \cdot \lambda + 163,517 \cdot \ln(T) - 1179,49 \quad (3.18)$$

$$c_{CO}(U, \lambda, T) = -0,75 \cdot U - 41,51 \cdot \lambda + \exp(17,79 - 0,01 \cdot T) + 178,05 \quad (3.21)$$

gdzie: c_{SO_2} – stężenie tlenku siarki(IV) [$mg \cdot m^{-3}$],
 c_{NO_x} – stężenie tlenków azotu [$mg \cdot m^{-3}$],
 c_{CO} – stężenie tlenku węgla(II) [$mg \cdot m^{-3}$],
 U – udział masowy osadów ściekowych w spalanej mieszance [%],
 λ – współczynnik nadmiaru powietrza,
 T – wskaźnik temperatury w strefie spalania [K].

Wnioski

1. Zmiany parametrów procesowych, dotyczących zarówno warunków spalania, jak i współspalania osadów ściekowych i badanych odpadów tworzyw sztucznych i ich wpływ na emisję zanieczyszczeń (SO_2 , NO_x , CO), pozwoliły stwierdzić fakt, iż wzrost wartości tych parametrów z jednej strony polepsza jakość procesu termicznego przekształcania badanych materiałów, obniżając wartości stężeń niektórych zanieczyszczeń, lecz jednocześnie, powodując wzrost innych zanieczyszczeń, jakość procesu termicznego przekształcania pogarsza.
2. Wzrost temperatury spalania – jako parametru zmiennego niezależnego – poprawia jakość spalania, zmniejszając stężenia tlenku węgla(II), ale jednocześnie zwiększa emisję tlenku siarki(IV) oraz tlenków azotu NO_x . Wzrost zawartości tlenu dostarczanego wraz z powietrzem do komory spalania powodował znaczną obniżkę stężenia tlenku węgla(II) i dużo mniejszą obniżkę tlenku siarki(IV), przy równoczesnym wzroście emisji tlenków azotu NO_x . Zależności te zaobserwowano dla wszystkich badanych materiałów.
3. Analiza właściwości energetycznych mieszanin osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków i odpadów typowych tworzyw sztucznych wykazała, że wysoka wartość ciepła spalania tworzyw sztucznych pozwala na udział suchej masy osadów ściekowych w mieszance nawet do 50%.
4. Proces spalania i współspalania osadów ściekowych, wraz z badanymi odpadami, można opisać równaniami analityczno-empirycznymi, które tworzą model matematyczny procesu spalania i współspalania tych paliw.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy

Literatura

- [1] BIEŃ J.B., WYSTALSKA K., 2009 – Przekształcanie osadów ściekowych w procesach termicznych. Warszawa, Wydawnictwo Seidel-Przywecki.
- [2] JAROSIŃSKI J., 1996 – Techniki czystego spalania. Warszawa, WNT.
- [3] KORDYLEWSKI W. i in., 2008 – Spalanie i paliwa. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

- [4] KOWALEWICZ A., 2000 – Podstawy procesów spalania. Warszawa, WNT.
- [5] Materiały informacyjne Ministerstwa Środowiska. Krajowy plan gospodarki odpadami 2010. <http://www.mos.gov.pl/>.
- [6] PIECUCH T., DĄBROWSKI J., DĄBROWSKI T., 2009 – Badania laboratoryjne nad możliwością termicznej utylizacji poprodukcyjnych odpadów poliestrowych. Rocznik Ochrona Środowiska t. 11.
- [7] PIECUCH T., DĄBROWSKI J., DĄBROWSKI T., 2009 – Laboratory Investigations and Preliminary Project of Installation for Utilization of Waste from Polyester Forming. Polish Journal of Environmental Studies, Volume 5, Series of Monographs; HARD.
- [8] PIECUCH T., DĄBROWSKI T., DĄBROWSKI J., LUBIERSKI M., JURASZKA B., KOŚCIERZYŃSKA-SIEKAN G., JANTOS K., 2003 – Analiza pracy spalarni odpadów Szpitala Wojewódzkiego w Koszalinie – spaliny, ścieki, wtórny odpad. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 5.
- [9] PIECUCH T., DĄBROWSKI T., DĄBROWSKI J., WINIECKI M., 2008 – Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania miazgi węglowej wraz z osadami ściekowymi i odpadami poliestrowymi. Inżynieria i Ochrona Środowiska t. 11, nr 2.
- [10] PIECUCH T., DĄBROWSKI T., HRYNIEWICZ T., ŻUCHOWSKI A.W., 1999 – Polish Made Pyrolytic Convective Waste Utilizer of WPS Type. Structure, Principle of Operation and Evaluation Problem of Residue Management After Thermal Waste Utilization. Journal of Solid Waste Technology and Management. Vol. 26, Nos 3&4, pp. 168–186. November, Philadelphia.
- [11] PIECUCH T., JURASZKA B., DĄBEK L., 2002 – Spalanie i piroliza odpadów oraz ochrona powietrza przed szkodliwymi składnikami spalin. Koszalin, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
- [12] PIECUCH T., 1999 – Termiczna utylizacja odpadów – wdrażać czy nie. Monografia Komisji Ekosfery PAN, Oddział Gdańsk.
- [13] PIECUCH T., 2000 – The Pyrolytic Convective Waste Utiliser. Thermal Solid waste utilisation in regular and industrial facilities. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York.
- [14] PIECUCH T., 2006 – Zarys metod termicznej utylizacji odpadów. Koszalin, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
- [15] PN-ISO 1213-2:1999 Paliwa stałe. Pobieranie, przygotowanie i analiza próbek.
- [16] PN-80/G-04511 Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci.
- [17] PN-ISO 1171:2002 Paliwa stałe. Oznaczanie popiołu.
- [18] PN-80/G-04512 Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu metodą wagową.
- [19] PN-G-04516:1998 Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości części lotnych metodą wagową.
- [20] PN-ISO 1928:2002 Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.

Janusz DĄBROWSKI, Tadeusz PIECUCH

Laboratory investigations on possibility of co-incineration of plastic waste and sewage sludge

Abstract

The paper presents results of investigations on possibility of thermal conversion of mixtures of plastic waste and sewage sludge as a possible utilisation of both: waste and sewage sludge. For the study of combustion and co-incineration following materials were used: sewage sludge, taken from the Wastewater Treatment Plant "Jamno", Koszalin, and waste plastic (PET – polyethylene terephthalate, PVC – polyvinyl chloride, PP – polypropylene).

In studies of combustion and co-incineration of materials used for research, following independent parameters (variables) were assumed: the temperature in the furnace combustion zone T , the excess air number λ , material weight indicator m and mass fraction of sewage sludge in the fuel mixture U . However, dependent parameters (deliverables) in these studies were: the concentration of sulphur oxide (IV) c_{SO_2} , the concentration of nitrogen oxides c_{NO_x} and the concentration of carbon oxide (II) c_{CO} .

Changes of process parameters, concerning both the incineration conditions, as well as the co-incineration of sewage sludge and plastic waste, and their influence on the emission of pollutants (SO_2 , NO_x , CO), proved that the increase of incineration temperature improves the quality of combustion, reducing concentration of carbon oxide (II), but it causes increase of emissions of sulphur oxide (IV) and nitrogen oxides NO_x . The increase of oxygen content along with the supplied air to incineration chamber results in a significant reduction of carbon oxide (II) concentration and a much smaller reduction of sulphur oxide (IV) concentration, with simultaneous increase of emission of nitrogen oxides NO_x . These relationships were observed for all tested materials.

Analysis of energetic properties of mixtures of sewage sludge and plastic waste showed, that high calorific value of plastic waste allows to use maximum share of sewage sludge in mixtures even up to 50%.

Finally, obtained results of investigations allowed to work out mathematical model, the criterion determining requirements of the incineration and co-incineration process.

KEY WORDS: plastic waste, sawage sludge, thermal-utilization, co-incineration