



Emisja tlenku azotu NO_x ze spalania biomasy wierzbowej

*Monika Sztyma-Horwat, Leszek Styszko
Politechnika Koszalińska*

1. Wstęp

Energia pochodząca ze źródeł odnawialnych (OZE) oznacza energię pochodzącą z naturalnych procesów przyrodniczych. OZE to energia wody, wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalna, fal, prądów i pływów morskich oraz energia wytwarzana z biomasy stałej, biogazu i biopaliw ciekłych [6]. Odnawialne źródła energii stanowią alternatywę dla tradycyjnych nieodnawialnych nośników energii. Biomasa stała obejmuje organiczne, niekopalne substancje pochodzenia biologicznego, które mogą być wykorzystane do produkcji ciepła lub wytwarzania energii elektrycznej. Podstawowym źródłem energii odnawialnej w Polsce jest biomasa, a jej udział w bilansie paliwowym w 2008 roku w Polsce wyniósł 87,7%, a w UE-25 – 46,0% [GUS 2009]. Podstawowym paliwem stałym z biomasy jest biomasa leśna jako drewno opałowe, odpady z leśnictwa oraz odpady z przemysłu drzewnego i papierniczego. W ostatnich latach znaczenia nabierają paliwa z biomasy rolniczej. Do nich zalicza się biomasę drzew i krzewów szybko rosnących (topola, wierzba, robinia akacjowa), byliny dwuliścienne, trawy wielolet-

nie, słoma z różnych roślin oraz pozostałości organiczne z rolnictwa i ogrodnictwa. Ze spalania biomasy stałej powstają gazy, które zanieczyszczają powietrze. Ilość tych gazów zależna była od rodzaju biomasy i temperatury spalania. Stąd w literaturze przedmiotu niekiedy stawia się pytanie, czy biomasa jest paliwem ekologicznym [11]? Podczas spalania biomasy powstają różne gazy i substancje. Największe znaczenie podczas spalania drewna mają zanieczyszczenia gazowe (NO_x , CO, węglowodory, w tym WWA) oraz cząstki stałe (popiół lotny, koks i sadza) [3, 5]. Podczas spalania paliw organicznych powietrzem atmosferycznym w urządzeniach spalających dochodzi do tworzenia następujących tlenków azotu: N_2O , NO i NO_2 . Te tlenki są sumarycznie oznaczane jako tlenek azotu NO_x . Przeważającym składnikiem tlenku azotu – NO_x w spalinach ze spalania paliw mineralnych jest tlenek azotu NO, który stanowi 95% całości NO_x , a pozostałe tlenki stanowią ok. 5% NO_x . Przy spalaniu paliw stałych w temperaturze do 1300°C przeważający udział w powstawaniu tlenków azotu mają paliwowe tlenki azotu powstające z utlenienia części azotu zawartego w paliwie [3]. Stąd właściwości spalanej biomasy mają podstawowy wpływ na wytwarzanie tlenków azotu podczas spalania w temperaturze do 1300°C .

Celem pracy była ocena emisji NO_x ze spalania biomasy wierzbowej kilku klonów wierzby krzewiastej (*Salix viminalis*) pozyskanej w drugim, trzecim i czwartym roku uprawy w rejonie Koszalina, na glebie lekkiej, na zróżnicowanym nawożeniu organicznym i mineralnym.

2. Materiał i metoda

Dziewięć klonów wierzby wysadzono w I dekadzie kwietnia 2005 roku na polu doświadczalnym Politechniki Koszalińskiej – w Kościernicy, na glebie lekkiej klas IVb-V przy zagęszczeniu 33,2 tys. karp na hektarze [9]. Zimą 2005/2006 roku skoszono pierwszoroczne odrosty pędów. Na istniejących nasadzeniach wierzby, w 2006 roku założono doświadczenie ściśle metodą losowanych podbłoków w układzie zależnym w trzech powtórzeniach, gdzie podbłokami I rzędu były cztery kombinacje nawozowe, a II rzędu – dziewięć klonów wierzby. Poletko miało powierzchnię $34,5 \text{ m}^2$ ($2,3 \times 15,0 \text{ m}$).

Na poletku o szerokości 230 cm, w jego centralnej części znajdują się trzy rzędy karp wierzby rozmieszczone co 40 cm, a z każdej strony

zewnątrznych rzędów znajdowała się wolna przestrzeń o szerokości 75 cm. Dało to obsadę 32 100 krzaków na hektarze.

W ramach kombinacji nawozowych zastosowano: objekty bez nawożenia (a), nawożone kompostem w ilości $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ świeżej masy (b), nawożone kompostem jak w kombinacji „b” i Hydrofoską 16 w ilości $N - 90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, $P_2O_5 - 90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $K_2O - 90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (c) oraz nawożone kompostem jak w kombinacji „b” i Hydrofoską 16 w ilości $N - 180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, $P_2O_5 - 180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $K_2O - 180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (d).

W kwietniu 2006 roku zastosowano pogłównie, zgodnie ze schematem doświadczenia, nawożenie kompostem oraz Hydrofoską 16. Nawozy te wymieszano z glebą. W latach 2007, 2008 i 2009, przed ruszeniem wegetacji wierzby, wysiano pogłównie tylko nawóz Hydrofoska 16.

We wrześniu 2007 roku zamontowano 12 piezometrów do pomiaru poziomu lustra wody gruntowej do głębokości 600 cm. Pomiar w latach 2007, 2008 i 2009, nie wykazały występowania wody gruntowej w tych piezometrach. Oznacza to, wzrost pędów wierzby odbywał się wyłącznie przy dostępie wody opadowej.

Do badań włączono dziewięć klonów wierzby: 1047, 1054, 1023, 1013, 1052, 1047D, 1056, 1018 i 1033.

Po drugiej (luty 2008), po trzeciej (luty 2009) i po czwartej wegetacji (listopad 2009) skoszono wierzbę i pobrano próby pędów do analiz chemicznych oraz do spalania. Próbki biomasy pobrano w dniu koszenia (I termin) oraz na przełomie maja i czerwca (II termin). Pędy wierzby wysuszone, rozdrobniono i zmielono.

Zmielone próbki pędów o masie 0,05 g spalano w elektrycznym rurowym piecu oporowym, z poziomą komorą roboczą, typu PRC 20/1300M wyposażonym w programowany mikroprocesorowy regulator temperatury SM 2002 umożliwiający utrzymanie w określonym czasie zadanej temperatury (Firma Czyłok z Jastrzębia Zdroju). Oznaczenia tlenków azotu NO_x w gazach pochodzących ze spalania biomasy wierzbowej wykonano przy pomocy przepływowego analizatora gazów spalania typu GA-21 plus (ELJACK Electronics w Zgierzu).

Spalanie próbek biomasy pochodzącej ze zbioru wierzby w latach 2008÷2010 oraz z ich poboru w I i II terminie prowadzono w temperaturach spalania: 300°C , 600°C , 900°C i 1200°C . Podczas spalania natężenie przepływu powietrza wynosiło $8,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Próbki biomasy spalano dwukrotnie, a do analiz przyjęto średni wynik z tych prób. Uzyskane

ze spalania maksymalne wartości NO_x w ppm odczytywane co 10 sekund, a następnie uśrednione, przeliczono na mg na 1 m^3 gazów spalinyowych w warunkach normalnych tj. przy ciśnieniu 1013 hPa i temperaturze $273,15^\circ\text{K}$ z zastosowaniem prawa Avogarda [4].

Dla tlenku azotu NO_x wykonano analizę wariancji oraz oceniono strukturę procentową komponentów wariancyjnych dla modelu mieszanego. Istotność efektów oceniono testem F.

3. Wyniki i dyskusja

W analizach statystycznych wykazano, że na powstawanie tlenku azotu NO_x przy spalaniu biomasy wierzbowej największe znaczenie miały temperatury spalania, mniejsze – wiek pozyskanych pędów oraz współdziałania temperatury spalania biomasy z wiekiem pędów, a względnie mały, chociaż istotny, termin poboru prób biomasy, kombinacje nawozowe i klony wierzby (tab. 1). Wykazano również, że wiele interakcji było istotnych, a suma tych zmienności wynosiła 15,4%.

Tabela 1. Wpływ badanych czynników na zmienność zawartości NO_x w spalinach biomasy wyprodukowanej w latach 2007÷2009 roku

Table 1. Effect of studied factors on the variability of NO_x in combustion gases of biomass produced in 2007÷2009 year

Komponent wariancyjny	Poziomy czynnik	Struktura procentowa komponentów wariancyjnych
Klony wierzby [E]	9	0,1*
Kombinacje nawozowe [D]	4	0,2***
Temperatura spalania biomasy [C]	4	73,4***
Termin poboru prób biomasy [B]	2	0,3***
Wiek pozyskanych pędów [A]	3	10,6***
Suma współdziałań		15,4
W tym współdziałania:		
DC		0,3***
CB		0,5***
DA		0,1**
CA		8,0***
BA		0,2***
CBA		1,0***
DCBA		1,7***
Pozostałe		3,6

Istotność przy poziomie ufności: * $\alpha = 0,05$; ** $\alpha = 0,01$; *** $\alpha = 0,001$.

Analizy spalania biomasy wierzbowej potwierdziły uszeregowanie znaczenia pięciu czynników wykazane w analizie komponentów wariacyjnych (tab. 2). Różnice pomiędzy skrajnymi poziomami badanych czynników w kolejności malejących efektów zostały uszeregowane następująco:

- temperatura spalania biomasy – $212,7 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$,
- wiek pędów wierzby – $71,6 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$,
- kombinacje nawozowe – $12,0 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$,
- termin poboru prób biomasy – $8,7 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$,
- klony wierzby – $8,5 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$.

Najmniejsze ilości tlenku azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy w temperaturze 300°C , a największe ilości przy spalaniu w temperaturze 1200°C . Przy podwyższaniu temperatury spalania z 300°C do 1200°C ilość tlenku azotu NO_x istotnie wzrastała.

Najmniejsze ilości tlenku azotu NO_x wytworzyło się przy spalaniu biomasy wierzbowej pozyskanej w czwartym roku uprawy, a większe z upraw w trzecim i drugim roku. Efekt ten powstał najprawdopodobniej z większego udziału kory wtórnej w biomacie, gdyż pędy wierzby w czwartym roku uprawy miały większą średnicę niż z trzeciego i drugiego roku [10].

Różnice w ilości tlenku azotu NO_x po spalaniu biomasy wierzbowej z badanych kombinacji nawozowych wyniosły $12 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$. Największe ilości tego tlenku powstały przy spalaniu biomasy z obiektów „d”, gdzie stosowano najwyższe dawki kompostu i nawozu Hydrofoska 16. Natomiast najmniej tlenku azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy z obiektów „a”, gdzie nie stosowano żadnego nawożenia. Spalana biomasa pochodząca z obiektów nawożonych kompostem z osadów komunalnych (b), nieistotnie więcej wytworzyła tlenku azotu NO_x , a biomasa z obiektów nawożonych kompostem i nawozem Hydrofoska 16 w mniejszej dawce (c) – zanieczyszczała powietrze istotnie więcej tlenkiem azotu NO_x . Intensywne nawożenie organiczne i mineralne (d) wierzby spowodowało istotnie silniejsze zanieczyszczenie powietrza NO_x przy spalaniu tej biomasy niż przy spalaniu biomasy pochodzącej z obiektów o niższym nawożeniu mineralnym (c).

Tabela 2. Wpływ badanych czynników na zawartość NO_x w spalinach biomasy wierzby

Table 2. Effect of studied factors on the content of NO_x in combustion gases of willow biomass

Badany czynnik	Poziomy czynnik	Zawartość NO _x w spalinach	
		[mg/m ³]	różnice pomiędzy wartościami skrajnymi
Wiek pędów wierzby = lata uprawy [A]	2	141,5	71,6
	3	149,2	
	4	77,6	
	NIR _{0,05}	3,6***	
Termin poboru prób biomasy [B]	I	127,1	8,7
	II	118,4	
	NIR _{0,05}	3,0***	
Temperatura spalania biomasy [C]	300°C	6,7	212,7
	600°C	65,5	
	900°C	199,4	
	1200°C	219,4	
	NIR _{0,05}	4,2***	
Kombinacje nawozowe [D]	a	118,2	12,0
	b	119,3	
	c	123,3	
	d	130,2	
	NIR _{0,05}	4,2***	
Klony wierzby [E]	1047	119,6	8,5
	1054	125,8	
	1023	121,8	
	1013	121,2	
	1052	127,8	
	1047D	127,3	
	1056	121,2	
	1018	120,8	
	1033	119,3	
	NIR _{0,05}	6,3*	
Średnia z doświadczenia		122,8	

Istotność przy poziomie ufności: * $\alpha = 0,05$; *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Różnice pomiędzy skrajnymi wartościami w dość odległych terminach poboru prób biomasy (cztery miesiące w okresie wiosny w latach 2008 i 2009 i sześć miesięcy w okresie zimy 2009/2010 i wiosny 2010) wyniosły 8,7 mg/m³ NO_x przy jej spalaniu. Wyższe ilości tlenu azotu NO_x wytworzyło się przy spalaniu biomasy wierzbowej z pierwszego

terminu poboru (luty 2008 i 2009 oraz listopad 2009) niż z drugiego terminu (przełom maja i czerwca).

Podobne wielkością różnice jak przy terminach poboru prób, były pomiędzy klonami ($8,5 \text{ mg/m}^3 NO_x$). Największe ilości tlenku azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy wierzbowej klonu 1052 ($127,8 \text{ mg/m}^3$), a najmniejsze – przy klonie 1033 ($119,3 \text{ mg/m}^3$).

Na tworzenie się tlenku azotu NO_x wywarła także interakcja kombinacji nawozowych z temperaturami spalania biomasy (tab. 3). Przy temperaturze spalania 300°C różnice pomiędzy kombinacjami nawozowymi były najmniejsze i nieistotne, a w wyższych temperaturach różnice te powiększały się i były istotne. W ramach kombinacji nawozowych, różnice pomiędzy temperaturami spalania były największe na obiektach „d”, a najmniejsze na obiektach „b”.

Tabela 3. Wpływ współdziałania nawożenia z temperaturami spalania biomasy wierzby na zawartość NO_x w spalinach

Table 3. Effect of fertilization interaction with temperatures of willow biomass combustion on the content of NO_x in combustion gases

Temperatury spalania biomasy [$^\circ\text{C}$]	Kombinacje nawozowe				
	a	b	c	d	różnice między wartościami skrajnymi
300	6,4	6,8	6,5	7,0	0,6
600	59,1	62,1	69,7	70,9	11,8
900	184,0	200,2	203,8	209,8	25,8
1200	223,2	208,1	213,2	233,2	25,1
Różnice między wartościami skrajnymi	216,8	201,3	206,7	226,2	–
$NIR_{0,05}$	8,4***				

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Na tworzenie się tlenków azotu NO_x przy spalaniu biomasy wierzbowej wpływ miało również współdziałanie kombinacji nawozowych z wiekiem pędów (tab. 4). Najmniejsze różnice pomiędzy kombinacjami nawozowymi w ilości powstałych tlenków azotu NO_x przy spalaniu biomasy z czwartego roku uprawy (różnice nieistotne), a większe i istotne – były przy biomacie z trzeciego i drugiego roku uprawy. Pomiedzy wiekiem pędów istotnie większe różnice w ilości powstałego NO_x były na

objektach „d”, a na pozostałych obiektach różnice te były mniejsze i nieistotne.

Tabela 4. Wpływ współdziałania nawożenia z wiekiem pędów wierzby na zawartość NO_x w spalinach

Table 4. Influence of fertilization interaction with age of the willow shoots on the content of NO_x in combustion gases

Kombinacje nawozowe	Wiek pędów wierzby [lata uprawy]			
	2	3	4	różnice między wartościami skrajnymi
a	133,9	144,8	75,8	69,0
b	138,0	143,1	76,8	66,3
c	143,9	146,5	79,5	66,8
d	150,0	162,5	78,2	84,3
Różnice między wartościami skrajnymi	16,1	19,4	3,7	–
NIR _{0,05}	7,2**			

*Istotność przy poziomie ufności: ** $\alpha = 0,01$;*

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Spalana biomasa wierzby po czwartym roku uprawy dawała mniej zanieczyszczeń powietrza tlenkiem azotu NO_x w każdym terminie poboru prób, a najwięcej było po trzecim roku uprawy (tab. 5). W drugim terminie poboru prób istotnie mniej tlenku azotu NO_x wytworzyło się po spalaniu biomasy z czwartego i drugiego roku uprawy niż z trzeciego. Różnice pomiędzy wartościami skrajnymi emisji NO_x były istotnie większe w drugim terminie poboru prób niż w pierwszym oraz po czwartym i po drugim roku uprawy niż po trzecim. Fakt ten można wytłumaczyć większymi opadami deszczu w okresie od kwietnia do czerwca odpowiednio w latach 2009 i 2007 niż w 2008 roku [10].

Wiek pędów poddanych spalaniu miał także wpływ na zróżnicowana emisję tlenków azotu przy spalaniu biomasy wierzby w różnych temperaturach (tab. 6). Przy spalaniu biomasy w temperaturach 600 i powyżej wystąpił spadek zawartości NO_x w spalinach z biomasy po czwartym roku w stosunku do biomasy z drugiego i trzeciego roku uprawy wierzby. Również różnica w wartościach skrajnych emisji tlenku azotu NO_x przy zróżnicowanych temperaturach spalania po czwartym uprawy była mniejsza niż po trzecim i drugim roku uprawy.

Tabela 5. Wpływ współdziałania terminu poboru prób z wiekiem pędów wierzby na zawartość NO_x w spalinach

Table 5. Effect the sampling date interaction with the age of willow shoots on the content of NO_x in combustion gases

Termin poboru prób biomasy	Wiek pędów wierzby [lata uprawy]			
	2	3	4	różnice między wartościami skrajnymi
I	146,7	148,9	85,8	63,1
II	136,3	149,5	69,3	80,2
Różnice między wartościami skrajnymi	10,5	0,6	16,5	–
NIR _{0,05}	5,1***			

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbowa dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6. Wpływ współdziałania temperatur spalania biomasy z wiekiem pędów wierzby na zawartość NO_x w spalinach

Table 6. Effect of temperatures of combustion of willow biomass interaction with age of willow shoots on the content of NO_x in combustion gases

Temperatury spalania biomasy [°C]	Wiek pędów wierzby [lata uprawy]			
	2	3	4	różnice między wartościami skrajnymi
300	6,2	5,1	8,7	3,6
600	83,8	86,5	26,1	60,4
900	232,9	221,9	143,6	89,3
1200	243,1	283,4	131,9	151,5
Różnice między wartościami skrajnymi	236,9	278,3	134,9	–
NIR _{0,05}	7,2***			

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbowa dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Mimo generalnej zależności, że emisja tlenu azotu wzrastała przy spalaniu biomasy w wyższych temperaturach niż 300°C, to w zakresie temperatur 600–900°C zawartość NO_x w spalinach była wyższa w pierwszym terminie poboru prób niż w drugim (tab. 7).

W tabeli 8 zilustrowano wpływ potrójnego współdziałania wieku pędów wierzby z terminem poboru prób do spalania i temperaturami spalania. W tym zestawieniu widać wyraźne efekty główne tzn. wieku pędów wierzby, terminów poboru prób i temperatur spalania na zanieczyszczenie spalin tlenkiem azotu NO_x . Współdziałanie tych czynników

widać w efekcie obniżenia emisji NO_x w zakresie wysokich temperatur spalania biomasy (900÷1200°C).

Tabela 7. Wpływ współdziałania temperatur spalania biomasy z terminem poboru prób wierzby na zawartość NO_x w spalinach

Table 7. Effect of temperatures of combustion of willow biomass interaction with date of willow sampling on the content of NO_x in combustion gases

Temperatury spalania biomasy [°C]	Termin poboru prób biomasy		
	I	II	różnice między wartościami skrajnymi
300	6,4	6,9	0,5
600	69,8	61,1	8,7
900	212,3	186,6	25,7
1200	220,1	218,8	1,3
Różnice między wartościami skrajnymi	213,7	211,9	-
NIR _{0,05}	5,9***		

*Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;*

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Tabela 8. Wpływ współdziałania temperatur spalania biomasy z wiekiem pędów wierzby i terminem poboru prób na zawartość NO_x w spalinach

Table 8. Effect of temperatures of combustion of willow biomass interaction with age of the willow shoots and sampling date on the content of NO_x in combustion gases

Temperatury spalania biomasy [°C]	Termin poboru prób i wiek pędów wierzby					
	I			II		
	2	3	4	2	3	4
300	6,9	4,4	7,9	5,5	5,8	9,4
600	97,5	86,2	25,7	70,0	86,8	26,6
900	243,4	221,5	171,9	222,3	222,3	115,3
1200	238,8	283,6	137,9	247,3	283,2	125,8
Różnice między wartościami skrajnymi	231,9	279,2	164,0	241,8	277,4	116,4
NIR _{0,05}	10,2***					

*Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;*

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Przedstawione w pracy wyniki badań w kontekście analizy wpływu warunków pozyskania biomasy na emisję zanieczyszczeń tlenkiem azotu NO_x do atmosfery podczas jej spalania są unikalnymi doniesienia-

mi w literaturze. Do tej pory w opracowaniach porównywano efekty spalania różnych biomas [1÷3, 5, 7, 8, 11, 12] i z reguły w mniejszym zakresie temperatur niż to uczyniono w badaniach własnych. W pracach tych skoncentrowano się raczej na porównaniu parametrów procesu spalania, a nie wnिकano w technologię produkcji i pozyskania biomasy drzewnej, a to w badaniach własnych okazało się bardzo ważne przy zawartości tlenku azotu NO_x w spalinach.

4. Wnioski

1. Na powstawanie tlenku azotu NO_x przy spalaniu biomasy wierzbowej największe znaczenie miały temperatury spalania, mniejsze – wiek pozyskanych pędów oraz współdziałania temperatury spalania biomasy z wiekiem pędów, a względnie mały, chociaż istotny, był wpływ terminu poboru prób biomasy, kombinacji nawozowych i klonów wierzby.
2. Różnice pomiędzy skrajnymi poziomami badanych czynników na zawartość tlenku azotu NO_x w spalinach w kolejności malejących efektów zostały uszeregowane następująco: temperatura spalania biomasy – $212,7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ NO}_x$, wiek pędów wierzby – $71,6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ NO}_x$, kombinacje nawozowe – $12,0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ NO}_x$, termin poboru prób biomasy – $8,7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ NO}_x$ i klony wierzby – $8,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ NO}_x$.
3. Najmniejsze ilości tlenku azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy wierzbowej w temperaturze 300°C , a największe przy spalaniu w temperaturze 1200°C . Przy podwyższaniu temperatury spalania z 300°C do 1200°C ilość tlenków azotu istotnie wzrastała.
4. Najmniejsze ilości tlenku azotu NO_x wytworzyło się przy spalaniu biomasy wierzbowej pozyskanej w czwartym roku uprawy, a większe z upraw z trzeciego i drugiego roku uprawy.
5. Największe ilości tlenku azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy z obiektów „d”, gdzie stosowano najwyższe dawki nawożenia kompostem i Hydrofoską 16. Natomiast najmniej tlenków azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy z obiektów „a”, gdzie nie stosowano żadnego nawożenia.
6. Zastosowanie przy uprawie wierzby intensywnego nawożenia organicznego i mineralnego (obiekt d) spowodowało istotnie silniejsze zanieczyszczenie powietrza tlenkiem azotu NO_x przy spalaniu tej

- biomasy niż przy spalaniu biomasy pochodzącej z obiektów o niższym nawożeniu mineralnym (obiekt c).
- Większe ilości tlenu azotu NO_x wytworzyło się przy spalaniu biomasy wierzbowej z pierwszego terminu poboru prób (luty 2008 i 2009 oraz listopad 2009) niż z drugiego terminu poboru (przełom maja i czerwca).
 - Największe ilości tlenków azotu NO_x powstało przy spalaniu biomasy wierzbowej klonu 1052 ($127,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), a najmniejsze – przy klonie 1033 ($119,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).
 - Na tworzenie się tlenków azotu NO_x wywarły także wpływ interakcje podwójne: kombinacji nawozowych z temperaturami spalania, kombinacji nawozowych z wiekiem pędów, temperatur spalania z terminem poboru prób, temperatur spalania z wiekiem pędów i terminu poboru prób z wiekiem pędów, a także interakcje potrójne temperatur spalania z terminem poboru prób i wiekiem pędów oraz interakcje poczwórne kombinacji nawozowych z temperaturami spalania, terminem poboru prób i wiekiem pędów. Łącznie wszystkie współdziałania odpowiadały za 15,4% zmienności zawartości tlenu azotu NO_x w spalinach.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008÷2011
jako projekt badawczy*

Literatura

- Dąbrowski J., Piecuch T.:** *Matematyczny opis procesu spalania węgla kamiennego i wybranych grup odpadów*. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 13, Koszalin: w druku, 2011.
- Dąbrowski J., Piecuch T.:** *Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania miału węglowego wraz z osadami ściekowymi*. Przegląd Górniczy, 11: 137÷147. 2010.
- Domański M., Dzurenda L., Jabłoński M., Osipiuk J.:** *Drewno jako materiał energetyczny*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa: ss. 130. 2007.
- Kaleta A., Górnicki K.:** *Podstawy inżynierii cieplnej w inżynierii rolniczej*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa: ss. 444. 2009.
- Kordylewski W. (red):** *Spalanie i paliwa*. Wyd. V poprawione i uzupełnione. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław: ss. 478. 2008.
- Lewandowski W.M.:** *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Wyd. czwarte uaktualnione. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa: ss. 432. 2007.

7. **Piecuch T.:** *Zarys metod termicznej utylizacji odpadów.* Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2006.
8. **Skrzypski J., Ledakowicz S., Tarkowski S., Zarzycki R.:** *Energia z odpadów.* Pod redakcją Romana Zarzyckiego. PAN Oddział w Łodzi. Komisja Ochrony Środowiska. ss. 188, Łódź 2008.
9. **Styszko L., Kustra W.:** *Obserwacje rozwojowe wierzby genotypów wierzby krzewiastej w okolicach Koszalina.* Koszalińskie Studia i Materiały Nr 9, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 73÷80. Koszalin 2006.
10. **Styszko L., Fijałkowska D., Sztyma-Horwat M.:** *Wpływ warunków pozyskania biomasy na odrastanie pędów wierzby energetycznej w 4-letnim cyklu.* Rocznik Ochrona Środowiska. T. 12: 339÷350. Koszalin 2010.
11. **Wielgościński G.:** *Czy biomasa jest paliwem ekologicznym?* Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 58. 347÷356. Lublin 2009.
12. **Wielgościński G., Nowicki M.:** *Badania nad termicznym rozkładem osadów ściekowych.* Ciepłne Maszyny Przepływowe Turbomachiny. Nr 126. 181÷189. 2004.

Nitrogen Oxides NO_x Emissions from Combustion of Willow Biomass

Abstract

In the study the influence of combustion of shrubby willow shoots was evaluated in laboratory conditions upon the content of the nitrogen oxide NO_x in combustion gases. Analyses covered biomass of nine willow's clones cultivated four years in light soil using compost from municipal sewage sludge and diverse doses of fertilizer Hydrofoska 16. Samples of biomass were taken in two terms (directly after mowing during winter and at the turn of May and June). The combustion of samples of willow biomass from the willow's crop after the harvest in the first and second term in years 2008÷2010 was carried out in temperatures: 300°C, 600°C, 900°C and 1200°C. During combustion the intensity of air flow amounted to $8.0 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Formation of nitrogen oxide NO_x during combustion of willow biomass was mostly influenced by temperatures of combustion (73.4%), less influenced by age of acquired willow shoots (10.6%), and joint action of temperature of combustion and age of the willow shoots (8.0%), and relatively little influenced but essential, by day of biomass harvesting (0.3%), fertilizer combinations (0.2%) and the willow clones (0.1%). The differences among extreme levels of factors under investigation concerning content of nitrogen oxide NO_x in combustion gases in order of diminishing ef-

fects were ranked as follows: temperature of biomass combustion – 212.7 mg/m³ NO_x, age of the willow's shoots – 71.6 mg/m³ NO_x, fertilizer combinations – 12.0 mg/m³ NO_x, date of biomass sampling – 8.7 mg/m³ NO_x and the willow's clones – 8.5 mg/m³ NO_x. The smallest quantities of nitrogen oxide NO_x formed in the process of combustion of biomass developed in temperature 300°C, and the highest in temperature 1200°C. Increase of combustion temperature from 300°C to 1200°C resulted in increase of the content of nitrogen oxide NO_x in combustion gases. The smallest quantities of nitrogen oxide NO_x produced during combustion of the willow biomass were obtained in fourth year of cultivation, and higher from cultivations in third and second year. The highest quantities of nitrogen oxide NO_x produced during combustion of the biomass were generated from “d” objects, where the highest doses of compost and the fertilizer Hydrofoska 16 were applied. On the contrary, the smallest quantities of nitrogen oxide NO_x were produced during combustion of biomass from “a” objects, where compost and fertilizer Hydrofoską 16 were not applied. Use of intensive organic and mineral fertilization (object “d”) caused essential stronger air pollution by nitrogen oxide NO_x than combustion of biomass originating from objects of lower mineral fertilization (object “c”). Higher quantities of nitrogen oxide NO_x were produced during combustion of willow biomass from the first term of sampling biomass (February 2008 and 2009 and November 2009) than from the second term of sampling (at the turn of May and June). The highest quantities of the nitrogen oxide NO_x were produced during combustion of willow biomass clone 1052 (127.8 mg/m³), and the smallest during combustion of clone 1033 (119.3 mg/m³). Creation of the nitrogen oxides NO_x was influenced by double interactions also: fertilizer combinations with temperatures of combustion, fertilizer combinations with age of shoots, temperatures of combustion with term of sampling, temperatures of combustion with age of shoots and date of sampling with age of shoots, and also threefold interaction of temperatures of combustion with term of sampling and age of shoots and fourfold interaction of fertilizer combinations with temperatures of combustion, term of sampling and the age of shoots. Total interactions were responsible for 15.4% of content of nitrogen oxide NO_x in combustion gases.