
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 15
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok VI

Warszawa–Opole 2013

WOJCIECH KALINOWSKI*

Suszenie paliw alternatywnych w warstwie fluidalnej

Słowa kluczowe: suszarka doświadczalna, suszenie fluidalne, pomiary technologiczne, emisje gazowe.

Jedną z niekorzystnych cech paliw alternatywnych jest wysoka zawartość wilgoci, co wpływa na istotne obniżenie wartości opałowej oraz jest przyczyną zwiększonych strat cieplnych w procesach technologicznych. W ramach działalności statutowej wykonano badania suszenia lekkich frakcji materiałów kawałkowych na stanowisku doświadczalnym suszarni fluidalnej. Na podstawie pomiarów parametrów strumieni gazów i materiału suszonego dla różnych wydajności suszarni określono wartości współczynników wymiany ciepła i masy w złożu fluidalnym. Analiza składu gazów odlotowych pozwoliła na ustalenie koncentracji zanieczyszczeń wydzielonych w procesie suszenia paliw alternatywnych. Zaobserwowano podwyższone poziomy emisji składników organicznych, w tym zwłaszcza heksanu.

1. Wprowadzenie

Paliwa alternatywne (PASr – paliwa alternatywne stałe rozdrobnione, RDF – Refuse Derived Fuel, BRAM – Brennstoff aus Muell) występujące na rynku także pod różnymi nazwami własnymi, należą do grupy odpadów innych niż niebezpieczne o kodzie 19.12.10. Charakteryzują się one zróżnicowanym składem morfologicznym, uzależnionym od rodzaju odpadów wchodzących w ich skład, wysoką, bo sięgającą nawet do 40%, zawartością wilgoci oraz stosunkowo niską wartością opałową. Zastosowanie takich materiałów w praktyce wymaga uprzedniego ich przygotowania, a zwłaszcza usunięcia nadmiaru wilgoci.

W ramach działalności statutowej podjęto badania procesu suszenia paliw alternatywnych z wykorzystaniem warstwy fluidalnej [1]. Przedmiotem realizacji pracy badawczej jest opracowanie efektywnego sposobu suszenia lekkich materiałów kawałkowych z wykorzystaniem złoża fluidalnego. Duża powierzchnia bezpośredniego kontaktu gazu i materiału, warunki ciepłno-przepływowe

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, w.kalinowski@icimb.pl

panujące w złożu fluidalnym sprzyjają intensywnej, równoczesnej wymianie ciepła i masy. Efektywność suszenia w sfuidyzowanej warstwie materiału jest porównywalna z suszeniem w stanie zawieszenia (transport pneumatyczny) dla znacznie szerszego spektrum ziarnistości materiału i przy zdecydowanie niższych nakładach energetycznych.

Gazy emitowane z procesu suszenia paliw alternatywnych, jako materiał wytworzony z odpadów, mogą stwarzać problemy wynikające z emisji zanieczyszczeń, zwłaszcza zanieczyszczeń gazowych, w tym też organicznych, uwalnianych w procesie suszenia. Dokuczliwa jest również emisja odorów.

Podstawowym celem niniejszej pracy jest określenie współczynników wymiany ciepła i masy w procesie suszenia paliw alternatywnych oraz badanie zanieczyszczeń gazowych emitowanych z procesu.

2. Stanowisko doświadczalne

Modelowa suszarnia fluidalna stanowi element rynny aeracyjnej, wyposażonej w regulowany układ nadmuchu gazów suszących pod ruszt, układ podawania materiału wilgotnego, instalację wyciągową oparów z nad złoża oraz system wstępnego odpylania i odprowadzenia gazów na zewnątrz. Źródłem ciepła w procesie suszenia są gazy spalinowe z wytwornicy ciepła, o temperaturze regulowanej ilością spalanego paliwa. Instalację wyposażono w regulowane ręcznie przepustnice mechaniczne, utrzymujące prędkość przepływu gazów w warstwie na założonym poziomie. Na rycinie 1 pokazano schemat stanowiska doświadczalnego, zlokalizowanego na terenie hali technologicznej Oddziału Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu.

Stanowisko wyposażono w dodatkowe króćce do poboru próbek oraz wzierniki umożliwiające obserwację złoża. Do pomiarów wykorzystano aparaturę pomiarową (termometry, manometry, sondy Prandtla, analizatory składu gazów) stanowiącą wyposażenie mobilnego laboratorium pomiarów przemysłowych Zakładu Inżynierii Procesowej i Środowiska.

W przemysłowych suszarniach fluidalnych gazy suszące wprowadza się pod ruszt suszarni za pomocą wentylatorów nadmuchu. Wentylatory te pracują na gorących gazach, wytwarzanych w specjalistycznych wytwornicach ciepła, zwykle pochodzących z palenisk pomocniczych, albo wykorzystujących entalpie gazów odlotowych z urządzeń technologicznych. Nad rusztem panuje zwykle nieznaczne podciśnienie, wynikające z warunków przepływowych gazów, kierowanych do zewnętrznego emitora. Dla warunków stanowiska doświadczalnego połączono wytwornicę gorących gazów, pracującą z maksymalnym nadmiarem powietrza, z komorą podrusztową modelowej suszarni. Wentylator wyciągowy przetłacza gazy suszące przez złożę suszonego materiału, odpylacz oraz rurociągi transportu gazów na zewnątrz hali technologicznej.

3. Pomiary na stanowisku

3.1. Charakterystyka badanego materiału

Materiałem wprowadzanym do suszarki fluidalnej są paliwa alternatywne – kod odpadu 19.12.10. Duża zmienność wymiarów i kształtu ziaren oraz własności fizykochemicznych rozdrobnionych odpadów stwarzają poważne trudności w ustaleniu jednoznacznej charakterystyki materiału. Badania morfologii odpadów wskazują na obecność odpadów komunalnych, papieru, tektury, gumy, rozdrobnionej biomasy, folii, elementów z tworzyw sztucznych, tekstyliów oraz części mineralnych stanowiących balast. Średnią wartość gęstości właściwej materiału określono jako średnią ważoną jej składników. Charakterystykę paliwa przedstawiono w postaci tabelarycznej. Analizę techniczną odpadów jako paliwa wykonano zgodnie z normami:

- PN-80/G-04512/Az1:2002 – Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu metodą wagową; Zmiana Az1;
- PN-80/G-04511 – Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci;
- PN-81/G-04513 – Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej.

Tabela 1

Charakterystyka techniczna paliwa alternatywnego

Paliwo	Wilgoć	Wilgoć całkowita	Popiół	Ciepło spalania	Wartość opałowa
	W ^a	W ^c	A ^a	Q ^c	Q ^a
	[%]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
Paliwo alternatywne	11,0	18,8	18,7	26 780	22 508

^a – stan analityczny

^c – stan dostawy

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 2

Oznaczenie gęstości nasypowej (objętość naczynia 0,02197 m³)

Paliwo alternatywne	Masa próbki	Gęstość
	[kg]	[kg/m ³]
	6,32	287,7
6,28	285,8	
Średnia		286,7

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 3

Własności i morfologia paliw alternatywnych [2]

Rodzaj odpadu	Udział masowy [%]	Gęstość właściwa [kg/m ³]
Papier + tektura	35,0	900
Tworzywa sztuczne (polietylen)	32,0	920
Tekstylnia	6,0	300
Guma	10,0	1 300
Drewno	5,0	500
Części mineralne	12,0	2 200
	Średnia	1 046,4

3.2. Metodyka pomiarów

Do określenia masowych i cieplnych strumieni uczestniczących w procesie suszenia wykorzystano aparaturę pomiarową stanowiącą wyposażenie mobilnego Laboratorium Pomiarów Przemysłowych Oddziału Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Opolu. Pomiary wykonano przy zastosowaniu metod pomiarowych zamieszczonych w tabeli 4.

Tabela 4

Metody pomiarowe

Badane cechy	Metody badawcze/pomiarowe	Normy i/lub udokumentowane procedury badawcze
Strumień objętości gazu	metoda spiętrzenia	PN-z-04030-7:1994
Pobieranie próbek do badań: stężenie pyłu, emisja pyłu	metoda grawimetryczna	PN-z-04030-7:1994
Stężenie O ₂	metoda elektrochemiczna	PN-ISO10396:2001 SOP-OP-02
	metoda celka cyrkonowa	
Stężenie CO, CO ₂ , NO, SO ₂ ,	metoda z detekcją w podczerwieni (NDIR)	
	metoda FT-IR	

Źródło: Opracowanie własne.

Strumień objętości gazów – obliczono z pomiaru średniej prędkości gazu w rurociągu metodą sondowania przekroju poprzecznego. Zastosowano spiętrzające rurki Prandtla, równocześnie mierzono temperaturę gazów oraz podciśnienie w rurociągu. Pomiary wykonano przy pomocy automatycznego pyłomierza typu EMIOTEST 2598.

Stopień zawilżenia gazów – określono metodą kondensacyjno-wagową, a wilgotność resztkową gazów po przejściu przez skraplacz przy pomocy modułu higrometrycznego, stanowiącego wyposażenie przyrządu EMIOTEST 2598. Pomiar polega na aspiracji z kanału przy pomocy sondy oczyszczonego z części stałych gazów i skierowaniu go na skraplacz, a następnie na pojemnościowy czujnik wilgotności względnej umieszczony wraz z czujnikiem temperatury w module montowanym na zewnętrznym końcu sondy. Stopień zawilżenia gazów jest określany jako suma zawilżenia obliczonego z kondensatu i zawilżenia resztkowego odczytanego z modułu higrometrycznego.

Pomiar stężeń składników gazowych spalin – pomiary składu spalin wykonano w sposób ciągły. Okres pomiarów ciągłych podzielono na półgodzinne testy pomiarowe. Dane z pomiarów zbierano co jedną sekundę i rejestrowano jako wartości średnie jednodominutowe. Pobór prób prowadzono według metodyki referencyjnej opartej na procedurze badawczej SOP-OP-02. Pomiary wykonano analizatorami – Gaset DX-4000 (FTIR) i analizatorem tlenu AMS 3220 oraz analizatorem Horiba PG-250 (NDIR dla CO, CO₂, i SO₂; CLD dla NO/NO_x oraz celą paramagnetyczną dla O₂).

Pomiar temperatury – pomiar temperatury gazów przeprowadzono przy użyciu termopary NiCr-NiAl oraz termopary typu N wraz z miernikiem Digital Thermometer HH 506 R. Pomiar temperatury powierzchni i materiałów wykonano za pomocą pirometru optycznego Raynger II oraz kamery termowizyjnej MobIR M8.

Wydajność suszarni – strumień masy suszonego żużla obliczono na podstawie pomiaru masy zatrzymanej w wytarowanym pojemniku i pomiaru czasu jego napełniania. Do pomiaru masy wykorzystano wychyłową wagę dziesiętną.

Pomiar warunków otoczenia – warunki otoczenia ustalono za pomocą termohigrometru z datalogerem D 4141.

3.3. Wyniki pomiarów technologicznych

Po ustabilizowaniu transportu materiału w złożu i zsynchronizowaniu stopnia otwarcia przepustnicy wylotowej i wydajności podawacza przystąpiono do wykonywania pomiarów przepływowych w instalacji. Pomiary wykonano dla trzech wydajności układu oraz zmiennych temperatur gazów grzewczych. Na rycinie 2 pokazano wnętrze suszarki w trakcie prób.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Widok złoża suszonego paliwa

W trakcie próby pobierano próbki materiału na próbę średnią, dla ustalenia wilgotności materiału na wlocie i wylocie z suszarni.

Warunki wykonania pomiarów:

- temperatura otoczenia – 5,0°C,
- ciśnienie barometryczne – 992,3 hPa,
- wilgotność – ok. 90%.

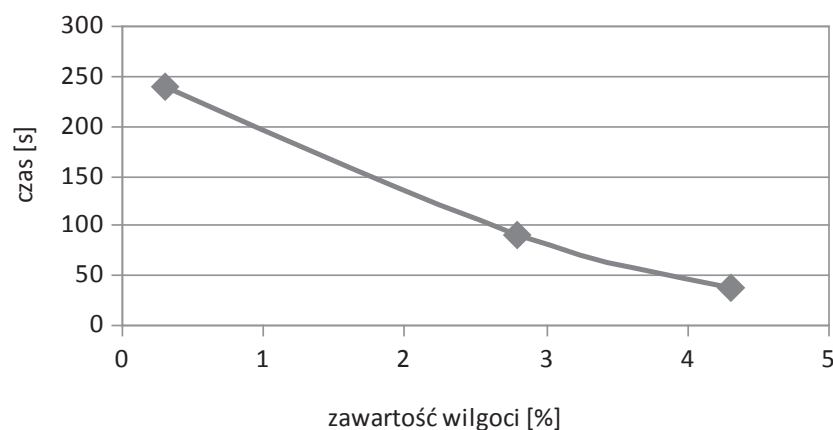
Aby zachować jednorodność rozkładu wilgoci w materiale, badania wykonywano na próbce pierwotnej, bez dodatkowego zwilżania nadawy. Wyniki suszenia próbek materiału przedstawiono w tabeli 5 oraz na rycinach 3 i 4.

T a b e l a 5

Wyniki oznaczeń wilgotności materiału

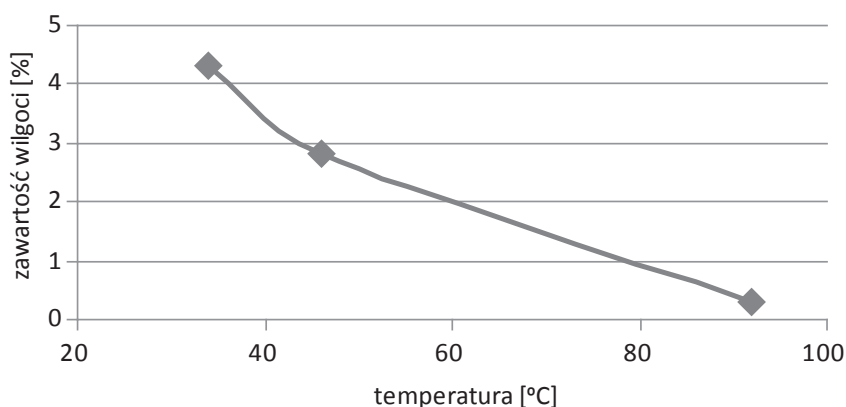
Rodzaj	Materiał	Wydajność instalacji [kg/h]	Wilgotność produktu [%]	Czas suszenia [s]
Paliwo alternatywne	nadawa	–	5,18	–
	produkt – 1	587,2	4,28	37
	produkt – 2	316,1	2,77	91
	produkt – 3	150,3	0,28	239

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 3. Krzywa suszenia paliw typu RDF w złożu fluidalnym



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Zależność zawartości wilgoci w produkcie od temperatury materiału

Dla stałej temperatury gazów suszących, przy rosnącym czasie przebywania materiału w suszarni, obserwuje się nieliniowy spadek wilgotności produktu. Jednocześnie wraz z obniżeniem się wilgotności materiału na wylocie z suszarni rośnie jego temperatura. Charakter obserwowanych zależności odpowiada wynikom teoretycznej symulacji procesu suszenia fluidalnego dla innych materiałów ziarnistych [3, 5], choć wskaźniki jakościowe charakteryzujące proces są niższe. Z uwagi na zakres eksperymentu przedstawione wyniki mają wyłącznie charakter badań wstępnych.

Do obliczeń współczynników wymiany ciepła i masy posłużono się zależnościami odpowiadającymi warunkom eksperymentu. Numerami oznaczono pomiary odpowiadające zmiennej wydajności suszarni. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 6–7. Wymianę ciepła wyrażono w postaci:

$$\text{Nu} = 0,01026 \cdot \text{Re} \cdot \text{Ar}^{0,176} \cdot \left(\frac{h_{\text{złóża}}}{d_m} \right)^{-0,45} \quad (1)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa,

Ar – liczba Archimedesesa,

Nu – liczba Nusselta,

$h_{z\text{ł}\text{o}\text{ż}\text{a}}$ – wysokość złoża,

d_m – średnica ekwiwalentna materiału.

T a b e l a 6

Wyniki obliczeń współczynnika wnikania ciepła α

Wielkość	Jednostka	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
Re	[-]	94,9	97,8	92,40
Ar	[-]	21 641 047	22 882 810	21 975 191
Nu	[-]	11,67	10,67	9,05
α	[W/(m ² deg)]	36,3	32,2	28,0

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Otrzymane wartości współczynników wnikania ciepła mieszczą się w zakresie $\alpha = 28,0\text{--}36,3$ W/(m²deg). Dane literaturowe z badań procesów konwekcji w złożu fluidalnym podają wartości α sięgające 30 W/m²deg [3–4]. Uzyskane w doświadczeniu wartości współczynników wnikania ciepła α wskazują na stosunkowo wysoką efektywność procesu wymiany ciepła pomiędzy gazami grzewczymi a materiałem suszonym.

Do obliczeń współczynników wnikania masy wykorzystano równanie [3]:

$$j_M = 2,05 \cdot \varphi_m \cdot [\text{Re}/((1 - \varepsilon_{z\text{ł}\text{o}\text{ż}\text{a}}) \cdot \varphi_m)]^{-0,468} \quad (2)$$

gdzie:

$$j_M = \text{Sh}/(\text{Re} \cdot \text{Sc}^{0,333}) \quad (3)$$

$\varepsilon_{z\text{ł}\text{o}\text{ż}\text{a}}$ – porowatość złoża,

φ_m – współczynnik kształtu ziaren materiału,

Sh – liczba Sherwooda,

Sc – liczba Schmidta.

Wyniki obliczeń dla warunków eksperymentu zestawiono w tabeli 7.

T a b e l a 7

Wyniki obliczeń współczynników wymiany masy

Wielkość	Jednostka	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
Re	[-]	94,93	97,80	92,40
Sc	[-]	73,140	57,167	59,694
$\sigma_{\text{para-g.w.}}$	[kg/(ms)]	3,329E-07	4,002E-07	4,021E-07
φ_m	[-]	0,70	0,70	0,70
$\varepsilon_{z\text{ł}\text{o}\text{ż}\text{a}}$	[-]	0,726	0,726	0,726

cd. tab. 7

Wielkość	Jednostka	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
$Re/((1-\varepsilon_{z\acute{o}\lambda}z\acute{o}\lambda) \cdot \varphi_m)$		495	510	482
$\beta_{para.gazy}$	[kg/(m ² s)]	0,001	0,001	0,001
m'_{H_2O}	[kg/(m ² h)]	8,01	11,56	11,23

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Uzyskane wartości współczynników wnikania masy są relatywnie niskie, co może wynikać ze stosunkowo niskiej zawartości wilgoci materiału na wlocie do suszenia oraz mniejszych niż zakładano prędkości gazu w złożu (graniczną prędkość gazów ustalono na podstawie obserwacji złoża). W dalszych pracach eksperymentalnych uzyskane wyniki powinny zostać poddane weryfikacji.

Gazy emitowane z procesu suszenia paliw alternatywnych, jako materiału wytworzonego z odpadów, mogą stwarzać problemy wynikające z emisji zanieczyszczeń, zwłaszcza zanieczyszczeń gazowych uwalnianych w procesie suszenia. Pomiary koncentracji zanieczyszczeń emitowanych podczas prób poprzedzono badaniem tła. Pomiar tła wykonano przy pustym ruszcie suszarni. Rejestracja trwała ok. 1/2 godziny. Zarejestrowano przebiegi 19 składników spalin, a wybrane przedstawiono w tabeli 8.

T a b e l a 8

Pomiary składu gazów spalinowych (pomiar tła)

Lp.	Temperatura gazów	Analiza gazów						
		O ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	HCl	CH ₄	C ₆ H ₁₄
	[°C]	[%]	[%]	[%]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
1	200	20,1	0,8	2,0	3,2	0,6	1,7	0,3
2	218	19,7	0,8	1,2	4,1	0,7	1,7	0,1

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

W trakcie badań wykonywano ciągły pomiar składu gazów wylotowych. Dla badanych obciążeń suszarni zestawiono w tabeli 9 charakterystyczne wyniki pomiarów składu gazów emitowanych z procesu suszenia paliw.

T a b e l a 9

Pomiary składu gazów spalinowych

Lp.	Temperatura gazów	Analiza gazów						
		O ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	HCl	CH ₄	C ₆ H ₁₄
	[°C]	[%]	[%]	[%]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
1	179	19,6	0,8	2,0	1,6	1,3	3,7	12,1
2	160	19,6	0,9	1,1	3,0	0,8	3,2	10,8
3	168	19,8	0,8	1,7	3,6	0,4	2,9	9,6

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Pomiary składu gazów odlotowych z doświadczalnej suszarni fluidalnej paliw alternatywnych wykazały obecność węglowodorów C_nH_{n+2} , zwłaszcza metanu CH_4 i heksanu C_6H_{14} .

4. Uwagi końcowe

1. Paliwa wytworzone z odpadów charakteryzują się zróżnicowanym składem morfologicznym, uzależnionym od rodzaju odpadów wchodzących w ich skład, wysoką, bo sięgającą nawet do 40%, zawartością wilgoci oraz stosunkowo niską wartością opałową. Zastosowanie takich materiałów w praktyce wymaga uprzedniego ich przygotowania, a zwłaszcza usunięcia nadmiaru wilgoci. Z uwagi na stosunkowo niskie wymagania termiczne procesu suszenia w stanie fluidalnym istnieje możliwość efektywnego wykorzystania energii odpadowej z procesów technologicznych (np. w przemyśle cementowym – wykorzystanie powietrza nadmiarowego z chłodzenia klinkieru).

2. Niskie obciążenie powierzchni rusztu przez gazy suszące wynika z konieczności ograniczania prędkości gazów w złożu. Rzeczywiste prędkości gazów suszących w warstwie różniły się istotnie od wartości teoretycznych. Przy wyższych prędkościach gazów obserwowano porywanie drobniejszej frakcji paliwa ze złoża.

3. Otrzymane, na podstawie wyników pomiarów i obliczeń, wartości współczynników wnikania ciepła α zawarte są w przedziale 28–36 W/(m²deg), co wskazuje na stosunkowo dużą intensywność procesu wymiany ciepła. Uzyskane wartości współczynników wnikania masy osiągnęły bardzo niski poziom. Konsekwencją tego są niskie wartości gęstości strumienia odparowanej wody m'_{H_2O} , które w przeliczeniu na pusty przekrój mieszczą się w przedziale 8–11 kg/(m²h).

4. Pomiary składu gazów odlotowych z doświadczalnej suszarni fluidalnej paliwa alternatywnego wykazały obecność licznych zanieczyszczeń, w tym również organicznych, uwalnianych w procesie suszenia. W gazach odlotowych z suszarni fluidalnej pojawiła się zwiększona koncentracja węglowodorów C_nH_{n+2} , zwłaszcza heksanu C_6H_{14} . Dokuczliwa jest także emisja odorów. Badania na obiektach przemysłowych potwierdzają występowanie takich zjawisk.

Literatura

- [1] K a l i n o w s k i W., Badania procesu suszenia materiałów kawałkowych z wykorzystaniem złoża fluidalnego. Raport ICiMB O/Opole nr 4N008S12, grudzień 2012 r.
- [2] W a n d r a s z J.W., W a n d r a s z A.J., *Paliwa formowane: biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych*, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2006.
- [3] S t r u m i ł ł o C., *Podstawy teorii i techniki suszenia*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.

[4] P a w ł o w K.F., R o m a n k o w P.G., N o s k o w A.A., *Przykłady i zadania z zakresu aparatury i inżynierii chemicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.

[5] C i e s i e l c z y k W., K a m i ń s k a A., S ł o n e c z n a J., *Badania procesu suszenia fluidalnego biomasy drzewnej*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2011, nr 5.

WOJCIECH KALINOWSKI

DRYING OF ALTERNATIVE FUELS IN FLUID BED

Keywords: research dryer unit, fluid bed drying, technological measurements, gas emission.

One of the unfavorable features of alternative fuels is high moisture content, resulting in a significant decrease in the calorific value and increase of heat loss in technological process. Tests of drying of light fractions of lump materials were performed at experimental fluid bed unit. Based on measurements of the gas stream and the material to be dried for various drying capacity coefficients of heat transfer and mass transfer in a fluidized bed were determined. Analysis of the composition of the exhaust gases allowed to determine the concentration of impurities released from the process of drying of alternative fuels. Increased levels of emissions of organic compounds, in particular hexane, was observed.