



## Drying of a composite formed fuel with dominant fraction of digested sewage sludge

Jan HEHLMANN<sup>1</sup>, Piotr BENDUCKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, Katedra Inżynierii Chemicznej i Projektowania Procesowego, ul. M. Strzody 7, 44-100 Gliwice, tel.: 32 237 12 88, e-mail: [jan.hehlmann@polsl.pl](mailto:jan.hehlmann@polsl.pl), [piotr.benducki@polsl.pl](mailto:piotr.benducki@polsl.pl)

### Abstract

The increased use of the sewage sludge for biogas production, as well as thermal processing of sewage sludge, are the main goals of the National Waste Management Plan 2014, that are to be fulfilled by 2022. Application of the thermal processing methods e.g. combustion, pyrolysis, gasification usually requires a preliminary drying of the sludge.

The paper presents the results of a research on the production of a composite, solid fuel. The key component of the fuel (68÷90% wet basis) is a digested sewage sludge. The remaining components used by the study are sawdust, lignocellulose, straw and coal concentrate obtained by flotation process.

To compare the drying kinetics and mechanical properties, spherical particles with uniform volume and different composition were formed. The second method of fuel forming, used in the research, is based on the extrusion of the fuel mixture through the openings. Then, the particles were coated with sawdust.

Proposed method enables to eliminate a number of problems, which occurs in sludge dryers operation recently. Furthermore, application of the solution by wastewater treatment plants will allow to switch from the production of waste as digested sludge into the production of a valuable solid formed fuel.

**Keywords:** sewage sludge, drying, alternative fuel

### Streszczenie

Suszenie kompozytowego paliwa formowanego z dominującym udziałem pofermentacyjnych osadów ściekowych.

W Krajowym Planie Gospodarki Odpadami 2014, jako główne cele do 2022 roku, wymieniono zwiększenie ilości osadów ściekowych wykorzystywanych do produkcji biogazu oraz przekształcanych termicznie. Zastosowanie termicznych metod utylizacji (np. spalanie, piroliza, zgazowanie) przeważnie wymaga wcześniejszego suszenia osadów.

W artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczących kompozytowego paliwa stałego, którego głównym składnikiem (68÷90% masy wilgotnej) są pofermentacyjne osady ściekowe. Pozostałe składniki to trociny, lignoceluloza, słoma i koncentrat flotacyjny węgla.

W celu porównania kinetyki suszenia oraz własności mechanicznych, formowano sferyczne kształtki o jednakowej objętości ale zmiennym składzie. Drugi zastosowany w badaniach sposób formowania paliwa polegał na ekstruzji mieszanki przez otwory i obtaczaniu elementów warstwą trocin.

Zaproponowana w artykule metoda pozwala wyeliminować szereg problemów pojawiających się obecnie podczas eksploatacji suszarni osadów. Dodatkowo, zastosowanie rozwiązania w oczyszczalniach ścieków rokuje, że nie będą one wytwarzały jak dotąd odpadu jakim jest pofermentacyjny osad, ale produkt w postaci formowanego paliwa stałego.

**Słowa kluczowe:** osady ściekowe, suszenie, paliwo alternatywne

## 1. Wstęp

Konsekwencją wprowadzenia Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych, stanowiącego narzędzie wdrożeniowe dyrektywy 91/271/EWG Rady Unii Europejskiej, jest obserwowany obecnie znaczny wzrost ilości powstających osadów ściekowych. W ostatnim dziesięcioleciu były one w głównej mierze składowane lub wykorzystywane rolniczo oraz do rekultywacji [1]. W Krajowym Planie Gospodarki Odpadami [2], jako główne cele w perspektywie do 2022 roku, wymieniono zwiększenie ilości komunalnych osadów ściekowych wykorzystywanych do produkcji biogazu oraz przekształcanych termicznie, przy jednoczesnym ograniczeniu ich składowania. Efektem przyjętych przez Radę Ministrów postanowień będzie z pewnością, obserwowany już dziś, znaczny wzrost ilości osadów pofermentacyjnych wymagających zagospodarowania.

W wyniku fermentacji metanowej, oprócz produktu w postaci biogazu, powstaje osad, który nadal zawiera znaczny udział masy organicznej, a więc stanowi potencjalne źródło energii. Jest on jednak odporny na biodegradację, przez co do odzysku zawartej w nim energii najlepiej nadają się metody termiczne [3]. Wśród nich najpopularniejsze są: spalanie, piroliza i zgazowanie [1, 4, 5]. W ciągu kilku ostatnich lat wybudowano w Polsce szereg instalacji umożliwiających termiczną utylizację osadów, a udział osadów poddawanych termicznemu przekształceniu wzrósł z 1,5% s.m. osadów wytworzonych w 2009 roku do 8% w 2011 roku [6].

Termicznemu przekształceniu można poddać zarówno same osady ściekowe jak również ich mieszaninę z węglem energetycznym, odpadami komunalnymi lub biomasą [4, 7]. Alternatywą dla tych rozwiązań jest produkcja stałych paliw formowanych w postaci brykietów [8, 11], pellet [9] lub granulatu [10, 12, 13], w których skład oprócz osadów ściekowych mogą wchodzić np. komponenty węglowe, trociny, lignoceluloza [8, 9, 10, 12].

Ponieważ odwodniony mechanicznie osad ściekowy zawiera przeważnie około 80% masy wody, korzystne jest, aby zastosowanie wymienionych metod energetycznego wykorzystania osadów poprzedzić etapem suszenia, co w ogromnej liczbie przypadków jest wręcz wymagane. Wśród stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych można wymienić suszarki: taśmowe, bębnowe, cienkowarstwowe, fluidalne, pneumatyczne, półkowe, tarczowe [4, 14, 15, 16]. Z powodzeniem stosuje się także suszarki mikrofalowe [16, 17]. Popularne są również suszarnie słoneczne [14, 18], jednak pomimo znacznej oszczędności energii, wymagają one dużej powierzchni zabudowy, zaś wilgotność produktu nadal jest wysoka i rzadko wynosi mniej niż 30%, a dodatkowo występują przestoje instalacji i gromadzenie osadów w okresie zimowym. Wśród innowacyjnych metod suszenia osadów, cieszących się zainteresowaniem wśród badaczy, można wymienić prażenie [19, 20] oraz suszenie biologiczne [21, 22].

Wraz z ubytkiem zawartości wody zmieniają się właściwości mechaniczne osadów ściekowych. Suszony materiał intensywnie się kurczy [23], a na jego powierzchni w zależności od rodzaju osadu powstają pęknięcia (osad pofermentacyjny) albo tworzy się twarda warstwa utrudniająca suszenie [24]. Charakterystyczne jest występowanie płynnej fazy kleistej przy zawartości suchej masy w osadzie w granicach 40÷50 % [25]. Zjawisko to jest przyczyną problemów w eksploatacji suszarni, gdyż powoduje powstawanie dużych, trudno łamiących się brył materiału [26]. W wielu rozwiązaniach zastosowano recyrkulację osadu suchego, co redukuje problem sklejanania oraz wpływa pozytywnie na kinetykę procesu suszenia poprzez zwiększenie porowatości materiału, powoduje jednak wzrost gabarytów urządzeń [25, 27]. Dodatkowym problemem w tego typu suszarniach jest przyspieszone zużycie elementów suszarni [28]. Termiczne suszenie osadów zapewnia dodatkowo ich biologiczną higienizację [29], z drugiej jednak strony wzrost temperatury powyżej 80°C powoduje rozkład substancji organicznej i emisję lotnych związków, co skutkuje powstawaniem odorów i spadkiem wartości opałowej [30, 31].

W przyszłości najprawdopodobniej większość oczyszczalni ścieków będzie posiadała instalację fermentacji metanowej, a dominującym sposobem zagospodarowania osadu pofermentacyjnego będzie jego wykorzystanie energetyczne. Przedstawione w niniejszym artykule badania są częścią tematyki mającej na celu opracowanie technologii otrzymywania kompozytowego paliwa formowanego, którego głównym składnikiem będą pofermentacyjne osady ściekowe. Uwaga autorów skupia się szczególnie na procesie suszenia, który ze względu na energochłonność jest kluczowym etapem wspomnianej technologii.

## 2. Cel i metodyka badań

Opisana w artykule część badań dotycząca otrzymywania kompozytowego paliwa z udziałem pofermentacyjnych osadów ściekowych miała na celu określenie, w jaki sposób dodatek wybranych

depozytowych komponentów wpływa na właściwości mechaniczne oraz kinetykę suszenia kształtek paliwowych.

W pierwszym etapie badań sporządzano mieszanki paliwowe z udziałem składników, których właściwości zestawiono w tabeli 2.1. Słomę rozdrabniano uzyskując elementy o maksymalnej długości około 15mm. Wilgotność wyznaczano za pomocą wagosuszarki z ogrzewaniem promiennikowym w temperaturze 105°C, ciepło spalania mierzono za pomocą kalorymetru statycznego KL-12Mn, a straty suchej masy podczas prażenia określano w piecu w temperaturze 550°C.

Tabela 2.1. Właściwości składników mieszanek paliwowych

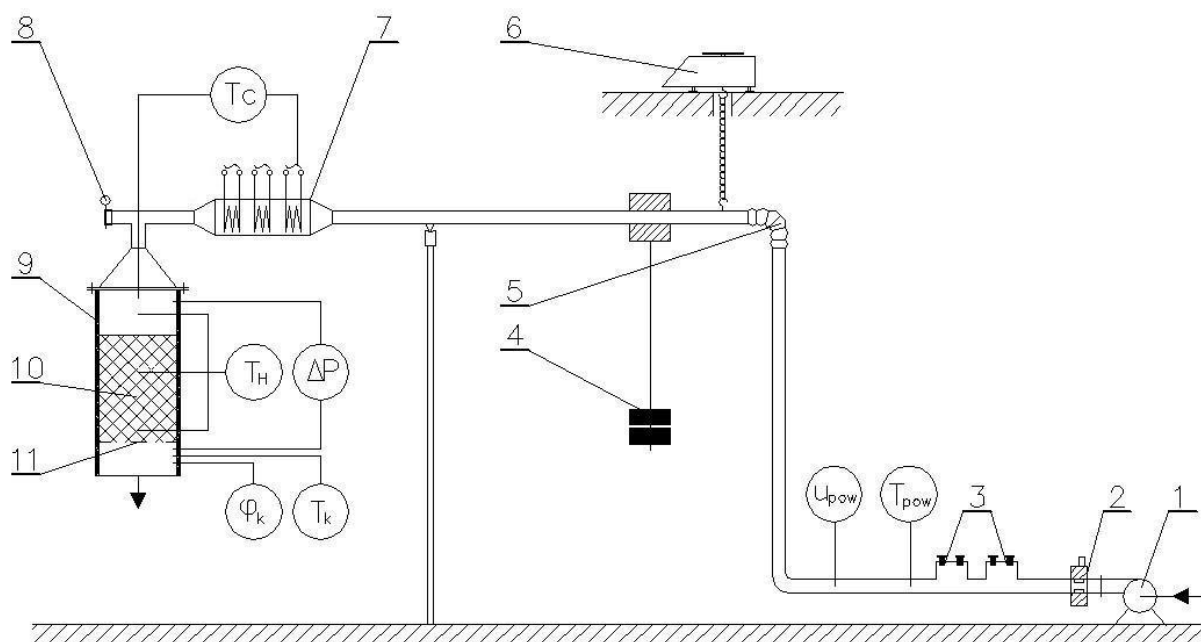
Składnik	Wilgotność		Ciepło spalania [MJ/kg s.m.]	Pozostałość po prażeniu [% s.m.]
	[%]	[kg H <sub>2</sub> O/kg s.m.]		
O - osad ściekowy	84,3	5,381	12,8	35,80
T – trociny drzew liściastych (frakcja 0÷5 mm)	9,7	0,107	18,8	0,50
L - lignoceluloza	10,2	0,114	20,4	1,33
S – słoma żółta	10,0	0,111	16,2	1,85
F – koncentrat flotacyjny węgla kamiennego	22,5	0,290	28,0	9,88

Po zważeniu i dokładnym wymieszaniu składników, wykorzystując sferyczną matrycę, formowano kształtki o średnicy 27 mm. Po trzy kształtki z każdej mieszanki suszono za pomocą wagosuszarki w temperaturze 85°C rejestrując ubytek masy, a pozostałe suszono w warunkach atmosferycznych. Po wysuszeniu mierzono siłę potrzebną do zniszczenia kształtek, wykorzystując w tym celu siłomierz firmy Axis z tłokiem ściskającym o średnicy 15 mm. Mierzono też średnicę kształtek, a na jej podstawie określano skurcz objętościowy jako  $(V_p - V_k)/V_p \cdot 100\%$ , gdzie  $V_p$  i  $V_k$  oznaczają objętość kształtki odpowiednio przed i po suszeniu.

W skali przemysłowej z powodzeniem może być wykorzystana procedura formowania zastosowana w drugim etapie badań, a polegająca na ekstrudowaniu mieszanek przez matrycę z oczkami o średnicy 13 mm i obcinaniu wypływających ekstrud na długość zbliżoną do ich średnicy. W wybranych badaniach zastosowano dodatkowo obtaczanie kształtek trocinami w granulatorze talerzowym, co zapobiegało ich sklejanii. Mieszanki sporządzano z osadów ściekowych i trocin.

Otrzymane kształtki suszono w temperaturze 60°C zarówno za pomocą wagosuszarki jak i na stanowisku do badań suszenia konwekcyjnego, którego schemat pokazano na rysunku 2.1. Suszone złożo (10) umieszczane jest na ruszcie (11) w izolowanym termicznie walcowym zasobniku o średnicy wewnętrznej 82 mm (9). Regulację natężenia przepływu powietrza tłoczonego wentylatorem (1) i ogrzewanego elektrycznie (7), zapewniają przepustnica (2) i system upustów (3). Rejestrację ubytku masy zapewnia waga (6) połączona za pomocą ciężna z systemem dźwigniowym układu suszącego.

Prędkość powietrza liczoną na pusty przekrój aparatu wynosiła 3,3 m/s. Masę suszonego złoża dobierano w ten sposób, aby niezależnie od udziału trocin w mieszance, parametrem stałym była ilość wody którą należy odparować. Masa osadu ściekowego poddawanego suszeniu (nie licząc masy trocin) wynosiła około 100 i 300 g odpowiednio dla suszenia na wagosuszarce i na stanowisku do badań suszenia konwekcyjnego.



Rys. 2.1. Schemat stanowiska do badań procesowych suszenia konwekcyjnego; 1 – wentylator, 2 – przepustnica, 3 – upusty powietrza, 4 – przeciwcieżar, 5 – elastyczny łącznik, 6 – waga połączona z rejestratorem, 7 – komora grzejna, 8 – króciec upustowy, 9 – zasobnik materiału, 10 – suszony materiał, 11 – ruszt; punkty pomiarowe:  $T_{pow}$ ,  $u_{pow}$  – odpowiednio temperatura i prędkość powietrza w rurociągu,  $T_H$  – temperatura w zasobniku na różnych wysokościach,  $\Delta P$  – spadek ciśnienia powietrza na złożu,  $\phi_k$ ,  $T_k$  – odpowiednio temperatura i wilgotność względna powietrza u wyloty z zasobnika

### 3. Wyniki i dyskusja

W tabeli 3.1 zestawiono właściwości sferycznych kształtek paliwowych. Udział poszczególnych komponentów podano zarówno w przeliczeniu na składniki wilgotne jak i suchą masę. Wilgotność wyznaczono na podstawie masy kształtek przed i po suszeniu, natomiast wartości ciepła spalania i pozostałość po prażeniu wyliczono na podstawie udziałów masowych komponentów. Na rysunku 3.1 pokazano fotografie otrzymanych kształtek.

Zastosowanie różnych dodatków daje możliwość modyfikacji właściwości paliwowych mieszanek (ciepło spalania, zawartość popiołu) oraz utylizacji drobnoziarnistych materiałów odpadowych. Istotnym jest, że niewielki dodatek komponentu w przeliczeniu na wilgotną masę składników, znacznie modyfikuje skład suchej masy mieszanki.

Kształtki uformowane z samych osadów ściekowych wykazywały duży skurcz, a ich wytrzymałość była znikoma. Najlepsze właściwości mechaniczne miały kształtki zawierające w swym składzie trociny. Przy wykorzystaniu słomy występowały problemy podczas formowania, co mogłoby być rozwiązane przez jej większe rozdrobnienie. Zastosowanie lignocelulozy i koncentratu flotacyjnego węgla powoduje powstanie niekorzystnej, kleistej konsystencji mieszanki. Efekt ten można ograniczyć poprzez dodatek trocin (pozycja 7, 8 i 11 w tabeli 3.1) dzięki czemu uzyskuje się materiał o dobrych właściwościach paliwowych i mechanicznych.

Kształtki suszone w łagodniejszych warunkach (atmosferycznie) wykazywały większą redukcję objętości, siła potrzebna do ich zniszczenia była większa, a na powierzchni zaobserwowano mniej pęknięć. Fotografie przykładowych kształtek o jednakowym udziale składników, wysuszonych różnymi metodami, znajdują się na rys. 3.1 (pozycje 3 i 3a).

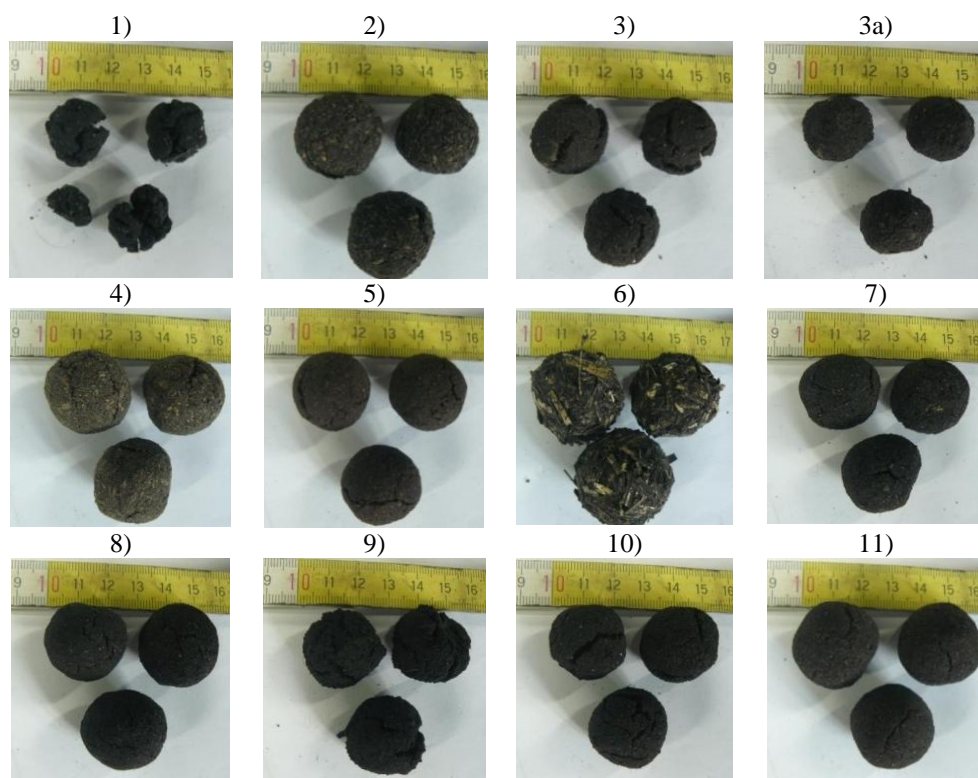
Na rysunku 3.2 zestawiono wykresy szybkości suszenia kształtek o różnym składzie w funkcji wilgotności. W przypadku kształtek składających się wyłącznie z osadów ściekowych szybkość suszenia była wyższa, a to ze względu na pękanie i rozpadanie się kształtek. Należy jednak mieć na uwadze, że suszenie samego osadu powoduje wspomniane w wstępie problemy w eksploatacji suszarni. W pozostałych przypadkach krzywe szybkości suszenia miały podobny charakter. Ze względu na nieznaczne różnice w kinetyce suszenia dla poszczególnych mieszanek można sądzić, że przy dużej zawartości osadu (68,8÷89,6% masy składników

wilgotnych), skład pozostałej części paliwa może być zmieniany bez istotnego wpływu na parametry pracy suszarki.

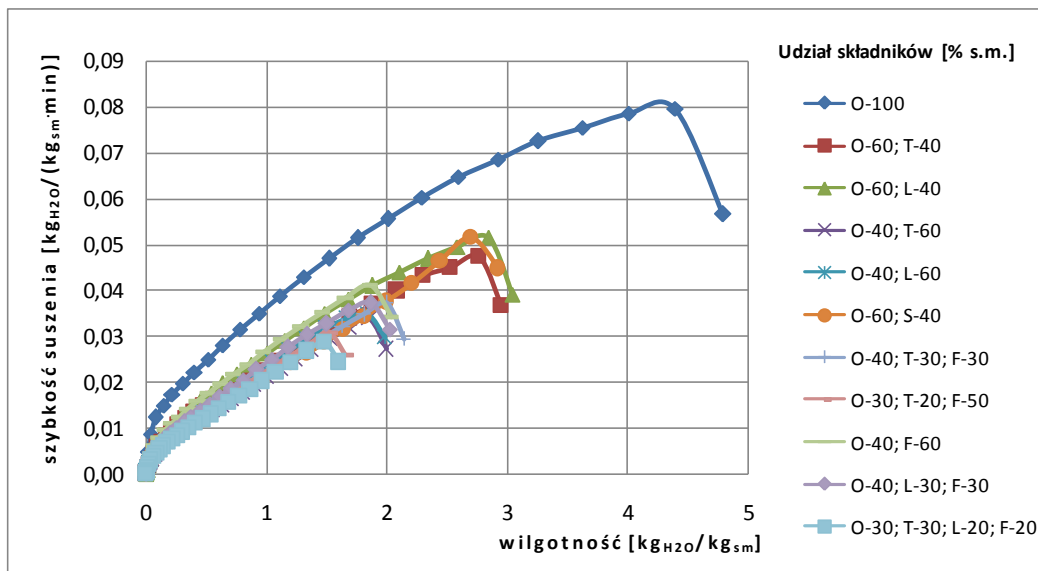
Tabela 3.1. Właściwości kulistych kształtek paliwa kompozytowego; składniki: O – osad ściekowy, T – trociny, L – lignoceluloza, F – koncentrat flotacyjny węgla; wartości pogrubione – udział składników wilgotnych, wartości (w nawiasie) – udział w suchej masie; P, K – odpowiednio wartości początkowe (przed suszeniem) i końcowe (po suszeniu); W - dotyczy kształtek suszonych za pomocą wagosuszarki, A – dotyczy kształtek suszonych atmosferycznie

L.p.	Udział masowy składników [%]	Wilgotność [kg H <sub>2</sub> O/kg s.m.]	Ciepło spalania [MJ/kg s.m.]	Pozostałość po prażeniu [% s.m.]	Masa trzech kształtek (badania na wagosuszarce) [g]		Skurcz objętościowy kształtek [%]		Siła niszcząca kształtkę [N]	
					P	K	W	A	W	A
1	O-100 (100)	5,09	12,8	35,8	34,7	5,7	59	-	10,6	-
2	O-60 (89,6) T-40 (10,4)	2,94	15,2	21,7	36,6	9,3	12	32	60,9	>200
3	O-60 (89,6) L-40 (10,4)	3,04	15,8	26,8	34,7	8,6	32	43	22,3	196,4
4	O-40 (79,4) T-60 (20,4)	1,99	16,4	14,6	36,8	12,3	5	14	129,9	>200
5	O-40 (79,3) L-60 (20,7)	1,98	17,4	22,3	36,4	12,2	19	30	45,9	189,7
6	O-60 (89,6) S-40 (10,4)	2,92	14,1	22,2	34,2	8,7	-18*	-5*	132,9	137,9
7	O-40 (78,0) T-30 (10,2) F-30 (11,8)	2,14	19,2	17,4	35,9	11,4	12	30	43,0	200,0
8	O-30 (68,8) T-20 (8,0) F-50 (23,2)	1,66	21,6	15,8	38,0	14,3	2	21	44,1	162,3
9	O-40 (76,7) F-60 (23,3)	2,03	21,9	20,2	36,7	12,1	19	-	10,6	-
10	O-40 (78,0) L-30 (10,2) F-30 (11,8)	2,02	19,6	21,3	36,7	12,2	17	36	18,6	176,3
11	O-30 (70,2) T-30 (12,2) L-20 (8,1) F-20 (9,5)	1,60	18,8	13,0	38,7	14,9	0	10	60,2	>200

\* - wartości ujemne wynikają z ekspansji objętości w przypadku kształtek zawierających słomę

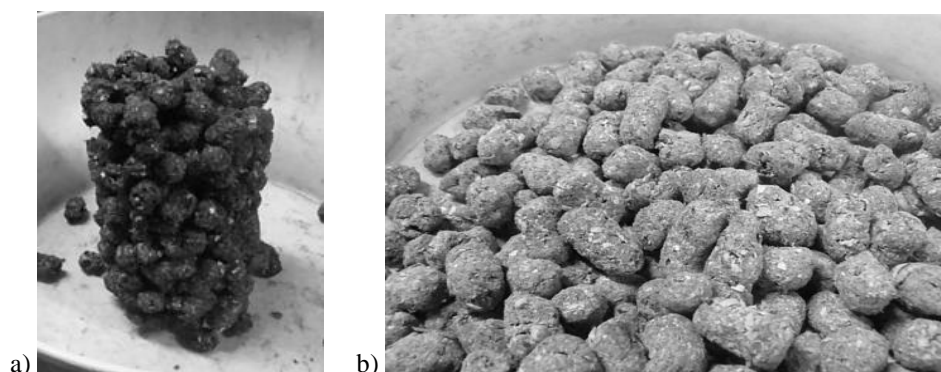


Rys. 3.1. Fotografie kształtek suszonych za pomocą wagosuszarki (wyj. 3a – suszone atmosferyczne); numery nad zdjęciami odpowiadają pozycjom z tabeli 3.1



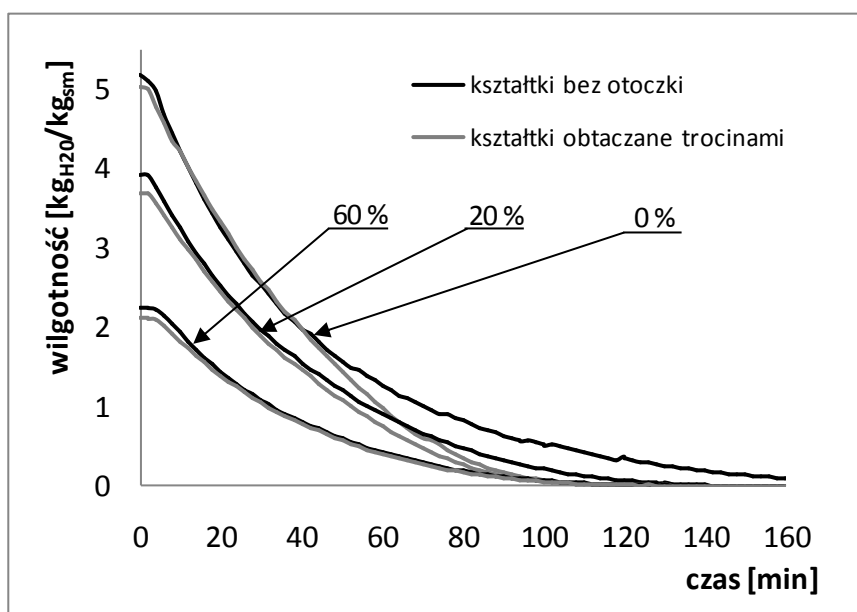
Rys. 3.2. Krzywe szybkości suszenia w funkcji wilgotności kształtek z dodatkiem różnych komponentów, pomiar z wykorzystaniem wagosuszarki, temperatura 60°C

Rysunek 3.3 przedstawia fotografie kształtek paliwowych suszonych konwekcyjnie na stanowisku pokazanym na rysunku 2.1. W przypadku braku otoczki kształtki sklejały się tworząc bryłę. Obtaczanie trocinami sprawia, że złożo jest rozmieszczone równomiernie w całym przekroju poprzecznym suszarki, co zapewnia wyrównany przepływ powietrza w całej jego objętości.



Rys. 3.3. Kształtki suszonego materiału: a – sklejona bryła bez otoczki, b – luźne kształtki obtaczane trocinami

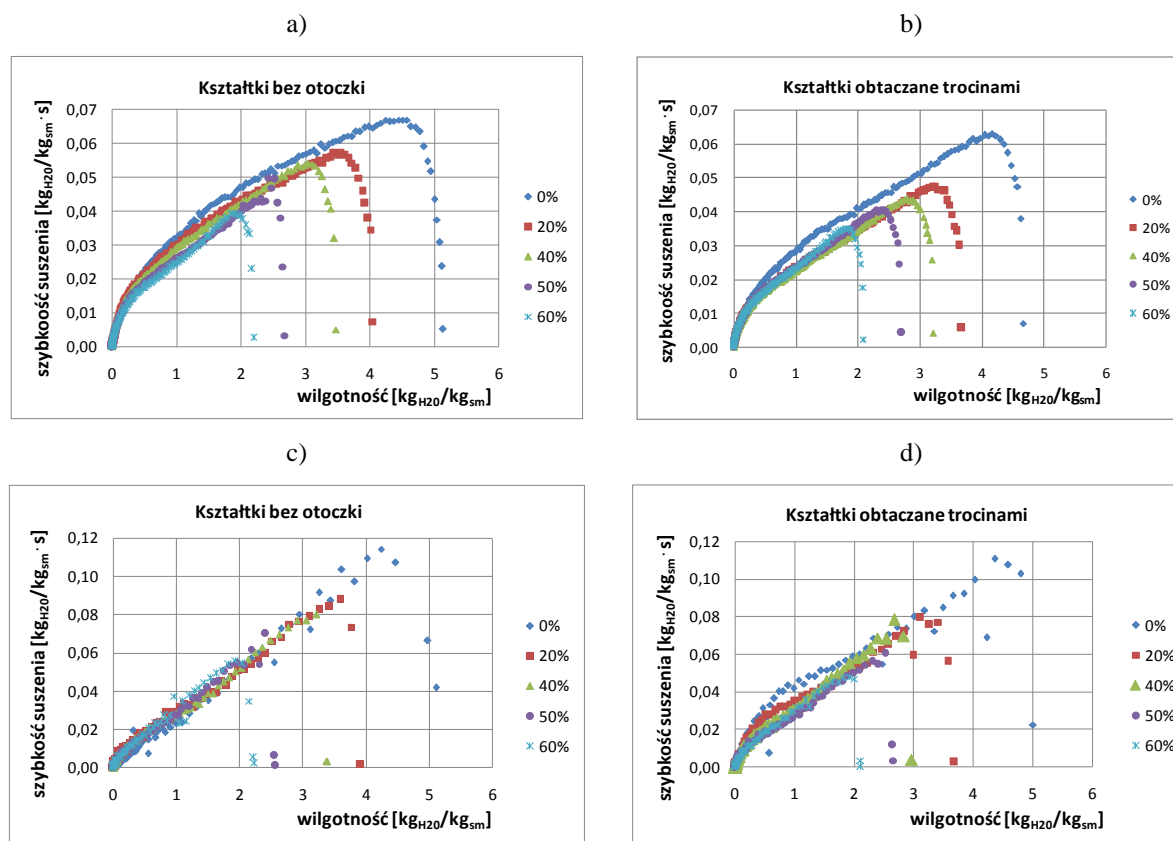
Krzywe suszenia (rys. 3.4) kształtek obtaczanych i nieobtaczanych mają początkowo jednakowy przebieg, a następnie rozdzielają się i suszenie elementów obtaczanych przebiega szybciej. Efekt zanika wraz ze wzrostem udziału trocin w mieszance, gdyż stabilizują one strukturę złoża, ograniczając jednocześnie skurcz materiału.



Rys. 3.4. Krzywe suszenia kształtek składających się z osadów ściekowych i trocin w ilości 0; 20 i 40% w suchej masie, uzyskane na stanowisku przedstawionym na rysunku 2.1

Z analizy krzywych szybkości suszenia kształtek uzyskanych za pomocą wagosuszarki (rys. 3.5a, 3.5b) wynika, że obtaczanie trocinami nieznacznie zmniejsza szybkość suszenia. Jest to prawdopodobnie związane z obniżeniem zdolności powierzchni kształtek do absorpcji promieniowania podczerwonego emitowanego w wagosuszarce.

W przypadku suszenia konwekcyjnego (rys. 3.5c, 3.5d) nie zaobserwowano pogorszenia kinetyki procesu w związku z obtaczaniem trocinami. Dodatkowo, wskutek wyeliminowania wzajemnego sklejanego elementów złoża, a co za tym idzie ich równomiernego rozłożenia w całym przekroju aparatu, poniżej pewnej wilgotności (około  $2 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{s.m.}}$ ), szybkości suszenia kształtek obtaczanych były wyższe. Jak wspomniano, efekt ten zanika ze wzrostem udziału trocin w mieszance w związku z ograniczeniem skurczu złoża.



Rys. 3.5. Krzywe szybkości suszenia uzyskane za pomocą wagosuszarki (a, b) i na stanowisku do badań suszenia konwekcyjnego (c, d) w zależności od udziału trocin w suchej masie mieszanki

#### 4. Podsumowanie

- Zaproponowana w artykule metoda wytwarzania kompozytowego paliwa formowanego z udziałem pofermentacyjnych osadów ściekowych zapewnia utylizację tego odpadu oraz umożliwia zagospodarowanie innych energetycznych drobnoziarnistych materiałów depozytowych.
- W badaniach zastosowano takie komponenty jak: trociny, słoma, lignoceluloza pohydrolityczna, koncentrat flotacyjny węgla kamiennego. Otrzymano paliwa formowane o dobrych właściwościach mechanicznych bez konieczności stosowania lepiszczy.
- Suszenie paliwa kompozytowego w połączeniu z zaproponowanym obtaczaniem suszonych elementów trocinami jest korzystne, gdyż eliminuje szereg problemów związanych z występowaniem efektu sklejanego kształtek.
- Zaletą proponowanego rozwiązania jest fakt, że jego zastosowanie w oczyszczalniach ścieków sprawi, iż nie będą one wytwarzały jak dotąd odpad, ale produkt mogący znaleźć zastosowanie jako paliwo dla energetyki.

*Badania częściowo finansowane w ramach Programu Operacyjnego  
Kapitał Ludzki Projekt Nr UDA-POKL.04.01.01-00-114/09-00.*

*Piotr Benducki jest Stypendystą projektu „DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska”  
współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

#### Literatura

1. Werle S., Wilk R. K.: A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy* 35, 1914–1919 (2010).



2. Krajowy plan gospodarki odpadami 2014. Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej „Monitor Polski”. Nr 101, poz. 1183. Warszawa 2010.
3. Cao Y., Shan S.: Energy recovery from sewage sludge. *Rocznik Ochrony Środowiska* 14, 81-95 (2012).
4. Malej J.: Odpady i osady ściekowe. Charakterystyka – unieszkodliwianie – zagospodarowanie. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004.
5. Rulkens W.: Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: Overview and assessment of the various options. *Energy & Fuels*, 22, 9-15 (2008).
6. Koziół M.: Procesy termicznego wykorzystania osadów w Polsce. W: Paliwa z odpadów. Wyzwania XXI wieku. Praca zbiorowa pod redakcją J. Biegańskiej i M. Landrata. Wydawca: KTiUZO Politechnika Śląska. Gliwice 2013.
7. Karcz H., Kantorek M., Folga K., Butmankiewicz T., Kozakiewicz A., Maciejak D.: Osady ściekowe alternatywnym paliwem dla kotłów energetycznych. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*. 6, 23-32 (2007).
8. Kubica K., Robak J.: Formowane paliwa stałe z udziałem osadów ze ścieków komunalnych - otrzymywanie i własności. W: Paliwa z odpadów t. III. Praca zbiorowa pod redakcją J. W. Wandrasza i J. Nadziakiewicza. Wydawnictwo HELION. Gliwice 2001.
9. Turkienė N., Zigmontienė A., Buinevičius K., Plečkaitienė R.: Sewage Sludge Combustion – Experimental and Theoretical Analysis. *Chemical and Process Engineering* 34(2), 203-214 (2013).
10. Wzorek M.: Wpływ składowania paliwa z biomasy drzewnej i osadów ściekowych na jego właściwości. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*. 10, 77-86 (2008).
11. Hehlmann J., Pietrasik E.: Ekologiczne paliwa formowane. Wybrane aspekty inżynierii produktu. Wydawnictwo KOMAG. Gliwice 2005.
12. Hehlmann J., Szeja W., Jodkowski M., Benducki P.: Badania nad otrzymywaniem kompozytowego biopaliwa energetycznego z udziałem pofermentacyjnej biomasy ściekowej. *Rocznik Ochrony Środowiska*. 13, 921-934 (2011).
13. Hehlmann J., Szeja W., Jodkowski M., Karwot J.: Sposób i układ urządzeń do wytwarzania biomasy energetycznej zwłaszcza z biokomponentów depozytowych. Zgłoszenie patentowe: P-392220 z dn. 24.08.2010.
14. Bień J., Wystalska K.: Przekształcanie osadów ściekowych w procesach termicznych. Wydawnictwo Seidel – Przywecki. Warszawa 2009.
15. Podedworna J., Umiejewska K.: Technologia osadów ściekowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2008.
16. Emerging technologies for biosolids management. Office of Wastewater Management U.S. Environmental Protection Agency Washington, D.C., EPA 832-R-06-005 (2007).
17. Broszura zamieszczona na stronie internetowej:  
<http://www.microtekprocesses.com/Documents/Dryer%20Brochure.pdf>, dostęp 15.10.2013.
18. Filipiak J., Przybyła C.: Wykorzystanie energii słonecznej w procesie suszenia osadów ściekowych. *Rocznik Ochrony Środowiska*. 13, 1783-1794 (2011).
19. Ohm T.I., Chae J.S., Kim J.E., Kim H.K., Moon S.H.: A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology. *Journal of Hazardous Materials* 168, 445–450 (2009).
20. Silva D.P., Rudolph V., Taranto O.P.: The drying of sewage sludge by immersion frying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 22(02), 271-276 (2005).
21. Navaee-Ardeh S., Bertrand F., Stuart P.R.: Key variables analysis of a novel continuous biodrying process for drying mixed sludge. *Bioresource Technology* 101, 3379-3387 (2010).
22. Zhao L., Gu W.M., He P.J., Shao L.M.: Biodegradation potential of bulking agents used in sludge bio-drying and their contribution to bio-generated heat. *Water Research* 45, 2322-2330 (2011).

23. Ruiz T., Wisniewski C.: Correlation between dewatering and hydro-textural characteristics of sewage sludge during drying. *Separation and Purification Technology* 61, 204–210 (2008).
  24. Font R., Gomez – Rico M.F., Fullana A.: Skin effect in the heat and mass transfer model for sewage sludge drying. *Separation and Purification Technology* 77, 146–161 (2011).
  25. Fukas – Płonka L., Janik M.: Plusy i minusy suszenia osadów ściekowych. *Forum Eksploatatora*. 5, 25-27 (2008).
  26. Wypler M., Kopiec R.: Doświadczenia z eksploatacji suszarni osadów ściekowych oczyszczalni Orzegów w Rudzie Śląskiej. Materiały z konferencji „Metody zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych”. Katowice, 19.03.2012.
  27. Léonard A., Meneses E., Le Trong E., Salmon T., Marchot P., Teye D., Crine M.: Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed. *Water Research* 42, 2671-2677 (2008).
  28. Głogowski Z.: Doświadczenia eksploatacyjne z suszarni osadów ściekowych w Radomiu. Materiał zamieszczony na stronie internetowej: [http://odpady.nfosigw.gov.pl/gfx/odpady/userfiles/files/spotkanie\\_06/6\\_glogowski.pdf](http://odpady.nfosigw.gov.pl/gfx/odpady/userfiles/files/spotkanie_06/6_glogowski.pdf), dostęp 15.10.2013.
  29. Romdhana M.H., Lecomte D., Ladevie B., Sablayrolles C.: Monitoring of pathogenic microorganisms contamination during heat drying process of sewage sludge. *Process Safety and Environmental Protection*. 87, 377-386 (2009).
  30. Deng W.Y., Yan J.H., Li X.D., Wang F., Zhu X.W., Lu S.Y. Cen K.F.: Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process. *Journal of Hazardous Materials* 162, 186–192 (2009).
  31. Środa K., Kijo – Kleczkowska A., Otwinowski H.: Termiczne unieszkodliwianie osadów ściekowych. *Inżynieria Ekologiczna*. 12, 67-81 (2012).
-