
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 18
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus
ISSN 1899-3230

Rok VII

Warszawa–Opole 2014

MALGORZATA WZOREK*
ANNA KRÓL**

Niskotemperaturowe suszenie paliw z osadów ściekowych z wykorzystaniem energii słonecznej

Słowa kluczowe: komunalne osady ściekowe, paliwa z odpadów, suszenie słoneczne.

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące opracowania warunków niskotemperaturowego suszenia paliw z osadów ściekowych z wykorzystaniem energii słonecznej. Badaniom poddano trzy rodzaje paliw wytworzonych z osadów ściekowych i innych odpadów, takich jak paliwo z osadów i pozaklasowych sortymentów węgla (paliwo PBS), paliwo z osadów i mączki mięsno-kostnej (paliwo PBM) oraz paliwo z osadów i trocin (paliwo PBT). Prace badawcze prowadzono w suszarni słonecznej o powierzchni 15 m², wyposażonej w system mieszania oraz system wymiany i cyrkulacji powietrza. Eksperymenty prowadzono w różnych warunkach pogodowych, w okresie wiosennym, letnim oraz jesiennym i w zmiennych warunkach procesowych, tj. różnej grubości warstwy suszonych osadów i intensywności mieszania. Proces suszenia prowadzono do uzyskania końcowej zawartości wilgoci w paliwach poniżej 10%.

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie energii słonecznej do procesów suszenia staje się coraz bardziej popularne. W literaturze można znaleźć wiele informacji o pracach badawczych związanych z jej wykorzystaniem do suszenia drewna i płodów rolnych [1–3], komunalnych osadów ściekowych [4–6], osadów z zakładów spożywczych o dużej zawartości białek i tłuszczu [7] oraz osadów z przemysłu farmaceutycznego [8].

Technologie suszenia z wykorzystaniem energii słonecznej wykorzystują efekt cieplarniany, powstający wewnątrz obiektu pokrytego powłoką przepuszczającą światło słoneczne. Szybkość suszenia uzależniona jest od wielu czynników, w tym od warunków pogodowych: temperatury i wilgotności względnej powie-

* Dr inż., Politechnika Opole, m.wzorek@po.opole.pl

** Dr hab. inż., prof. PO, Politechnika Opolska, a.krol@po.opole.pl

trza, natężenia promieniowania słonecznego, od prędkości i kierunku przepływu nośnika ciepła, wielkości odkrytej powierzchni materiału suszonego, grubości złoża itp. [5].

Niewątpliwie bardzo ważnym czynnikiem w suszeniu słonecznym jest natężenie promieniowania słonecznego, które stanowi podstawowe źródło energii cieplnej dostarczanej do suszonego materiału. Warunki meteorologiczne w Polsce sprzyjają wykorzystaniu potencjału energii słonecznej. W strategii dotyczącej odnawialnych źródeł energii założono nawet, że techniczny potencjał wykorzystania energii promieniowania słonecznego wynosi 1340 PJ [9]. W naszej szerokości geograficznej roczna średnia wartość sumy nasłonecznienia wynosi ok. 1600 godzin, a roczna gęstość promieniowania słonecznego, na każdy metr kwadratowy płaskiej powierzchni, zawiera się w przedziale 956–1100 kWh/m² [10].

Dodatkowym czynnikiem zwiększającym kontakt materiału suszonego z medium suszącym jest system mieszania. Przy niskotemperaturowym suszeniu samych osadów ściekowych stosowane są różne urządzenia mieszające, takie jak: przewracarki łańcuchowe, nawowe, elektryczne krety, a także stosuje się pryzmowy system przesypywania [11–12].

W ostatnich latach, ze względu na coraz szersze wykorzystanie paliw z odpadów, biomasy oraz komunalnych osadów ściekowych w procesach spalania i współspalania z węglem, obserwuje się wzrost zainteresowania suszeniem jako tematem badawczym, co potwierdzają liczne prace z tego zakresu. Badacze zajmujący się suszeniem rozpatrują zarówno procesy suszenia wysokotemperaturowego [13–15], suszenia biologicznego [16–18] oraz możliwości wykorzystania w procesie suszenia alternatywnych źródeł energii [19–21]. Suszenie jest często stosowane w procesach przetwarzania odpadów w paliwa. Dzięki obniżeniu zawartości wilgoci uzyskuje się poprawę właściwości energetycznych i fizycznych paliwa, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia procesu spalania, a dla odpadów organicznych suszenie stosowane jest także w celach higienizacyjnych, niemniej jednak zawsze podnosi to koszty produkcji paliw [22–23].

Jedną z możliwości energetycznego wykorzystania komunalnych osadów ściekowych w procesach współspalania z węglem jest ich zastosowanie jako składnika paliwa alternatywnego. Technologia produkcji paliw z komunalnych osadów ściekowych polega na wstępnym ich mieszaniu, w ściśle ustalonych proporcjach, z innymi odpadami, a następnie poddawaniu ich formowaniu w granulaty oraz suszeniu w suszarni bębnowej [24]. Odpadami, które mogą być komponentami takich paliw są odpady powstające w czasie mechanicznej obróbki drewna, tj. trociny, wióry (paliwo PBT), produkty z przetwarzania odpadów pochodzenia zwierzęcego: mączki mięsne i mięsno-kostne (paliwo PBM) oraz pozaklasowe sortymenty węgla (paliwo PBS) [25].

W związku z wysoką energochłonnością procesu suszenia paliw z osadów w warunkach wysokotemperaturowych podjęto się opracowania nowej technologii ich

suszenia z wykorzystaniem energii słonecznej, co wymagało zaprojektowania systemu mieszania oraz określenia warunków prowadzenia procesu.

2. Metodologia badawcza

Badania własne nad niskotemperaturowym suszeniem paliw z osadów, z wykorzystaniem energii solarnej przeprowadzono w suszarni o powierzchni 15 m². Szkielet suszarni pokryto poliwęglanem komórkowym o grubości 5 mm. W obiekcie zainstalowano dwa automatyczne czujniki rejestrujące temperaturę i wilgotność powietrza. Suszarnię słoneczną wyposażono także w system wentylatorów złożony z 6 wentylatorów nadmuchowych (wydajność 824 m³/h) i 2 wentylatorów wyciągowych (wydajność 95 m³/h).

Wentylatory nadmuchowe zamontowane były w dwóch rzędach w górnej części suszarni, natomiast wentylatory wyciągowe w ścianie frontowej. Rolą wentylatorów nadmuchowych jest cyrkulacja powietrza wewnątrz suszarni w celu intensyfikacji wymiany masy i ciepła. Natomiast zadaniem wentylatorów wyciągowych było usuwanie zawilgoconego powietrza z wnętrza obiektu do otoczenia. Poziom wilgotności powietrza w suszarni kontrolowano higrometrem. Przy przekroczeniu założonej (95%) wartości wilgotności względnej następowało otwarcie klap wentylacyjnych oraz uruchomienie wentylatorów wyciągowych.

W suszarni słonecznej umieszczono urządzenie mieszające – wzór użytkowy [26]. Urządzenie to składa się z ruchomej belki, na której umieszczono 15 pionowych mieszadeł łopowych, tak ukształtowanych, aby unosić suszony materiał w górę. Mieszadła ustawione są w dwóch rzędach, aby cała przestrzeń robocza była objęta ich zasięgiem. Prędkość obrotowa mieszadeł pionowych, jak i prędkość przesuwu belki jezdnej była regulowana za pomocą przemienników częstotliwości.

Badania słonecznego suszenia paliw z osadów prowadzono w różnych warunkach pogodowych, w okresie wiosennym, letnim oraz jesiennym. Bazując na doświadczeniach istniejących suszarni osadów ściekowych [1, 3–4, 6–7], w których w okresie zimowym suszenie nie jest realizowane, z suszenia w tym czasie zrezygnowano.

Suszeniu poddano paliwa o granulacji 15, 25 i 35 mm, wytworzone w granulatorze bębnowym o następującym składzie:

- paliwo PBS – 60% wag. osady ściekowe, 34% wag. muł węglowy, 6% wag. wapno palone,
- paliwo PBM – 75% wag. osady ściekowe, 24% wag. mączka mięsno-kostna, 1% wag. wapno palone,
- paliwo PBT – 80% wag. osady ściekowe, 19% wag. trociny, 1% wag. wapno palone.

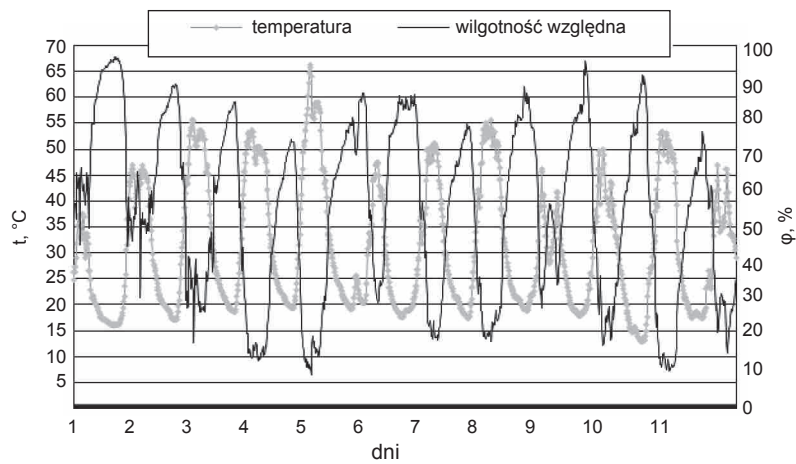
W okresie letnim, najkorzystniejszym do suszenia słonecznego, aby określić optymalne warunki procesu, badania prowadzono przy różnej grubości warstwy suszonych paliw 5, 10 i 20 cm, stosując zmienną intensywność mieszania, a mianowicie: wariant I – bez mieszania, wariant II – 3 razy/dobę, wariant III – mieszanie 5 razy/dobę.

Natomiast badania w okresie jesiennym i wiosennym prowadzono dla paliw o granulacji 35 mm, ustalonej stałej pracy urządzenia mieszającego z 3-krotnym przesuwem belki wzdłuż suszarni w ciągu jednego dnia suszenia oraz częstości obrotowej mieszadeł pionowych – 15 obr/min.

3. Analiza wyników badań

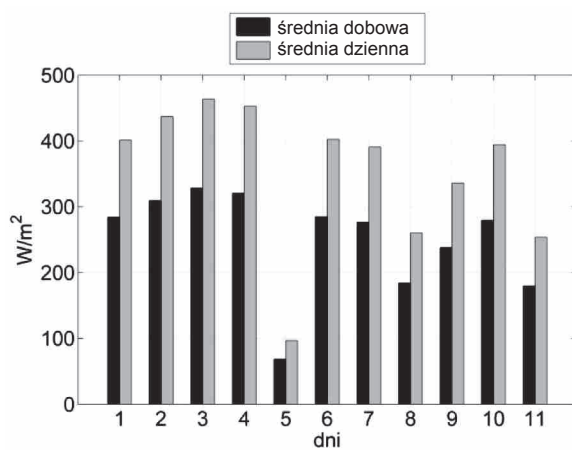
Wyniki badań suszenia paliw z osadów z wykorzystaniem energii solarnej, prowadzonych w różnych warunkach pogodowych, przedstawiono na rycinach 1–12.

Seria badań prowadzonych w okresie letnim odzwierciedla najbardziej korzystne warunki z punktu widzenia suszenia słonecznego. Średnia dobowa temperatura powietrza w suszarni dla tego okresu to 31°C, natomiast w godzinach 6–20⁰⁰ średnia temperatura wynosiła 41°C, a w nocy w godzinach od 20–6⁰⁰ – 21°C. Średnia wartość dobowa natężenia promieniowania całkowitego dla tego okresu wynosiła 241 W/m², a dzienna – 340 W/m². Wartości temperatur i wilgotności względnej powietrza w suszarni słonecznej w okresie letnim przedstawiono na rycinie 1, a natężenie promieniowania całkowitego na rycinie 2.



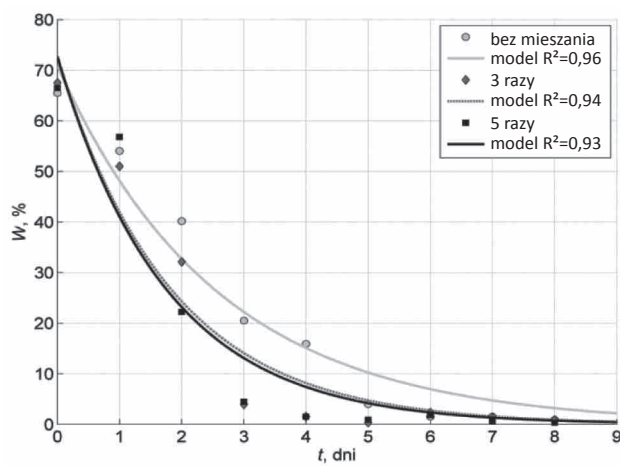
Źródło: Ryc. 1–12 opracowanie własne.

Ryc. 1. Temperatura i wilgotność względna powietrza w suszarni słonecznej w okresie letnim

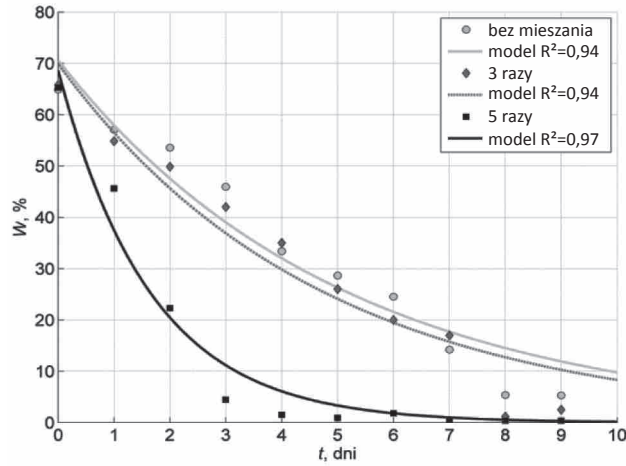


Ryc. 2. Natężenie promieniowania całkowitego w okresie letnim

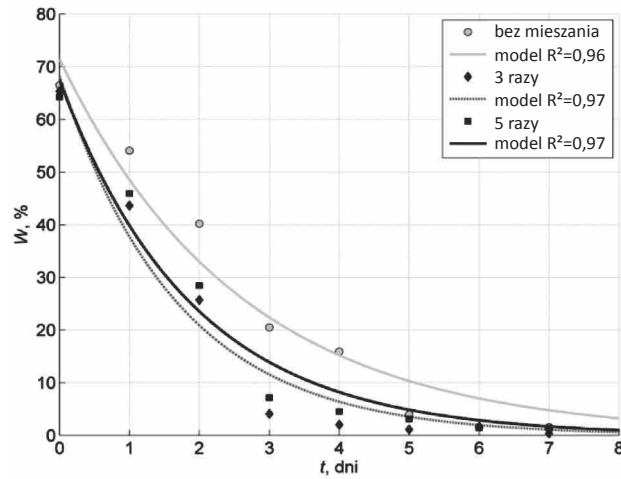
Dla przykładu na rycinach 3–6 pokazano przebieg procesu suszenia paliwa PBT o granulacji 15 mm i 35 mm w warstwie 5 cm i 20 mm w warunkach letnich.



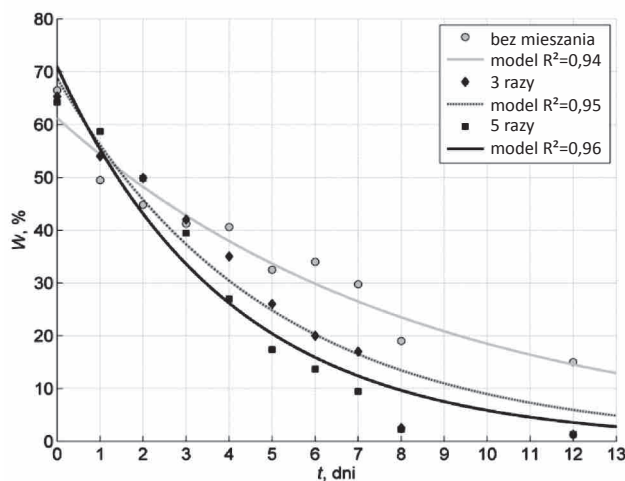
Ryc. 3. Przebieg zmian wilgotności paliwa PBT o granulacji 15 mm suszonych w warstwie 5 cm w warunkach letnich



Ryc. 4. Przebieg zmian wilgotności paliwa PBT o granulacji 15 mm suszonych w warstwie 20 cm w warunkach letnich



Ryc. 5. Przebieg zmian wilgotności paliwa PBT o granulacji 35 mm suszonych w warstwie 5 cm w warunkach letnich

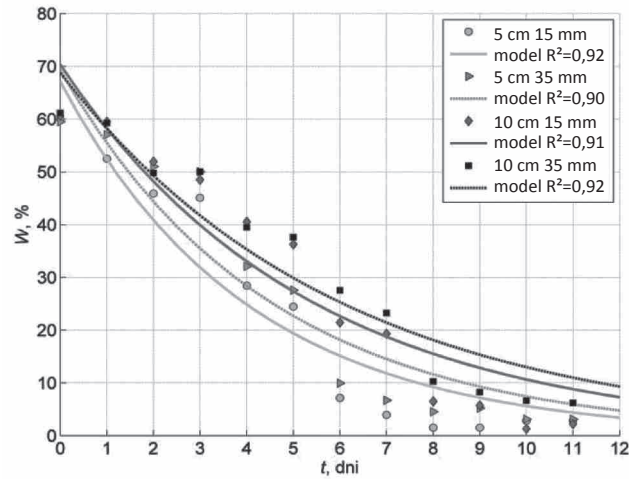


Ryc. 6. Przebieg zmian wilgotności paliwa PBT o granulacji 35 mm suszonych w warstwie 20 mm w warunkach letnich

Analizując krzywe suszenia można stwierdzić, że na szybkość suszenia duży wpływ ma mieszanie. Dla wszystkich trzech paliw suszonych w warstwie o grubości 5 cm, przy zastosowaniu mieszania, 10% wilgotność otrzymano po 3 dniach. Bez mieszania osiągnięcie tej samej wilgotności wymagało 5 dni.

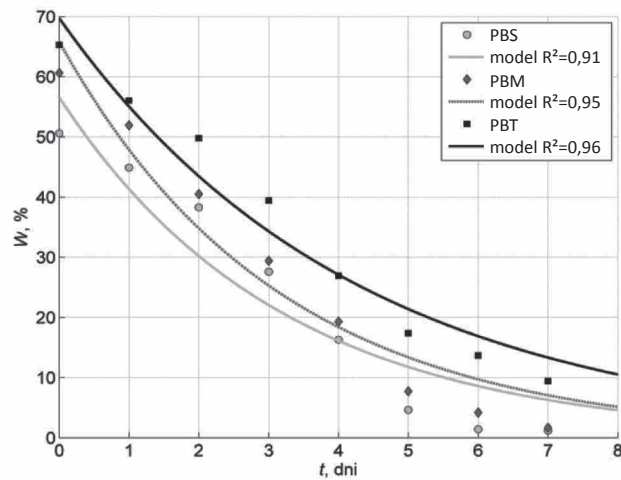
Podczas suszenia w warstwie grubszej – 20 cm, zauważono różnice w szybkości suszenia poszczególnych paliw. Czas osiągnięcia 10% wilgotności przez paliwo PBT o granulacji 15 mm wyniósł 8 dni, a dla paliw PBS i PBM – 7 dni. Dla wszystkich paliw o różnych granulacjach zastosowanie mieszania skracało czas suszenia średnio o 5 dni.

Zauważono także, że wielkość granul ma znacznie mniejszy wpływ na czas suszenia niż grubość warstwy, w której suszyło się paliwo (ryc. 7).



Ryc. 7. Przebieg zmian wilgotności paliw z osadów o granulacji 15 i 35 mm suszonych w warstwie 5 i 10 cm w warunkach letnich

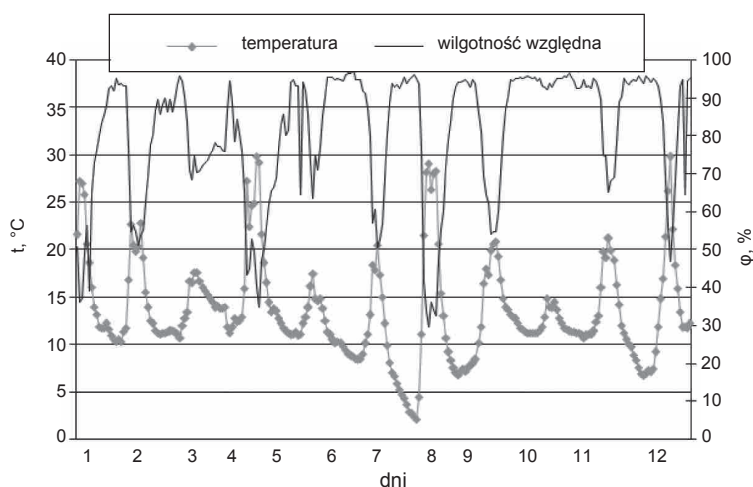
Przebieg zmian wilgotności wszystkich paliw o granulacji 35 mm suszonych w warstwie 10 cm, z 5-krotnym mieszaniem w ciągu dnia pokazano na rycinie 8.



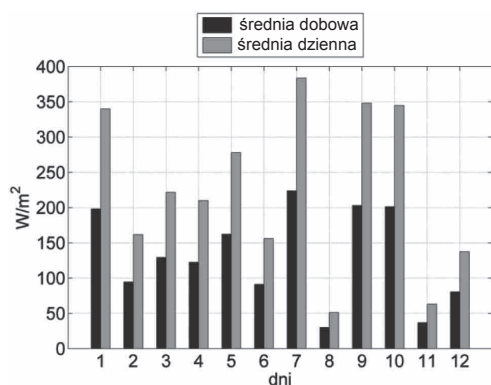
Ryc. 8. Przebieg zmian wilgotności paliw z osadów o granulacji 35 mm suszonych w warstwie 10 cm w warunkach letnich

Analiza ryciny 8 pozwala stwierdzić, że podczas suszenia paliw o granulacji 35 mm w warunkach letnich osiągnięcie 10% wilgotności przez paliwa PBS i PBM wymagała 6 dni, a przez paliwo PBT – 8 dni.

Wyniki badań wykonanych w warunkach jesiennych (wrzesień/październik) przedstawiono na rycinach 9–12. Wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza dla tego okresu przedstawiono na rycinie 9, a natężenie promieniowania całkowitego na rycinie 10. Średnia temperatura dzienna w suszarni w okresie badawczym wynosiła 17°C , a w godzinach nocnych 10°C . W tym czasie występowały opady deszczu, stąd tak wysoka średnia wilgotność względna powietrza atmosferycznego – 80%. Średnia wartość dobowa natężenia promieniowania całkowitego dla okresu jesiennego wynosiła 135 W/m^2 , a dzienna 231 W/m^2 .



Ryc. 9. Temperatura i wilgotność względna powietrza w suszarni słonecznej podczas badań w okresie jesiennym

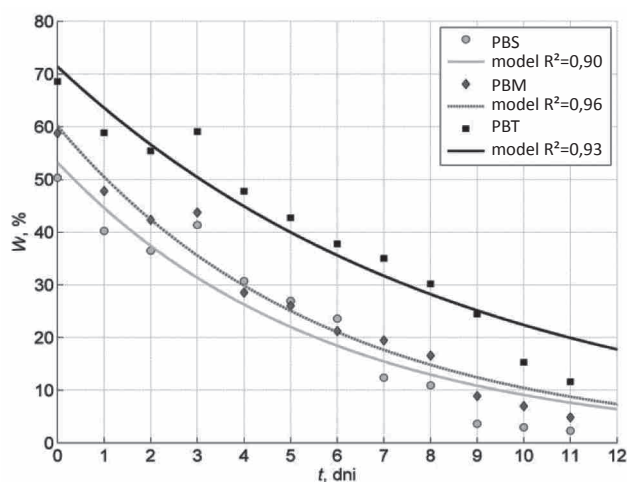


Ryc. 10. Natężenie promieniowania całkowitego w okresie jesiennym

Krzywe suszenia w warunkach jesiennych (ryc. 11) mają podobny przebieg jak krzywe uzyskane w warunkach letnich. Różnice dotyczą czasu osiągnięcia 10% wilgotności paliw, który w tym przypadku wyniósł odpowiednio dla paliwa PBS – 9 dni, PBM – 10 i PBT ponad 11 dni.

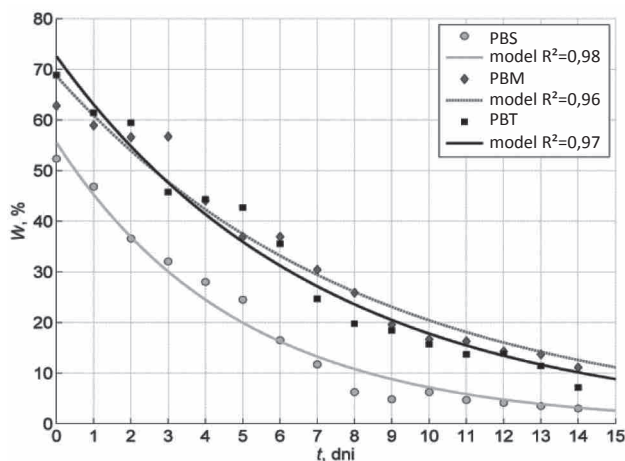
Okres suszenia w warunkach wiosennych charakteryzował się najniższą temperaturą powietrza (w okresie tym notowano nawet temperatury ujemne) i najmniejszym natężeniem promieniowania całkowitego.

Średnia temperatura powietrza w suszarni dla okresu wiosennego to 12°C, a jego wilgotność względna 69%. Średnia wartość dobowa natężenia promieniowania całkowitego dla okresu badawczego wynosiła 86 W/m², a dzienna 171 W/m².



Ryc. 11. Przebieg zmian wilgotności paliw z osadów o granulacji 35 mm suszonych w warstwie 10 cm w warunkach jesiennych

Efekty suszenia uzyskane w serii wiosennej (marzec/kwiecień) przedstawiono na rycinie 12.



Ryc. 12. Przebieg zmian wilgotności paliw z osadów o granulacji 35 mm suszonych w warstwie 10 cm w warunkach wiosennych

Tak jak w poprzednich przypadkach, uzyskano najszybszy ubytek wilgoci dla paliwa PBS. W porównaniu do okresu jesiennego, w okresie wiosennym suszenie paliw wydłużyło się. Wartości wilgotności poniżej 10% dla paliwa PBS uzyskano po 8 dniach, dla paliwa PBM i PBT po przekroczeniu 14 dni.

Podobne wyniki uzyskuje się przy biologicznym suszeniu odpadów. Według Velisa [17], 20% zawartość wilgotności w odpadach uzyskuje się w ciągu 7–15 dni. Okres suszenia osadów ściekowych również może wynosić od kilku do kilkunastu dni.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań określono warunki prowadzenia procesu suszenia paliw z osadów z wykorzystaniem energii słonecznej, a w szczególności grubość warstwy paliw oraz sposób i intensywność mieszania. Stwierdzono, że wielkość granul tylko nieznacznie wpływa na szybkość suszenia. Ustalono, że korzystnie jest suszyć paliwa w warstwie o grubości 10 cm.

Można oczekiwać, że przy tej grubości warstwy, w okresie wiosennym i jesiennym, paliwa PBS i PBM osiągną wilgotność poniżej 10% po 8 dniach, a paliwo PBT po 14 dniach. W warunkach letnich ten sam efekt uzyskuje się dla wszystkich paliw średnio po 4 dniach. Suszenie paliw z osadów w okresie zimowym, tak jak wykazuje praktyka dla suszenia osadów ściekowych z wykorzystaniem energii słonecznej, jest możliwe jedynie przy zastosowaniu dodatkowego źródła ciepła wspomagającego pracę suszarni, np. ciepła odpadowego z procesów przemysłowych lub wykorzystania do tego celu biogazu powstającego w trakcie oczyszczania ścieków w oczyszczalni.

Opracowany system mieszania, wraz z dobranymi parametrami pracy urządzenia (częstością obrotów mieszadeł pionowych i częstością mieszania), nie wpływa negatywnie na strukturę granulatu. Mieszanie nie tylko przyspiesza proces, ale także w początkowym okresie suszenia, kiedy to granulaty mają jeszcze konsystencję plastyczną, zapobiega sklejanemu się i zbijaniu granulatów w większe aglomeraty.

Podsumowując można stwierdzić, że na podstawie przeprowadzonych badań opracowano oryginalny sposób suszenia paliw z osadów ściekowych i innych odpadów, który może być z powodzeniem stosowany w liniach technologicznych instalacji przemysłowych przez 8 miesięcy w roku. Metoda niskotemperaturowego suszenia osadów ściekowych może być wykorzystana w oczyszczalniach ścieków, które na własnym terenie mogą przetwarzać osady w paliwa, a w związku z wykorzystaniem energii słonecznej nie będą musiały ponosić kosztów eksploatacyjnych związanych z dostarczeniem ciepła, tak jak jest to w przypadku suszenia termicznego. Wytwarzane paliwa z osadów mogą być sto-

sowane w procesie współspalania z węglem kamiennym np. w lokalnych elektrociepłowniach lub w procesie wypalania klinkieru cementowego.

Literatura

- [1] Ramana M.V., *A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2012, Vol. 16, s. 1061–1073.
- [2] Helwa N.H., Khater H.A., Enayet M.N., Hashish M.I., *Experimental evaluation of solar kiln for drying wood*, „Drying Technology” 2004, Vol. 22, No. 4, s. 703–717.
- [3] Campan M., Marinescu I., *Solar systems for wood drying*, „Environmental Engineering and Management Journal” 2011, Vol. 10, No. 8, s. 1069–1076.
- [4] Bennamoun L., *Solar drying of wastewater sludge: A review*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2012, Vol. 16, s. 1061–1073.
- [5] Bień J.D., Bień B., Nowak W., *Możliwości słonecznego suszenia osadów ściekowych w świetle polskich doświadczeń*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska” 2008, t. 11, nr 1, s. 45–54.
- [6] Shannon R., Nathan S., Luboschik V., *Solar Sludge Drying*, „Water Works” 2004, December, s. 38–43.
- [7] Trojanowska K., *Solarne suszarnie osadów ściekowych*, „Przegląd Komunalny” 2012, nr 4, s. 51–55.
- [8] Mehrdadi N., Joshi S.G., Nasrabadi T., Hoveidi H., *Application of Solar Energy for Drying of Sludge from Pharmaceutical Industrial Waste Water and Probable Reuse*, „International Journal of Environmental Research” 2007, No. 1, s. 42–48.
- [9] www.oze.opole.pl (10.09.2014).
- [10] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#> (10.09.2014).
- [11] Wzorek M., *Technologie niskotemperaturowego suszenia osadów ściekowych*, [w:] *Kompostowanie i mechaniczno-biologiczne przetwarzanie odpadów*, red. G. Siemiątkowski, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2011, s. 117–126.
- [12] Wzorek M., Głowacki T., Troniewski L., *Determination of circumstances of drying waste sludge with solar energy*, [w:] *Proceedings of 18 the International Congress of Chemical and Process Engineering*, Praha 2008, s. 1895.
- [13] Vaxelaire J., Bongiovanni M., Mousques P., Puiggali R., *Thermal drying of residual sludge*, „Water Research” 2000, Vol. 34, No. 17, s. 4318–4323.
- [14] Bancelos M.S., Jesus C.D.F., Freire J.T., *Modeling and Drying of Carton Packaging Waste in a Rotary Dryer*, „Drying Technology” 2009, Vol. 27, No. 9, s. 927–937.
- [15] Lermana P., Wennberg O., *Experimental method for designing a biomass bed dryer*, „Biomass and Bioenergy” 2011, Vol. 35, s. 31–39.
- [16] Tambone F., Scaglia B., Scotti S., Adani F., *Effects of biodrying process on municipal solid waste properties*, „Bioresource Technology” 2011, Vol. 102, s. 7443–7450.
- [17] Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T., *Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: a review of process science and engineering*, „Bioresource Technology” 2009, Vol. 100, No. 11, s. 2747–2761.

- [18] Krzystek L., Zawadzka A., Ledakowicz S., *Biologiczne suszenie osadów ściekowych i organicznej frakcji miejskich odpadów stałych metod kompostowania w reaktorze okresowym*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2009, nr 3, s. 65–66.
- [19] Jukka-Pekka S., Pekka A., *Improving the power to heat ratio in CHP plants by means of a biofuel multistage drying system*, „Applied Thermal” 2002, Vol. 22, s. 1175–1180.
- [20] Krawczyk P., Badyda K., *Modeling of thermal and flow processes in a solar wastewater sludge dryer with supplementary heat supply from external sources*, „Journal of Power Technologies” 2011, Vol. 91, s. 37–40.
- [21] Flaga-Maryńczyk A., Schnotale J., *Sludge drying in CO₂ heat pump dryer*, [w:] *Proceedings of the 23rd International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Widener University, Philadelphia 2008, s. 522–531.
- [22] Economopoulos A.P., *Technoeconomic aspects of alternative municipal solid wastes treatment methods*, „Waste Management” 2010, Vol. 30, s. 707–715.
- [23] Caputo A.C., Pelagagge P.M., *RDF production plants I. Design and costs*, „Applied Thermal Engineering” 2002, Vol. 22, s. 423–437.
- [24] Wzorek M., *Characterization of the properties of alternative fuels containing sewage sludge*, „Fuel Processing Technology” 2012, No. 104, s. 80–89.
- [25] Wzorek M., Troniewski L., Duda J., Sposób wytwarzania paliwa z osadów z oczyszczalni ścieków i układ do wytwarzania paliwa z osadów z oczyszczalni ścieków, Patent RP 36 35 57.
- [26] Wzorek M., Głowacki T., Urządzenie do mieszania, zwłaszcza osadów ściekowych, Wzór użytkowy nr 67 303 Y1.

MAŁGORZATA WZOREK
ANNA KRÓL

LOW-TEMPERATURE DRYING OF FUEL FROM SEWAGE SLUDGE
USING SOLAR ENERGY

Keywords: sewage sludge, fuels from waste, solar drying.

The paper presents results of research on the development of low-temperature drying conditions fuels from sewage sludge using solar energy. The study involved three types of fuels produced from sewage sludge and other waste, ie. fuel from sewage and assortments coal (fuel PBS), fuel sludge and meat and bone meal (PBM fuel) and fuel sludge and sawdust (fuel PBT). The research work carried out in the solar drying area of 15 m² equipped the mixing system and a system of exchange and circulation of air. Experiments were carried out in different weather conditions in the spring, summer and autumn and variable process conditions, ie, varying thickness of the layer of dried sludge and intensity of mixing. The drying process was continued until a final moisture content in the fuel was less than 10%.