



## Wykorzystanie energii słonecznej w procesie suszenia osadów ściekowych

*Janusz Filipiak, Czesław Przybyła*  
*Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań*

### 1. Wstęp

W obliczu zagrożeń związanych z globalnymi zmianami klimatycznymi Unia Europejska coraz większy nacisk kładzie na wykorzystywanie w krajach członkowskich odnawialnych źródeł energii. Jednym z nich mogą być powstające w procesie oczyszczania wód osady ściekowe. Ich przydatność potwierdza relatywnie wysokie ciepło spalania suchej substancji organicznej zawartej w osadach wynoszące 22 MJ/kg s.m. (suchej masy) (węgiel kamienny 25 MJ/kg s.m.). Jednak także w przypadku pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł niezmiernie ważny pozostaje aspekt ekonomiczny danej inwestycji z tego względu warto zastanowić się nad najbardziej uzasadnionym w danych warunkach sposobem suszenia osadów ściekowych na oczyszczalniach. Poprzez wykorzystanie darmowych źródeł energii takich jak: słońce, wiatr, ciepłe ścieki czy osady ściekowe (biomasa) można znacząco ograniczyć ewentualne zapotrzebowanie na paliwa kopalne. Na uwagę zasługuje zwłaszcza technologia słonecznego suszenia osadów ściekowych, która zarówno

w procesie inwestycyjnym, jak i w eksploatacji jest tańsza niż suszenie w suszarniach wykorzystujących energię konwencjonalną.

Oczyszczanie ścieków to produkcja osadów, w których koncentrują się substancje doprowadzone przez ścieki lub selektywnie wydzielone podczas procesu ich oczyszczania. W Polsce najbardziej rozpowszechnioną metodą zagospodarowania osadów ściekowych na obszarach wiejskich jest ich rolnicze wykorzystanie. Przewiduje się natomiast, że docelowym działaniem będzie spalanie tychże osadów w spalarniach, które będą budowane w Polsce w kolejnych latach. Zarówno w programach rolniczego zagospodarowania osadów ściekowych, jak i w energetycznym wykorzystaniu osadów może być wykorzystane solarne ich suszenie, które pozwala na przyspieszenie procesu technologicznego przygotowania osadów i ich zastosowania w rolnictwie, czy też wzrostu energii produktu, jakim jest wysuszony do określonej zawartości suchej masy osadów ściekowych.

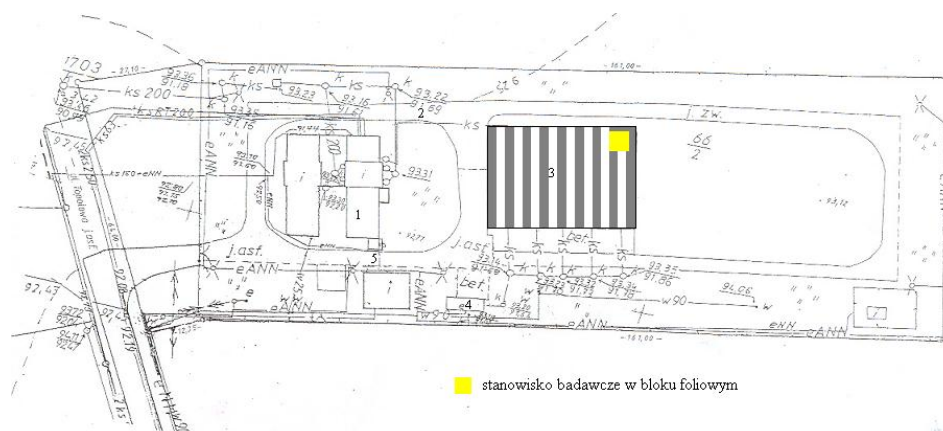
## 2. Cel i metodyka badań

Celem pracy jest sprawdzenie, czy w rzeczywistych warunkach klimatycznych Wielkopolski odwodnione wstępnie na prasie taśmowej osady ściekowe umieszczone w bloku foliowym poprzez solarne osuszenie osadów ściekowych będą w okresie wegetacyjnym ulegały zmianie uwilgotnienia od początkowej wartości 86,4% do 35÷50%, co pozwoli na ich rolnicze wykorzystanie lub w procesie spalania bądź współspalania.

Prowadzone badania mają określić możliwości wysuszenia osadów ściekowych w bloku foliowym, przy naturalnym przepływie powietrza w okresie letnim (62 dni) nie stosując urządzeń mechanicznych do wentylowania tunelu i przegarniania osadów z wykorzystaniem tylko energii odnawialnej w postaci promieniowania słonecznego. Badaniu poddano osady po wstępnym odwodnieniu na prasie taśmowej o różnej miąższości (30 cm, 40 cm i 50 cm o zawartości 13,6% s.m.).

Badania osadów ściekowych przeprowadzono w bloku foliowym na oczyszczalni ścieków w Bytkowie, w gminie Rokietnica, w powiecie poznańskim jako jednostce reprezentatywnej dla oczyszczalni działających na obszarach wiejskich Wielkopolski. Osady ściekowe po odwodnieniu na prasie taśmowej zostały zmagazynowane w bloku foliowym na przygotowanych 3 poletkach o wymiarach 2x2 m i miąższości 0,3 m,

0,4 m i 0,5 m oraz w 9 skrzyniach o miąższości 0,2 m, 0,25 m i 0,3 m (rys. 1). Sprawdzenie możliwości zastosowania solarnego suszenia osadów ściekowych na przykładzie oczyszczalni ścieków w Bytkowie pozwoli w przyszłości przenieść doświadczenia z wykorzystaniem energii słonecznej na inne podobne obiekty w Wielkopolsce, a nawet całym kraju. W zależności od lokalnych potrzeb danej oczyszczalni rozstrzygnięta będzie musiała zostać tylko kwestia zastosowania urządzeń przegarniających (ich wielkości) poprawiających skuteczność procesu osuszania.



**Rys. 1.** Plan oczyszczalni w Bytkowie: 1 – oczyszczalnia, 2 – rurociąg dosyłowy, 3 – blok foliowy, 4 – punkt zlewczy, 5 – rurociąg tłoczny z punktu zlewczego do oczyszczalni ścieków dowożonych i filtratu

**Fig. 1.** Plan of sewage treatment plant in Bytkowo: 1 – treatment plant, 2 – supplying pipeline, 3 – foil tunnel, 4 – inflow point, 5 – pressure pipeline from inflow point to sludge treatment installation and filtrate

Saldo promieniowania obliczono z pomierzonych strumieni energii promieniowania w zakresie promieniowania długo- i krótkofalowego z podziałem na energię przychodzącą i wychodzącą z danej powierzchni. Pomiaru strumieni dokonano z zastosowaniem Pyrrometru (Adolf Thies GmbH & Co.KG, Göttingen, Niemcy) z 10-minutowym interwałem. W tym samym odstępie czasowym dokonywano pomiaru temperatury i wilgotności powietrza przy użyciu dwóch termohigrometrów HMP90Y (Vaisala Helsinki, Finlandia) na wysokościach + 15 cm i + 65 cm ponad wierzchnią warstwę osadów ściekowych. Pomiar strumienia ciepła glebowego został wykonany za pomocą płytki glebowej HFP01SC (Huk-

seflux Thermal Sensor, Delft, Holandia), a pomiar temperatury w glebie za pomocą 6 termometrów glebowych 107 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA). Pomiary temperatury w próbach osadów ściekowych o miąższości 30, 40 i 50 cm prowadzono w warstwie górnej osadów (15 cm poniżej wierzchu osadów osuszanych) oraz w warstwie dolnej (5 cm od dna). Rejestrację pomiarów wykonano rejestratorem angielskim data-logger CR 1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA). Wymienione pomiary prowadzone były pomiędzy 28.07. a 28.09.2009.

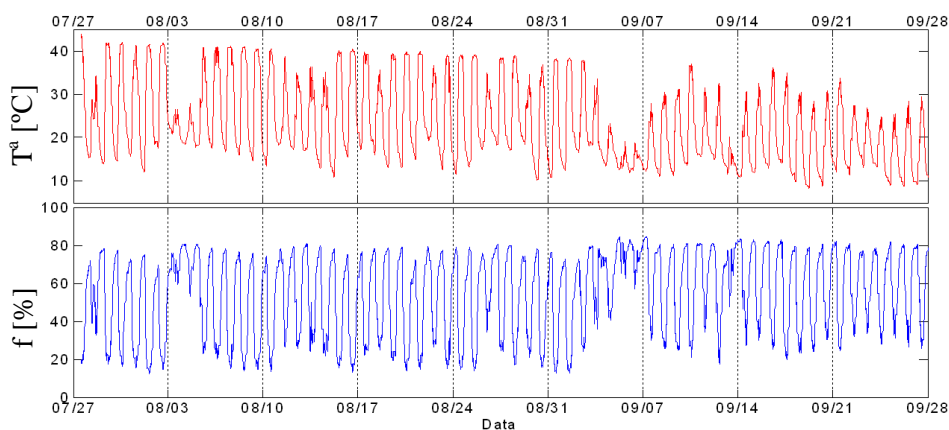
Dodatkowo określono wartość opałową osadów po wstępnym odwodnieniu na prasie taśmowej oraz po dwóch miesiącach suszenia osadów przez promienie słoneczne. Pozwoliło to na ocenę możliwości wykorzystania osuszonych w suszarniach słonecznych osadów ściekowych jako lokalnego źródła energii odnawialnej.

Osady ściekowe zostały przebadane jako substancja lignocelulozowo-minerala pod względem prezentowanego poziomu wartości ciepła spalania, wartości opałowej, wilgotności oraz zawartości popiołu. Badania przeprowadzono w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Zakładzie Ochrony Środowiska w Poznaniu. Oznaczenie wykonane zostało na hermetycznie zamkniętych próbach z 28.07.2009 – osady ściekowe po odwodnieniu na prasie taśmowej na początku badań osuszania promieniami słonecznymi osadów ściekowych o początkowej zawartości suchej masy wynoszącej 13,6% oraz 28.09.2009 – osady po zakończeniu osuszania. Średnie ciepło spalania i wartość opałowa prób zostały określone na podstawie normy PN81/G-04513 przy pomocy certyfikowanej bomby kalorymetrycznej (numer 6418, l.dz.92/AK/2009 z dnia 16.04.2009 wydanej przez „PRECYZJA-BIT-BYDGOSZCZ”). Oznaczanie ciepła spalania prowadzone było na materiale o frakcji < 200  $\mu\text{m}$ , wilgotność określono na podstawie normy PN75/Z-04002/13, natomiast zawartość popiołu określono na podstawie normy PN 80/G-04512.

### **3. Wyniki badań i dyskusja**

W analizowanym okresie pomiędzy 28.07. a 28.09.2009 średnia dobową temperatura w bloku foliowym na wysokości 15 cm wynosiła 22,9°C i wahała się w granicach od 13,4 do 30,7°C. Temperatura powietrza na wysokości 65 cm różniła się nieznacznie. Średnia dobową wysokość wyniosła również 22,8°C i wahała się w granicach 12,9÷30,8°C.

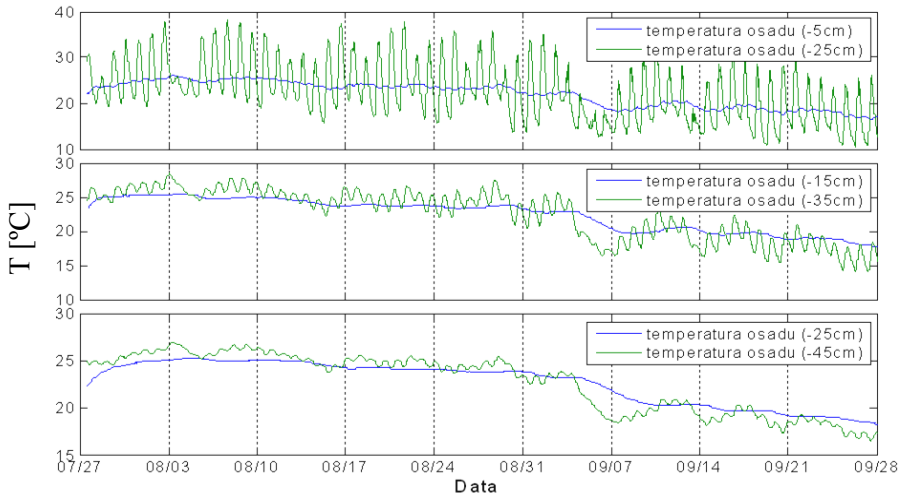
Najwyższą temperaturę zanotowano 30.07. o godzinie 14.10 i 14.50 i 2.08. o 14.40 ( $41,9^{\circ}\text{C}$ ), najniższą z kolei 19.09. pomiędzy godziną 4.00 a 7.00 ( $12,1^{\circ}\text{C}$ ). Z kolei średnia dobowa wilgotność względna wyniosła na wysokości 15 cm 54% i wahała się w granicach  $32,2\div 76,4\%$ , a na wysokości 65 cm – 54,6% i wahała się w granicach  $28,9\div 76,7\%$ . Zarejestrowane w odstępach 10-minutowych pomiary potwierdzają ich dobową i sezonową zmienność (rys. 2).



**Rys. 2.** Przebiegi dobowe temperatury ( $T^a$ ) i wilgotności względnej ( $f$ ) powietrza na wysokości 15 cm nad osadami ściekowymi

**Fig. 2.** Courses of day-and-night temperature ( $T^a$ ) and of relative humidity ( $f$ ), at the height on 15 cm above the sludge

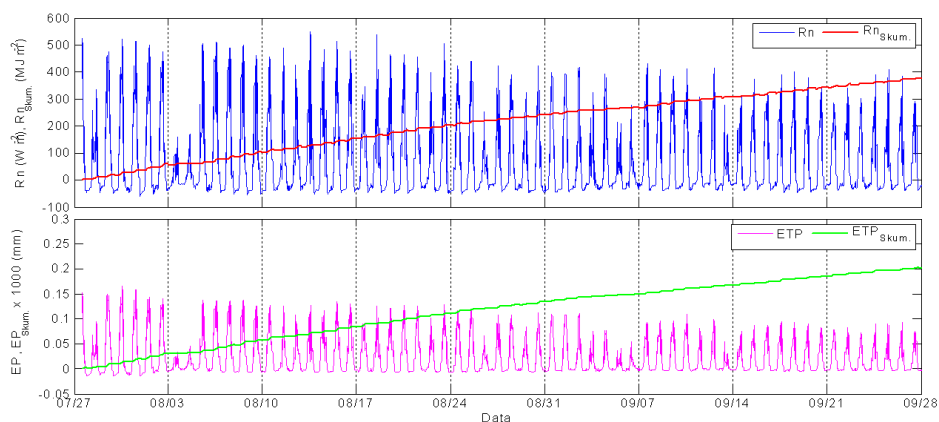
Średnia dobowa temperatura osadów ściekowych dla próby o miąższości 30 cm na głębokości 5 cm wynosiła  $22^{\circ}\text{C}$  i wahała się w granicach  $16,8\div 26^{\circ}\text{C}$ , a na głębokości 25 cm –  $22,5^{\circ}\text{C}$  i wahała się w granicach  $14\div 29,1^{\circ}\text{C}$ . Średnia dobowa temperatura osadów dla próby o miąższości 40 cm zarówno na głębokości 15 cm, jak i 35 cm wynosiła  $22,4^{\circ}\text{C}$  osiągając wartości pomiędzy  $17,8$  i  $25,4^{\circ}\text{C}$  na głębokości 15 cm i  $15,3\div 27,5^{\circ}\text{C}$  na głębokości 35 cm. Obserwacja zmian temperatur osadów na różnych głębokościach (dla prób o miąższości 30, 40 i 50 cm) wskazuje na większą dobową zmienność przy większej głębokości pomiaru. Jednocześnie dobowe amplitudy spadają wraz ze wzrostem miąższości próby (rys. 3).



**Rys. 3.** Przebiegi temperatur (T) osadów na różnych głębokościach, dla prób o miąższości 30, 40 i 50 cm

**Fig. 3.** Courses of sludge temperature (T) at different sludge depths, in samples with 30, 40, 50 cm of depth

Na podstawie wyznaczonej metodą Penmana ewaporacji (EP) obliczono dla analizowanego okresu wartość skumulowaną EP (rys. 4). Informuje ona, ile wody mogłoby wyparować z osadów, gdyby jedynie czynnik energetyczny (dostępność energii) decydował o ilości wyparowanej wody. Jest to wirtualny parametr opisujący potencjał a nie faktyczne wartości. Skumulowana wartość ewaporacji potencjalnej wyniosła w analizowanym okresie 203 mm, przy skumulowanej ewaporacji rzeczywistej w wysokości 112 mm. Na rys. 4 przedstawiono również skumulowaną wartość salda promieniowania ( $R_n$ ). Krzywa ta opisuje, ile energii w postaci promieniowania krótko- i długofalowego „odkłada się” w tunelu foliowym. W analizowanym okresie skumulowana wartość salda promieniowania wyniosła  $0,63 \text{ MW/m}^2$ . Energia ta wykorzystana jest na ogrzanie powietrza, ogrzanie osadów i parowanie. Warunkiem wykorzystania tej energii na parowanie jest zapewnienie wody w osadach do odparowywania. Powietrze natomiast powinno mieć duży niedosyt wilgotności, co wiąże się z koniecznością zastosowania wentylacji.



**Rys. 4.** Przebiegi dobowe zmierzonych wartości salda promieniowania ( $R_n$ ) i oszacowanej ewaporacji (EP) metodą Penmana oraz ich skumulowana wartość w trakcie eksperymentu

**Fig. 4.** Day-and-night courses of measured total radiation ( $R_n$ ) and the estimated evaporation (EP) measured by Penman's method, and their accumulated values during the experiment

Badania osuszania osadów ściekowych rozpoczęte 28.07.2009 prowadzone były przez 62 dni i zakończyły się 28.09.2009. W tym celu wykonano 12 prób, w tym 3 na poletkach badawczych, na których prowadzono monitoring salda promieniowania ( $R_n$ ), temperatury powietrza i osadów ( $T$ ) oraz wilgotności względnej ( $f$ ). Pozostałe dziewięć pobrano z pojemników kontrolnych o miąższości osadów 20, 25 i 30 cm. Wilgotność określono metodą wagową, a następnie ustalono średnią wynoszącą 86,37%. W próbach pobranych ostatniego dnia badań średnia wilgotność wyniosła 45,0%. Osady pobrane na początku eksperymentu, jak i na końcu eksperymentu został poddany badaniu na zawartość popiołu, ciepło spalania i wartość opałową (tab. 1). Zawartość popiołu (46%) w próbce pobranej po 62 dniach trwania eksperymentu osuszania była o 7% wyższa niż średnia zawartość popiołu w próbkach z nieosuszonych osadów ściekowych (z 28.07.2009). W wyniku badań stwierdzono także spadek ciepła spalania osadów ściekowych w wyniku procesu suszenia z 22251 kJ/kg do 18874. Potwierdzono ponadto wyraźny wzrost wartości opałowej osadów ściekowych (o 78%) z 10133 kJ/kg do 18035 kJ/kg.

**Tabela 1.** Zawartość popiołu, ciepło spalania i wartość opałowa osadów ściekowych w zależności od wilgotności początkowej osadów

**Table 1.** Ash content, combustion heat and calorific value of sewage sludge, depending on the original sludge water content

Lp. No.	Data pobrania próby Sampling date	Wilgotność Water content $W^a$ [%]		Zawartość popiołu Ash content	Ciepło spalania Combustion heat $Q_s^a$ [kJ/kg]	Wartość opałowa Calorific value $Q_i^a$ [kJ/kg]
		początkowa initial	końcowa final	$A^a$ [%]		
1.	28.07.2009	86,37	6,3	38,9	22250,7	10132,7
2.	28.09.2009	45,0	17,4	46,0	18874,2	18034,5

W wyniku solarnego suszenia osadów ściekowych największe efekty w postaci spadku wilgotności zaobserwowano w warstwie wierzchniej (do 10 cm). Osady na głębokości do 10 cm zmieniały uwilgotnienie średnio z 86,37% do 45,0% (tab. 2). Na zmianę wilgotności dominujący wpływ miało promieniowanie dochodzące do osadów, wychodzące i wynikające z nich saldo promieniowania. Średnie dla wymienionych parametrów wyniosły odpowiednio 511,19 W/m<sup>2</sup>, 441,67 W/m<sup>2</sup> i 69,52 W/m<sup>2</sup>. Dostarczona energia słoneczna do osadów ściekowych wyniosła odpowiednio: 2738 MJ/m<sup>2</sup>, 2366 MJ/m<sup>2</sup> i 372 MJ/m<sup>2</sup>.

**Tabela 2.** Zmiany wilgotności i zawartości suchej masy osadów ściekowych w pojemnikach osuszanych w tunelu foliowym

**Table 2.** Changes in water and dry matter content of sewage sludge in containers dried in the foil tunnel

Miąższość Depth [cm]	Oznaczenie próby Sample identity	Wilgotność Water content [%]		Sucha masa s. m. Dry matter d. m. [%]	
		Data Date			
Poletko doświadczalne nr 1 o miąższości 30 cm Experimental plot no. 1 with 30 cm sludge layer depth					
		28.07.2009	28.09.2009	28.07.2009	28.09.2009
0÷10	P 043	85,60	48,86	14,40	51,14
10÷15	M 150	87,6	86,81	12,40	13,19
15÷20	P 217	87,61	88,99	12,39	11,01
20÷30	P 281	88,99	87,55	11,01	12,45



Tabela 2. cd.

Table 2. cont.

Mięszkość Depth [cm]	Oznaczenie próby Sample identity	Wilgotność Water content [%]		Sucha masas. m. Dry matter d. m.[%]	
Poletko doświadczalne nr 2 o miąższości 40 cm Experimental plot no. 2 with 40 cm sludge layer depth					
0÷10	P 116	86,16	35,02	13,84	64,98
10÷20	M 114	86,60	80,99	13,40	19,01
20÷30	P 208	89,02	88,49	10,98	11,51
30÷40	P 163	89,10	88,61	10,90	11,39
Poletko doświadczalne nr 3 o miąższości 50 cm Experimental plot no. 3 with 50 cm sludge layer depth					
0÷10	M 059	85,35	40,12	14,65	59,88
10÷20	M 190	86,91	86,30	13,09	13,77
20÷30	P 005	86,69	86,48	13,31	13,52
30÷40	P 202	88,21	87,92	11,79	12,08
40÷50	P 090	88,21	88,21	11,79	11,79
Poletko doświadczalne nr 3 o miąższości 20 cm Experimental plot no. 3 with 20 cm sludge layer depth					
0÷10	P 234	86,84	47,60	13,16	52,40
10÷20	M 293	87,13	87,08	12,87	12,92
Poletko doświadczalne nr 6 o miąższości 20 cm Experimental plot no. 6 with 20 cm sludge layer depth					
0÷10	P 31	85,60	48,22	14,40	51,78
10÷20	M 27	88,88	88,76	11,12	11,24
Poletko doświadczalne nr 9 o miąższości 20 cm Experimental plot no. 9 with 20 cm sludge layer depth					
0÷10	P 185	87,26	49,81	12,74	50,19
10÷20	P 129	88,68	88,38	11,27	11,62
Poletko doświadczalne nr 2 o miąższości 25 cm Experimental plot no. 2 with 25 cm sludge layer depth					
0÷10	M 55	85,73	39,52	14,27	60,48
10÷15	P 255	88,12	88,02	11,88	11,98
15÷25	P 255	88,12	88,02	11,88	11,98

Tabela 2. cd.

Table 2. cont.

Mięszość Depth [cm]	Oznaczenie próby Sample identity	Wilgotność Water content [%]		Sucha masa s. m. Dry matter d. m.[%]	
Poletko doświadczalne nr 5 o miąższości 25 cm Experimental plot no. 5 with 25 cm sludge layer depth					
0÷10	P 16	86,12	48,64	13,88	51,36
10÷15	P 68	86,27	85,34	13,77	14,66
15÷25	P 68	86,27	85,34	13,77	14,66
Poletko doświadczalne nr 8 o miąższości 25 cm Experimental plot no. 8 with 25 cm sludge layer depth					
0÷10	P 153	88,08	42,86	11,92	57,14
10÷15	P 181	90,87	90,57	9,13	9,42
15÷25	P 181	90,87	90,57	9,13	9,42
Poletko doświadczalne nr 1 o miąższości 30 cm Experimental plot no. 1 with 30 cm sludge layer depth					
0÷10	P 166	85,60	44,42	14,40	55,58
10÷15	P 68	87,60	87,41	12,40	12,59
15÷20	P 68	87,60	87,41	12,40	12,59
20÷30	P 1	89,60	87,85	10,40	12,15
Poletko doświadczalne nr 4 o miąższości 30 cm Experimental plot no. 4 with 30 cm sludge layer depth					
0÷10	P 158	85,61	46,41	14,39	53,59
10÷15	M 92	85,64	85,34	14,36	14,66
15÷20	M 92	85,64	85,34	14,36	14,66
20÷30	M 73	87,54	87,14	12,46	12,86
Poletko doświadczalne nr 7 o miąższości 30 cm Experimental plot no. 7 with 30 cm sludge layer depth					
0÷10	P 158	87,01	45,52	12,99	54,48
10÷15	M 92	89,02	87,46	10,98	12,54
15÷20	M 92	89,02	87,46	10,98	12,54
20÷30	M 73	89,10	87,14	10,90	12,86

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Energia wykorzystana do osuszenia osadów ściekowych w bloku foliowym na oczyszczalni w Bytkowie pochodziła wyłącznie z promieniowania słonecznego, co pozwala zaliczyć analizowane rozwiązanie do tanich i ekonomicznie uzasadnionych, także do stosowania na podobnych obiektach obsługujących tereny wiejskie Wielkopolski. Warta podkreślenia jest także niska awaryjność urządzeń technologicznych, wynikająca z mało skomplikowanej technologii suszenia oraz emisja odorów porównywalna do ich emisji powstającej w czasie składowania. Przeprowadzone badania pozwoliły ponadto sformułować następujące wnioski:

1. Grubość warstwy, która może zostać efektywnie osuszona poprzez promieniowanie słoneczne w bloku foliowym bez stosowania dodatkowych zabiegów (wentylacja, przegarnianie) niezależnie od miąższości osadów ściekowych wynosi około 10 cm.
2. Dla zwiększenia ilości osuszanych osadów ściekowych na takiej samej powierzchni i w takim samym czasie istnieje konieczność zastosowania wentylacji o działaniu wymuszonym i urządzenia do przewracania osadów z zastosowaniem energii konwencjonalnej.
3. Osiągnięty w procesie suszenia osadów ściekowych w bloku foliowym wzrost o 7,90 MJ/kg s.m. (z 10,1 na 18 MJ/kg s. m.) jego wartości opałowej potwierdza, że suszenie słoneczne jest właściwym sposobem zwiększenia wartości opałowej osadów ściekowych pozwalającym na ich wykorzystanie w energetyce jako źródło energii odnawialnej.
4. Osady ściekowe po osuszeniu w suszarni słonecznej mogą być wykorzystane w rolnictwie do nawożenia, obecnie powszechnie stosowany sposób zagospodarowania lub w energetyce w procesie współspalania.

#### Literatura

1. **Bień J. B., Bień J. D., Wystalska K.:** *Problemy gospodarki osadowej w ochronie środowiska*. Wyd. P. Częst. Częstochowa. 1998.
2. **Bux M., Baumann R., Pinnekamp J., Quadt S., Mühlbauer W.:** *Solare Trockung von Flüssigschlamm in kleinen Kläranlagen*. *KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*. 49 (3): 341÷344. 2002.

3. **Filipiak J., Przybyła C.:** *Zastosowanie nowych technologii odwadniania i osuszania osadów ściekowych w wiejskich oczyszczalniach ścieków*. Roczn. AR w Poznaniu 365. Melioracje i inżynieria środowiska 26. Poznań: 105÷116. 2005.
4. **Gilewska M., Przybyła Cz.:** *Wykorzystanie osadów ściekowych w rekultywacji składowisk popiołowych*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 477: 217÷222. 2001.
5. **Mazur T.:** *Rozwiązania o wartości nawozowej osadów ściekowych*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 437 : 13÷21. 1996.
6. **Oleszkiewicz J.:** *Gospodarka osadami ściekowymi*. LEM s.c., Kraków. 1998.
7. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych*. Dz. U. z 2002 r. Nr 134, poz. 1140. 2002
8. **Siuta J., Kulta G., Morawska M.:** *Przyrodnicze użytkowania osadów ściekowych*. 3 Konf. Nauk.-Tech. Ekoinżynieria. Świnoujście 9÷11.06.1999. 1999.

## **Solar Energy Application for Sewage Sludge Drying Process**

### **Abstract**

Studies were carried out in summer (28.07÷28.09.2009) on sewage sludge primarily dewatered on a belt press and subsequently dried by solar energy on a ferroconcrete plate covered with foil in a solar dryer ventilated gravitationally. No raking of the sludge was applied during the process.

Experiments were carried out on plots of 2 x 2 m area and sludge layer depths of 30, 40 and 50 cm, and in plastic boxes. The purpose of the study was to determine the content of sludge dry matter after the solar drying. The dry matter amount changed from the original 14.6% to 55÷65% after drying, but only in the top part of the layer reaching about 10 cm, independent of the layer depth. Below the 10 cm layer, the drying effect occurred in a minimal degree. From the energetic point of view, the studied sewage sludge after dehydration on the belt press contained 10.13 MJ/kg of dry matter and after the experiment termination, it reached the value of 18.03 MJ/k d. m. The required demand for heat energy was fully satisfied by the solar energy.