

Efektywne napowietrzanie w instalacji przetwarzania odpadów biodegradowalnych

Effective aeration in a biodegradable waste processing installation

Robert Sidelko, Piotr Grabek*

Słowa kluczowe: kompostowanie, napowietrzanie, modelowanie matematyczne.

Streszczenie

W artykule opisano metodę równoważenia hydraulicznego instalacji doprowadzającej powietrze do reaktora, wypełnionego kompostowanym materiałem. Algorytm obliczeniowy wykorzystuje zasady mechaniki płynów stosowane w układach otwartych, gdzie zmiany oporów przepływu, w zależności od wydatku powietrza, opisują doświadczalnie opracowane charakterystyki hydrauliczne. Wymiar praktyczny opisanego algorytmu polega na stworzeniu narzędzia umożliwiającego projektowanie systemu doprowadzającego powietrze do różnego rodzaju procesów, w których wymagane jest równomierne natlenienie złoża. Dotyczy to przede wszystkim kompostowania, jak również szeroko stosowanej biofiltracji w procesie oczyszczania np. powietrza poprocesowego.

Keywords: composting, aeration, mathematical modeling.

Abstract

The article describes a method of hydraulic balancing of the installation supplying air to the reactor filled with composted material. The computational algorithm is based on the principles of fluid mechanics used in open systems in which changes in flow resistance depending on air efficiency are described by experimentally developed hydraulic characteristics. The practical dimension of the described algorithm consists in creating a tool enabling the design of a system supplying air to various types of processes where uniform oxygenation of the bed is required. This applies primarily to composting, as well as the widely used biofiltration in the purification process, e.g. of post-process air.

Istotą efektywnego napowietrzania, podczas procesu kompostowania, jest doprowadzenie powietrza w tej samej, ewentualnie przybliżonej ilości, do każdego miejsca w kompostowanym materiale [7,14].

Według różnych źródeł, rozkład materii organicznej w warunkach tlenowych przebiega prawidłowo, jeżeli masa doprowadzanego tlenu, w przeliczeniu na kilogram substancji organicznej (s.o.) w ciągu godziny, mieści się w przedziale 2.6÷51.8 mg O₂/g s.o./h, co w przeliczeniu na objętość powietrza w warunkach normalnych określa przedział 0.6÷1.9 m³/kg s.o./doba [2,12]. Wysoka intensywność napowietrzania jest jednym z kluczowych parametrów procesowych determinującym dobór wentylatorów ale nie jedynym. Drugim, to ciśnienie uwarunkowane oporami przepływu powietrza w układzie, na które składają się: przewody po stronie ssawnej i tłocznej wentylatora, kanał z rusztem napowietrzającym pryzmę oraz sama pryzma kompostu. Wartości strat ciśnienia, w zależności od przepływu dla poszczególnych części tego układu, opisują charakterystyki hydrauliczne, które można wykorzystać do modelowania przepływu w dowolnym miejscu całego układu doprowadzającego powietrze do kompostu.

Elementem decydującym o równomiernym wypływie powietrza z kanału napowietrzającego do pryzmy powinien być odpowiednio perforowany ruszt, stanowiący przykrycie kanału [1,3]. Na ogół, kanał napowietrzający pryzmę kompostu jest zintegrowany z posadzką reaktora i poza dostarczaniem powietrza pełni również funkcję odprowadzania nadmiaru wody poprocesowej. Powietrze wypływa z otworów rusztu na całej jego długości bezpośrednio do kompostowanej masy, a następnie jako powietrze poprocesowe, wpływa do przestrzeni, w której panuje ciśnienie atmosferyczne. Tego typu rozwiązania występują we wszystkich dostępnych na rynku technologiach kompostowania, przebiegającego w warunkach statycznych z wymuszonym napowietrzaniem [4,5,6]. Z hydraulicznego punktu

widzenia jest to układ otwarty [9,10]. Tak więc uzyskanie równomiernego napowietrzania kompostu, przykrywającego kanał na całej jego długości, wymaga zastosowania regulacji ciśnienia w kolejnych częściach/sekcjach rusztu.

W przypadku kanałów napowietrzających pryzmę kompostu, efekt równomiernego wypływu powietrza z rusztu na całej długości kanału można uzyskać wyłącznie poprzez odpowiednie dławienie nadwyżki ciśnienia. Oznacza to konieczność odcinkowego wymiarowania powierzchni czynnej rusztu przykrywającego kolejne, wydzielone sekcje kanału w warunkach, gdy wartość ciśnienia statycznego stopniowo maleje w kierunku przepływu powietrza.

Obecnie trudno znaleźć rozwiązania, które gwarantują równomierne napowietrzanie kompostu przy zastosowaniu kanałów zlokalizowanych w podłodze reaktora. Chociaż stosowane w praktyce ruszty betonowe mają odpowiednio profilowane szczeliny lub dysze napowietrzające, to w większości przypadków rozstaw oraz wymiary szczelin, jak i dysz napowietrzających świadczą, że ich projektowanie przeprowadzono bez zastosowania zasad równoważenia hydraulicznego.

W artykule przedstawiono algorytm do wymiarowania powierzchni czynnej rusztu, przykrywającego kanał napowietrzający pryzmę kompostową, w oparciu o charakterystykę hydrauliczną pojedynczej szczeliny, przy czym liczba szczelin w danej sekcji tworzy całkowitą czynną powierzchnię wypływu powietrza. Równomierne napowietrzanie kompostu w przypadku kanałów, których długość wiąże się z wymiarami reaktora, wymaga wykonania obliczeń uwzględniających stopniowy spadek ciśnienia wraz z odległością od miejsca włączenia kanału do instalacji doprowadzającej powietrze, wyposażonej w wentylatory promieniowe o wysokim ciśnieniu nominalnym.

*) Robert Sidelko, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Politechnika Koszalińska, ORCID 0000-0002-4555-5638, Tel.: +48 94 3478500; e-mail address: robert.sidelko@tu.koszalin.pl, Piotr Grabek, AKNOVA Sp. z o.o., ul. Mrągowska 3, 60-161 Poznań

2. Metodologia

Do symulacji numerycznej wykorzystano równania charakterystyk poszczególnych części instalacji, wyrażających zależności oporów przepływu od wydatku, ustalone na podstawie badań własnych autorów. Przyjęte do obliczeń wartości brzegowe, związane przede wszystkim z przepływami powietrza, ustalono na podstawie wymagań technologicznych, stawianych procesowi kompostowania frakcji podsitowej, wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych przy zastosowaniu sita o średnicy oczek 80 mm ($Fr < 80$ mm) [8,11].

Obiektem technicznym, na którym przeprowadzono pomiary podczas walidacji opracowanego modelu, był Zakład Przetwarzania Odpadów Komunalnych (ZPOK) w Katowicach. Technologia kompostowania polega w tym przypadku na zastosowaniu żelbetonowych reaktorów stacjonarnych, z kanałami zlokalizowanymi w podłodze reaktorów i napowietrzaniem pozytywnym, oznaczającym przepływ od rusztu do warstwy kompostu. Reaktor ma 4 kanały napowietrzające o długości 28 m każdy i wymiarach 0.3 m (wysokość) i 0.35 m (szerokość). Każdy kanał jest przykryty płytą betonową o grubości 0.15 m, mającą szczeliny napowietrzające o przekroju poprzecznym w kształcie trapezu i średnicy zastępczej w górnej części równej 0.0067 m. Reaktor jest zapełniany materiałem wsadowym – $Fr < 80$ mm, do wysokości docelowej 3.0 m i szczelnie zamykany po jego wypełnieniu. Podczas testów służących weryfikacji opracowanego modelu badano ciśnienie nad rusztem przykrywającym kanał napowietrzający w trzech miejscach, tj.: na początku, w środku i końcu kanału. Czujniki ciśnienia typu PC-28 Aplisens (0÷2.5 kPa), monitorujące ciśnienie statyczne, umieszczono w metalowej perforowanej osłonie bezpośrednio na ruszcie napowietrzającym, w miejscach odpowiadających sekcjom początkowej, środkowej i końcowej. Wydatek, w części instalacji doprowadzającej powietrze do kanału, ustalano na podstawie pomiaru prędkości przepływu przy wykorzystaniu rurki spiętrzającej Prandtla.

2.1. Założenia modelu

Kanał napowietrzający, o prostokątnym przekroju poprzecznym, jest konstrukcją betonową. Kanały tego typu są powszechnie stosowane do napowietzania materiału biologicznego zapełniającego zarówno reaktory stacjonarne, jak również materiału uformowanego w postaci pryzmy kompostowej, przykrytej paroprzepuszczalną membraną lub pryzmy bez przykrycia ale przetrzymywanej w wydzielonej hali produkcyjnej [2].

Obliczenia przeprowadzono przyjmując następujące założenia:

- ilość powietrza wypływającego z rusztu do kompostu q_r z każdej sekcji: $s(1), s(2), s(3), \dots, s(n)$, jest taka sama: $q_r(i) = \text{const}$, gdzie i mieści się w przedziale $\langle 1, n \rangle$
- ilość powietrza przepływającego w każdej sekcji zmniejsza się wg. zasady:
 $q_{s(n)} = \sum_{i=1}^n q_{r(i)} - (n-1) \cdot q_{r(i)}$, gdzie i mieści się w przedziale $\langle 1, n \rangle$
- ciśnienie statyczne na wypływie z rusztów na całej długości kanału jest takie same,
- stopniowy spadek ciśnienia statycznego (p_s) wzdłuż osi kanału następuje zgodnie z kierunkiem przepływu (rys.1),
- dławienie nadwyżki ciśnienia, podczas przepływu powietrza przez ruszt, jest skutkiem oporu przepływu przez pojedynczą szczelinę (Δp_d), przez którą przepływ jest proporcjonalny do liczby szczelin tworzących powierzchnię czynną rusztu odpowiadającą danej sekcji,
- powierzchnie czynne wypływu powietrza z rusztu do kompostu, odpowiadające danym sekcjom kanału, zmieniają się według zasady:

$$\sum F_{d(1)} < \sum F_{d(2)} < \sum F_{d(3)} < \dots < \sum F_{d(n)}$$

- równanie charakterystyki hydraulicznej kanału – rezultat badań własnych, ma postać:

$$\Delta p_k = 0.0077 - 0.0308 \cdot q + 22.154 \cdot q \cdot q, Pa \quad (1)$$

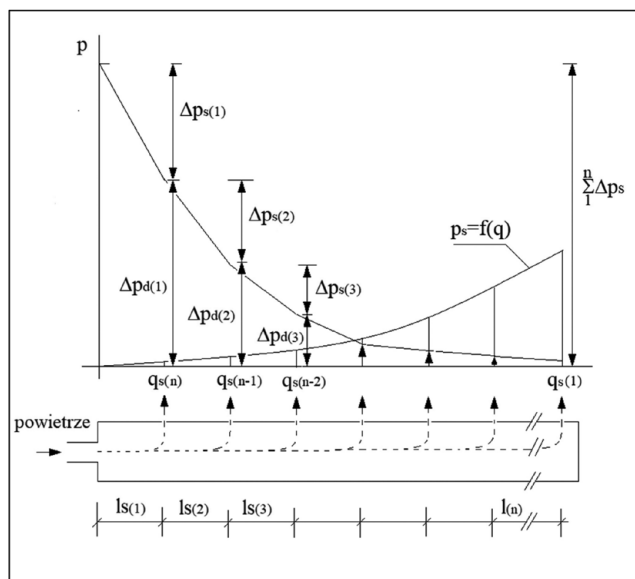
- równanie charakterystyki hydraulicznej pojedynczej szczeliny wbudowanej w ruszt – rezultat badań własnych, ma postać:

$$\Delta p_d = 0.001 - 0.0268 \cdot q + 207350 \cdot q \cdot q, Pa \quad (2)$$

Ze względu na sposób załadunku reaktora, polegający na jego wypełnieniu masą kompostowanego materiału do wysokości odpowiadającej projektowanej miąższości złoża (2÷3.5 m) [12], dodatkowo przyjęto:

- kanał napowietrzający na całej długości ($\sum_{i=1}^n l_i$) będzie przykryty równą warstwą kompostu,
- ciśnienie statyczne bezpośrednio nad rusztem w każdej sekcji będzie miało taką samą wartość odpowiadającą oporom przepływu powietrza przez jednorodną warstwę o grubości równej docelowej miąższości złoża kompostu.,
- ciśnienie nad warstwą kompostu jest równe ciśnieniu atmosferycznemu.

Arkusze kalkulacyjny przy wykorzystaniu programu Excel Microsoft Office 2010, skonstruowano stosując zasady określone w pkt. a÷h oraz przyjmując, że długość każdej sekcji wynosi 2 m. Interpretację graficzną w układzie osi X-Y, tj.: wydatek powietrza-straty ciśnienia, w odniesieniu do kanału i szczeliny napowietrzającej, przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Interpretacja graficzna wydatku i strat ciśnienia powietrza w układzie kanał-szczelina

Fig.1. Graphical interpretation of pressure losses and air flow in the duct-gap relation.

2.2. Algorytm

Algorytm składa się z 5. etapów (tab. 1):

- krok nr 1 – wprowadzanie danych służących obliczeniom parametrów hydraulicznych kanału betonowego,
- krok nr 2 – obliczenia przepływu powietrza w poszczególnych sekcjach kanału oraz strat ciśnienia statycznego w tych sekcjach, przy wykorzystaniu charakterystyki hydraulicznej kanału $\Delta p_k = f(q)$ (1),
- krok nr 3 – ustalenie liczby szczelin w ostatniej sekcji (inicjacja obliczeń),
- krok nr 4 – ustalenie liczby szczelin w każdej sekcji oraz obliczenia przepływów i strat ciśnienia dla pojedynczych szczelin sekcji, przy wykorzystaniu charakterystyki hydraulicznej szczeliny $\Delta p_d = f(q)$ (2),
- krok nr 5 – szacowanie błędu wyrażającego wartość bezwzględną obliczaną jako:

$$|\delta| = 100 - (\Delta p_{d(n)} \cdot 100 / p_{s(n)})$$

Kluczowym etapem jest krok nr 4. Nadwyżkę ciśnienia statycznego, w miejscu przykrycia kanału rusztem w danej sekcji ($p_s(n)$) względem sekcji następnej ($p_s(n+1)$) uzyskuje się poprzez zmniejszenie liczby szczelin. W takim przypadku spełnienie warunku (a) musi skutkować wzrostem przepływu przez pojedynczą szczelinę, co zwiększa lokalną stratę ciśnienia docelowo o wartości:

$$\Delta p_g = \Delta p_s = \Delta p_{s(n)} - \Delta p_{s(n+1)}$$

Tabela 1. Opis kolejnych kroków w przyjętym algorytmie obliczeniowym
 Table 1. Description of the next steps in the developed computational algorithm

Działanie	Krok				
	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5
1	przepływ w kanale, q_k (m^3/s)	średnica zastępcza kanału, D_k (m)	inicjacja	liczba szczelin w kolejnych sekcjach	błąd
2	liczba sekcji, ni dla $i \in \{1, n\}$	sekcje: wydatki, $q_s(nr)$ (m^3/s)		przepływ przez 1. szczelinę w sekcji, m^3/s	
3	długość kanału, lk (m)	sekcje: prędkości $v_s(nr)$, (m/s)		strata ciśnienia na 1. szczelinie w sekcji, Pa	
4	wymiary kanału, (m)	sekcje: straty ciśnienia, Δp (Pa)		-	
5	długości sekcji, $ls(nr)$ (m)	sekcje: ciśnienie stat., p_s (Pa)		-	
6	ciśnienie dyspoz., p_d (Pa)	(ilość szczelin w ostatniej sekcji)		-	

Znając równanie charakterystyki pojedynczej szczeliny (2) oraz arbitralnie przyjęte liczby szczelin w miejscach rusztu odpowiadających danym sekcjom, obliczone zostają przepływy powietrza w kolejnych pojedynczych szczelinach w zgodzie z następującą regułą:

$$q_{g(1)} \cdot q_{g(1)} = q_{g(2)} \cdot q_{g(2)} = \dots = q_{g(n)} \cdot q_{g(n)} \quad (3)$$

gdzie:

$$q_{g(1)} > q_{g(2)} > \dots > q_{g(n)}$$

$$q_{g(1)} < q_{g(2)} < \dots < q_{g(n)}$$

Przekształcając równanie (3) otrzymujemy wzór w postaci:

$$q_{g(n-1)} = q_{g(n)} \frac{q_{g(n)}}{q_{g(n-1)}}$$

gdzie: $q_{g(n)} \leftrightarrow \Delta p_g$. Obliczenia rozpoczyna się od ostatniej sekcji, a następnie krok po kroku dla kolejnych sekcji, w kierunku przeciwnym do przepływu powietrza w kanale.

3. Wyniki

Działanie algorytmu wymagało zdefiniowania równań funkcji opisujących charakterystyki hydrauliczne kanału napowietrzającego (1) oraz szczeliny (2), przez którą wypływa powietrze do kompostu. Dążąc do

równomiernego napowietrzania kompostu na całej długości przyzmy, jako konsekwencja warunku (a) przyjęto, że przepływy w kolejnych sekcjach będą stopniowo zmniejszały się o stałą wartość równą ilości powietrza wypływającego przez kolejne części rusztu. Należy podkreślić, że czynnikiem stabilizującym ciśnienie nad rusztem, którego stała wartość zapewnia równomierny przepływ powietrza przez jednorodną przyzmy kompostu, jest liczba szczelin w danej części rusztu.

Dążąc do uzyskania równomiernego wypływu powietrza przez szczeliny napowietrzające na całej długości kanału, należy zdławić nadwyżki ciśnienia, poprzez zmianę liczby szczelin w kolejnych częściach rusztu przykrywającego kanał napowietrzający. Ustalając początkową liczbę szczelin w ostatniej sekcji założono, że stopniowe zmniejszanie ich liczby, w miarę zbliżania się do sekcji początkowej, skutkować będzie zwiększeniem przepływu jednostkowego przez pojedynczą szczelinę, co spowoduje zwiększenie strat ciśnienia powietrza przepływającego w kolejnych sekcjach. Parametrem pozwalającym ustalić przepływ jednostkowy szczeliny w każdej sekcji był wymagany spadek ciśnienia na szczelinie, wynikający z różnicy pomiędzy ciśnieniem dyspozycyjnym w danej sekcji i ostatniej. Przyjętą *ex-ante* liczbę szczelin w ostatniej sekcji, w kolejnych iteracjach stopniowo zmniejszano. Jednocześnie, na podstawie charakterystyki (2), obliczano wymagane straty ciśnienia przepływu powietrza przez pojedynczą szczelinę w kolejnych sekcjach, stosując kryterium zdefiniowane, jako:

$$\delta = \text{MODUŁ.LICZBY}(100 - ((\Delta p_d \cdot 100) / p_s)) \quad (4)$$

Wynik symulacji przeprowadzonej przy pomocy opracowanego algorytmu przedstawiono w tab. 2.

4. Dyskusja wyników

Uzyskane wyniki wskazują, że największa fluktuacja błędów ma miejsce w przypadku początkowych częściach rusztu, licząc od miejsca włączenia przewodu doprowadzającego powietrze do kanału napowietrzającego. Niewątpliwie jest to rezultat relatywnie największych przepływów powietrza przez pojedyncze szczeliny w sekcjach początkowych, gdzie wartości ciśnienia wymaganych do zdławienia jest największa. Stosując określony rodzaj/wymiar szczelin, jedyną możliwością dławienia nadwyżki ciśnienia, w danej części rusztu, jest dobór ich liczby. W konsekwencji, uwzględniając kształt charakterystyki (2), w niektórych przypadkach błąd (4) pomiędzy wartością strat ciśnienia Δp_d , a wartością p_s (tab.2), przekracza 20 %.

Tabela 2. Wyniki obliczeń algorytmu
 Table 2. Calculation results using the algorithm

nr	Kanał napowietrzający/sekcje					Szczeliny						Błąd δ , %
	q, m^3/s	v, m/s	p, Pa	ps, Pa	n, szt.	inicjacja		korekta				
						q, m^3/s	Δp , Pa	n, szt.	q, m^3/s	Δp_d , Pa		
1	0.69	8.5	10.67	60.45	-	-	-	3	0.0167	57.60	4.72	
2	0.64	7.9	9.20	49.78	-	-	-	3	0.0167	57.60	15.71	
3	0.60	7.3	7.84	40.58	-	-	-	4	0.0125	32.40	20.15	
4	0.55	6.7	6.59	32.74	-	-	-	4	0.0125	32.40	1.03	
5	0.50	6.1	5.44	26.15	-	-	-	5	0.0100	20.74	20.70	
6	0.45	5.4	4.41	20.70	-	-	-	5	0.0100	20.74	0.16	
7	0.40	4.8	3.48	16.29	-	-	-	6	0.0083	14.40	11.61	
8	0.35	4.2	2.67	12.81	-	-	-	7	0.0071	10.58	17.39	
9	0.30	3.6	1.96	10.14	-	-	-	7	0.0071	10.58	4.34	
10	0.25	3.0	1.36	8.18	-	-	-	8	0.0063	8.10	0.96	
11	0.20	2.4	0.87	6.82	-	-	-	9	0.0056	6.40	6.12	
12	0.15	1.8	0.49	5.95	-	-	-	9	0.0056	6.40	7.63	
13	0.10	1.2	0.22	5.46	-	-	-	10	0.0050	5.18	4.99	
14	0.05	0.6	0.05	5.24	10	0.0050	5.18	10	0.0050	5.18	1.04	

Wygenerowane przez algorytm wyniki odnoszą się do warunków ustalonych, co oznacza, że podczas działania całej instalacji poszczególne jej części nie ulegają zmianie. Jedynym czynnikiem, zmieniającym tę sytuację w warunkach przemysłowych, jest przykrycie rusztu warstwą kompostu. W przypadku, gdy reaktor zostanie załadowany kompostowanym materiałem, np. frakcją podsitową ($Fr < 80$ mm), zmienia się charakterystyka hydrauliczna przemy i w konsekwencji zmianie ulega tzw. charakterystyka zastępcza całej instalacji [10]. W praktyce oznacza to zwiększenie kąta nachylenia charakterystyki instalacji i w konsekwencji przesunięcie punktu przecięcia charakterystyk instalacji i wentylatora w lewo. Powoduje to zmniejszenie wydajności wentylatora w stosunku do wymaganej, co wymusza zwiększenie obrotów wirnika do wartości przywracającej wymaganą wydajność.

Zgodnie z technologią kompostowania w ZPOK, wydatek powietrza dostarczanego do jednego reaktora wyposażonego w cztery kanały napowietrzające wynosi 2500 m³/h/kanał. Ruszt betonowy przykrywający kanał, jest wyposażony w szczeliny o rozstawie co 130 mm na całej długości kanału. Testy przeprowadzono dla czterech wariantów: (a1) reaktor pusty i wszystkie szczeliny odkryte, (b1) reaktor pusty i odkrytych jest część szczelin w kolejnych sekcjach zgodnie z danymi w tab. 2, oraz warianty (c2) i (d2) analogicznie jak warianty (a1) i (b1) z tym, że reaktor został zapelniony docelową warstwą kompostowanego materiału tj. $Fr < 80$ mm o miąższości 3 m. Ponieważ w dwóch ostatnich wariantach złożo odpadów odpowiadało za dodatkowy opór przepływu powietrza, zmieniając tym samym kształt charakterystyki zastępczej całej instalacji, to w porównaniu do wariantu (a1) i (b1) zmieniano odpowiednio parametry pracy wentylatora, uzyskując przepływ powietrza przypadający na jeden kanał w reaktorze, zbliżony do wartości 2500 m³/h podobnie jak w dwóch pierwszych wariantach. Pomiar ciśnienia statycznego wykonano w trzech miejscach ponad rusztem, tj.: 1., 2. oraz 3. na całej długości kanału, odpowiadających odpowiednio: początek kanału, środek i koniec. Wyniki badań przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3. Wartości ciśnień powyżej rusztu dla czterech wariantów
Table 3. Pressure values above the grate for four variants

Wariant	Ciśnienie, Pa					
	rzeczywiste (zmierzone)			obliczone (algorytm)		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.
(a1)	26	5	0	–	–	–
(b1)	3.2	1.2	0.1	2.9	1.9	0.1
(c2)	1665	1511	1288	–	–	–
(d2)	1506	1496	1495	1503	1502	1500

Porównując wyniki pomiarów ciśnień dla wariantów (c2) i (d2) można zauważyć, że wartości ciśnień pomierzonych na wylocie ze szczelin na początku, środku i końcu rusztu są porównywalne (tab. 3). Prawdopodobnie jest to wynik wysokiego sprężenia wentylatora, wynikającego z zawyżonych oporów jednostkowych warstwy kompostu przyjętych na etapie projektowania instalacji przemysłowej. Badania prowadzone przy zastosowaniu kolumn wypełnionych odpadami ($Fr < 80$ mm) wykazały, że opór jednostkowy złoża w trakcie 19. dni eksperymentu, przy porównywalnym obciążeniu hydraulicznym wynoszącym 60 m³/m²/h, wzrósł maksymalnie do ca. 200 Pa/m [13]. Jest to wartość znacznie mniejsza niż przyjmowane arbitralnie przez projektantów wartości z podanego w literaturze zakresu 100÷1000 Pa/m [3]. Wobec znacznie mniejszych strat ciśnienia, podczas przepływu powietrza przez kompost w warunkach rzeczywistych, nastąpiła zmiana współrzędnych punktu pracy wentylatora, wynikająca z przecięcia jego charakterystyki z mniej nachyloną charakterystyką instalacji. Powoduje to wzrost wydatku powyżej wartości wymaganej, co powinno wymusić korektę (zmniejszenie) obrotów wentylatora i spadek jego ciśnienia – sprężenia.

Niższe sprężenie wentylatora w wariantach (a1) i (b1) wobec wyższego w wariantach (c2) i (d2) powoduje relatywnie większy

przepływ w początkowych częściach rusztu, a tym samym szybszy spadek ciśnienia w kanale, do wartości powodujących jedynie minimalny przepływ powietrza w dalszych częściach rusztu. Tak więc czynnik sprężenia wentylatora jest kluczowy dla stabilizacji wpływu powietrza przez ruszt, przy czym jego wartość, ze względu na koszty z tytułu tzw. mocy zamawianej, powinna być optymalna.

Należy stwierdzić, że zastosowanie zmiennej powierzchni wpływu powietrza na całej długości rusztu, przynosi oczekiwany skutek. W warunkach podwyższonego ciśnienia powietrza w kanale, wynikającego z wypełnienia reaktora, wartość ciśnienia nad rusztem na końcu kanału w wariancie d2 osiągnęło prawie 100% wartości ciśnienia na początku rusztu wobec 77% w wariancie c2.

5. Wnioski

Otrzymane wyniki podczas badań terenowych, polegających na pomiarach ciśnień ponad rusztem przykrywającym kanał doprowadzający powietrze do procesu kompostowania (4. warianty), pozwalają sformułować następujące wnioski:

- 1) wyniki pomiaru rozkładu ciśnienia wzdłuż rusztu napowietrzającego, przykrytego docelową warstwą kompostowanego materiału, dla wariantu oznaczającego stopniowe zwiększanie liczby szczelin w kolejnych sekcjach rusztu, wobec wariantu w którym rozstaw szczelin na całej długości kanału jest stały, udowodniły, że ruszt zaprojektowany zgodnie z wynikiem obliczeń omówionego modelu pozwala uzyskać zbliżone wartości ciśnienia na całej długości rusztu,
- 2) równomierny rozstaw szczelin rusztu, przykrywającego kanał doprowadzający powietrze, powoduje zwiększenie przepływu w początkowych sekcjach, przy czym wraz ze wzrostem miąższości warstwy kompostu, różnice pomiędzy przepływami w poszczególnych sekcjach rusztu ulegają zmniejszeniu,
- 3) parametrem stabilizującym przepływ powietrza przez ruszt, w sytuacji zmieniającej się miąższości warstwy kompostu (co wpływa na zmiany charakterystyki zastępczej całego układu) są obroty wentylatora doprowadzającego powietrze technologiczne. ■

LITERATURA

- [1] Bilitewski Bernard, Georg Hardtle, Marek Klaus. 2003. „Podręcznik gospodarki odpadami”. Wydawnictwo Seidel Przywecki, Warszawa.
- [2] Epstain Eliot. 1997. „The science of composting”. Technomic Publishing Company, Lancaster.
- [3] Frederickson J., C.P. Boardman, T.L. Gladding, A.E. Simpson, G. Howell, F. Sgouridis. 2013. „Biofilter performance and operation as related to commercial composting”. Environment Agency. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c6f65ed915d6969f44d67/LIT_8166_d2eca5.pdf
- [4] <https://www.horstmann.pl>
- [5] <https://www.aknova.pl>
- [6] <https://www.sutco.pl>
- [7] Jędrzak Andrzej. 2007. „Biologiczne przetwarzanie odpadów”. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [8] Jędrzak Andrzej, Emilia Den Boer. 2015. „Final report of the 3rd stage of an expert opinion aimed at conducting waste tests in 20 installations for mechanical-biological waste treatment. <https://sdr.gdos.gov.pl/Documents/GO/Ekspertyzy>.”
- [9] Lubczyńska Urszula. 2017. „Hydraulika stosowana w inżynierii środowiska”. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- [10] Ross Hans. 1995. „Hydraulik der wasserheizung Oldenbourg”. Verlag GmbH, Monachium.
- [11] Rudnik Ewa. 2019. „Chapter 5 – Composting methods and legislation, Compostable Polymer Materials 2.nd Edition”. Elsevier Ltd.: 127-161.
- [12] Sidelko Robert. 2018. „Przetwarzanie odpadów komunalnych w praktyce”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- [13] Sidelko Robert, Beata Janowska, Kazimierz Szymański, Natalia Mostowik, Anna Głowacka. 2019. „Advanced methods to calculation of pressure drop during aeration in composting process”. *Science of the Total Environment* (674): 19-25.
- [14] Thien-Phuc Nguyen, Koyama Mitsuhiro, Nakasaki Kiyohiko. 2022. „Effects of oxygen supply rate on organic matter decomposition and microbial communities during composting in a controlled lab-scale composting system”. *Waste Management* (153): 275-282.