

BADANIA MORFOLOGICZNE KŁACZKÓW OSADU CZYNNEGO Z WYKORZYSTANIEM ANALIZATORA WIELKOŚCI I KSZTAŁTU CZĄSTEK

Magdalena Kuśnierz^{1*}, Magdalena Domańska¹, Kamila Szafulska¹

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

* Autor do korespondencji: magdalena.kusnierz@upwr.edu.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono oryginalne wyniki badań parametrów morfologicznych kłaczków osadu czynnego pobranego z oczyszczalni ścieków w Brzegu Dolnym. Wykazano, że zawiesina osadu czynnego składała się z kłaczków małych poniżej 10 µm proporcjonalnie włóknistych oraz kulistych, o niskiej chropowatości krawędzi. Wśród kłaczków średnich (od 10 µm do 100 µm) wraz ze wzrostem średnicy zwiększało się wydłużenie oraz chropowatość, a zmniejszała kolistość. Kłaczkami o dużych średnicach występowały bardzo rzadko. Ich rozmiar spowodowany jest z reguły dużą obecnością bakterii nitkowatych, których nie stwierdzono w nadmiarze w badanych próbkach osadu czynnego. Badania potwierdziły, że wykorzystanie zautomatyzowanego analizatora obrazu Morphologi pozwala na szczegółową analizę budowy kłaczków osadu czynnego.

Słowa kluczowe: osad czynny, analiza obrazu, wielkość kłaczków osadu, kształt kłaczków osadu, barwienie fluorescencyjne

MORPHOLOGICAL STUDY OF ACTIVATED SLUDGE FLOCS WITH THE USE OF PARTICLE SIZE AND SHAPE IMAGE ANALYZER

ABSTRACT

The study presents the original research results of morphological parameters of activated sludge flocs taken from the Wastewater Treatment Plant located in Brzeg Dolny. It has been shown that activated sludge suspension consisted of small flocs below 10 µm in proportion of fibrous and circular shape with low edge roughness. Among the flocs from 10 µm to 100 µm with increasing diameter increased elongation and roughness, and decreased circularity. Flocs of large diameter were very rare. Their size is generally due to a large presence of filamentous bacteria, which were found in abundance in the presented samples of activated sludge. Studies have confirmed that the use of automated image analyzer allows for a detailed analysis of the activated sludge flocs size and shape.

Keywords: activated sludge, image analysis, floc size, floc shape, fluorescent staining



SIEĆ NA RZECZ
INNOWACJI W ROLNICTWIE
I NA OBSZARACH WIEJSKICH



Krajowa Sieć
Obszarów Wiejskich



Program
Rozwoju
Obszarów
Wiejskich
na lata 2014-2020

„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie”.

Artykuł opracowany na zlecenie Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie.

Artykuł współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach II Schematu Pomocy Technicznej

„Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich” Program Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020.

Instytucja Zarządzająca Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020

– Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

WPROWADZENIE

Osad czynny to najbardziej rozpowszechniona technologia oczyszczania ścieków, która swój początek zawdzięcza badaniom prowadzonym przez Munro już w 1883 roku [Szniolis, 1928]. Współcześnie, technologia osadu czynnego znajduje zastosowanie na większości oczyszczalni ścieków na świecie. Osad czynny tworzą zlepione w kłaczkach i zawieszane w ściekach bakterie, pierwotniaki oraz organizmy tkankowe, które w momencie styczności ze ściekami dopływającymi do oczyszczalni wykorzystują je jako źródło substancji pokarmowych i prowadzą do usuwania zanieczyszczeń. Zasadniczą rolę w procesie oczyszczania odgrywa odpowiednio ukształtowany skład gatunkowy i rodzajowy biocenozy kłaczków [Liwarska-Bizukojć, 2017] oraz ich formy morfologiczne. Charakterystyka morfologiczna kłaczków stała się przedmiotem intensywnych badań w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Kłaczkach osadu czynnego nie są jednorodne i składają się z wielu małych i dużych jednostek, cząstek stałych i kolonii mikroorganizmów. Warto zaznaczyć, iż bakterie tworzą niewielką część budulcową kłaczkach od 5 do 20% [Kocwa-Haluch i Woźniakiewicz, 2011]. Jego największą część stanowią natomiast pozakomórkowe substancje polimerowe tzw. *EPS* (*Extracellular Polymeric Substances*). *EPS*, występujące w postaci luźnego i związanego *EPS*, składa się z polisacharydów białek, lipidów oraz makrocząstek i substancji humusowych, stanowi od 50% do 90% całkowitej materii organicznej [Wang i in., 2014; Zhang i in., 2018] i determinuje kształt i wielkość kłaczków.

Kłaczkach osadu czynnego uznawane są za materiał charakteryzujący się dużą porowatością i nieregularnością. Aktualnie szeroko akceptowanym jest, że struktura fraktalna i rozmiar kłaczków są właściwościami mającymi duży wpływ na efektywność oczyszczania ścieków [Zhao i in. 2013; Zheng i Wang, 2017]. Parametry te mogą być wykorzystywane do prognozowania zjawiska puchnięcia osadu, obecności substancji toksycznych w ściekach, które mogą przyczyniać się do rozdrobnienia kłaczków [Liwarska-Bizukojć, 2012] oraz ryzyka pogorszenia procesu biosorpcji i sedymentacji osadu [Qi i in., 2011].

Ocena wielkości i kształtów kłaczków uzależniona jest od rodzaju zastosowanej techniki pomiarowej. Podstawowe obserwacje mikroskopowe często dają możliwość rozróżnienia

kształtu jedynie jako regularny i nieregularny lub struktury jako spójnej bądź luźnej. Zastosowanie cyfrowej analizy obrazu rozszerza możliwości oceny budowy morfologicznej kłaczków. Wówczas za pomocą odpowiednich algorytmów programowych separowane są pojedyncze cząstki i w sposób zaawansowany mierzone ich poszczególne parametry.

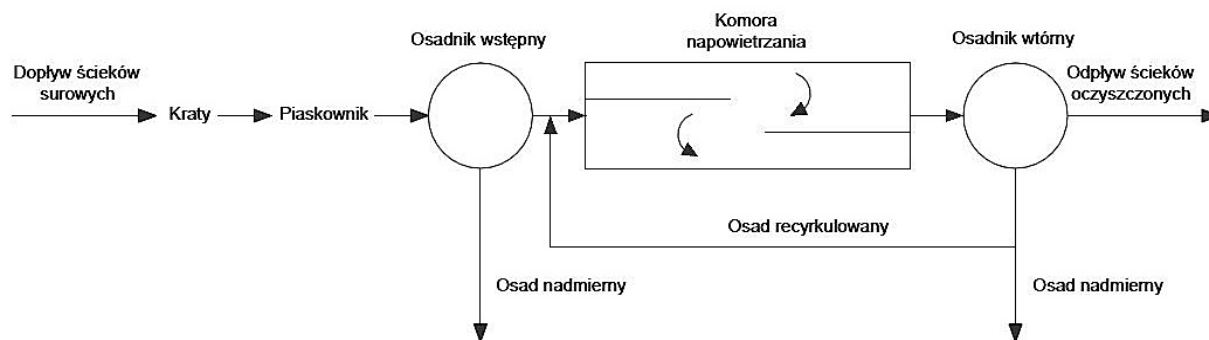
Celem niniejszej pracy była ocena morfologiczna kłaczków osadu czynnego z wykorzystaniem zautomatyzowanego analizatora Morphologi G3. Analizator ten wykorzystano do określenia zarówno parametrów opisujących wielkość kłaczków (pole powierzchni, długość, średnica) jak i parametrów opisujących kształt kłaczków (kolistość, wypukłość, wydłużenie, wymiar fraktalny) osadu czynnego, pobranego z mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków w Brzegu Dolnym.

METODYKA BADAŃ

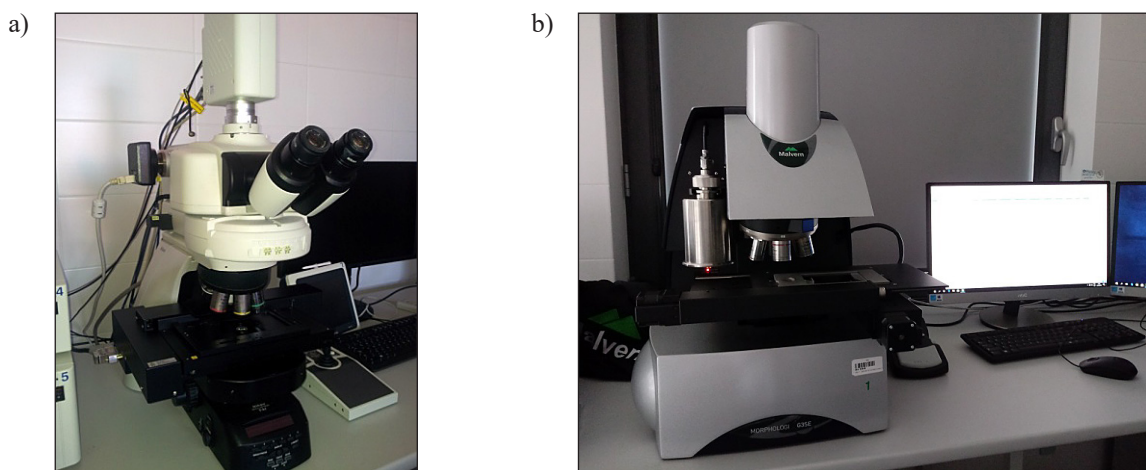
Próbki osadu czynnego pobierane były z oczyszczalni ścieków zlokalizowanej w miejscowości Brzeg Dolny i eksploatowanej przez tamtejszy Zakład Wodno-Kanalizacyjny. Oczyszczalnia ścieków w Brzegu Dolnym przyjmuje i oczyszcza ścieki przemysłowe oraz ścieki komunalne wytwarzane na terenie gminy. Ścieki dopływające do oczyszczalni poddawane są mechanicznym i biologicznym procesom oczyszczania, po czym trafiają do odbiornika, którym jest rzeka Odra. Ogólny schemat oczyszczalni przedstawiono na rysunku 1.

Próbki osadu czynnego pobierane były bezpośrednio z komory osadu czynnego w ilości 0,5 l w okresie od grudnia 2015 r. do lutego 2016 r. Badania laboratoryjne z zastosowaniem analizatora Morphologi G3 (rys. 2b) oraz mikroskopu konfokalnego Nikon Eclipse Ni-E C2 (rys. 2a) wykonywane były w dniu poboru próbek.

Analizator Morphologi G3 o zakresie pomiarowym od 0,5 μm do 1000 μm pozwala na badania morfologiczne cząstek w stanie suchym lub płynnym. Układ pomiarowy wyposażony jest w zestaw optyczny *Nikon CFI 60* oraz kamerę cyfrową *CCD*. Badanie osadu czynnego rozpoczynano od przygotowania i umieszczenia niewielkiej ilości próbki na płytce przeznaczonej do pomiarów na mokro (powierzchnia 180x110mm) i ustawień analizy z wykorzystaniem *SOP* (*Standard Operating Procedure*). Ustawienia *SOP*



Rys. 1. Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków w Brzegu Dolnym



Rys. 2. Mikroskop konfokalny Nikon Eclipse Ni-E C2 (a) oraz Morphologi G3 (b)

obejmowały między innymi wybór odpowiedniego oświetlenia, obiektywu, ostrości, wartości progowej (*threshold*) oraz wielkości skanowanej powierzchni. Na podstawie ustawień *threshold* automatycznie wykonywana była segmentacja kłaczek osadu czynnego. Po akceptacji ustawień wstępnych rozpoczynano skanowanie zadanej powierzchni płytki z osadem. Obrazy każdej skanowanej cząstki zostały zapisane w oprogramowaniu urządzenia, co pozwoliło na późniejszą weryfikację danych oraz identyfikację wszystkich kształtów i wielkości kłaczek osadu czynnego (tabela 1).

W badaniach mikroflory osadu czynnego zastosowany został mikroskop konfokalny Nikon Eclipse Ni-E C2 oraz wykorzystano technikę fluorescencji znaną pod nazwą *Live/DEAD*, która pozwoliła na wybarwienie żywych i martwych mikroorganizmów. W tym celu zastosowano specyficzne barwniki fluorescencyjne – fluorofory, które po wnikięciu do komórki mikroorganizmów i wzbudzeniu emitują światło o kolorze zależnym od właściwości fluoroforu. Wskaźnikiem wyznaczającym granicę pomię-

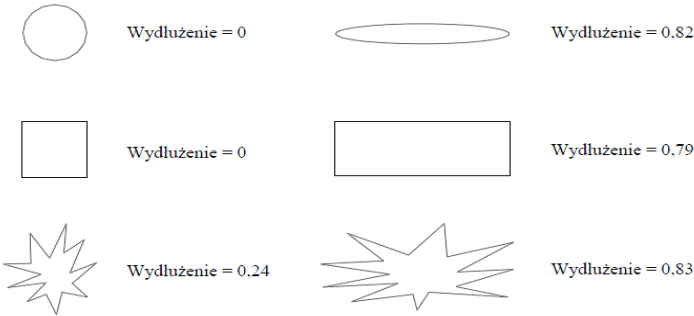
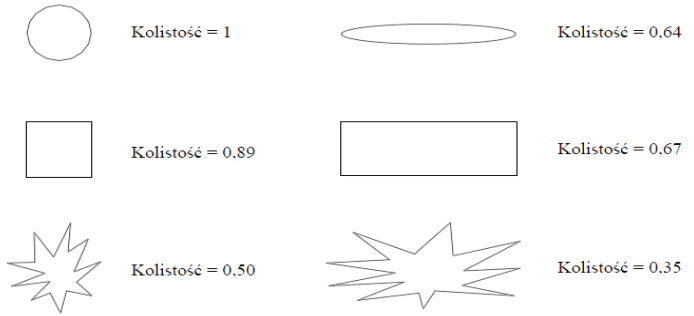
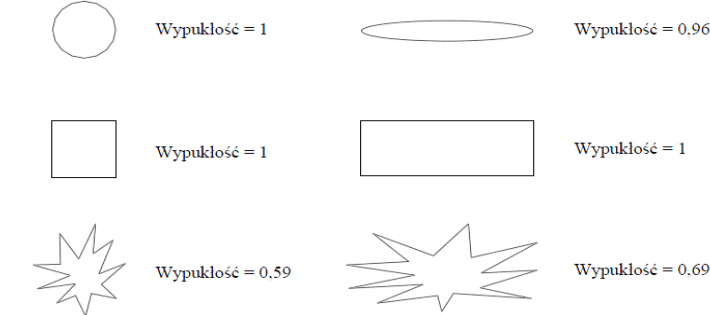
dzy stanami „żywa” i „martwa” komórka jest jej błona cytoplazmatyczna, która jeżeli jest nieuszkodzona pozwala na wnikięcie odczynnika *SYTO9*, który barwi komórkę na zielono. Drugi składnik odczynnika *Live/DEAD* – jodek propidyny przenika głównie do komórek uszkodzonych barwiąc je na czerwono. Proces barwienia polegał na odpowiednim rozcieńczeniu próbki (1:20) i dodaniu do niej wcześniej zmieszanych odczynników wg protokołu producenta firmy Thermo Fisher Scientific.

WYNIKI BADAŃ

Identyfikacja mikroorganizmów obecnych w osadzie czynnym

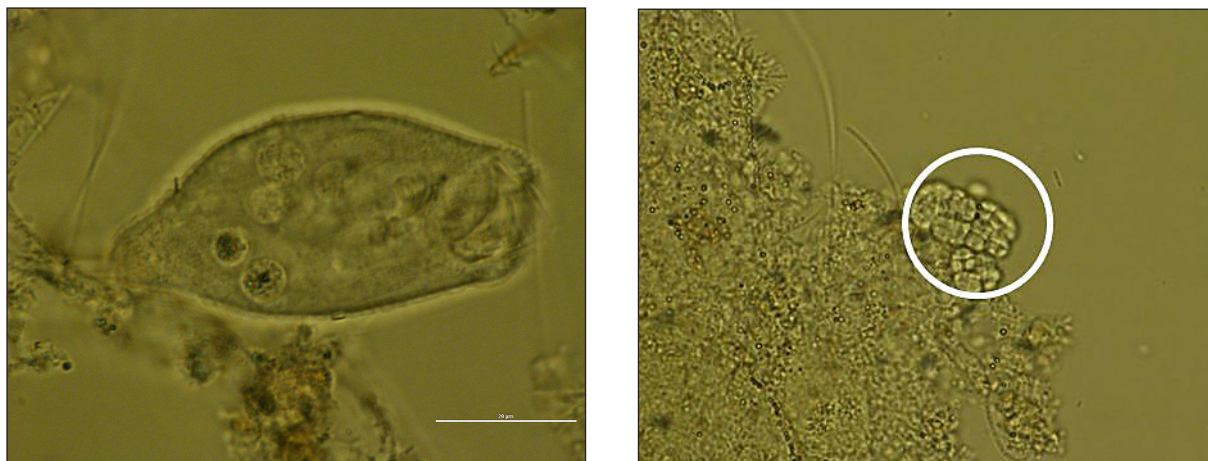
Na kształt i postać kłaczek osadu czynnego wpływa skład jego biocenozy, np. występowanie bakterii nitkowatych i grzybów, sprzyja powstawaniu nieregularnych kształtów. Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe osadu wykazały, iż mikroflorę stanowiły głównie bakterie, w tym bakte-

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów charakteryzujących cząstki, generowanych z wykorzystaniem Morphologi G3

Nazwa parametru	Jednostka	Opis
Średnica	μm	Średnica koła o takiej samej powierzchni jak dana cząstka powierzchni
Długość	μm	Linia między dwoma punktami na obwodzie cząstki o największej długości rzutowana na główną oś cząstki
Szerokość	μm	Linia między dwoma punktami na obwodzie cząstki o największej długości rzutowana na małą oś cząstki
Maksymalna odległość	μm	Największa odległość pomiędzy dwoma dowolnymi punktami cząstki
Obwód	μm	Łączna długość obwodu cząstki; obliczana poprzez zsumowanie długości brzegowych pikseli cząstki
Powierzchnia	μm	Wielkość powierzchni zajmującej przez cząstkę
Wydłużenie	0-1	<p>Stosunek szerokości do długości cząstki; przykład opisany przez wartości liczbowe:</p>  <p>Wydłużenie = 0 Wydłużenie = 0.82 Wydłużenie = 0 Wydłużenie = 0.79 Wydłużenie = 0.24 Wydłużenie = 0.83</p>
Kolistość	0-1	<p>Stosunek obwodu koła o tej samej powierzchni co dana cząstka do jej rzeczywistego obwodu; przykład opisany przez wartości liczbowe:</p>  <p>Kolistość = 1 Kolistość = 0.64 Kolistość = 0.89 Kolistość = 0.67 Kolistość = 0.50 Kolistość = 0.35</p>
Wypukłość	0-1	 <p>Wypukłość = 1 Wypukłość = 0.96 Wypukłość = 1 Wypukłość = 1 Wypukłość = 0.59 Wypukłość = 0.69</p> <p>pomiar chropowatości krawędziowej cząstki; stosunek obwodu otoczki wypukłej do rzeczywistego obwodu cząstki; przykład opisany przez wartości liczbowe:</p>

rie nitkowate, wiciowce oraz orzęski. Wśród orzęsek wyróżniono między innymi orzęski osiadłe z gatunku *Vorticella infusionum* i orzęski swobodnie pływające *Metopus setifer*. *Vorticella infusionum* jest gatunkiem występującym bardzo często, zazwyczaj są to orzęski pojedynczo przylegając do kłaczek osadu (rys. 3). Z kolei występowa-

nie gatunku *Metopus setifer* w osadzie czynnym świadczyć może o przeciążeniu oczyszczalni jak również dopływie ścieków zagnitych. Wynikiem jego pojawienia się są najczęściej warunki beztlenowe i znajdujący się w ściekach siarkowodor w znaczących ilościach. Warunki beztlenowe, jak również występowanie łatwo wchłanianych



Rys. 3. Wyniki analizy mikroskopowej. Po lewej *Vorticella infusionum*, po prawej, wśród bakterii tworzących kłaczków można wyróżnić charakterystyczne skupiska bakterii nitryfikacyjnych. Długość paska 20 µm

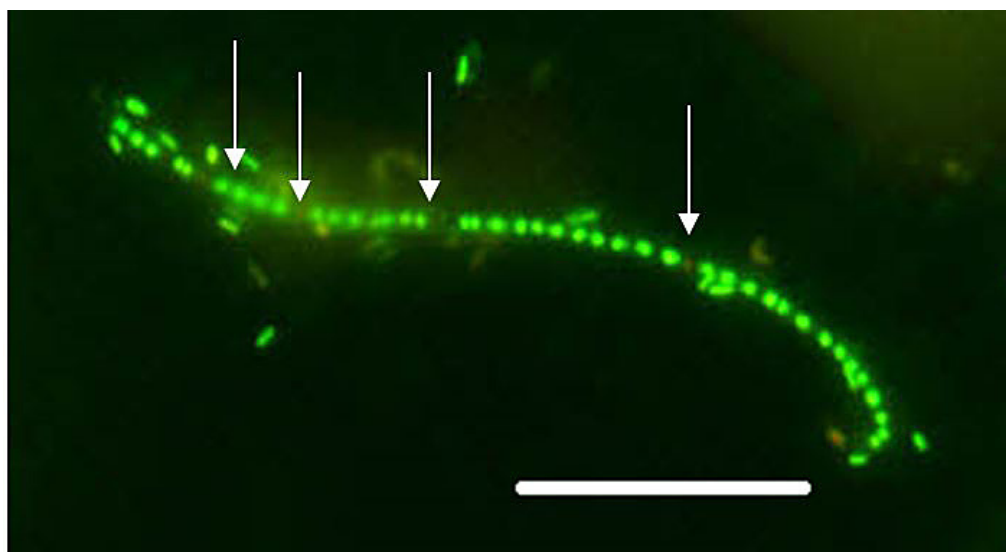
związków organicznych w reaktorach z osadem czynnym, mogą sprzyjać także rozwojowi bakterii kumulujących glikogen i fosforany.

Na rysunku 4 przedstawiono obraz uzyskany z mikroskopu fluorescencyjnego wykonany dla próbki osadu czynnego, przygotowanego z zastosowaniem odczynników barwiących komórki. Zabarwienie komórek na kolor zielony i czerwony wynika ze stanu ich błony cytoplazmatycznej, która jeżeli jest nieuszkodzona pozwala na sprawne funkcjonowanie komórek, w tym pobieranie substratów z otoczenia i wydalanie metabolitów. Przez uszkodzone błony biologiczne komórek przenika jedynie fluoroforemیتujący światło w kolorze czerwonym, kolor zielony wzbudzony został poprzez organizmy o spójnej błonie tzw.

„żywe”. Rozróżnienie żywych i martwych komórek jest bardzo ważne w kontroli liczebności, wzrostu i aktywności komórek. Przeprowadzone obserwacje dają pewność, iż analizowana w dalszej części pracy struktura osadu dotyczyła żywego osadu, a na oczyszczalni nie występują problemy z żywotnością bakterii.

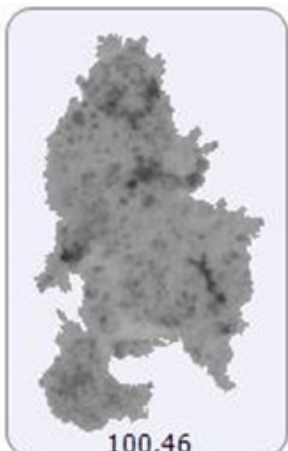
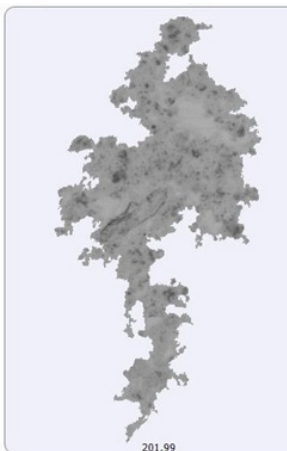
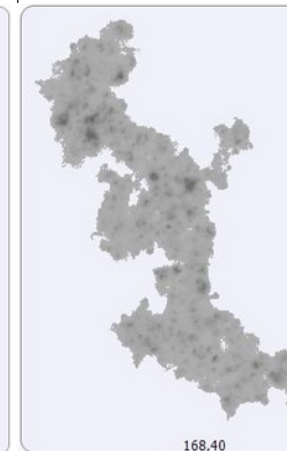
MORFOLOGIA KŁACZKÓW

Binarny obraz pojedynczych kłaczków osadu czynnego zarejestrowany po przeprowadzonej segmentacji i skanowaniu obszaru za pomocą analizatora G3 przedstawiono w tabeli 2. Zarejestrowane obrazy, w zależności od ustawionej ska-



Rys. 4. Obraz z mikroskopu fluorescencyjnego wybarwionej odczynnikami Live/DEAD bakterii nitkowatej z widocznymi uszkodzeniami. Kolor zielony – komórki żywe/nieuszkodzone, kolor czerwony (wskazany strzałkami) – komórki martwe/uszkodzone. Długość paska 10 µm

Tabela 2. Binarny obraz pojedynczych kłaczków osadu czynnego zarejestrowany za pomocą analizatora Morphologi G3

Parametr	 100.46 7.01.2016	 201.99 10.12.2015	 168.40 2.12.2015
Średnica, μm	168,40	201,99	100,46
Długość, μm	355,31	422,51	152,83
Szerokość, μm	168,43	193,12	88,38
Mak. odległość, μm	360,27	422,59	154,04
Obwód, μm	2395,72	3678,85	773,62
Powierzchnia, μm^2	22272,82	32044,23	7927,18
Wydłużenie	0,526	0,543	0,422
Wydłużenie włókien	1	1	1
Kolistość	0,219	0,171	0,405
Wypukłość	0,363	0,263	0,508
Wymiar fraktalny	2,11	2,77	1,59

li, pozwalają rozpoznać regularność bądź nieregularności budowy kłaczków, stopień upakowania materii w obrębie kłaczków, występowanie bakterii nitkowanych oraz określić czy mamy do czynienia z kłaczkami typu *pinpoint* (rozbrobnionymi). W przypadku analizowanych próbek rozpoznana została zarówno zbita struktura (2.12.2015) jak i rozbudowana linia brzegowa kłaczków (10.12.2015). Miarą upakowania powierzchni kłaczków i nieregularności linii brzegowej jest wartość wymiaru fraktalnego (FD). Wraz ze zwiększaniem się wartości wymiaru fraktalnego kłaczków uznawane są za słabsze, mniej trwałe i mają mniejszą zdolność do adsorpcji zanieczyszczeń [Smoczyński i in., 2014]. Zgodnie z opracowaniem Bizukojć-Liawarskiej [2012] FD określono jako stosunek obwodu kłaczków do największej odległości pomiędzy dwoma dowolnymi punktami kłaczków. Kłaczków o bardziej nieregularnej linii brzegowej charakteryzowały się większymi wartościami wymiarów fraktalnych.

W tabeli 3 przedstawiono parametry opisujące wielkość kłaczków, jednak ze względu na dużą ilość zeskanowanych obiektów odniesiono się wyłącznie do uzyskanych wartości minimalnych i maksymalnych. Ilość obiektów zależała między innymi od wielkości obszaru próbki, który przeznaczano do skanowania. Dla pobranych próbek wykonywano kilka pomiarów, za każdym razem wskazując inny obszar do analizy. Dodatkowo zmiany w liczbie cząstek mogą wynikać z wartości progowych dla ustalenia granic kłaczków osadu, tzw. *threshold*. Ostatecznie otrzymywano od kilkuset do ponad 140 tys. cząstek opisanych wieloma parametrami morfologicznymi.

Kształty zarejestrowanych kłaczków osadu czynnego były różnorodne, a ich rozmiar przyjmował wartości z szerokiego zakresu. Większość kłaczków w badanych próbkach osadu czynnego nie przekraczała rozmiaru $500 \mu\text{m}$ (z wyjątkiem pomiarów z dnia 16.12.2015 oraz 22.01.2016). W rozkładach objętościowych do-

Tabela 3. Wybrane parametry morfologiczne określające wielkość kłaczków osadu czynnego

Data	Liczba analizowanych cząstek	Średnica		Powierzchnia		Długość	
		min	max	min	max	min	max
		[μm]		[μm ²]		[μm]	
02.12.2015	648	0,52	219,80	0,21	37945,68	0,68	296,29
	426	2,17	255,22	3,70	51159,57	2,22	431,66
03.12.2015	1108	1,04	275,58	0,85	59646,58	1,11	539,13
	817	1,08	229,13	0,92	41233,69	1,11	381,99
08.12.2015	771	2,17	138,88	3,70	15148,36	2,22	235,20
9.12.2015	2411	1,08	202,18	0,92	32103,14	1,11	326,96
	4669	1,08	408,91	0,92	131326,16	1,11	727,98
16.12.2015	146757	1,04	841,94	0,85	556735,00	1,11	1778,29
	44869	1,04	722,32	0,85	409783,63	1,11	1369,74
07.01.2016	72776	1,04	245,72	0,85	47421,16	1,11	605,39
22.01.2016	42169	1,01	720,65	0,85	407883,47	1,11	3350,35

minowały cząstki z zakresu od 100 μm do 300 μm, ale kłaczkami z przedziału od 1 μm do 10 μm stanowiły około 90% całej liczebności danej próbki. Dobry dostęp do tlenu i zanieczyszczeń będących substratem pokarmowym mają kłaczkami o średnich i małych rozmiarach. Han i in. [2012] udowodnili, iż wzrost średnic kłaczków osadu czynnego od 100 do 250 μm powoduje, że stężenie tlenu rozpuszczonego w kłaczkach maleje o 10-55%. Jednak w dużych kłaczkach o rozmiarach ponad 100 μm skład gatunkowy i rodzajowy biocenozy okazuje się być bogatszy, niż w tych o rozmiarach poniżej 100 μm [Han i in., 2012]. W przypadku mierzonych powierzchni stwierdzono, iż powierzchnia poniżej 100 μm² dotyczyła cząstek o rozmiarach poniżej 15 μm, a powierzchnią ok 40 000 μm² charakteryzowały się kłaczkami o rozmiarach powyżej 200 μm. Na rysunkach 5 i 6, na podstawie wartości progowych określonych w tabeli 4, przedstawiono klasyfikację kształtów kłaczków osadu pobranego w dniu 7.01.2016. Analizując parametry kolistości, wydłużenia i wypukłości można stwierdzić, iż w osadzie występowały

Tabela 4. Zestawienie przyjętych wartości progowych określających kształt i wielkość kłaczków

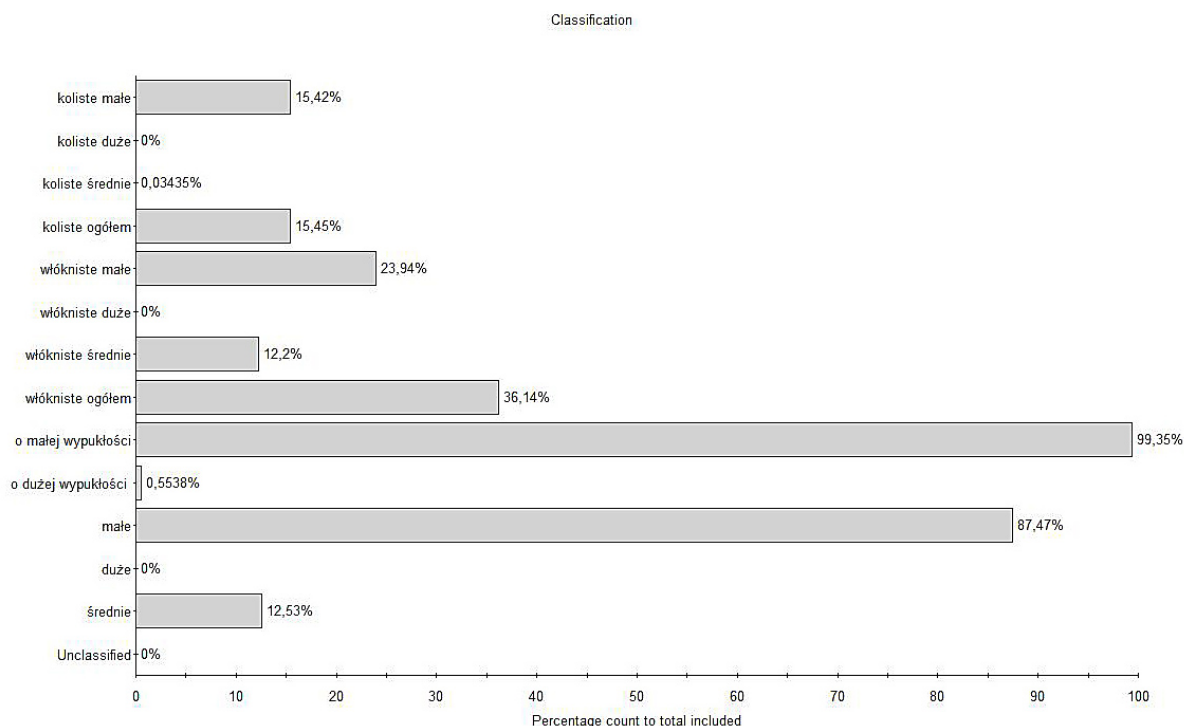
Parametr	Zastosowane wartości progowe
Wielkość kłaczków: – kłaczkami małe – kłaczkami średnie – kłaczkami duże	< 10 μm 10 μm – 300 μm > 300 μm
Kłaczkami koliste	> 0,89
Kłaczkami włókniste	> 0,80
Kłaczkami wypukłe	< 0,40

kłaczkami małe <10 μm zarówno włókniste jak i kuliste, o niskiej chropowatości krawędzi. Wraz z zwiększeniem rozmiaru kłaczków powyżej 10 μm zwiększała się chropowatość ich krawędzi oraz wydłużenie. Kłaczkami o dużych średnicach występowały bardzo rzadko. Ich rozmiar spowodowany jest z reguły dużą obecnością bakterii nitkowatych, których nie stwierdzono w nadmiarze w badanych próbkach osadu czynnego.

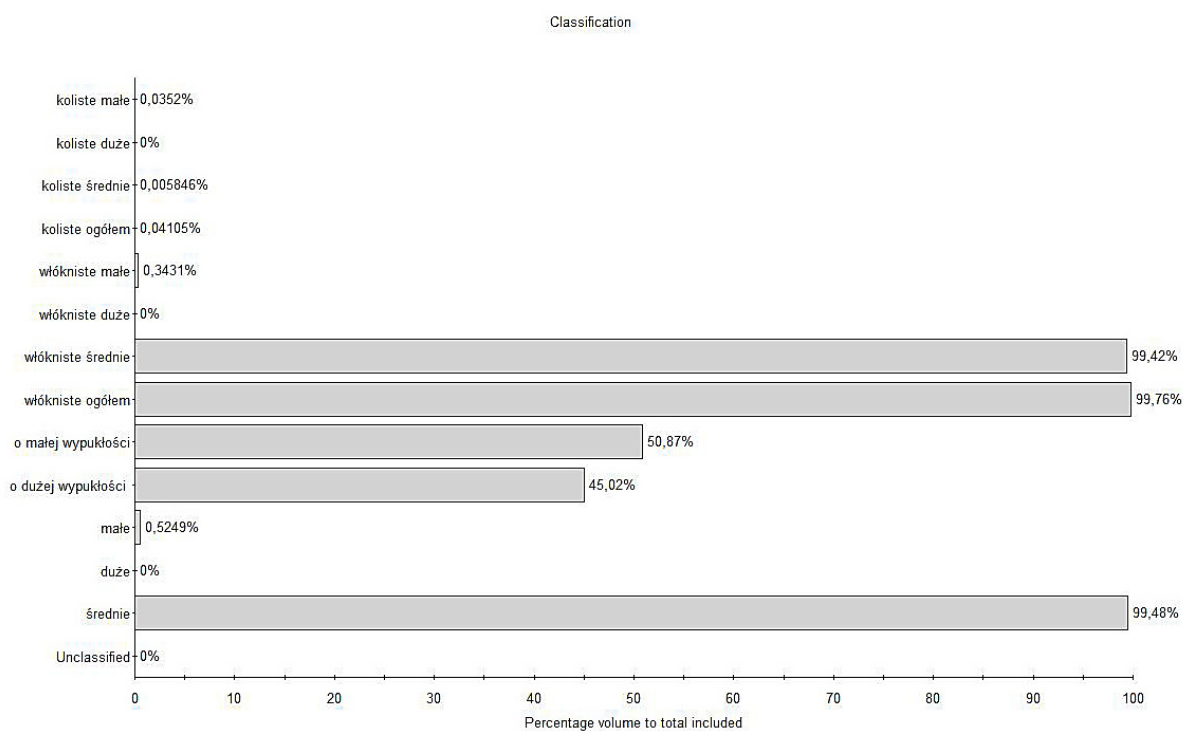
PODSUMOWANIE

Zawiesina osadu czynnego odgrywa decydującą rolę w procesie oczyszczania ścieków. Na kondycję osadu czynnego wpływa nie tylko jego skład gatunkowy, ale również wiele innych czynników w tym cechy morfologiczne kłaczków. Analiza obrazu z wykorzystaniem Morphologi G3 umożliwia identyfikację dowolnego parametru morfologicznego, który może zostać przedstawiony w postaci funkcji udziałów liczbowych, powierzchniowych oraz objętościowych.

Przeprowadzone badania wykazały, iż na rozkładach objętościowych dominowały cząstki z zakresu od 100 μm do 300 μm, a na rozkładach udziałów liczbowych kłaczkami z przedziału od 1 μm do 10 μm. Najmniejsze kłaczkami to zarówno kłaczkami koliste jak i włókniste o małej nieregularności krawędzi. Wśród kłaczków średnich od 10 μm do 100 μm zwiększało się ich wydłużenie, nieregularność krawędzi, a zmniejszała kolistość. Badana zawiesina osadu czynnego charakteryzowała się kłaczkami o nieregularnej



Rys. 5. Klasyfikacja kłaczków osadu w odniesieniu do rozkładu liczbowego



Rys. 6. Klasyfikacja kłaczków osadu w odniesieniu rozkładu objętościowego

budowie, ale bez cech rozdrobnienia oraz spęcznienia, z żywą kulturą bakterii. Można zatem przypuszczać, iż kształt i wielkość kłaczków, na analizowanej oczyszczalni ścieków, nie niesie za sobą ryzyka pogorszenia procesu biosorpcji i sedymentacji osadu czynnego.

LITERATURA

1. Han Y., Liu J., Guo X. i Li L. 2012. Micro-environment characteristics and microbial communities in activated sludge flocs of different particle size. *Bioresource Technology*, 124, 252-258.

2. Kocwa-Haluch R. i Woźniakiewicz T. 2011. Analiza mikroskopowa osadu czynnego i jej rola w kontroli procesu technologicznego oczyszczania ścieków. *Environmental Engineering*, 6, 141–162.
3. Liwarska-Bizukojć E. 2017. Skład biocenozy bakteryjnej osadu czynnego na przykładzie miejskiej oczyszczalni ścieków w Zgierzu. *Ochrona Środowiska*, 39 (4), 3–7.
4. Liwarska-Bizukojć E. 2012. Rola cyfrowej analizy obrazu w monitoringu osadu czynnego w oczyszczalniach ścieków. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 4, 151–153.
5. Qi Y., Thapa K.B. i Hoadley A.F.A. 2011. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – A review. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 373–384.
6. Smoczyński L., Ratnaweera H., Kosobucka M. i Smoczyński M. 2014. Image analysis of sludge aggregates. *Separation and Purification Technology*, 122, 412–420.
7. Sznoliś A. 1928. *Osad czynny*. Przegląd Techniczny.
8. Wang L-F., Wang L-L., Li W-W., He D-Q., Jiang H., Ye X-D., Yuan H-P., Zhu N-W., i Yu H-Q. 2014. Surfactant-mediated settleability and dewaterability of activated sludge. *Chemical Engineering Science*. 116(6), 228–234.
9. Zhang H., Lu X., Song L. i Zhang, L. 2018. Effects of Loosely Bound EPS Release and Floc Reconstruction on Sludge Dewaterability. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(2), 27.
10. Zhao P., Ge S., Chen Z. i Li, X. 2013. Study on pore characteristics of flocs and sludge dewaterability based on fractal methods (pore characteristics of flocs and sludge dewatering). *Applied Thermal Engineering*, 58(1-2), 217–223.
11. Zheng P. i Wang Z. 2017. Predicting settling performance of ANAMMOX granular sludge based on fractal dimensions. *Water Research*, 120, 222–228.
12. Kocwa-Haluch R. i Woźniakiewicz T. 2011. Analiza mikroskopowa osadu czynnego i jego rola w kontrolowaniu procesu technologicznego oczyszczania ścieków. *Environmental Engineering*, 6, 141–162.