

Ewelina GUTKOWSKA, Andrzej JODŁOWSKI\*

## WYKORZYSTANIE MIKROSKOPOWEGO ANALIZATORA OBRAZU W OCENIE PRZEBIEGU FLOKULACJI KOMÓREK SINIC *MICROCYSTIS AERUGINOSA*

W pracy określono wpływ czasu flokulacji i gradientu prędkości ruchu cieczy na morfologię powstających agregatów komórek sinicy *Microcystis aeruginosa*, powszechnie występującej w wodach o wysokiej trofii. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem analizatora obrazu Morphologi G3. Stwierdzono, że zmiana czasu trwania procesu flokulacji oraz ilości energii wprowadzanej do układu w istotny sposób wpłynęły na wielkość utworzonych agregatów. Prowadzenie flokulacji przez 20 minut prowadziło do utworzenia agregatów o największej średnicy. Wpływ czasu trwania flokulacji na morfologię cząstek był zauważalny w przypadku parametrów morfologicznych w postaci kolistości i wypukłości. Analiza danych pomiarowych dotyczących wpływu gradientu prędkości wykazała, że wraz ze wzrostem ilości energii wprowadzanej do układu średnica agregatów malała. Na skutek działania coraz większej siły odśrodkowej agregaty charakteryzowały się coraz większym wydłużeniem i mniejszą zwartością.

### 1. WSTĘP

Nowoczesne techniki analizy obrazu umożliwiają poznanie złożonej struktury cząstek. Mikroskopowa analiza obrazu jest to metoda pomiaru wielkości i kształtu cząstek. Pomiar parametrów opisujących wielkość i budowę morfologiczną cząstek jest możliwy dzięki, zarejestrowanym za pomocą mikroskopii optycznej, obrazom cząstek. Metoda ta daje możliwość obserwacji struktury i rozmieszczenia pojedynczych cząstek, jak również całych agregatów bazując na zmianie gradientu barwy na konturach obiektów graficznych.

Wiedza na temat budowy morfologicznej cząstek jest istotna z punktu widzenia zagadnień dotyczących uzdatnia wód zawierających zawiesiny trudno opadające. W przypadku

---

\* Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, ewelina.gutkowska@p.lodz.pl.

tego typu zanieczyszczeń powszechnie stosuje się proces koagulacji, w czasie którego powstają agregaty o zróżnicowanej budowie morfologicznej. Znajomość wielkości, budowy przestrzennej i kształtu cząstek pozwala lepiej zrozumieć i przewidzieć zjawiska zachodzące w czasie flokulacji cząstek, a tym samym pozwala ustalić warunki prowadzenia procesu zapewniające największą skuteczność agregacji. Morfologia agregatów jest zależna od zastosowanej dawki koagulantu, pH środowiska wodnego, a w szczególności od gradientu prędkości ruchu cieczy oraz czasu trwania flokulacji [1, 2]. W zależności od budowy morfologicznej i kształtu cząstek konieczne jest zastosowanie odpowiedniej metody ich separacji. Cząstki o zróżnicowanej wielkości, zwartości struktury oraz regularności budowy przestrzennej będą w odmienny sposób reagować na zastosowanie tych samych procesów separacyjnych, a tym samym stopień ich usunięcia będzie różny. Dążąc do zwiększenia skuteczności agregacji cząstek oraz podniesienia efektywności ich usunięcia możliwe jest skrócenie czasu trwania procesów technologicznych oraz podniesienie ich wydajności.

W układach technologicznych przeznaczonych do oczyszczania wód powierzchniowych do celów wodociągowych istotny problem stanowią organizmy fitoplanktonowe o właściwościach zbliżonych do cech cząstek koloidalnych. Z punktu widzenia uzdatniania wody, podstawowe trudności wynikające z obecności fitoplanktonu to pogorszenie właściwości organoleptycznych i fizyczno-chemicznych ujmowanej wody oraz występowanie substancji toksycznych [3,4]. Szczególne zagrożenie dla zdrowia ludzi stanowią sinice, które produkują substancje toksyczne o charakterze dermatotoksyn, hepatotoksyn i neurotoksyn. *Cyanobacteria* to drobne organizmy o zróżnicowanej budowie, posiadające szereg przystosowań środowiskowych, charakteryzujące się wysoką ekspansywnością i konkurencyjnością wobec innych organizmów. Jest to grupa organizmów licznie występująca w eutroficznych wodach powierzchniowych, stanowiąca trudny do usunięcia materiał ze względu na wysoki stopień dyspersji w toni wodnej. W procesach oczyszczania wód powierzchniowych zawierających zawiesiny sinicowe powszechnie stosuje się proces koagulacji i flokulacji. Jednak prowadzone dotychczas analizy dotyczące eliminacji komórek sinic z wody pomijały zagadnienie morfologii powstających agregatów.

W pracy określono wpływ warunków mieszania (czas trwania flokulacji oraz gradient prędkości ruchu cieczy  $G$ ) na morfologię agregatów komórek sinic powstających w procesie koagulacji. Na cel ogólny badań składało się przedstawienie przebiegu flokulacji komórek sinic w aspekcie zmian parametrów rozkładów średnicy równoważnej cząstek i zmian parametrów morfologicznych oraz wpływ intensywności mieszania na mechanizmy agregacji i rozpadu cząstek.

## 2. MIKROSKOPOWA ANALIZA OBRAZU

W najnowszych badaniach dotyczących analizy wielkości cząstek na znaczeniu zyskuje mikroskopowa analiza obrazu oparta na technice mikroskopii optycznej. Metoda komputerowej analizy obrazu składa się z pięciu podstawowych etapów: przygotowanie zdyspergowanej próbki, fotografowanie cząstek, pomiar cząstek i przeliczenie ich na obraz komputerowy oraz obróbka statystyczna. Analizowana cząstka 3D jest oświetlana i powiększana zgodnie z ustawieniami użytkownika. Następnie jej zarejestrowane zdjęcie jest konwertowane na 2-wymiarowy obraz komputerowy. Liczba pikseli opisujących cząstkę jest podstawą do analizy wielkości i kształtu cząstek. Mikroskopowa analiza obrazu umożliwia pomiar wielkości, ale również licznych parametrów opisujących budowę morfologiczną cząstek. Analiza morfologiczna dostarcza szeregu informacji o budowie przestrzennej cząstek, ich sferyczności, gładkości powierzchni. Mikroskopowa analiza obrazu dostarcza również informacji dotyczącej liczby przeanalizowanych cząstek, co umożliwia przedstawienie wielkości cząstek w próbce za pomocą rozkładów ilościowych, w których każda cząstka ma takie samo znaczenie. Rejestrowanie obrazów o wysokiej rozdzielczości daje możliwość sortowania, klasyfikacji oraz filtrowania cząstek. Analiza obrazu pozwala oszacować, czy mamy do czynienia z agregatami czy z cząstkami pierwotnymi. Metoda ta umożliwia wizualną weryfikację zjawisk, takich jak obecność uszkodzonych lub obcych cząstek.

### 2.1. PARAMETRY MORFOLOGICZNE

Analiza obrazu przewyższa inne metody takie jak np. dyfrakcja laserowa tym, że pozwala na pomiar parametrów morfologicznych. W toku realizowanej pracy wykorzystane zostały parametry morfologiczne oparte na relacjach pomiędzy cechami geometrycznymi rzutu analizowanych cząstek. W skład tych cech wchodzi: pole powierzchni rzutu cząstki ( $A$ ), obwód rzutu cząstki ( $P$ ), pole określone przez nić oplatającą rzut cząstki ( $A_i$ ), obwód określony przez napiętą nić oplatającą cząstkę ( $P_i$ ) oraz szerokość ( $w$ ) i długość cząstki ( $l$ ). W Tabeli 1 przedstawiono wzory i definicje wybranych parametrów morfologicznych cząstek.

## 3. PODSTAWOWE PARAMETRY PROCESU FLOKULACJI

Flokulacja jest procesem polegającym na łączeniu się zdestabilizowanych cząstek zawieszonych w wodzie w większe agregaty. Agregacja cząstek prowadzi do zmniejszenia liczebności rozproszonych cząstek oraz jednoczesnego przyrostu wielkości powstających agregatów. W wyniku zmniejszania się liczebności cząstek flokującego

układu, następuje wzrost wielkości powstających agregatów. Wobec tego przebieg procesu flokulacji można opisać za pomocą modelu zmian liczebności cząstek oraz modelu zmian rozkładu wielkości cząstek.

Tabela 1. Zestawienie wzorów i definicji parametrów morfologicznych cząstek

Wzór	Parametr morfologiczny
$d_r = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$	<i>Średnica równoważna (d<sub>r</sub>)</i> - średnica koła o takiej samej powierzchni, jaką miał obraz analizowanej cząstki.
$SF = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P}$	<i>Współczynnik kształtu, kolistość (ang. Shape Factor (SF), circularity)</i> - stosunek obwodu koła o takiej samej powierzchni, jak powierzchnia cząstki do obwodu rzeczywistego analizowanej cząstki. Parametr SF przyjmuje wartości od 0 do 1 (cząstki sferyczne o rzucie idealnie kolistym).
$Zwartość = \frac{A}{A_t}$	<i>Zwartość</i> - stosunek powierzchni rzeczywistej cząstki do powierzchni figury wyznaczonej przez napiętą nić oplatającą cząstkę. Wartości <i>zwartości</i> mogą zmieniać się w przedziale od 0 do 1 (cząstki koliste).
$Wydluzenie = 1 - \frac{w}{l}$	<i>Wydluzenie</i> - stosunek szerokości do długości analizowanej cząstki. <i>Wydluzenie</i> przyjmuje wartości od 0 (cząstki koliste) do 1.
$Wypukłość = \frac{P_t}{P}$	<i>Wypukłość</i> - stosunek obwodu napiętej nici oplatającej cząstkę do obwodu rzeczywistego cząstki. <i>Wypukłość</i> przyjmuje wartości od 0 do 1. Wartość 1 oznacza, że cząstki przyjmują formę o idealnie gładkiej powierzchni.

Przyjmując pewne uproszczenie i podstawiając do równania kinetyki zmian liczebności cząstek (1) średnice agregatów odpowiadające średnicom kul o takiej samej objętości jak objętość cząstki tworzącej agregat (2) uzyskuje się zależność określającą kinetykę zmian wielkości agregatów (3).

$$\ln\left(\frac{n}{n_0}\right) = -\alpha_a \left(\frac{4}{\pi}\right) \phi G t_F \quad (1)$$

w której:

$n$  – liczebność cząstek, szt.·dm<sup>-3</sup>

$\alpha_a$  – współczynnik skuteczności zderzeń zachodzących podczas agregacji, (-)

$\phi$  – stężenie objętościowe cząstek w jednostce objętości wody, dm<sup>3</sup>·dm<sup>-3</sup>

$G$  – gradient prędkości ruchu cieczy, s<sup>-1</sup>

$t_F$  – czas flokulacji, min.

$$n_0 \left(\frac{\pi}{6}\right) d_0^3 = n_t \left(\frac{\pi}{6}\right) d_t^3 \dots \frac{n_t}{n_0} = \frac{d_0^3}{d_t^3} \quad (2)$$

$$\ln = \left( \frac{d_t^3}{d_0^3} \right) = \alpha_a \frac{4}{\pi} \phi G t_F \quad (3)$$

w której:

$d$  – średnica równoważna agregatów.

W przypadku analizy zmian liczebności cząstek oraz zmian wielkości agregatów, parametrami decydującymi o przebiegu flokulacji są gradient prędkości ruchu cieczy ( $G$ ) oraz czas trwania procesu ( $t_F$ ). Gradient prędkości mieszania  $G$  opisuje ilość energii wprowadzonej do układu w czasie mieszania, rozproszonej w danej objętości cieczy o znanej lepkości (4).

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (4)$$

w którym:

$P$  – moc włożona w mieszanie,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

$V$  – objętość mieszanej cieczy,  $\text{m}^3$

$\mu$  – współczynnik lepkości dynamicznej,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Moc włożoną w mieszanie cieczy  $P$  można określić na podstawie zależności uwzględniającej liczbę łopatek mieszadła ( $m$ ) i ich szerokość ( $b$ ), gęstość cieczy ( $\rho$ ), współczynnik oporów hydraulicznych ( $\zeta$ ), prędkość obrotową mieszadła ( $n$ ) oraz na promień mieszadła ( $r$ ) (5)

$$P = m\pi^3 \rho \eta^3 b r^4 \quad (5)$$

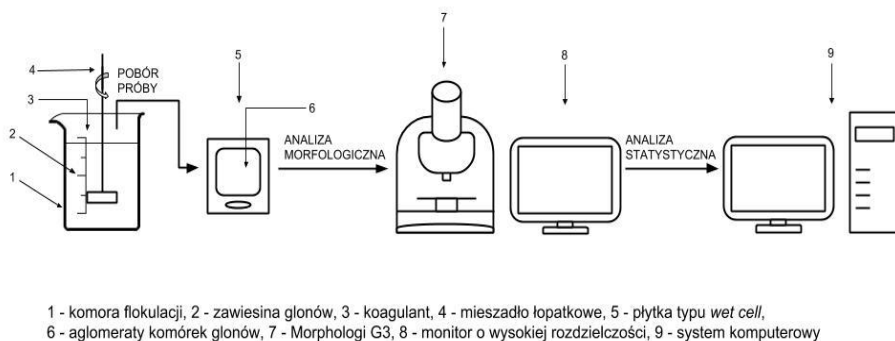
Gradient prędkości  $G$  wyrażony w  $\text{s}^{-1}$  rozumiany jest również jako różnica prędkości dwóch elementarnych objętości roztworu, rozmieszczonych w kierunku prostopadłym do kierunku przemieszczania się cieczy. W przypadku koagulacji optymalna wartość gradientu prędkości ruchu cieczy to taka, przy której mieszanie zapewnia maksymalną częstość zderzeń między cząstkami, a siły ścinające nie powodują rozrywania powstających agregatów. Optymalna wartość gradientu prędkości zależy od wytrzymałości agregatów, o której decyduje ich struktura morfologiczna i siła wiązań międzycząsteczkowych. Przekroczenie wartości granicznej powoduje zjawisko erozji powierzchniowej i rozpadu cząstek. Podobny efekt uzyskuje się w przypadku przedłużenia czasu mieszania, czemu towarzyszą zderzenia pomiędzy powstałymi agregatami, które mogą prowadzić do uszkodzenia delikatnej struktury kłaczków. Określenie optymalnych warunków prowadzenia procesu flokulacji polega zatem na osiągnięciu równowagi pomiędzy efektywną liczbą zderzeń pomiędzy cząstkami, a wytrzymałością powstających agregatów.

#### 4. METODYKA BADAŃ

**Przedmiot badań.** W badaniach wykorzystano monokulturową zawiesinę komórek sinic *Microcystis aeruginosa* powszechnie występującą w wodach powierzchniowych o wysokiej trofii. Rodzaj *Microcystis* należy do rzędu *Chroococcales*, jednokomórkowych cyanobakterii. Z uwagi na to, że komórki *M. aeruginosa* wytwarzają mikrocystynę, toksynę, która uszkadza i niszczy hepatocyty, należy ona do gatunków szczególnie niebezpiecznych dla zdrowia ludzi. Zawiesinę sinic przygotowano w warunkach laboratoryjnych. Hodowlę materiału biologicznego prowadzono w kolbach szklanych o pojemności 10 dm<sup>3</sup>, na pożywce Z8. Rozwój *M. aeruginosa* przebiegał w temperaturze 20–25°C przy sztucznym oświetleniu (lampa fluorescencyjna OSRAM L18W/11-860 Lumilux Plus Eco, fotoperiod 16h/8h). Komórki *M. aeruginosa* nie tworzyły skupisk, występowały w postaci pojedynczych cząstek dyskretnych. Badania i pomiary przeprowadzono wykorzystując zawiesinę sinic pobieraną z naczynia hodowlanego po rozcieńczeniu wodą destylowaną w stosunku 1:10.

**Metodyka badań technologicznych.** Naczynia reakcyjne w postaci zlewek polietylenowych miały wysokość czynną 130 mm i średnicę 100 mm. Zastosowany w badaniach chlorek żelaza (III) wprowadzano w dawce 20 mg Fe<sup>+3</sup>·dm<sup>-3</sup> do zlewek zawierających 1 dm<sup>3</sup> rozcieńczonej zawiesiny glonowej. Odczyn korygowano do stałej wartości pH 6,0 ± 0,1 przy użyciu roztworów HCl i NaOH. W badaniach wykorzystano wielomiejscowe mieszadło JLT-6 firmy Velp Scientifica z mieszadłami łopatkowymi o wymiarach 75×25 mm. Badania nad wpływem czasu mieszania prowadzono przy stałej prędkości obrotowej mieszadła (szybkie mieszanie: 100 obr.·min<sup>-1</sup> przez 1 minutę, wolne mieszanie: 10 obr.·min<sup>-1</sup> w zależności od zadanego czasu kontaktu). W czasie trwania flokulacji pobierano próbki z częstotliwością co 2 minuty w ciągu pierwszych 10 minut, a następnie materiał pobrano po 20, 40 i 60 minutach od momentu rozpoczęcia procesu (rys. 1). Badając wpływ prędkości obrotowej mieszadła na skuteczność flokulacji, zastosowano czas mieszania 20 min. Przyjęto prędkości obrotowe mieszadła – 10, 30, 50, 100, 150 obr.·min<sup>-1</sup>. Badania prowadzono w temperaturze 23,0 ± 0,1°C.

**Wykorzystana aparatura.** W badaniach nad morfologią zawiesin sinic wykorzystano mikroskopowy analizator obrazu Morphologi G3 firmy Malvern wyposażony w kasetę typu *wet cell* (100×80 mm). Próbki wody pobierano w końcowej fazie wolnego mieszania zwracając uwagę na ostrożne przenoszenie badanego materiału z naczynia reakcyjnego do kasety. W skład układu pomiarowego analizatora Morphologi G3 wchodziły mikroskop automatyczny oraz komputer z oprogramowaniem umożliwiającym kierowanie pomiarami i prowadzeniem analizy uzyskanych wyników.



Rys. 1. Schemat stanowiska do prowadzenia badań nad morfologią agregatów komórek glonów

Układ optyczny umożliwiał pomiar wybranych parametrów morfologicznych cząstek w zależności od zastosowanego obiektywu o powiększeniu  $50\times$  ( $0,5\text{--}40\ \mu\text{m}$ ),  $20\times$  ( $1,75\text{--}100\ \mu\text{m}$ ),  $10\times$  ( $3,5\text{--}210\ \mu\text{m}$ ),  $5\times$  ( $6,5\text{--}420\ \mu\text{m}$ ),  $2,5\times$  ( $13\text{--}1000\ \mu\text{m}$ ). Pomiarzy prowadzono z użyciem standardowych procedur operacyjnych – SOP (ang. *Standard Operating Procedure*). Procedura wymagała, aby przed przystąpieniem do pomiarów opracować zestaw ustawień, według których można było prowadzić analizy w sposób powtarzalny. Analizę zmian rozkładu wielkości cząstek dokonano przy użyciu programu Statistica 10 PL.

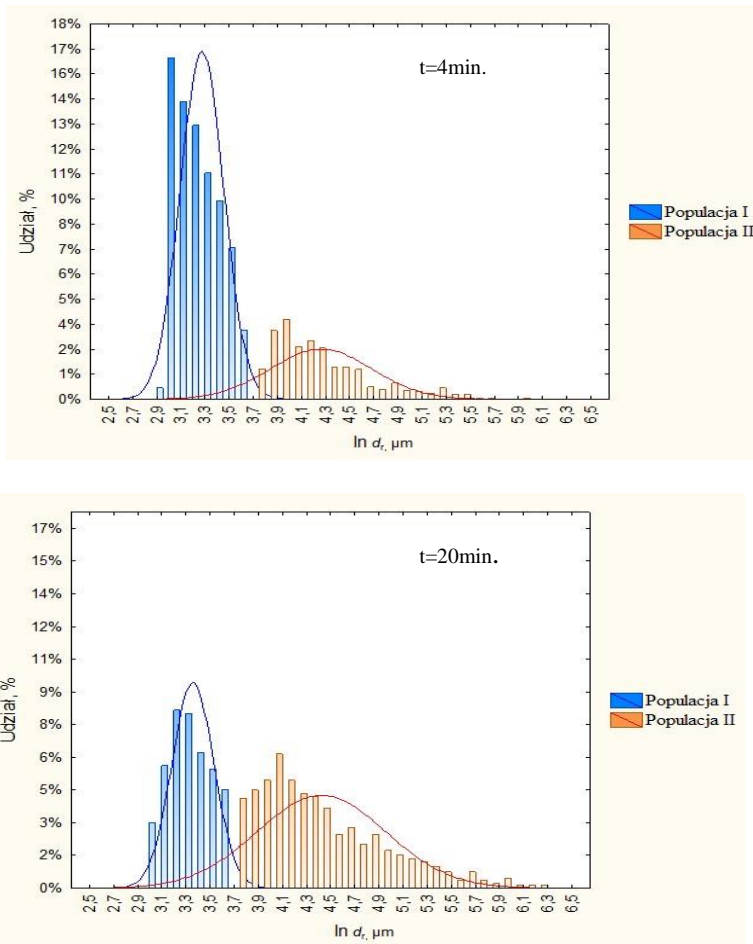
## 5. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

### 5.1. WPŁYW CZASU FLOKULACJI NA MORFOLOGIĘ AGREGATÓW SINIC *M. AERUGINOSA*

W czasie trwania koagulacji zawiesiny sinic *M. aeruginosa* pobierano próbki wody, które poddano analizie pod kątem zmian parametrów rozkładów średnicy równoważnej cząstek i zmian parametrów morfologicznych. Sinice *M. aeruginosa* po zadanym czasie kontaktu tworzyły agregaty o rozbudowanej strukturze. Jako pierwszą poddano analizie średnicę równoważną cząstek  $d_r$ .

Analiza wpływu czasu mieszania na rozkład średnicy równoważnej cząstek ujawniła, że w wyniku koagulacji tworzyły się rozkłady bimodalne. Zmienna  $d_r$ , podporządkowana była rozkładowi logarytmiczno-normalnemu. Zlogarytmowanie wartości zmiennej  $d_r$  umożliwiło uzyskanie rozkładów wielkości cząstek zbliżonych do symetrycznych (w ramach poszczególnych populacji), co pozwoliło scharakteryzować je za pomocą parametrów: wartość oczekiwana i odchylenie standardowe. Z uwagi na bimodalność rozkładu wielkości cząstek, wydzielono populację I (cząstek dyskretnych) oraz populację II (dużych agregatów). W wyniku zastosowania koagulantu w postaci chlorku żelaza (III) w stałej dawce równej  $20\ \text{mg Fe}^{+3}\cdot\text{dm}^{-3}$  zaobserwowano zmniejsz-

szenie procentowego udziału cząstek dyskretnych (populacja I) oraz jednoczesny wzrost udziału dużych agregatów (populacja II) (rys. 2).



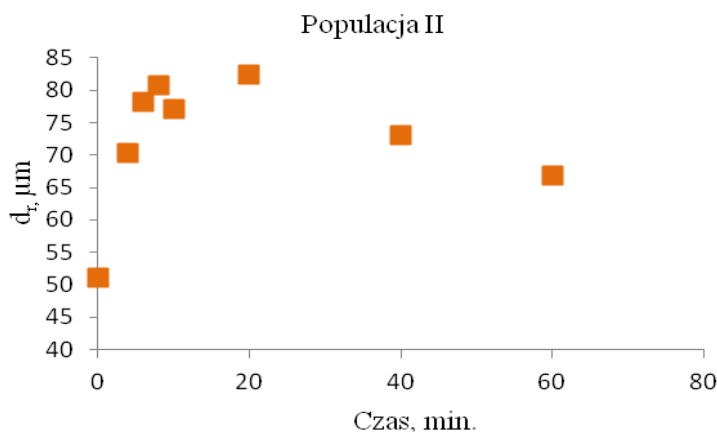
Rys. 2. Rozkład wielkości cząstek dyskretnych i agregatów sinic *M. aeruginosa* po koagulacji przy wybranych czasach flokulacji

Procentowy udział cząstek należących do populacji I na początku trwania procesu wyniósł 84% (czas: 0min – brak wolnego mieszania), natomiast po 60 minutach dominującą była populacja II, której procentowy udział stanowił 64%. Analiza wartości średniej średnicy równoważnej populacji II wskazywała na wzrost wielkości cząstek w czasie do 20 minut, po którym zanotowano najwyższą wartość średniej średnicy równoważnej wynoszącą  $82\ \mu\text{m}$  (rys. 3).

Prowadzenie procesu flokulacji przekraczającym 20 minut skutkowało niewielkim spadkiem średnicy równoważnej agregatów. Wzrost wartości odchylenia standardo-



wego w populacji II i jednocześnie jego spadek w przypadku populacji I również wskazuje na wzrost wielkości cząstek. Uzyskane wyniki badań wskazują, że wydłużenie czasu mieszania powodowało wzrost liczby zderzeń, a tym samym wzrost wielkości cząstek. Jednak wydłużenie czasu kontaktu powinno odbywać się w określonym przedziale czasu ze względu na wytrzymałość powstających agregatów. Układ flokulujący dąży zatem do ustalenia stanu równowagi pomiędzy udziałem procentowym i wielkością cząstek dyskretnych, a udziałem procentowym i wielkością powstających agregatów.



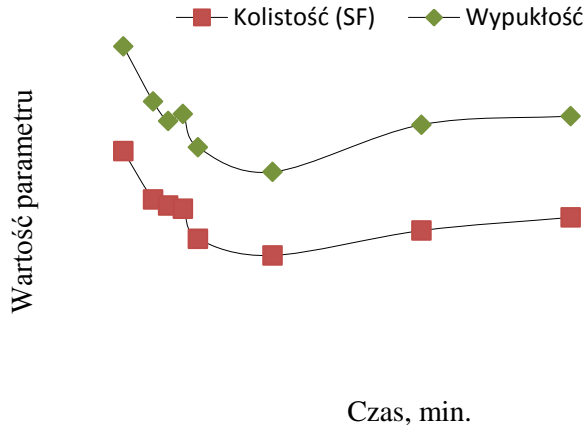
Rys. 3. Zmiany średniej średnicy równoważnej cząstek populacji II w czasie

Pozostałe analizowane parametry morfologiczne nie wykazywały, aż tak widocznych różnic w wartościach na skutek wydłużania czasu prowadzenia procesu koagulacji. Jednak zauważono pewne tendencje zachodzących zmian w przypadku parametru morfologicznego w postaci kolistości i wypukłości. W przedziale czasu od 0 do 20 minut wartości obydwu parametrów malały, a następnie w niewielkim stopniu rosły i utrzymywały się na stałym poziomie (rys. 4).

Wskaźnik SF populacji II w czasie od 0 do 20 minut obniżył swoją wartość z 0,28 do 0,18. Kolistość rozumiana jako stosunek obwodu okręgu o takim samym polu jak rzut cząstki do obwodu rzeczywistego tej cząstki świadczyła o coraz bardziej nieregularnym obwodzie powstających agregatów. Przypuszczenie to potwierdza parametr wypukłości. W czasie do 20 minut zanotowano spadek wypukłości agregatów komórek *M. aeruginosa* z 0,38 do 0,26. Znaczna różnica pomiędzy obwodem napiętej nici oplatającej cząstkę ( $P_i$ ), a obwodem rzeczywistym cząstki ( $P$ ), decydowała o niewielkiej wartości wypukłości wynikającej z poszarpanej, nieregularnej powierzchni brzowej agregatów.

Zmiany w wydłużeniu agregatów w czasie prowadzenia flokulacji były niewielkie. Parametr ten zmieniał się w przedziale wartości 0,32–0,35. Stosunkowo małe różnice

wydłużenia występujące od momentu rozpoczęcia do zakończenia procesu świadczą o równomiernym rozbudowywaniu się cząstek w płaszczyźnie X i Y.



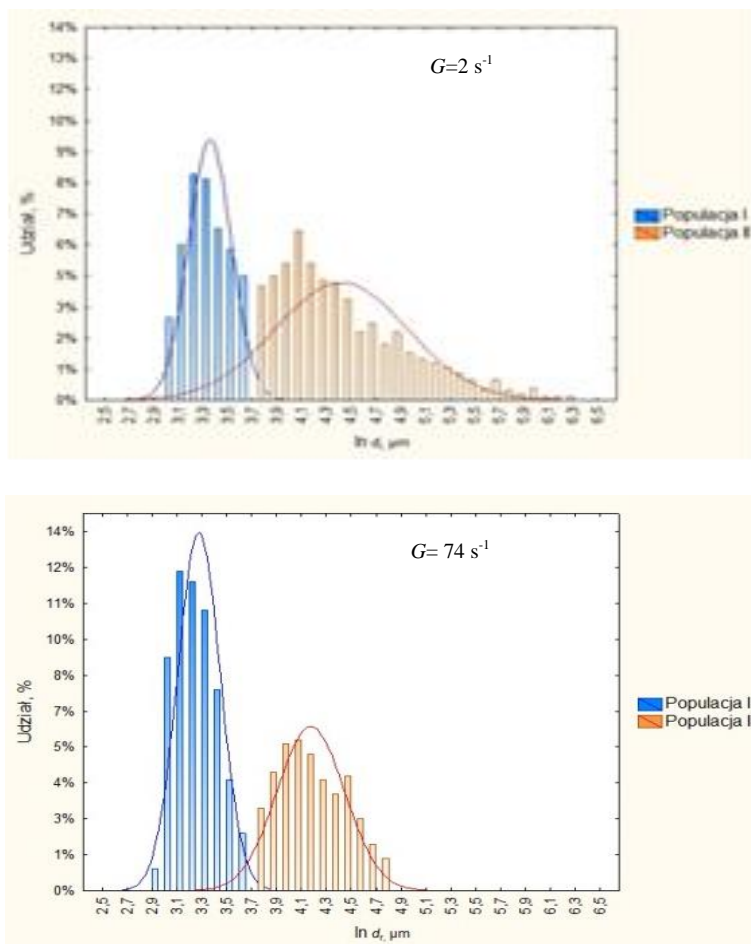
Rys. 4. Zmiany wartości parametrów morfologicznych agregatów zachodzące w czasie przebiegu procesu flokulacji

## 5.2. WPŁYW GRADIENTU PRĘDKOŚCI NA MORFOLOGIĘ AGREGATÓW *SINIC M. AERUGINOSA*

Zgodnie z zależnością (3) decydujący wpływ na zmiany liczebności cząstek, a tym samym na zmiany wielkości agregatów oprócz czasu flokulacji ma gradient prędkości ruchu cieczy  $G$ . Badania nad wpływem gradientu prędkości na skuteczność flokulacji wykonano dla czterech prędkości obrotowych mieszadła przy, których uzyskano  $G = 12, 26, 74$  i  $137 \text{ s}^{-1}$ . W analizie wzięto pod uwagę również wyniki badań uzyskane w pierwszym etapie dotyczącym wpływu czasu kontaktu na morfologię agregatów, gdzie jednym z zadanych czasów był czas 20 min. Zastosowano wówczas  $G = 2 \text{ s}^{-1}$  ( $10 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

W wyniku zwiększania ilości energii wprowadzonej do układu wyrażonej wartością  $G$  następowały zmiany w rozkładzie średnicy równoważnej cząstek (rys. 5). Utworzone agregaty tworzyły populacje bimodalne, a zmienna  $d_r$  podporządkowana była rozkładowi logarytmiczno-normalnemu. Zlogarytmowanie wartości zmiennej  $d_r$  umożliwiło uzyskanie rozkładów wielkości cząstek zbliżonych do symetrycznych (w ramach poszczególnych populacji), co pozwoliło scharakteryzować je za pomocą parametrów: wartość oczekiwana i odchylenie standardowe. Podobnie jak w przypadku badań nad wpływem czasu kontaktu na przebieg flokulacji, zlogarytmowano wartości zmiennej  $d_r$ , a cząstki podzielono arbitralnie na dwie populacje odpowiadające cząstkom dyskretnym (populacja I) oraz agregatom o znacznej wielkości (populacja

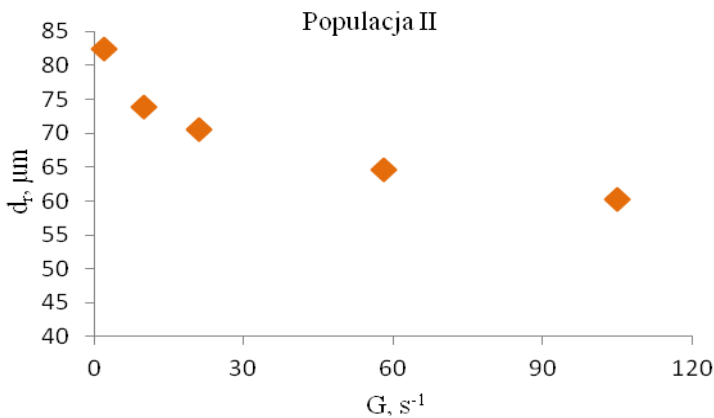
II). Wzrost gradientu prędkości prowadził do wzrostu udziału procentowego populacji I oraz jednoczesnego spadku udziału populacji II (rys. 5). Udział procentowy liczby cząstek dyskretnych uległ zwiększeniu z 42% ( $G = 2 \text{ s}^{-1}$ ) do 58% ( $G = 137 \text{ s}^{-1}$ ).



Rys. 5. Rozkład wielkości cząstek i agregatów sinic *M. aeruginosa* po koagulacji przy różnych gradientach prędkości  $G$

Wzrost wartości  $G$  wpłynął na zmniejszenie średniej średnicy równoważnej powstających procesie flokulacji agregatów. Najniższą wartość  $d_r$  zanotowano po zastosowaniu najwyższego gradientu prędkości  $G$  i wynosiła ona  $60 \mu\text{m}$  (rys. 6). Wyraźne zmniejszenie wartości średniej średnicy równoważnej cząstek populacji II oraz zmniejszenie wartości odchylenia standardowego wskazywało, że zwiększenie ilości energii wprowadzonej do układu prowadziło do erozji powierzchniowej kłaczków. Zastosowanie gradientu prędkości  $G > 2 \text{ s}^{-1}$  skutkowało większą siłą ścinania i prowa-

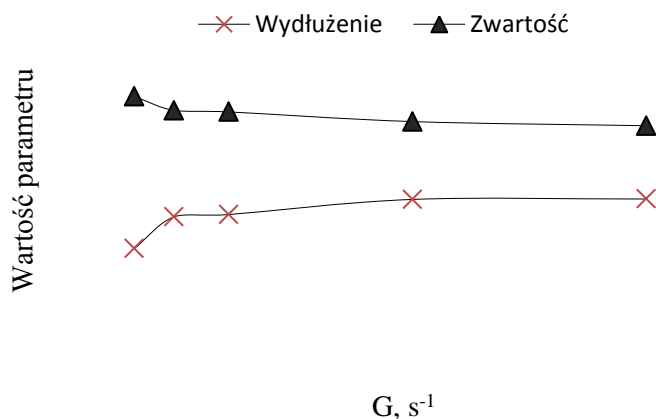
dziło do rozpadu agregatów sinic oraz zmniejszenia skuteczności procesu agregacji. Zagadnienie uzdatniania wód zawierających zawiesinę sinicową badał również Aktas i in. [2014]. Autorzy prowadzili doświadczenia nad aglomeracją komórek *sinic* *Synechococcus* sp., analizując wpływ czasu i prędkości szybkiego mieszania na wielkość powstających agregatów. Uzyskane przez Aktas i in. [2014] wyniki badań potwierdzają przypuszczenia dotyczące agregacji komórek sinic. Określenie parametrów procesu w postaci czasu i gradientu prędkości mieszania, polega na osiągnięciu równowagi pomiędzy efektywną liczbą zderzeń pomiędzy cząstkami, a wytrzymałością powstających agregatów.



Rys. 6. Zmiana średniej średnicy równoważnej cząstek populacji II przy zastosowaniu różnych gradientów prędkości mieszania

W przypadku wpływu gradientu prędkości  $G$  na parametry morfologiczne, zaobserwowano tendencję do wydłużania się cząstek. Zwiększanie ilości energii wprowadzanej do układu flokującego powodowało powstawanie agregatów o coraz większym wydłużeniu i mniejszej zwartości (rys. 7). Parametr morfologiczny w postaci zwartości opisaney jako stosunek pola powierzchni cząstki do pola powierzchni określonego przez napiętą nić opasającą cząstkę osiągnął w przypadku cząstek populacji II wartość równą 0,55.

Cząstki na skutek zwiększania prędkości mieszania charakteryzowały się coraz większą różnicą powierzchni uzyskanych pól, a tym samym mniejszą zwartością. Ponadto zwiększanie ilości energii wprowadzanej do układu powodowało wydłużanie cząstek, które po zastosowaniu  $G = 74$  i  $137 s^{-1}$  osiągnęły średnią wartość równą 0,43.



Rys. 7. Zmiany wartości parametrów morfologicznych agregatów przy zastosowaniu różnych gradientów prędkości mieszania

## 6. WNIOSKI

1. Zmiana czasu flokulacji i gradientu prędkości  $G$  w istotny sposób wpłynęły na wielkość utworzonych agregatów komórek sinicy *M. aeruginosa*.

2. Wyniki badań dotyczące zmian średnicy równoważnej w czasie wskazywały na to, że proces ten powinien odbywać się w określonym przedziale czasu. Prowadzenie procesu przez 20 minut zapewniło utworzenie agregatów o największej średnicy.

3. Wpływ czasu na morfologię cząstek był zauważalny w przypadku parametrów kolistości i wypukłości.

4. Analiza wpływu gradientu prędkości mieszania  $G$  na rozkład średnicy równoważnej cząstek ujawniła, że wraz ze wzrostem ilości energii wprowadzanej do układu średnica agregatów malała.

5. Na skutek działania coraz większej siły odśrodkowej agregaty charakteryzowały się coraz większym wydłużeniem i mniejszą zwartością.

## LITERATURA

- [1] AKTAS T.S., FUJIBAYASHI M., TAKEDA F., MARUO CH., NISHIMURA O., *The role of rapid mixing condition on picophytoplankton floc growth*, Desalination and water treatment 2014, (52): 1404–1413.
- [2] CHOW C.W.K., HOUSE J., VELZEBOER R.M.A., DRIKAS M., BURCH M.D., SREFFENSEN D.A., *The effect of ferric chloride flocculation on cyanobacterial cells*, Wat. Res 1998, 32(3): 808–814.

- [3] LI. T., ZHU Z., WANG D., YAO Ch., TANG H., *Characterization of floc size, strength and structure under various coagulation mechanism*, Powder Technology 2006, (168): 104–110.
- [4] WANG D., WU R., JIANG Y., CHOW C.W.K., *Characterization of floc structure and strength: Role of changing shear rates under various coagulation mechanism*, Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, (379): 36–42.

USE OF IMAGE ANALYZER IN THE EVALUATION OF THE FLOCCULATION OF CELLS  
*CYANOBACTERIUM MICROCYSTIS AERUGINOSA*

In this paper, the influence of flocculation time and the velocity gradient of the liquid on the morphology of the *Cyanobacterium Microcystis aeruginosa* aggregates, commonly present in waters with high trophic state have been assessed. The tests were performed using a Morphologi G3 image analyzer. It has been found that a change in the duration of the flocculation process and the amount of energy introduced to the system significantly affected the size of the formed aggregates.