

## Zastosowanie nowoczesnych technik pomiarowych do badań charakterystyki kłaczków osadu czynnego

*Krzysztof Barbusiński  
Marcin Kłós*  
Politechnika Śląska  
Gliwice

### 1. Wprowadzenie

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych i efektywnych sposobów oczyszczania ścieków jest zastosowanie procesu osadu czynnego. Efektywność tego procesu uzależniona jest nie tylko od rzeczywistych warunków technologicznych i stanu biochemicznego osadu czynnego, ale także od jego charakterystyki fizycznej, determinowanej właściwościami poszczególnych kłaczków. Dokonujący się postęp techniczny pozwolił w ostatnich latach rozszerzyć zakres badań kłaczków osadu czynnego zarówno ze względu na dostępność do specjalistycznej aparatury pomiarowej, umożliwiającej wykroczenie poza dotychczas istniejące ramy klasycznej obserwacji mikroskopowej, jak również z uwagi na opracowanie specyficznych metod preparowania kłaczków do badań.

Wprowadzanie nowoczesnych technik pomiarowych w głównej mierze opiera się na zmodyfikowanych metodach klasycznej obserwacji mikroskopowej kłaczków. Najczęstszym usprawnieniem jest zastosowanie systemów analizy obrazu w celu zwiększenia efektywności obserwacji i miarodajności uzyskanych wyników. Systemy te wykorzystują techniki komputerowe do rejestrowania, przetwarzania, analizowania i archiwizowania obrazów uzyskiwanych poprzez kamerę wideo, np. z mikroskopu.

W opracowaniu przedstawiono wyniki badań charakterystyki fizycznej i morfologii kłaczków osadu czynnego, uzyskane dzięki zastosowaniu specyficznych metod eksperymentalnych oraz wykorzystaniu systemów analizy obrazu.

## 2. Kierunki badań

Badania charakterystyki fizycznej kłaczków prowadzone są w trzech kierunkach:

- doskonalenia metod analizowania wielkości i morfologii kłaczków;
- badania wpływu zmiany warunków pracy osadu czynnego na wielkość i strukturę kłaczków;
- analizy wpływu parametrów geometrycznych i struktury kłaczków na efektywność procesów sedymentacji, zagęszczania i odwadniania osadów.

Kierunki te są ze sobą ściśle powiązane, zarówno na etapie eksperymentu, jak i analizy uzyskanych rezultatów. Należy zaznaczyć, że dla uzyskania wiarygodnych wyników badań niezbędne jest zachowanie szczególnej ostrożności w trakcie pobierania materiału biologicznego (osad czynny), jak również podczas przechowywania próbek (jeśli natychmiastowa analiza nie jest możliwa). Dlatego w tego typu badaniach osad czynny pobierany jest pipetą o szerokim otworze (4-5 mm średnicy), co zapobiega możliwości rozbijania i deformowania kłaczków, a próbki są często stabilizowane w agarze (1-3).

## 3. Charakterystyka kłaczków

### 3.1. Parametry geometryczne

Wcześniejsze badania charakterystyki geometrycznej kłaczków osadu czynnego opierały się na zastosowaniu bezpośrednich metod obserwacji mikroskopowych (4-6) lub na analizie fotografii kłaczków (7-8). Rozwój techniki komputerowej umożliwił cyfrową obróbkę obrazu mikroskopowego eliminując ryzyko błędów oraz pozwalając na pomiar wielkości geometrycznych niemożliwych do analizowania klasycznymi metodami mikroskopowymi. Przydatność systemów analizy obrazu do badań wielkości kłaczków osadu czynnego potwierdzili jako jedni z pierwszych Li i Ganczarczyk (2). Zastosowali oni układ złożony z kamery wideo połączonej z mikroskopem świetlnym i sprzę-



żonej z mikrokomputerem wyposażonym w specjalne oprogramowanie oraz pióro świetlne. Uzyskane wyniki dowiodły, że systemy te mogą być efektywnie wykorzystane do precyzyjnych pomiarów parametrów geometrycznych: długości, szerokości, obwodu, pola powierzchni przekroju poprzecznego oraz współczynników kształtu tych biologicznych agregatów.

Analiza rozkładów najdłuższego (długość) i najkrótszego (szerokość) wymiaru kłaczków wykazała, że największa liczba mierzonych agregatów znajduje się w małym zakresie wielkości i obniża się wraz ze wzrostem rozmiarów kłaczków. Pomiarzy średnicy ekwiwalentnej (średnica koła o powierzchni równej powierzchni rzutu kłaczków), kołowości (stosunek powierzchni koła o średnicy równej długości kłaczków do jego powierzchni rzutu) i wydłużenia (stosunek długości kłaczków do jego szerokości) dowiodły, że większość kłaczków ma kształt zbliżony do sferycznego. Stwierdzono także, że rozkład wielkości kłaczków większych od 10  $\mu\text{m}$  jest rozkładem logarytmiczno-normalnym. Zostało to potwierdzone także w innych badaniach (3,9).

Oprócz rozkładu traktowanego jako liczba występowania agregatów w poszczególnych przedziałach wielkości, rozkład kłaczków osadu czynnego może być także wyrażony według pola powierzchni, objętości i masy w oparciu na bezpośrednich pomiarach i równaniach różniczkowych zdefiniowanych przez Allena (10). Na podstawie wyników analizy matematycznej przeprowadzonych pomiarów wykazano, że małe kłaczkiki (< 10  $\mu\text{m}$ ), które stanowią głównie rozproszone pojedyncze mikroorganizmy lub skupiska niewielu mikroorganizmów, w znacznym stopniu przewyższają liczebnie kłaczkiki o większych rozmiarach. Pomimo że małe kłaczkiki przeważają ilościowo, duże agregaty są głównym źródłem powierzchni, objętości oraz masy osadu czynnego (3,9). Dlatego też kłaczkiki większe od 10  $\mu\text{m}$  zasługują na szczególną uwagę w badaniach struktury oraz sedymentacji osadu, jak również w analizie procesów wymiany masy.

### 3.2. Struktura

Do pełnego zrozumienia procesów zachodzących w kłaczkach osadu czynnego niezbędne jest poznanie ich struktury. Klasyczna obserwacja mikroskopowa nie jest w stanie dostarczyć wystarczających informacji o morfologii kłaczków. W celu polepszenia jakości badań prowadzonych nad strukturą agregatów mikrobiologicznych należało prowadzić obserwacje przekrojów o mniejszej grubości, wykorzystując bardziej inwazyjne metody zapożyczone z histopatologii, umożliwiające obserwacje wnętrza agregatu. Najnowocześniejszym sposobem jest cięcie kłaczków i mikroskopowa analiza uzyskanych przekrojów (11). Metody zastosowane ostatnio w Polsce zostały opisane w „Biotechnologii” (12).

Zastosowanie systemów analizy obrazu do badań struktury otrzymanych przekrojów kłaczków osadu czynnego dowiodło braku jednolitości w ich strukturze oraz w wewnętrznym rozkładzie mikroorganizmów. Wszystkie analizy wykazały, że mikroorganizmy, woda i pozakomórkowe biopolimery są nieregularnie rozmieszczone w całej objętości kłaczków. Nie znaleziono szczegól-



nych obszarów, gdzie skupiska organizmów byłyby w jakiś sposób charakterystyczne. Neguje to prawdziwość założenia poczynionego przez Mitani (13), że rozkład liczby mikroorganizmów w kłaczkach jest jednostajnie malejący od centrum agregatu do jego powierzchni. Według tego modelu w centrum kłaczków miało się znajdować swoiste jądro, całkowicie zasiedlone przez mikroorganizmy.

Nieregularność struktury tłumaczy również obserwowane przypadkowe rozmieszczenie przestrzeni wodnych w kłaczkach. Wielkość obserwowanych luk wodnych zawiera się w szerokim zakresie. Najmniejsze z nich mają rozmiary pojedynczej komórki bakteryjnej, a największe prawie całkowicie wypełniają przekrój poprzeczny kłaczków. Komputerowa „rekonstrukcja” obrazów poszczególnych przekrojów kłaczków pozwoliła zauważyć dużą zmienność wielkości obszarów wodnych w kierunku prostopadłym do powierzchni analizowanych przekrojów. Obserwowany układ połączeń „zbiorników” i „kanałów” wodnych potwierdza hipotezę o możliwości przepływu drenażowego przez kłaczkę osadu czynnego (14). Udział zbiorników i kanałów wodnych w całkowitej powierzchni analizowanego przekroju kłaczków można określić współczynnikiem porowatości przekroju. Wyrażony jest on stosunkiem niewybarwionej (pustej) części kłaczkę do całkowitej powierzchni przekroju. Uzyskane wartości tego współczynnika zawierają się w zakresie 30÷55%. Wskaźnik porowatości przekroju różni się od porowatości kłaczkę. Porowatość jest cechą kłaczkę jako obiektu trójwymiarowego, natomiast wskaźnik porowatości charakteryzuje przekrój. Te dwa wskaźniki są porównywalne tylko dla sekcji o nieskończonej małej grubości.

Ostatnio wykazano także, że ze względu na nieregularny kształt, kłaczkę osadu czynnego posiadają naturę fraktali, a ich powierzchnia zewnętrzna może być scharakteryzowana za pomocą współczynnika wymiaru fraktalnego (15). Zastosowanie teorii fraktali stwarza nowe możliwości opisu charakterystyki geometrycznej i morfologii kłaczków. Ponieważ wymiar fraktalny zmienia się dla kłaczków generowanych w różnych warunkach procesu osadu czynnego, wskaźnik ten może być pomocny do analizowania czynników wpływających na flokulację tych mikrobiologicznych agregatów.

Istotne znaczenie pozakomórkowych biopolimerów w kształtowaniu się struktury kłaczków było przypuszczane już wcześniej (16,17). Wnioskowano, że są one jednym z ważniejszych czynników wpływających na bioflokulację i utrzymanie spistości kłaczków, a zmniejszona ich zawartość może być przyczyną istotnych zmian w rozkładzie wielkości.

Analiza przekrojów kłaczków osadu czynnego potwierdziła te przypuszczenia, wykazując obecność w nich dużej ilości pozakomórkowych biopolimerów. Biopolimery obserwowane wewnątrz kłaczków, nadają kształt podstawowym składnikom kłaczkę poprzez wiązanie większości mikroorganizmów w jedną całość i utrzymanie integralności kłaczków (18). Dzięki temu kłaczkę mogą zachować swoją formę i wielkość pomimo silnych turbulencji występujących podczas procesu napowietrzania w bioreaktorach z osadem czynnym. Znaczna ilość tych polimerów sprawia, że należy brać je pod uwagę w obliczeniach gęstości i porowatości kłaczków. Wpływają one również



w znacznym stopniu na transport substratów i produktów w układzie komórka — otoczenie. Substraty podczas wnikania do wnętrza komórki muszą pokonać nie tylko dyfuzyjny opór wody, lecz również opór stwarzany im przez barierę biopolimerów, które otaczają bardzo ściśle pojedyncze mikroorganizmy i ich kolonie.

#### 4. Charakterystyka kłaczków w zmiennych warunkach obciążenia substratowego osadu czynnego

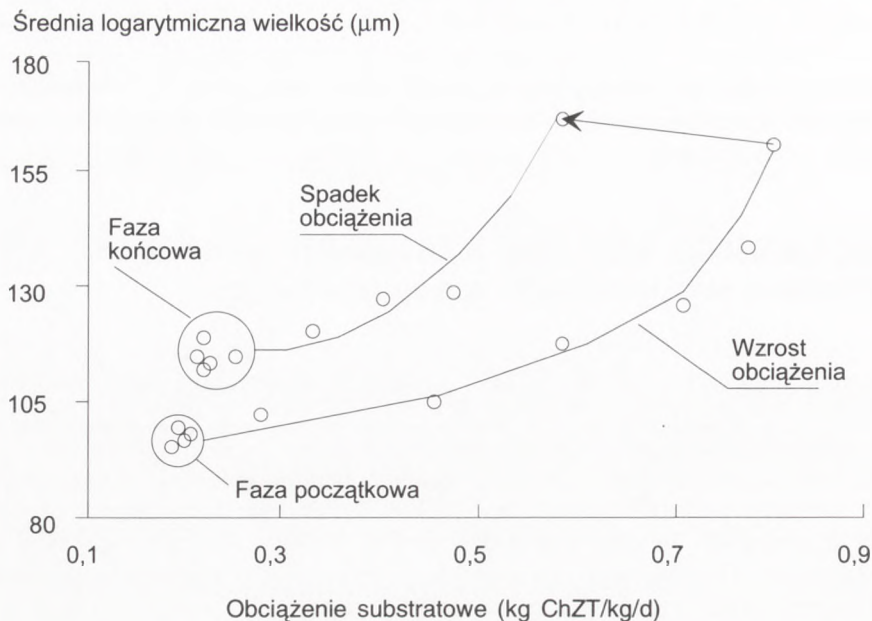
Zmiana warunków technologicznych procesu oczyszczania ścieków ma bezpośredni wpływ na kształtowanie się poszczególnych właściwości fizycznych osadu czynnego. Zagadnienia te związane są z biochemicznymi i fizycznymi aspektami adaptacji osadu czynnego (19).

Najważniejszym parametrem technologicznym podczas eksploatacji oczyszczalni ścieków jest obciążenie osadu ładunkiem zanieczyszczeń organicznych. Wykazano (3), że parametr ten wywiera istotny wpływ na rozkład wielkości kłaczków. Długotrwałe zmiany obciążenia osadu powodują poważniejsze zakłócenia w rozkładzie wielkości kłaczków, niż zmiany bardziej gwałtowne, lecz krótkotrwałe. Podczas systematycznego wzrostu, a następnie spadku obciążenia osadu czynnego zmiany średniej wielkości kłaczków nie pokrywają się ze sobą, lecz mogą tworzyć krzywą o kształcie histerezy (rys.1). Istnienie związków pomiędzy obciążeniem a rozkładem wielkości kłaczków potwierdziły również inne badania, prowadzone zarówno w skali modelowej (20,22), jak i technicznej (21). Uważa się, że jest to w dużym stopniu związane z produkcją pozakomórkowych biopolimerów.

Obciążenie osadu wpływa na zawartość biopolimerów w kłaczkach. Wykazano, że mikroorganizmy wytwarzają mniejsze ilości biopolimerów przy wyższych obciążeniach substratowych (16,17). Obniżanie obciążenia powinno zatem prowadzić do wzrostu ich produkcji i zwiększenia spoistości kłaczków. W warunkach ekstremalnych niedobór substratu może jednak być przyczyną wykorzystywania tych biopolimerów jako substancji zapasowej. Jeśli szybkość wykorzystania biopolimerów jest większa od ich produkcji, może to spowodować zmniejszenie spoistości kłaczków i ich rozpad. Zjawisko rozpadu kłaczków zgodne z tą hipotezą zaobserwowali Barbusiński i Kościelniak (3).

#### 5. Wpływ charakterystyki kłaczków na ich prędkość opadania i proces odwadniania osadu czynnego

Charakterystyka fizyczna kłaczków jest interesująca z wielu praktycznych powodów obejmujących transport substratów i tlenu, a także procesy flokulacji i odwadniania osadu czynnego. Charakterystyka poszczególnych agregatów jest też bezpośrednio związana z siłami oporu przy ich swobodnym opadaniu w cieczy. Informacje dotyczące szybkości opadania pojedynczych



Rys. 1. Efekt histerezy wielkości kłaczków podczas zmian obciążenia substratowego wg (3).

kłaczków są istotne w badaniach sedymentacji osadu czynnego, jak również dla określenia gęstości kłaczków. We wcześniejszych eksperymentach wykazano bowiem, że średnia prędkość opadania zawiesiny osadu czynnego może być empirycznie wyrażona jako funkcja liniowa prędkości opadania pojedynczych kłaczków (23).

### 5.1. Prędkość opadania kłaczków

Dotychczasowe badania wzajemnych powiązań pomiędzy charakterystyką, szybkością sedymentacji i gęstością kłaczków były ograniczone ze względu na trudności związane głównie z pomiarami parametrów geometrycznych tych biologicznych aglomeratów podczas swobodnego opadania. Zastosowanie nowoczesnych technik badawczych pozwala obecnie na dokonywanie szybkich i wiarygodnych pomiarów tych parametrów.

Wykorzystanie techniki stroboskopowej w powiązaniu z metodą fotografii szybkoklatkowej (wieloekspozycyjnej), umożliwiło powiązanie prędkości opadania kłaczków z ich wielkością (24,25). W przypadku największego wymiaru (długości) jako kryterium wielkości kłaczków uzyskane dane można było aproksymować zarówno jako zależność liniową oraz jako funkcję potęgową. Funkcja nieliniowa lepiej odwzorowuje zależności dla małych kłaczków, a liniowa dla agregatów o większych rozmiarach. Wyrażając wielkość kłaczków jako średnicę ekwiwalentną przekroju poprzecznego prostopadłego do kie-



runku opadania, otrzymywano funkcję liniową jednak współczynniki korelacji były mniejsze niż poprzednio.

W przeprowadzonych badaniach wykazano również prawdopodobny wpływ nieregularności kształtu agregatów na ich właściwości sedymentacyjne. Zaobserwowano, że prędkość opadania nie zawsze zwiększała się wraz ze wzrostem wielkości kłaczków, chociaż nie była to tendencja ogólna. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami (26,27), wpływ sił oporu na agregat w czasie swobodnego opadania jest znacznie mniejszy dla kłaczków o kształcie zbliżonym do sferycznego niż dla cząstek niesferycznych. Oznacza to, że kłaczkki o tej samej objętości, ale o różnym kształcie mogą opadać z różnymi prędkościami.

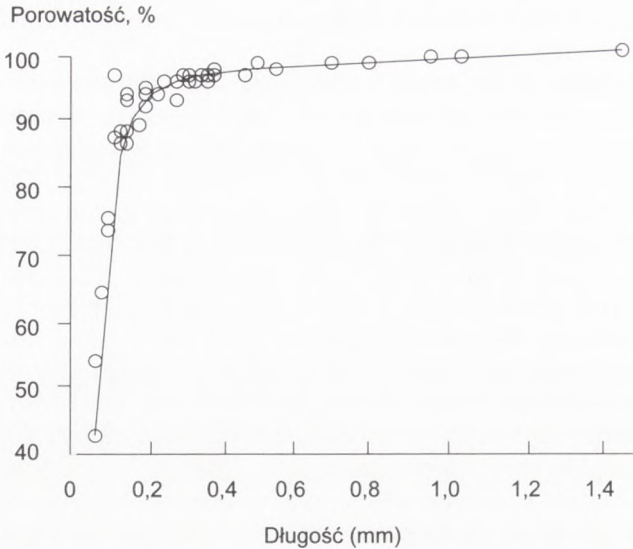
Prędkość opadania kłaczków związana jest też z ich orientacją podczas sedymentacji ponieważ występujące w tych warunkach siły oporu zależą od wielkości pola powierzchni skierowanego czołowo do kierunku opadania. Dotyczy to szczególnie agregatów o nieregularnych kształtach, które mogą opadać z wieloma możliwymi orientacjami (10). Kształt i przestrzenna orientacja kłaczków wpływa także na kierunek ich opadania. Zaobserwowano, że cząstki o kształcie płaskim, dyskowatym i igłowym (nitkowatym) sedymentują często w taki sposób, że ich najdłuższy wymiar nie jest ani równoległy ani prostopadły do kierunku pionowego. W niektórych przypadkach droga opadania takich kłaczków nie jest pionowa, tak jak gdyby działała na nie pozioma składowa ruchu, pomimo że testy prowadzone są w warunkach ustalonych, wykluczających wpływ czynników zewnętrznych.

Pomiary wielkości i prędkości opadania kłaczków osadu czynnego mogą być wykorzystane do obliczeń ich porowatości, która ma między innymi wpływ na procesy dyfuzji substratów do mikroorganizmów w kłaczkach. W oparciu na zależnościach matematycznych i danych doświadczalnych (25) określono porowatość kłaczków, obliczoną w funkcji ich wielkości (rys. 2). Widać, że dla agregatów mniejszych od 200  $\mu\text{m}$  porowatość bardzo szybko rośnie wraz ze wzrostem wymiarów. Dla kłaczków większych porowatość wzrasta znacznie wolniej. Jest to spowodowane morfologią kłaczków. Tak jak dowiedziono w badaniach przeprowadzonych na agregatach ilastych, ich porowatość zależy od charakteru tzw. pierwotnych cząstek (skupisk) z których składają się te agregaty (26). Przykładowo, jeśli agregaty ilaste zawierały głównie pierwotne skupiska o kształtach sferycznych to ich porowatość wynosiła około 40-50%, podczas gdy dla pierwotnych cząstek o kształtach zbliżonych do nitki wynosiła nawet ponad 90%.

Obserwacje te znajdują także potwierdzenie w przypadku mikrobiologicznych agregatów. Duże kłaczkki osadu czynnego zazwyczaj zawierają znaczną liczbę mikroorganizmów nitkowatych, dających w efekcie strukturę bardziej porowatą. Natomiast tworzące kłaczkki mikroorganizmy zooglealne, które posiadają z natury kształt zbliżony do sferycznego, formują z reguły małe, spoiste kłaczkki. Dlatego morfologia mikroorganizmów osadu czynnego może odgrywać ważną rolę w kształtowaniu porowatości kłaczków.

Z porowatością materiałów łączy się cecha zwana przepuszczalnością. Dotychczasowe badania morfologii oraz szybkości opadania kłaczków (w tym rezultaty testów agregatów immobilizowanych na różnych nośnikach) dopro-





Rys. 2. Porowatość kłaczków w funkcji ich największego wymiaru wg (25).

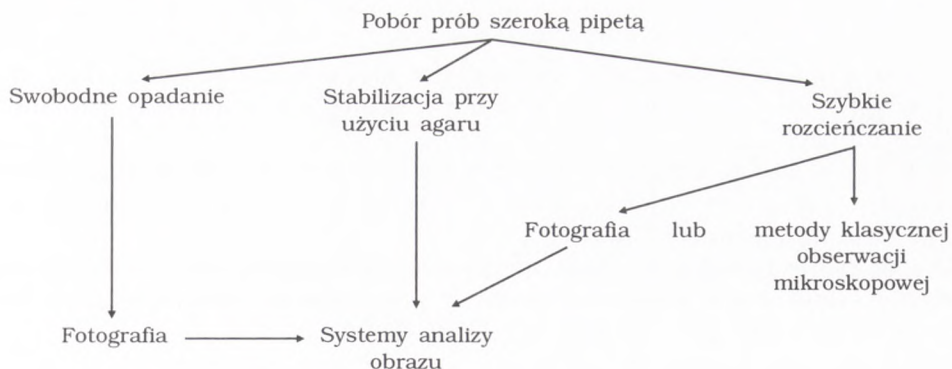
wadziły do sformułowania wspomnianej hipotezy zakładającej możliwość przepływu drenażowego cieczy przez kłaczkę osadu czynnego. Na podstawie danych uzyskanych w testach swobodnego opadania kłaczków oraz wykorzystując metody matematyczne sprawdzone wcześniej dla innych materiałów wykazano prawdziwość tej hipotezy. Dowiedziono, że bardzo małe kłaczkę nie były przepuszczalne dla cieczy, ale kłaczkę o długości od 50 do 1000  $\mu\text{m}$  były przepuszczalne, a wydajność przepływu była w zakresie od  $10^2$  do  $10^7$   $\mu\text{m}^3/\text{s}$  (28). Zależność pomiędzy porowatością i przepuszczalnością kłaczków najlepiej opisuje model matematyczny Carman-Kozeny. Na podstawie zjawiska przepływu drenażowego mogą być również w znacznym stopniu wyjaśnione problemy związane z wpływem nieregularności kształtu oraz orientacji na proces opadania kłaczków.

## 5.2. Proces odwadniania osadu

Osady powstające podczas procesów oczyszczania ścieków charakteryzują się różną podatnością na odwadnianie. Na odwadnialność osadów wpływa wiele czynników m.in. odczyn, potencjał elektrokinetyczny, zawartość substancji organicznych i związanej wody, lepkość, sposób kondycjonowania, typ osadu (tlenowy czy beztlenowy), porowatość oraz wielkość cząstek.

W przeprowadzonych dotychczas eksperymentach wykazano, że rozkład wielkości cząstek, a szczególnie udział małych cząstek w ogólnej masie osadu ma podstawowe znaczenie dla efektywności jego odwadniania (29-33). W części tych badań stwierdzono przydatność do pomiarów wielkości, dyfrakcyjnego spektroskopu laserowego (32,33). Uzyskane wyniki dowiodły, że naj-





Rys. 3. Podstawowe techniki badań kłaczków osadu czynnego i ich powiązania wg (2).

większy wpływ na opór filtracji mają pseudokoloidy. Wzrost koncentracji cząstek o wymiarach 1-100  $\mu\text{m}$  w osadzie powoduje znaczne zwiększenie współczynnika oporu filtracji. Jest to możliwe, gdyż cząstki pseudokoloidów są w stanie przemieszczać się w obrębie placka filtracyjnego blokując istniejące kanały, poprzez które odbywa się transport cieczy. Zjawisko to nosi nazwę „zasłepiania” i jest powodem spadku porowatości placków filtracyjnych, co pociąga za sobą wzrost oporów filtracji. Analiza rozkładów wielkości kłaczków dla różnych osadów (31) wykazała, że wielkość cząstek jest bardzo dobrym wskaźnikiem podatności osadów na „zasłepianie”. Dla osadu czynnego o średniej wielkości kłaczków powyżej 40  $\mu\text{m}$ , zjawisko zatykania się placka filtracyjnego prawie nigdy nie zachodzi, w przeciwieństwie do osadów charakteryzujących się mniejszymi kłaczkami.

Prócz bezpośredniego oddziaływania na proces filtracji, wielkość cząstek osadu ma również wpływ na inne czynniki decydujące o przebiegu procesu odwadniania. Przykładowo, efektywność działania różnych reagentów używanych do kondycjonowania osadów jest uzależniona od ich zdolności do tworzenia aglomeratów o dużych rozmiarach.

W omawianych badaniach podkreślano również znaczenie struktury kłaczków. Analizując rolę jonów  $\text{Ca}^{+2}$  w procesie odwadniania zauważono, że usunięcie z osadu czynnego tych kationów prowadziło do zwiększenia ilości małych kłaczków i wzrostu oporów filtracji (34). Argumentowano, że około połowa wszystkich kationów  $\text{Ca}^{+2}$  zawartych w osadzie czynnym jest związana z biopolimerami, będąc w ten sposób ważnym składnikiem biorącym udział w formowaniu struktury kłaczków.

## 6. Podsumowanie

Techniki służące do pomiarów wielkości i struktury kłaczków osadu czynnego można sklasyfikować w trzech głównych kategoriach: klasyczne metody

obserwacji mikroskopowej, fotografowanie kłaczków połączone z analizą zdjęć lub negatywów oraz systemy analizy obrazu (rys. 3). Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań wykazują, że systemy analizy obrazu mogą być efektywnie używane do precyzyjnych pomiarów szeregu geometrycznych i morfologicznych cech kłaczków. W porównaniu z metodami klasycznej obserwacji mikroskopowej lub technikami opartymi na fotografii są one dokładniejsze, w mniejszym stopniu uzależnione od doświadczenia osoby dokonującej pomiarów oraz mniej czasochłonne.

W celu pełnego wykorzystania możliwości tych systemów należy w dalszym ciągu doskonalić specyficzne metody preparowania kłaczków oraz modernizować warunki przeprowadzania eksperymentów.

## Literatura

1. Sezgin M., Jenkins D., Parker D. S., (1978), *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 50, 362-381.
2. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1986), *Wat. Pollut. Res. J. Can.*, 21, 130-140.
3. Barbusiński K., Kościelniak H., (1995), *Wat. Res.*, 29, 1703-1710.
4. Mueller J. A., Morand J., Boyle W. C., (1967), *Appl. Microbiol.*, 15, 125-134.
5. Parker D. S., Kaufman W. J., Jenkins D., (1971), *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 43, 1817-1833.
6. Sadalgekar V. V., Mahajan B. A., Shaligram A. M., (1988), *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 60, 1862-1863.
7. Magara Y., Nambu S., Utosawa K., (1976), *Wat. Res.*, 10, 71-77.
8. Tambo N., Watanabe Y., (1979), *Wat. Res.*, 13, 409-419.
9. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1991), *Res. J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 63, 806-814.
10. Allen T., (1981), *Particle size measurement*, 3<sup>rd</sup> ed., Chapman and Hall Ltd., London.
11. Ganczarczyk J. J., Zahid W. M., Li D. H., (1992), *Wat. Res.*, 26, 1695-1699.
12. Barbusiński K., Kościelniak H., (1997), *Biotechnologia*, 1(36), 37-44.
13. Mitani T., Unno H., Akekata T., (1983), *Jpn. Wat. Res.*, 6, 69-75.
14. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1988), *Wat. Res.* 22, 789-792.
15. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1989), *Envir. Sci. Technol.*, 23, 1385-1389.
16. Pavoni J. L., Tenney M. W., Echelberger W. F., (1972), *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 44, 414-431.
17. Chao A. C., Keinath T. M., (1979), *Wat. Res.*, 13, 1213-1223.
18. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1990), *Biotechnol. Bioeng.*, 35, 57-65.
19. Barbusiński K., (1992), *Post. Mikrobiol.*, XXXI (1), 111-125.
20. Andreadakis A. D., (1993), *Wat. Res.*, 27, 1707-1714.
21. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1993), *Wat. Envir. Res.*, 65, 258-263.
22. Kościelniak H., Barbusiński K., (1995), *Mat. III Symp. Biotechnologia Środowiskowa, Ustroń-Jaszowiec*, 75-82.
23. Bradley R. A., Krone R. B., (1971), *J. Sanit. Engng Div. Am. Soc. Civ. Engrs*, 97, 59-79.
24. Hermanowicz S. W., Ganczarczyk J. J., (1983), *Biotechnol. Bioeng.*, 25, 1321-1330.
25. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1987), *Wat. Res.*, 21, 257-262.
26. Lerman A., (1979), *Geochemical Processes: Water and Sediment Environment*, Wiley, New York.
27. Ozturgut E., Lavallo J. W., (1984), *Envir. Sci. Technol.*, 18, 947-952.
28. Li D. H., Ganczarczyk J. J., (1992), *Wat. Environ. Res.*, 64, 236-240.
29. Karr P. R., Keinath T. M., (1978), *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 50, 1911-1930.
30. Lawler D. F., (1986), *Envir. Sci. Technol.*, 20, 856-861.
31. Novak J. T., Goodman G. L., Pariroo A., Huang J. C., (1988), *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 60, 206-214.



32. Olböter L., Vogelpohl A., (1993), *Wat. Sci. Technol.*, 28, 149-157.
33. Friedrich E., Friedrich H., Heinze W., Jobst K., Richter H. J., Hermel W., (1993), *Wat. Sci. Technol.*, 28, 145-148.
34. Bruus J. H., Nielsen P. H., Keiding K., (1992), *Wat. Res.*, 26, 1597-1604.

## Application of advanced measuring techniques for the study of activated sludge flocs characteristic

### Summary

The activated sludge process is one of the major biological wastewater treatment techniques. The physical properties of the activated sludge flocs are interesting for numerous practical reasons, including activated sludge mass transfer phenomena, biomass flocculation, solid-liquid separation, sludge thickening and dewatering. Application of the advanced measuring techniques, such as image analysis system, and development of specific experimental methods including sample preparation (embedding procedures and microtome sectioning) as well as multi-exposure photography with stroboscope illumination source, can provide complex information about flocs and may lead to a better understanding of the activated sludge process and more effective control of the process performance. In this paper, the results of a recent study concerning the physical properties and structure of the activated sludge flocs are presented.

### Key words:

activated sludge flocs, physical characteristics of floc, internal structure, porosity, permeability, free settling velocity, sludge dewatering, microtome sectioning, image analysis system.

### Adres do korespondencji:

Krzysztof Barbusiński, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18, 44-101 Gliwice.