

Ewa Burszta-Adamiak, Magdalena Kuśnierz, Janusz Łomotowski, Paweł Wiercik

**BADANIA SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO
ZAWIESIN ZAWARTYCH W ŚCIEKACH
KOMUNALNYCH I PRZEMYSŁOWYCH**

***THE RESEARCH ON GRAIN SIZE DISTRIBUTION
IN SUSPENSION OCCURRING IN MUNICIPAL
AND INDUSTRIAL WASTEWATER***

Streszczenie

W procesach oczyszczania wody i ścieków przy usuwaniu zawiesin istotną rolę odgrywają właściwości i cechy pojedynczych cząstek. Powierzchnia właściwa, kształt, wielkość i stopień upakowania cząstek zawiesiny decyduje o ich właściwościach sedymentacyjnych i sorpcyjnych. Informacje na temat budowy wewnętrznej, struktury i rozmiaru cząstek tworzących zawiesinę można uzyskać między innymi w badaniach składu granulometrycznego przy wykorzystaniu granulometrów laserowych.

W artykule przedstawiono oryginalne wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w komunalnych ściekach surowych, ściekach oczyszczonych oraz w popłuczynach powstających na stacjach uzdatniania wód podziemnych.

Przy opracowywaniu wyników badań składu granulometrycznego zawiesin wykorzystano zmodyfikowaną postać równania Avramiego.

Słowa kluczowe: ścieki surowe i oczyszczone, popłuczyny, zawiesina, skład granulometryczny

Summary

During removal of suspension in course of water and wastewater treatment processes the crucial role is played by properties and features of individual particles. Such parameters as specific surface area, shape, size and compaction of sus-

suspension particles may decide on their settling and sorptive properties. The results of grain size analysis, obtained by means of laser granulometer, give information about structure and size of particles that form suspension.

In this paper the original results of suspension's grain size analysis conducted on municipal wastes originating from mechanical-biological wastewater treatment plants and on filter backwash water taken from iron and manganese removal filters on groundwater treatment plants are presented.

The modified form of Avrami equation was used in order to describe grain size results and to identify the process of suspension's formation.

Key words: raw and treated sewage, filter backwash water, suspension, grain size

WPROWADZENIE

Zawiesiny występujące w ściekach charakteryzują się złożoną budową, co wpływa na ich właściwości sedymentacyjne oraz sorpcyjne. Skład granulometryczny polidispersyjnej zawiesiny można ustalić z wykorzystaniem analizatorów optycznych, głównie granulometrów laserowych. W urządzeniach tego typu dokonuje się pomiaru wielkości rozpraszania światła przez cząstki tworzące zawiesinę. Analiza wielkości rozproszenia światła lasera pod różnym kątem w stosunku do kierunku osi optycznej wiązki światła wychodzącego z lasera pozwala określić liczbę cząstek n_i , objętość v_i oraz powierzchnię s_i o średnicy zastępczej d_i . W oparciu o uzyskane wyniki badań ustala się funkcje zmienności liczby cząstek $n_i=f(d_i)$, ich objętości $v_i=f(d_i)$ i powierzchni $s_i=f(d_i)$ w zależności od średnicy zastępczej d_i . Krzywe te najczęściej przedstawiane są w postaci rozkładów log-normalnych [Chaignon i in., 2002; Gonze i in., 2003]. Oprócz dwuparametrowego rozkładu log-normalnego rzeczywiste wielkości cząstek opisywane są rozkładami prawdopodobieństwa Gaudin-Meloya, Gates-Gaudin-Schumanna, Weillulla, Nukiyamy-Tanasawy, trzyparametrowym rozkładem gamma oraz log Cauchy'ego [Ahmed i Drzymała, 2005; Bandrowski i in., 2001; Łomotowski i in., 2008; Orzechowski, 1990]. Estymacja gęstości prawdopodobieństwa występowania zmiennej, w tym wypadku wielkości cząstek rzeczywistych rozkładów, bez założenia z góry o charakterze rozważanej funkcji możliwa jest także dzięki konstruowaniu estymatorów jądrowych [Jarnicka i Kęszycka, 2008; Kulczycki, 2005].

Rozkład objętości cząstek $v_i=f(d_i)$ jak i ich powierzchni $s_i=f(d_i)$ opisuje się także funkcjami: gamma, potęgową, eksponentylną. Rozkład liczby cząstek $n_i=f(d_i)$ najczęściej opisuje się dystrybuantą Rosina-Rammlera [Chaignon i in., 2002; Neis i Tiehm, 1997; Atteia i Kozel, 1997].

Do opisu rozkładu wielkości cząstek można wykorzystać zmodyfikowaną postać równania Avramiego, które pozwala identyfikować mechanizm tworzenia się polidispersyjnej zawiesiny.

PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU KRYSZTALIZACJI

Teoria krystalizacji powstała w celu opisu kinetyki zmian fazy ciekłej w fazę stałą, do jakiej dochodzi w czasie krzepnięcia metali i ich stopów oraz zamarzania wody, a obecnie znalazła zastosowanie w badaniach nad kinetyką powstawania polimerów organicznych oraz nad wzrostem mikroorganizmów i tkanek. W początkowym etapie procesu krystalizacji dochodzi do przemiany fazowej substancji pozostającej w stanie rozpuszczonym do fazy stałej, w czasie której powstają zarodniki krystalizacji, rozumiane jako punkty materialne fazy stałej. Faza ta nosi nazwę nukleacji lub zarodkowania. Na zarodnikach w dalszym etapie następuje wzrost struktury ziaren. Jądra nukleacji mogą powstawać na skutek zmiany gęstości roztworu (nukleacja homogeniczna) lub mogą być do niego wprowadzane (nukleacja heterogeniczna).

Ogólne równanie krystalizacji w literaturze nazywane jest bardzo często równaniem Kołmogorowa-Johson-Mehl-Avramiego (równanie *KJMA*) lub równaniem Avramiego, gdyż wyniki prac tego autora znalazły wiele praktycznych zastosowań. Statystyczna teoria uwzględnia losowy charakter rozmieszczenia przestrzennego ziaren, ich zetknięć oraz oddziaływania tego zjawiska na szybkość wzrostu ziaren krystalizacji. Ogólne równanie statystycznej teorii przemian fazowych, dla przestrzeni N -wymiarowej, ma postać:

$$V(t) = 1 - \exp(-\Omega(t)) \quad (1)$$

gdzie V to stopień przemiany (udział objętościowy produktu) w chwili t , a funkcja $\Omega(t)$ to rozszerzona objętość produktów przemiany (ang. *extended volume*), nazywana w literaturze polskiej objętością geometryczną [Burbelko i Gurgul, 2009]. *W praktyce przy opracowywaniu wyników badań nad wytrącaniem się substancji z roztworów wodnych, stosuje się uogólnione równanie Avramiego [IUPAC, 1997]:*

$$V(t) = 1 - \exp(-k \cdot t^n) \quad (2)$$

gdzie wartość stałej k zależy od warunków środowiskowych, w których zachodzi przemiana fazowa, a wykładnik n związany jest z geometrią powstających produktów przemiany i może przyjmować wartości z przedziału (1-4).

Do opisu składu granulometrycznego polidispersyjnej zawiesiny zespół autorski zaproponował wykorzystanie zmodyfikowanego równania Avramiego (2). Przyjmując założenie, że średnice d_i ziaren zawiesiny są proporcjonalne do czasu t tworzenia się tej frakcji zawiesiny, równanie (2) można przekształcić do równania o postaci:

$$v_i = 1 - \exp(-k^* \cdot d_i^n) \quad (3)$$

gdzie wartość stałej k^* zależy od wartości stałej k oraz stałej szybkości wzrostu średnicy cząstek zawiesiny.

Celem badań było rozpoznanie składu granulometrycznego zawieszin powstających w złożach filtracyjnych na stacjach uzdatniania wód podziemnych, w ściekach surowych oraz oczyszczonych oraz wykazanie możliwości zastosowania zmodyfikowanego równania Avramiego do opisu składu granulometrycznego zawieszin polidispersyjnych w badanych próbach.

METODYKA BADAŃ

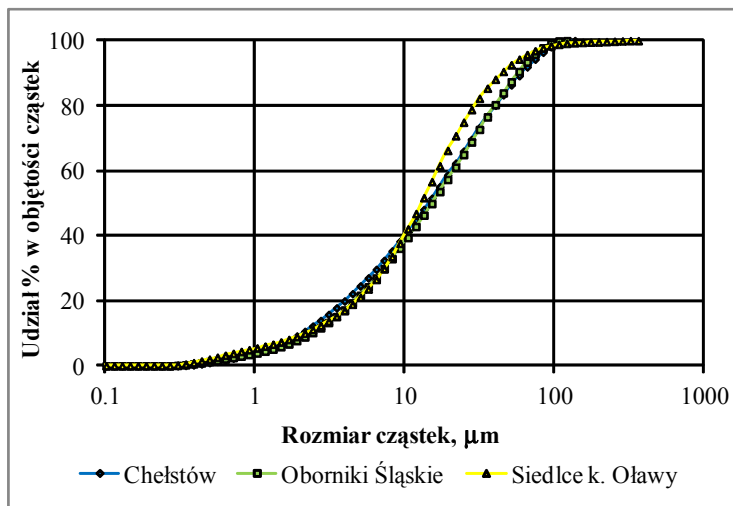
Badania przeprowadzone zostały na próbkach ścieków surowych i oczyszczonych oraz próbkach popłuczyn, które pobierano w trakcie płukania filtrów do odżelaziania i odmanganiania. Próbki ścieków surowych i oczyszczonych (ścieki komunalne) pobrane zostały z mechaniczno-biologicznych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w miejscowościach Kąty Wrocławskie, Kobierzyce oraz Sobótka. Próbki ścieków przemysłowych (popłuczyn) pobierano na stacjach uzdatniania wód podziemnych znajdujących się w miejscowościach Oborniki Śląskie, Chelstów i Siedlce koło Oławy. Badania przeprowadzono w miesiącu lipcu w 2008 i 2009 roku.

Skład granulometryczny zawieszin ustalano z wykorzystaniem granulometru laserowego Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd. o zakresie pomiarowym cząstek od 0,01 do 2000 μm . Do poszukiwania współczynników empirycznych k^* i n regresji opisanej równaniem (3), wykorzystano program STATISTICA 9 PL.

WYNIKI BADAŃ

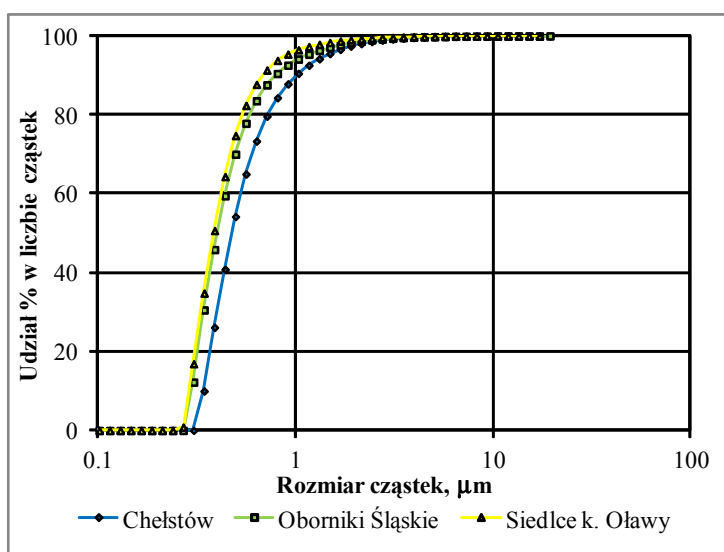
Wyniki badań składu granulometrycznego zawieszin zawartych w ściekach komunalnych przedstawione zostały w tabelach 1 i 2. Przykłady dystrybucji rozkładu liczby cząstek i ich objętości w polidispersyjnej zawieszynie zawartej w popłuczynach przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

W całkowitej objętości cząstek zawiesziny zawartej w popłuczynach dominowały cząstki o średnicach zastępczych z przedziału 1-100 μm , a w próbkach ścieków oczyszczonych i surowych cząstki o rozmiarach od 10 do 1000 μm . Zakres wielkości cząstek występujących w ściekach surowych jest najbardziej zróżnicowany i może być potraktowany jako indywidualny dla każdego terenu, z którego ścieki systemem kanalizacji zbiorczej odprowadzane są do oczyszczalni. W przypadku rozkładu ilościowego cząstek tworzących zawieszinę zarówno w popłuczynach, jak i ściekach komunalnych przeważały cząstki o średnicach zastępczych z przedziału 0,1-1 μm , czyli cząstki zaliczane do mikrozawieszin, a więc niepodlegające procesowi sedymentacji [Łomotowski i Szpindor, 1999]. Udział procentowy tych cząstek w całkowitej ilości cząstek tworzących zawieszinę w poszczególnych próbkach wynosił około 90%.



Rysunek 1. Procentowy udział cząstek o średnicy d_i w całkowitej objętości cząstek zawiesiny zawartej w ściekach przemysłowych (popłuczyny)

Figure 1. Percentage of particles in given diameter ranges d_i in whole volume of industrial wastes suspension (filter backwash water)



Rysunek 2. Procentowy udział cząstek o średnicy d_i w całkowitej ilości cząstek zawiesiny w ściekach przemysłowych (popłuczyny)

Figure 2. Percentage of particles in given diameter ranges d_i in whole number of industrial wastes suspension (filter backwash water)

Tabela 1. Wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w ściekach komunalnych w odniesieniu do udziału procentowego cząstek o danej wielkości w całkowitej objętości cząstek zawiesiny

Table 1. Percentage of particles in given diameter ranges in whole volume of municipal wastes suspension

Miejscowość	Data Poboru	Zakres wielkości cząstek zawiesiny, μm					
		0,01-0,1	0,1-1	1-10	10-100	100-1000	1000-2000
Ścieki komunalne przed oczyszczeniem							
Kąty Wrocławskie	08.07.2008	0,00	1,35	13,15	59,04	26,44	0,02
Kobierzyce	08.07.2008	0,00	1,40	10,42	48,14	39,69	0,35
Sobótka	08.07.2008	0,00	1,61	10,96	60,20	27,23	0,02
Ścieki komunalne po oczyszczeniu							
Kąty Wrocławskie	08.07.2008	0,00	1,08	8,72	83,68	6,53	0,00
Kobierzyce	08.07.2008	0,00	0,00	2,23	49,07	48,69	0,01
Sobótka	08.07.2008	0,00	0,45	6,47	32,34	60,75	0,00

Tabela 2. Wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin zawartych w ściekach komunalnych w odniesieniu do udziału procentowego cząstek o danej wielkości w całkowitej ilości cząstek zawiesin

Table 2. Percentage of particles in given diameter ranges in whole number of municipal wastes suspension

Miejscowość	Data poboru	Zakres wielkości cząstek zawiesiny, μm					
		0,01-0,1	0,1-1	1-10	10-100	100-1000	1000-2000
Ścieki komunalne przed oczyszczeniem							
Kąty Wrocławskie	08.07.2008	0,00	89,46	10,44	0,10	0,00	0,00
Kobierzyce	08.07.2008	0,00	93,68	6,28	0,05	0,00	0,00
Sobótka	08.07.2008	0,00	84,42	15,50	0,08	0,00	0,00
Ścieki komunalne po oczyszczeniu							
Kąty Wrocławskie	08.07.2008	0,00	90,62	9,30	0,08	0,00	0,00
Kobierzyce	08.07.2008	0,00	0,00	95,38	4,57	0,05	0,00
Sobótka	08.07.2008	0,00	68,29	31,59	0,12	0,00	0,00

W tabeli 3 zamieszczone zostały wartości średnich średnic $D(1,0)$, $D(3,2)$, $D(4,3)$ ustalonych na podstawie zmian w rozkładzie objętości cząstek zawiesiny zawartej w ściekach przemysłowych i komunalnych. Opis metodyki wyznaczenia średnich średnic $D(1,0)$, $D(3,2)$, $D(4,3)$ można znaleźć między innymi w pracy Łomotowskiego i in. [2008]. Średnia średnica $D(1,0)$, będąca średnią arytmetyczną ze zbioru cząstek, wyliczana w odniesieniu do całkowitej ilości cząstek, wynosiła od 0,6 do 1,0 μm zarówno w przypadku popłuczyn, ścieków nieczyszczonych, jak i oczyszczonych. Wyjątkiem jest wartość średniej średnicy, która określona została dla rozkładu cząstek zawiesin zawartych w ściekach oczyszczonych pochodzących z Kobierzyc ($D(1,0) = 4,111 \mu\text{m}$).

Średnica $D(3,2)$, obliczana ze stosunku sumy objętości cząstek do sumy ich powierzchni, jest miarą powierzchni czynnej ziaren tworzących zawiesinę

polidispersyjną. W miarę zmniejszania się średnicy D(3,2) wzrasta powierzchnia czynna cząstek, które wykazują większą skuteczność katalizowania procesów chemicznych. Dla przeanalizowanych próbek popłuczyn średnica D(3,2) była mniejsza od 10 μm , co świadczy o wysokich zdolnościach zawiesin zawartych w popłuczynach do adsorpcji i katalizowania przemian chemicznych. Cząstki o takiej średnicy wykorzystywane są m. in. do produkcji nanoaglomeratów [Tural i in., 2009]. W przypadku ścieków surowych analizowane średnice D(3,2) charakteryzują się rozmiarami do 20 μm , których wartość ulega zwiększeniu podczas procesu oczyszczania ścieków nawet do 50 μm (oczyszczalnia Kobierzyce).

Średnia średnica D(4,3), która obliczana jest na podstawie momentu masy i objętości, daje informację, gdzie w układzie zawiesiny skupiona jest masa cząstek. Stąd cząstki o dużych średnicach decydują o jej wartości, małe natomiast mogą zostać potraktowane w przenośni jako „kurz”. Przykładowo dla dwóch cząstek o średnicy 1 μm i 10 μm uzyskany wynik średniej średnicy D(4,3) może być zbliżony do wartości 9 μm . Dla badanych próbek popłuczyn średnica D(4,3) charakteryzowała się rozmiarami z zakresu od 20,38 do 26,6 μm , co świadczy o tym, że jej ziarna należy zaliczyć do trudno sedymentujących. Największe wartości średnicy D(4,3) określono dla próbek ścieków oczyszczonych, co może być związane z obecnością w oczyszczonych ściekach gęstych kłaczków osadu czynnego wyniesionych z osadników wtórnych po procesie sedymentacji.

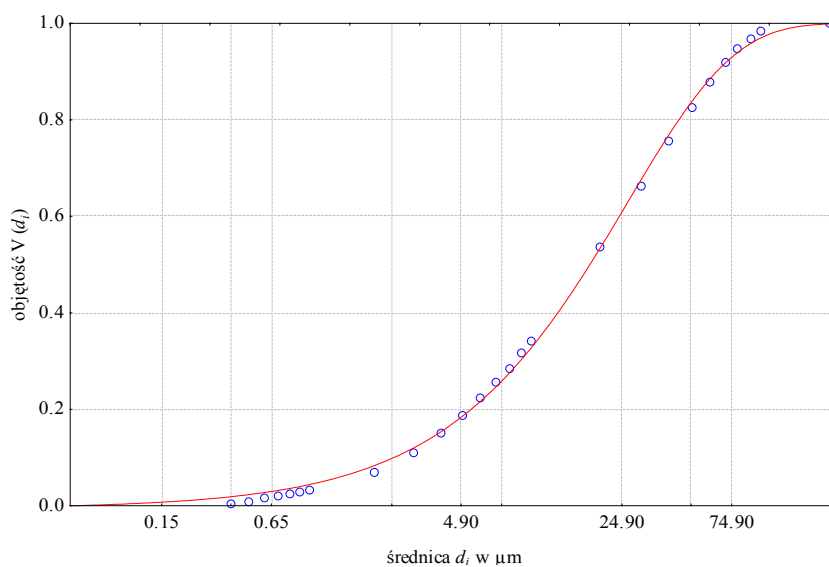
Tabela 3. Średnie średnice ustalone na podstawie funkcji zmian objętości cząstek zawiesiny $v_i = f(d_i)$ w próbkach popłuczyny i ścieków komunalnych przed i po oczyszczeniu

Table 3. Mean diameters determined for particle size distribution $v_i = f(d_i)$ filter backwash water and municipal wastes suspension before and after treatment

Miejscowość	Data poboru	Średnie średnice cząstek, μm		
		D(1,0)	D(3,2)	D(4,3)
Popłuczyny – ścieki przemysłowe				
Oborniki Śląskie	01.07.2009	0,594	6,041	26,607
Chelstów	06.07.2009	0,629	5,045	23,277
Siedlce k. Oławy	08.07.2009	0,477	4,539	20,380
Ścieki komunalne przed oczyszczeniem				
Kąty Wrocławskie	08.07.2008	0,628	12,622	95,10
Kobierzyce	08.07.2008	0,565	14,223	156,53
Sobótka	08.07.2008	0,779	13,103	93,53
Ścieki komunalne po oczyszczeniu				
Kąty Wrocławskie	08.07.2008	0,664	15,674	48,34
Kobierzyce	08.07.2008	4,111	56,603	125,96
Sobótka	08.07.2008	1,061	27,638	129,72

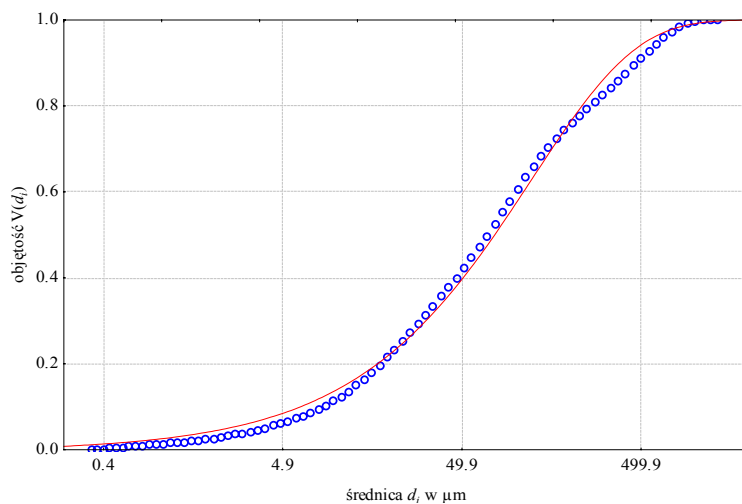
Na rysunkach 3-5 przedstawiono przykładowe wykresy przebiegu estymowanych funkcji, opisanych zmodyfikowanym równaniem Avramiego (3) oraz ustalone dyskretne wyniki analiz prowadzonych dla próbek ścieków przemysłowych i komunalnych. Estymowane wartości stałych k^* i wykładniki n modeli opisanych równaniem (3), błędy standardowe oszacowania tych wartości oraz współczynniki korelacji dla wszystkich analizowanych próbek przedstawione zostały w tabeli 4.

Stałe k^* i n modeli udziału procentowego cząstek o danym zakresie średnic zastępczych w całkowitej objętości zawiesiny były statystycznie istotne na poziomie 95% we wszystkich analizowanych próbkach. Prace analityczne wykazały, że model opisany równaniem (3) dobrze dopasowywał regresję do danych eksperymentalnych składu granulometrycznego zawiesin zawartych w badanych próbkach. Wartości współczynników korelacji były bliskie 1, co oznacza bardzo silny związek korelacyjny, a model regresji bardzo dobrze opisuje przypadki zmienną niezależną $v_i = f(d_i)$.



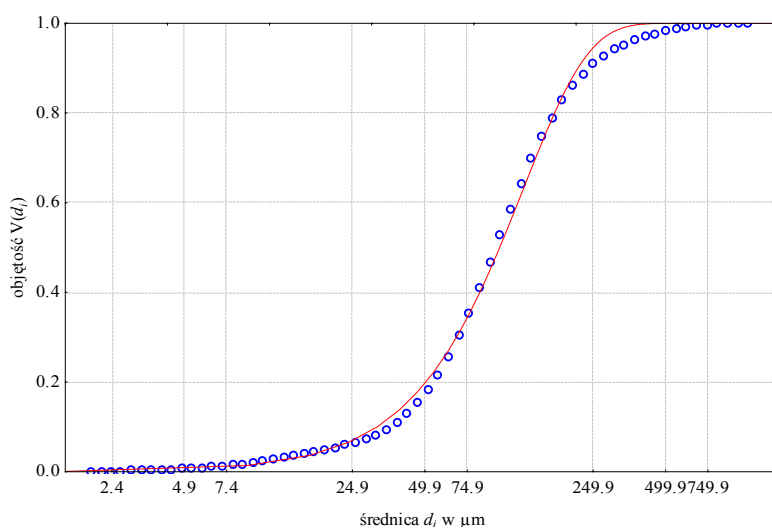
Rysunek 3. Wyestymowana funkcja regresji opisana równaniem (3) oraz skład granulometryczny zawiesiny zawartej w popłuczynach pobranych na SUW w Obornikach Śląskich

Figure 3. Estimated function described by equation (3) and granulometric constitution of filter backwash water suspension sample taken from Oborniki Śląskie GWTP



Rysunek 4. Wyestymowana funkcja regresji opisana równaniem (3) oraz skład granulometryczny zawiesiny zawartej w próbce nieoczyszczonych ścieków komunalnych z Kobierzyc

Figure 4. Estimated function described by equation (3) and granulometric constitution of raw municipal wastes suspension sample taken from Kobierzyc



Rysunek 5. Wyestymowana funkcja regresji opisana równaniem (3) oraz skład granulometryczny zawiesiny zawartej w próbce oczyszczonych ścieków komunalnych z Kobierzyc

Figure 5. Estimated function described by equation (3) and granulometric constitution of treated municipal wastes suspension sample taken from Kobierzyc

Tabela 4. Zestawienie wyników obliczeń stałych modeli regresji składu granulometrycznego $v_i = f(d_i)$ dla próbek popłuczyn i ścieków komunalnych przed i po oczyszczeniu

Table 4. Values of constants obtained in regression models of granulometric constitution $v_i = f(d_i)$ of filter backwash water samples and of municipal wastes before and after treatment

Miejscowość	Data poboru	Współczynnik korelacji R	Parametr k^*		Parametr n	
			Ocena	Błąd standardowy	Ocena	Błąd standardowy
Popłuczyny – ścieki przemysłowe						
Oborniki Śląskie	01.07.2009	0,999	4,523E-02	1,667E-03	9,433E-01	1,155E-02
Chelstów	06.07.2009	0,999	6,336E-02	2,818E-03	8,891E-01	1,502E-02
Siedlce k. Oławy	08.07.2009	0,999	4,621E-02	1,692E-03	1,039E+00	1,343E-02
Ścieki komunalne przed oczyszczeniem						
Łąki Wrocławskie	08.07.2008	0,997	2,996E-02	2,288E-03	8,263E-01	1,891E-02
Obierzyce	08.07.2008	0,999	2,685E-02	1,234E-03	7,506E-01	1,002E-02
Obótka	08.07.2008	0,999	1,683E-02	6,360E-04	9,301E-01	9,017E-03
Ścieki komunalne po oczyszczeniu						
Łąki Wrocławskie	08.07.2008	0,999	2,187E-03	2,100E-04	1,529E+00	2,490E-02
Obierzyce	08.07.2008	0,999	4,150E-04	5,300E-05	1,604E+00	2,688E-02
Obótka	08.07.2008	0,995	7,740E-04	1,570E-04	1,430E+00	4,1946E-02

Na stacjach uzdatniania wód podziemnych w procesie filtracji na złożach filtracyjnych wraz z uzdatnianą wodą dostają się uwodnione związki żelaza i manganu, które stanowią zarodki dla tworzących się wokół nich ziaren zawiesin. Proces ten przypomina proces krystalizacji substancji z roztworów wodnych. Zmodyfikowane równanie Avramiego (3) pozwoliło opisać zmiany w przyroście cząstek zawiesiny w złożu filtracyjnym. Analogicznie do tworzenia się kryształów z roztworów nasyconych oraz zawiesin w złożach filtracyjnych powstają zawiesiny w trakcie transportu ścieków siecią kanalizacji zbiorczej oraz w wyniku procesów oczyszczania ścieków. Tworzenie zawiesin inicjują zarodki mikrozwiesiny, na powierzchni których rozwijają się mikroorganizmy i przyłączana jest zewnętrzna materia organiczna.

WNIOSKI

Tradycyjne pomiary zawiesiny ogólnej, wykonywane metodami wagowymi lub objętościowymi, nie ujmują zagadnień związanych z wielkością cząstek i ich właściwościami. Cząstki zawiesiny o różnym kształcie i rozmiarach, w tym cząstki koloidalne, tworzą układy polidispersyjne. Określenie stopnia dyspersji i charakterystyki zawartych w danym materiale zawiesin oraz ocenę rozmiarów cząstek umożliwiają granulometry laserowe.

Otrzymane w wyniku badań składu granulometrycznego rozkłady wielkości cząstek zawiesiny charakteryzowały się szerszym zakresem występowania w przypadku ścieków komunalnych niż w przypadku popłuczyn. W analizowanych próbach objętościowo dominowały cząstki z zakresu od 1 do 100 μm w

przypadku popłuczyn oraz od 10 do 1000 μm w przypadku ścieków komunalnych. We wszystkich analizowanych próbkach ilościowo przeważały cząstki z zakresu od 0,1 do 1 μm zaliczane do mikrozwiesin. Na podstawie wartości średnich średnic $D(3,2)$ oraz $D(4,3)$ można stwierdzić, że w przypadku popłuczyn cząstki tworzące zawiesinę posiadają wysokie zdolności sorpcyjne. W przypadku zawiesin zawartych w ściekach komunalnych przed i po oczyszczeniu wartości średnic $D(3,2)$ oraz $D(4,3)$ wskazują na koncentrację masy w cząstkach o znacznie większych wymiarach, co skutkuje mniejszymi zdolnościami sorpcyjnymi w stosunku do cząstek zawartych w popłuczynach.

Wykazano, że przy opracowywaniu wyników badań składu granulometrycznego zawiesin w ściekach surowych, oczyszczonych i popłuczynach można stosować zmodyfikowane równanie Avramiego.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmed H.A.M, Drzymała J. *Two-dimensional fractal linearization of distribution curves*. Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, t. 39, 2005, s. 129-139.
- Atteia O., Kozel R. *Particle size distributions in waters from karstic aquifer: from particle to colloids*. Journal of Hydrology, t. 201, 1997, s. 102-119.
- Bandrowski J., Merta H., Ziolo J. *Sedymentacja zawiesin. Zasady i projektowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- Burbelko A., Gurgul D. *Kinetyka przemiany przy natychmiastowym zarodkowaniu w małej objętości. Sprawdzenie statystycznej teorii ekranowania*. XXXIII Konferencja Naukowa z okazji Ogólnopolskiego Dnia Odlewnika, WO AGH, Kraków 2009, s. 1-6.
- Chaignon V., Lartiges B.S., El Samrani A., Mustin C. *Evolution of size distribution and transfer of mineral particles between flocs in activated sludges: an insight into floc exchange dynamics*. Water Research, t. 36, 2002, s. 676-684.
- Gonze E., Pillot S., Valette E., Gonthier Y., Bernis A. *Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor*. Chemical Engineering and Processing, t. 42, 2003, s. 965-975.
- IUPAC (Edited by McNaught A.D, Wilkinson A.) *Compendium of Chemical Terminology*. 2nd Edition. Research Triangle Park, US (NY), Royal Society of Chemistry: London, 1997 (<http://www.chem.qmul.ac.uk>).
- Jarnicka J., Kęszycka M. *Zastosowanie dwukrokowej metody estymacji gęstości do analizy rozkładów wielkości cząstek w układach zawiesin polidispersyjnych w ściekach*. Raport badawczy RB/51/2008, Instytut Badań Systemowych PAN, 2008.
- Kulczycki P. *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005.
- Łomotowski J., Burszta-Adamiak E., Kęszycka M., Jary Z. *Metody i techniki optyczne w badaniach zawiesin*. Monografia. Wydawnictwo PAN, Instytut Badań Systemowych, 2008.
- Łomotowski J., Szpindor A. *Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1999.
- Neis U., Tiehm A. *Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents*. Water Science Technology, t. 36, nr 4, 1997, s. 151-158.
- Orzechowski Z. *Przepływy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabatyczne*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1990.
- Tural B., Özkan N., Volkan M. *Preparation and characterization of polymer coated superparamagnetic magnetite nanoparticle agglomerates*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, t. 70, 2009, s. 860-866.

Ewa Burszta-Adamiak, Magdalena Kuśnierz, Janusz Łomotowski, Paweł Wiercik

Dr inż. Ewa Burszta-Adamiak
Dr inż. Magdalena Kuśnierz
Prof. dr hab. inż. Janusz Łomotowski
Dr inż. Paweł Wiercik

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,
Instytut Inżynierii Środowiska, pl.Grunwaldzki 24,
50-363 Wrocław
ewa.burszta-adamiak@up.wroc.pl,
magdalena.kusnierz@up.wroc.pl,
janusz.lomotowski@gmail.com,
pawel.wiercik@up.wroc.pl