



**POLSKA AKADEMIA NAUK**  
**Instytut Badań Systemowych**

---

**BADANIA SYSTEMOWE**  
**Inżynieria Środowiska**

**METODY I TECHNIKI OPTYCZNE**  
**W BADANIACH ZAWIESIN**



**Janusz Łomotowski**  
**Ewa Burszta-Adamiak**  
**Magdalena Kęszycka**  
**Zdzisław Jary**

**Warszawa 2008**





**METODY I TECHNIKI OPTYCZNE  
W BADANIACH ZAWIESIN**

**POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

**Seria: BADANIA SYSTEMOWE, tom 58**

**Redaktor naukowy: prof. Jakub Gutenbaum**

---

**Podseria: Inżynieria Środowiska**

**Warszawa 2008**

**METODY I TECHNIKI OPTYCZNE  
W BADANIACH ZAWIESIN**

**Janusz Łomotowski  
Ewa Bursza-Adamiak  
Magdalena Kęszycka  
Zdzisław Jary**

Publikacja wydana ze środków projektu badawczego MINISTERSTWA NAUKI i SZKOLNICTWA WYŻSZEGO: nr R 11 001 01.

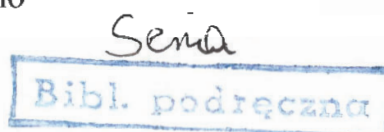
W pracy przedstawiono podstawy działania przyrządów stosowanych do badania zawiesin opartych o dyfrakcję światła. Zaprezentowano sposoby opracowywania wyników badań uzyskiwanych z granulometru laserowego. Praca zawiera oryginalne wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin w wodach opadowych, powierzchniowych, ściekach surowych i oczyszczonych oraz osadach czynnych. Wykazano, że instrumentalne badania zawiesin z wykorzystaniem dyfrakcji światła zwiększają zasób informacji o tych, tak ważnych, a rzadko badanych analitycznie domieszkach wód naturalnych i ścieków. Granulometry laserowe pozwalają poznać skład cząsteczkowy zawiesin oraz ich budowę przestrzenną, dzięki identyfikacji wymiaru fraktalnego. Badania z użyciem granulometrów laserowych powinny w większym stopniu być prowadzone przy monitoringu jakości wód naturalnych i technologicznych, badaniach ścieków surowych i oczyszczonych oraz osadów ściekowych.

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Metzger

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Dr inż. hab. Maria Żygadło



45903

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2008

Instytut Badań Systemowych PAN  
Newelska 6, PL 01-447 Warsaw

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw IBS PAN  
e-mail: [biblioteka@ibspan.waw.pl](mailto:biblioteka@ibspan.waw.pl)

**ISBN 978-83-89475-14-5**

**ISSN 0208-8029**

Druk i oprawa: ARTPRESS, tel. 052 354 95 10

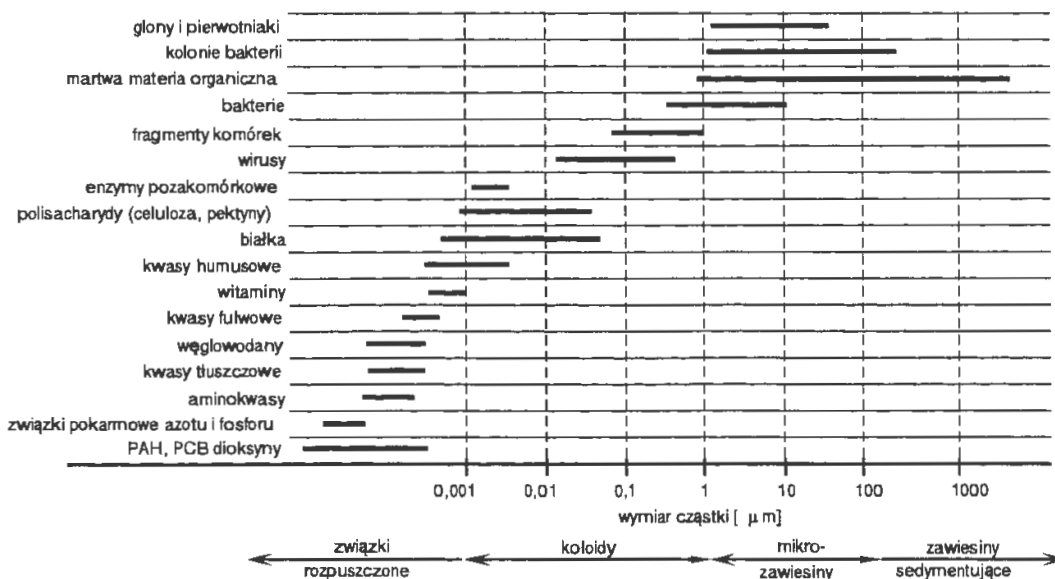
## 1. WPROWADZENIE

Wody naturalne, wodociągowe oraz ścieki są mieszaninami wieloskładnikowymi, w których oprócz substancji rozpuszczonych można identyfikować układy dwufazowe złożone z cząstek ciał stałych, cieczy i gazów tworzących fazę rozproszoną w wodzie będącą fazą rozpraszającą. Cząstki o budowie polarnej i wymiarach mniejszych od  $0,001 \mu\text{m}$  tworzą roztwory rzeczywiste. Większe cząstki w wodzie pozostają w formie zawiesiny.

Pod pojęciem zawiesiny rozumie się układ, w którym w cieczy (wodzie) rozproszone są nierozpuszczone ciała stałe zbudowane z substancji organicznych, mineralnych lub mineralno-organicznych o gęstości większej od gęstości wody. Zawiesiny mogą być zbudowane z martwej materii z udziałem lub bez udziału żywych mikroorganizmów: wirusów, bakterii, glonów i pierwotniaków.

Właściwości zawiesin zależą głównie od budowy chemicznej, wymiarów i przestrzennej struktury oraz gęstości cząstek tworzących fazę rozproszoną, a także od składu jonowego i temperatury wody. Budowa chemiczna wpływa na wielkość ładunku elektrostatycznego utrzymującego się na powierzchni cząstki oraz na zwilżalność powierzchni przez cząsteczki wody. Cząstki o powierzchniach dobrze zwilżalnych noszą nazwę hydrofilowych, w odróżnieniu od cząstek hydrofobowych, których powierzchnie są słabo lub nie są zwilżalne. Do cząstek hydrofobowych należą cząstki minerałów ilastych, wytrącające się z wody węglany i wodorotlenki żelaza. Hydrofilowe są cząstki związków organicznych wchodzących w skład organizmów żywych, takie jak polipeptydy, białka, enzymy, poliwęglowodany oraz produkty ich niepełnego rozkładu, np. kwasy humusowe.

Cząstki o wymiarach od  $1-100 \mu\text{m}$  zalicza się do mikrozawiesin. Pozostawanie tych cząstek w stanie zawieszonym zależy od ich gęstości, od powierzchni właściwej oraz wielkości ładunku elektrycznego, jakim ta powierzchnia się charakteryzuje.



**Rysunek 1.** Ogólna charakterystyka cząstek obecnych w wodzie

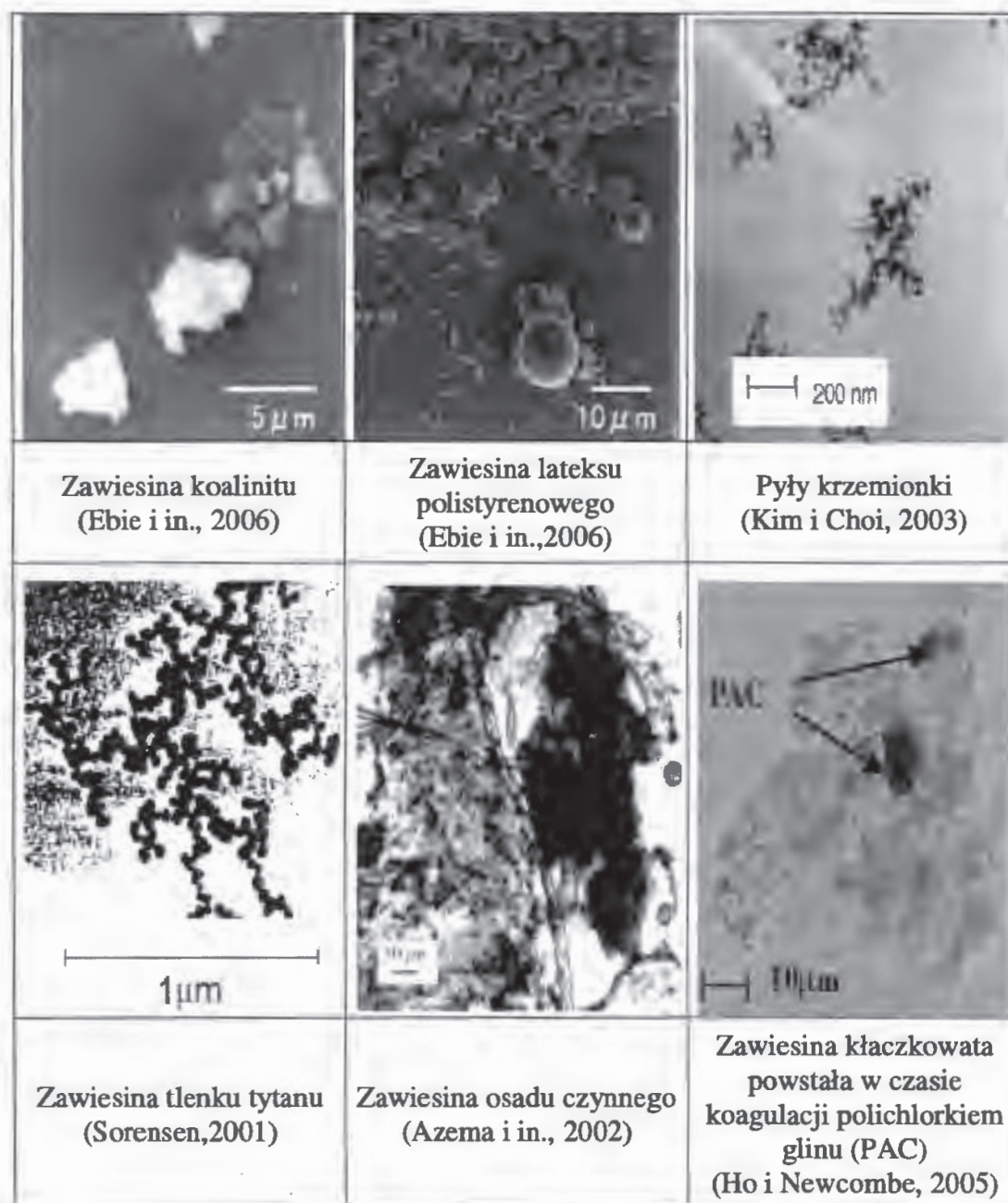
Na Rysunku 1 przedstawiono ogólną charakterystykę cząstek tworzących zawiesiny sedimentujące, mikro-zawiesiny, układy koloidalne oraz wybrane grupy organicznych związków tworzących w wodzie roztwory rzeczywiste.

O szybkości zachodzenia procesu koagulacji decyduje nie tylko wartość potencjału elektrokinetycznego  $\zeta$ , ale także siły van der Waalsa-Londona, powodujące przyciąganie się cząsteczek. Znacznie szybciej następuje proces koagulacji, jeżeli cząstki koloidalne pozostają w kontakcie z cząstkami o dużych wymiarach. Ten sposób koagulacji ma miejsce w obszarze oddziaływania roślinności przybrzeżnej na wody naturalne. Substancje śluzowate produkowane przez mikroorganizmy osiadłe np. na pędach trzciny wspomagają proces wytrącania się koloidów z wody. Podobne znaczenie mają produkowane przez liczną grupę mikroorganizmów wodnych wielkocząsteczkowe pozakomórkowe substancje organiczne, które sprzyjają „usidleniu” cząstek koloidalnych w makrozawiesinach. Mechanizm ten zachodzi podczas oczyszczania ścieków z zastosowaniem złóż biologicznych lub metody osadu czynnego. Stosowane metody oznaczeń zawiesin nie pozwalają na identyfikację cząstek zawieszonych w wodzie.

Zawiesiny to swoisty makrokosmos zróżnicowanych form geometrycznych o bardzo rozbudowanej powierzchni zewnętrznej. Obrazują to zdjęcia przedstawione na Rysunku 2. Na powierzchniach zawiesin zachodzą zjawiska istotnie wpływające na skład wód naturalnych i ścieków. Należy do nich zaliczyć między innymi sorpcję, wymianę jonową, wytrącanie się sub-



stancji mineralnych i organicznych, procesy katalizy z udziałem enzymów i katalizatorów mineralnych. Poznanie budowy przestrzennej zawiesin oraz ich składu granulometrycznego w przyszłości pozwoli lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące z ich udziałem.



Rysunek 2. Zróżnicowanie form występowania zawiesin



Powszechnie zawartość cząstek koloidalnych oznacza się metodami optycznymi z zastosowaniem umownych skal odniesienia, a mikrozawiesiny i zawiesiny sedymentujące metodami wagowymi.

Kwasy humusowe, mogące tworzyć układy koloidalne, oraz inne barwne związki rozpuszczone powodują rzeczywistą barwę wody. Pozorna barwa wody wywołana jest przez mikrozawiesiny. W celu ich usunięcia stosuje się filtrację przez filtr o porach 0,45  $\mu\text{m}$ . W rozdziale 3 normy PN EN ISO 7887 *Jakość wody. Badanie i oznaczanie barwy* dopuszcza się stosowanie oznaczenia barwy rzeczywistej z użyciem spektrofotometru lub fotometru z filtrem. Powszechnie stosowanym sposobem oznaczania barwy rzeczywistej jest metoda wizualna polegająca na porównaniu badanej próby z roztworem wzorcowym sześciochloroplatynianu potasu z użyciem cylindrów Nesslera, opisana w rozdziale 4 normy PN-EN ISO 7887. Umowną jednostką barwy rzeczywistej jest  $\text{mg Pt/dm}^3$ .

Miarą pośrednią zawartości cząstek tworzących układy koloidalne jest mętność wody. Zawieszony w wodzie cząstki minerałów ilastych, związków żelaza, manganu, glinu i innych metali, substancji organicznych, nanoplanktonu oraz innych mikroorganizmów powodują rozpraszanie promieni świetlnych. Na przestrzeni lat stosowano różne jednostki mętności (Gippel, 1994). Zgodnie z normą PN-EN ISO 7027 jednostką mętności jest formazynowa jednostka nefelometryczna FNU (*Formazin Nephelometric Unit*). W oznaczaniu mętności podawanych w jednostkach FNU używa się źródła światła laserowego o długości 860 nm. Pomiaru dokonuje się instrumentalnie mierząc światło rozproszone pod kątem  $90^\circ$  w stosunku do osi optycznej przyrządu.

Jednostka FNU jest równa nefelometrycznej jednostce mętności NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). Pomiar NTU odbywa się podobnie jak FNU, przy czym używa się światła białego (Sarah, 2002). Przy dużej mętności przekraczającej 40 FNU pomiaru dokonuje się na kierunku wiązki światła wychodzącego z emitora. W celu identyfikacji zastosowanej metody pomiaru wyniki podaje się w formazynowych jednostkach osłabienia FAU (*Formazin Attenuation Unit*).

W Polsce zawiesiny ogólne obejmujące mikrozawiesiny i zawiesiny sedymentujące oznacza się zgodnie z normą PN-EN 872 *Jakość wody. Oznaczenie zawiesin – metoda z zastosowaniem filtracji przez sączki z włókna szklanego*. Najniższa wartość oznaczanych zawiesin to  $2 \text{ mg/dm}^3$ . Oznaczenie to dostarcza jedynie informacji ilościowych, przy czym podczas suszenia zawiesin niszczone jest ich struktura.

W Tabeli 1 przedstawiono metody stosowane przy wyznaczaniu średnic cząstek zawiesiny oraz zakresy oznaczalności.

**Tabela 1.** Stosowane metody przy wyznaczaniu średnic cząstek pozostających w stanie zawieszonym w wodzie

Metoda analityczna	Zakres oznaczanych wymiarów $\mu\text{m}$
Analiza mikroskopowa	1-1000
Metoda sedymentacyjna	2-300
Komputerowa analiza obrazu	0,2-1000
Metoda akustyczna	0,02-800
Metoda z wykorzystaniem dyfrakcji światła	0,02-2000
Analiza dynamicznych zmian światła rozproszonego	0,004-5

Najstarszą metodą stosowaną do wyznaczania zróżnicowania średnic cząstek była analiza sitowa powszechnie stosowana w gleboznawstwie i gruntoznawstwie (Wiłun, 2001) oraz w badaniach pyłów atmosferycznych. Przydatność tej metody przy badaniach zawiesin w wodzie jest niewielka. Przy badaniach zawiesin stosowano metody sedymentacyjne, których szczegółowy opis można znaleźć w pracy Orzechowskiego (1990).

Analizę mikroskopową stosuje się powszechnie przy identyfikacji nano- i mikroplanktonu, oraz przy ustalaniu objętości biomasy (Kawecka i Eloranta, 1994). Zaletą tej techniki pomiaru jest możliwość bezpośredniej obserwacji cząstek, dzięki czemu można określić ich kształt, rozmiar, strukturę oraz powstałe aglomeraty. Obrazują to fotografie przedstawione na Rysunku 2. Manualne przeglądanie fotografii jest pracochłonne, dlatego opracowano komputerowe programy do analizy zmienności barwy pikseli, z których obrazy na fotografiach się składają. Cyfrowa obróbka obrazów wykorzystuje zjawisko, że na konturach obiektów graficznych gradienty zmian barwy są największe. Początkowo metody te były wykorzystywane do liczenia kolonii hodowanych na podłożach stałych, dziś są wykorzystywane do badań zawiesin w wodach naturalnych (Lunven i in., 2003), osadzie czynnym (Govoreanu, 2004) i biofilmów (Neu i in., 2004).

Podstawy teoretyczne działania granulometrów laserowych zostały opracowane w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku (Cornillault, 1972; Weiss i Frock, 1976; Swithenbank i in., 1977). Rozwój czujników fotooptycznych i techniki laserowej oraz wykorzystanie komputerów do przetwa-

rzania wyników pomiarów doprowadziło do powstania pierwszych urządzeń komercyjnych. Pionierami w ich wdrażaniu do praktyki były firmy Malvern Instruments (Wielka Brytania), CILAS (Francja) i Leeds & Northrup (USA).

Początkowo do obliczeń wielkości cząstek zawiesiny wykorzystywano model Fraunhofera (Pluta, 1982; Issmer, 2000). Model ten nie sprawdza się w przypadku pomiarów większości zawiesin naturalnych o wymiarach 0,05-30  $\mu\text{m}$  (McCave i in., 1986; Boer i in., 1987). Współczesne analizatory dyfrakcyjne, zgodnie z wymogami stawianymi przez międzynarodowy standard ISO-13320-1: 1999 *Particle size analysis-Laser diffraction methods. Part 1: General principles*, przy wyznaczaniu wielkości cząstek zawiesiny wykorzystują model Mie. Przewiduje on zachowanie się światła przechodzącego przez rozproszoną materię o cząstkach sferycznych, z uwzględnieniem współczynników refrakcji i absorpcji promieni przez te cząstki oraz ośrodka, w którym się one znajdują. Opis modelu Mie przedstawiony będzie w dalszej części pracy.

Granulometry laserowe są powszechnie stosowane przy standaryzacji i kontroli jakości preparatów farmaceutycznych: zawiesin, emulsji i aerozoli (Leuschner i in., 1999). Wykorzystuje się je do kontroli zmiany uziarnienia preparatów farmakologicznych pod wpływem różnych warunków przechowywania. Na podstawie składu granulometrycznego można badać oryginalność leków, gdyż skład granulometryczny substancji czynnych poszczególnych firm farmaceutycznych, w wyniku stosowania różnych zastrzeżonych procesów technologicznych, jest cechą indywidualną produktu. Metoda służy do porównania produktów pochodzących od różnych producentów (Syroeshkin i in., 2005). Z użyciem granulometrów laserowych testuje się działanie inhalatorów (Clark, 1995).

Dyfrakcję laserową wykorzystuje się w badaniach skrobi, przy ocenie jej przydatności dla przemysłu spożywczego, w mleczarstwie do badania mleka w proszku i innych produktów (McCrae i Lepoetre, 1996; Vyas i in., 2000), przemyśle ceramicznym do określania składu granulometrycznego użytych surowców (Szenwald i Kotsis, 2001), pomiarach wielkości cząstek cementów oraz wapna palonego i hydratyzowanego (Robens i in., 2002), badaniach nad absorpcją wody przez popioły lotne i przydatności poszczególnych frakcji popiołów lotnych jako dodatku do cementów (Lilkov i in., 1999; Iyer i Stanmore, 1999). Dyfrakcja laserowa jest wykorzystywana w badaniach pyłów zawartych w gazach odlotowych, powietrzu atmosferycznym (Lackowski i in., 2002) i analizie składu granulometrycznego pyłów drogowych (Kizil i in., 2000). Wykorzystując funkcję prawdopodobieństwa rozkładu występowania cząstek identyfikuje się pochodzenie pyłów (pyłów morskich, z erozji wietrznej gleb, pochodzenia roślinnego, z obsza-



rów aglomeracji miejsko-przemysłowych) oraz bada zjawisko koagulacji aerozoli. Duże znaczenie poznawcze mają badania z zastosowaniem laserowej metody badania mikrocząstek aerozoli (Wright, 2000).

Granulometry znalazły zastosowanie w chemii procesorowej (Zaidi i in., 1998), badaniach koloidów (Alba i in., 1999), pigmentów (*Using laser...* McGarvey i in., 1997), w metalurgii (Etxebarria i in. 2005), przy produkcji katalizatorów (Ertl i in.), w badaniach gruntów (Eshel i in., 2004) i próbek dla potrzeb analiz sądowych (Pye i Lott, 2004).

Z użyciem granulometru laserowego prowadzono badania cząstek wchodzących w skład zawiesin morskich (Bale, 1996; Sampei i in., 2002), obecnych w wodach powierzchniowych (Hejduk i Banasik, 2002), w ściekach i osadzie czynnym (Neis i Tiehm, 1997; Azema i in., 2002). Wykorzystywano go również do kontroli technologicznej osadu czynnego tlenowego i beztlenowego (Biggs i Lant, 2002; Houghton i in., 2002) oraz w badaniach szybkości zachodzenia procesu koagulacji w czasie uzdatniania wód naturalnych (Gilbert i in., 1990).

W Tabeli 2 przedstawiono zalety i wady różnych metod badań składu granulometrycznego zawiesin. Zestawienia tego dokonano na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych. Najwięcej zalet wykazują metody oparte na analizie światła rozproszonego.

W piśmiennictwie można znaleźć nieliczne publikacje, w których dokonuje się porównania wyników badań składu granulometrycznego tych samych zawiesin przy zastosowaniu różnych metod.

Lunven i in. (2003) prowadzili badania zawartości zawiesin w wodach morskich. Do określania wielkości cząstek zastosowano komputerową analizę obrazu uzyskiwanego kamerą video o dużej rozdzielczości oraz metodę optyczną opartą na zjawisku dyfrakcji światła, pozwalającą oznaczać cząstki o wymiarach w przedziale od 0,7 do 400  $\mu\text{m}$ . Uzyskano istotne statystyczne skorelowanie objętości cząstek oznaczanych metodą optyczną i metodą analizy obrazu.

W pracach Azema i in. (2002); Lilkov i in. (1999), Bayle i in. (2005) wykazano, że wyniki badań z zastosowaniem granulometrii laserowej lepiej odwzorowują skład zawiesin polidispersyjnych niż uzyskane z zastosowaniem mikroskopii i spektrofotometrii UV.

Govoreanu (2004) badała osady czynne z zastosowaniem granulometru laserowego oraz metodą analizy obrazów. Uzyskiwane wyniki z zastosowania obu metod były ze sobą porównywalne.

Tabela 2. Porównanie wad i zalet metod stosowanych w badaniach zawiesin

ZALETY	WADY
<b>METODY SEDYMENTACYJNE</b>	
<p>Tanie i proste w wykonaniu.</p> <p>Możliwość wyznaczania wymiarów fraktalnych cząstek.</p> <p>Niepodatne na czynniki zaburzające powstałe w wyniku zanieczyszczenia powierzchni zawiesin.</p> <p>Bardzo przydatne przy badaniach dużej ilości pojedynczych cząstek o zróżnicowanych wymiarach.</p>	<p>Duża pracochłonność.</p> <p>Trudności w wyznaczaniu współczynnika oporu powodują, że oznaczane średnice mają charakter umowny.</p> <p>Przy oznaczaniu cząstek o nieregularnych kształtach zawiesiny opadają w nieprzypadkowym ułożeniu, co wpływa na wynik ustalonej średnicy.</p> <p>Na wyniki ma wpływ wysokość kolumny sedymentacyjnej.</p>
<b>METODY OPARTE O ANALIZĘ OBRAZU</b>	
<p>Najlepsze przy badaniu struktury dużych przestrzennych zawiesin.</p> <p>Niepodatne na czynniki zaburzające powstałe w wyniku zanieczyszczenia powierzchni zawiesin.</p> <p>Możliwość poznania struktury pojedynczych cząstek zawiesin.</p>	<p>Duża pracochłonność.</p> <p>Konieczność wykonywania zdjęć o dużej rozdzielczości i kontraście.</p>
<b>METODA OPARTA O ANALIZĘ ŚWIATŁA ROZPROSZONEGO</b>	
<p>Krótki czas trwania badań.</p> <p>Analiza zawiesin bez naruszenia ich stanu naturalnego.</p> <p>Możliwość obserwacji dynamicznych zmian struktury zawiesin.</p> <p>Bardzo dobra analiza dla małych agregatów z otwartą strukturą, charakteryzujących się niskimi wartościami zespolonego współczynnika załamania światła.</p> <p>Możliwość oznaczenia zawiesin w dużym zakresie zastępczych wymiarów cząstek 0,02-2000 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>Trudności w oznaczaniu wymiaru fraktalnego zawiesin polidispersyjnych utworzonych z dużej liczby małych pojedynczych cząstek.</p> <p>Wynik badań zależy od prawidłowego doboru wartości zespolonego współczynnika załamania światła dla ośrodka dyspergującego oraz zawiesiny.</p> <p>Na wynik badania mają wpływ zanieczyszczenia zaadsorbowane na powierzchni zawiesin.</p>
<b>METODA OPARTA O ANALIZĘ ŚWIATŁA ROZPROSZONEGO I POCHODZĄCEGO Z FLUORESCENCJI</b>	
<p>Krótki czas trwania badań.</p> <p>Analiza zawiesin bez naruszenia ich stanu naturalnego.</p> <p>Możliwość identyfikacji materii martwej i ożywionej.</p> <p>Możliwość identyfikacji biomasy glonów.</p>	<p>Bardzo wysokie koszty badań.</p> <p>Brak ujednoliconej metodyki interpretacji wyników badań.</p>

Najbardziej krytycznie do analizy składu granulometrycznego z zastosowaniem dyfraktometrów laserowych podchodzą gleboznawcy (Eshel i in., 2004). Wynika to z faktu, że stosowane powszechnie w gleboznawstwie metody sedymentacyjne z założenia odbiegają sposobem wyznaczania wymiarów umownych cząstek ilastych i pylastych od stosowanych w metodach opartych na rozpraszaniu światła.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań, których celem było wykazanie, w jakim stopniu instrumentalna analiza składu granulometrycznego zawiesin w wodach naturalnych, w deszczu, śniegu, ściekach i wodach wodociągowych z użyciem granulometru laserowego jest przydatna w monitoringu wód naturalnych oraz badań technologicznych dla potrzeb eksploatacji systemów wodociągowo-kanalizacyjnych.

Celem niniejszego opracowania jest przybliżenie szerszemu gronu specjalistów zasad działania urządzeń do badań składu granulometrycznemu zawiesin, opartych na metodach optycznych, które powinny w najbliższym czasie znaleźć większe zastosowanie w badaniach naukowych i praktyce inżynierskiej.



## LITERATURA

- Afoakwa E.O., Paterson A, Fowler M. (2007): Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate. *European Food Research and Technology* DOI 10.1007/s00217-007-0652-6
- Agrawal Y.C., McCave I.N., Riley J.B. (1997): Laser diffraction size analysis. In: J.P.M. Syvitski (ed.), *Principles, methods, and application of particle size analysis*. Cambridge University Press, Cambridge. 119-128.
- Ahmed H.A.M, Drzymala J. (2005): Two-dimensional fractal linearization of distribution curves. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, **39**, 129-139.
- Alba F.I. (1999): Acoustic spectroscopy as a technique for the particle sizing of high concentration colloids, emulsions and suspensions. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects*, **153**, 495-502.
- Allen T. (1997): *Particle size measurement. Vol.1 - Powder sampling and particle size measurement*. 5<sup>th</sup> ed. Chapman and Hall Ltd., London.
- Andersson S. (1990): *Om mineraljordens och mullens rumsutfyllande egenskaper. En teoretisk studie*. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord, XXVI., Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Azema N., Pouet M.F., Berho C., Thomas O. (2002): Wastewater suspended solids study by optical methods. *Physicochemical and Engineering Aspects*, **204**: 131-140.
- Bachalo W.D. (2005): Spray characterization: techniques, capabilities, limitations, accuracy, and error analysis. *18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Irvine, CA.
- Bale A.J. (1996): In situ laser optical particle sizing. *Journal of Sea Research*, **36**, 1-2: 31-36.
- Bayle S., Azema N, Berho C., Pouet M.F., Lopez-Cuesta J.M., Thomas O. (2005): Study of heterogeneous suspensions: A new quantitative approach coupling laser granulometry and UV-vis spectrophotometry. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **262**: 242-250.

- Berho C., Pouet M. F., Bayle S., Azema N., Thomas O. (2004): Study of UV-vis responses of mineral suspensions in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **248**: 9-16.
- Bertino L. Wackernagel H. (2002): *Case studies of change-of-support problems*. IMPACT Project Report No 20 (Contract IST-1999-11313). Technical Report N-21/02/G ENSMP - ARMINES, Centre de Géostatistique 35 rue Saint Honoré, F-77305 Fontainebleau, France <http://cg.ensmp.fr>.
- Biggs C.A., Lant P.A. (2000): Activated sludge flocculation: on-line determination of floc size and effect of shear. *Wat. Res.* **2000**, **34**, 9: 2542-2550.
- Chu B. (1991): *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Academic Press, New York: 13-20.
- de Boer G.B., de Weerd C., Thoenes D., Goossens H.W.J. (1987): Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characterisation*, **4**: 14-19.
- Blodgett C., Jakubauskas M., Price K., and Martinko E. (2000): *Remote Sensing-based Geostatistical Modeling of Forest Canopy Structure*. ASPRS 2000 Annual Conference, Washington, D.C., May 22-26, 2000.
- Boeker E., van Grondelle R. (2002): *Fizyka środowiska*. PWN, Warszawa.
- Boer de G.B., de Weerd, C., Thoenes, D., Goossens, H.W.J. (1987): Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characterisation*, **4**: 14-19.
- Bushell G. (2005): Forward light scattering to characterise structure of flocs composed of large particles. *Chemical Engineering Journal*, **111**: 145-149.
- Chapman G. V. (2000): Instrumentation for flow cytometry. *Journal of Immunological Methods*, **243**: 3-12
- Chu B. (1991): *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Academic Press, Boston.
- Clark R.A. (1995): The use laser diffraction for the evaluation of the aerosol clouds generated by medical nebulizers. *International Journal of Pharmaceutics*, **115**: 69-78.
- Comtois P. (2001): John Tyndall and the floating matter of the air. *Aerobiologia*, **17**: 193-202.
- Cornillault, J. (1972): Particle size analyser. *Applied Optics*, **11**: 265-268.
- Ebie K, Yamaguchi D., Hoshikawa H., Shirozu T., (2006): New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbid meter with two optical systems in series. *Water Research*, **40**: 681-691.

- Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J. (Eds.) (1997): *Handbook of Heterogeneous Catalysis*. VCH, Weinheim.
- Eshel G. Levy G. J., Mingelgrin U., Singer M. J. (2004): Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68**: 736-743.
- Etxebarria N, Arana G., Antolin R, Diez E., Borge G., T. Posada T., Raposo J.C. (2005): Chromium powder as a reference material for the quality control of particle-size measurement by laser diffraction. *Powder Technology*, **155**: 85-91.
- Förster J. (1996): Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Wat. Sci. Tech.*, **33**, 6: 39-48.
- Förster J. (1998): The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 10: 83-90.
- Gerds G. Luedke G. (2006): FISH and chips: Marine bacterial communities analyzed by flow cytometry based on microfluidics. *Journal of Microbiological Methods*, **64**: 232-240.
- Gillberg L., Eger L., Jepsen S.E. (1990): Effect of Coagulants on Particle Distribution and Concentration. W: *Chemical Water and Wastewater Treatment*, Ed. Hahn H.H. and Klute R., Springer Verlag, Heidelberg.
- Gippel C.J. (1994): Monitoring turbidity of stream water. *Austr. J. Soil Water Cons.*, **7**: 37-44.
- Gradziński, R., Kosteczka, A., Radomski, A., Unrug, R. (1986): *Zarys sedymentologii*. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- Govoreanu R. (2004): *Activated sludge flocculation dynamics: On-line measurement methodology and modeling*. Universiteit Gent Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Gent (ISBN 90-5989-031-0).
- Guan J., Waite D.T., Amal R. (1998): Rapid structure characterization of bacterial aggregates. *Environ. Sci. Technol.*, **32**: 3735-3742.
- Guinier A. (1994): *X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals, and amorphous bodies*. Dover, New York.
- Heinrich S., Mirko Peglow M., Henneberg M., Drechsler J., Mörl L. (2004): *Fluidized bed spray granulation: analysis of dynamic particle populations and heat and mass transfers*. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A., 121-128



- Hejluk L., Banasik K. (2002): *Badania zmienności uziarnienia rumowiska unoszonego w małej zlewni rolniczej*. Mat. Sympozjum Naukowego nt. Erozja gleb i transport rumowiska rzecznego, Zakopane 10-12.10.2002, str. 81-87.
- Ho L., Newcombe G. (2005): Effect of NOM, turbidity and floc size on the PAC adsorption of MIB during alum coagulation. *Water Research*, **39**: 3668-3674.
- Houghton J.I., Burgess J.E., Stephenson T. (2002): Off-line particle size analysis of digested sludge. *Wat. Res.*, **36**: 4643-4647.
- Hutorowicz A. (2005): *Opracowanie standardowych objętości komórek do szacowania biomasy wybranych taksonów glonów planktonowych wraz z określeniem sposobu pomiarów i szacowania*. Olsztyn ([http://www.gios.gov.pl/dokumenty/oprac\\_stan\\_kom.doc](http://www.gios.gov.pl/dokumenty/oprac_stan_kom.doc))
- Issmer K. (2000): Optical methods in the grain-size analysis of fine-grained sediments. *Geological Quarterly*, **44**, 2: 205-210.
- Iyer R.S., Stanmore B. (1999): The effect of water absorption and the role of fines on the yield stress of dense fly ash slurries. *Cement and Concrete Research*, **29**: 765-767.
- Jarvis P., Jefferson B., Parsons S.A. (2005): Measuring floc structural characteristics. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. **4**: 1-18.
- Jonker R.R., Meulemans J.T., Dubelaar G.B.J., Wilkins M.F., Ringelberg J. (1995): Flow cytometry: A powerful tool in analysis of biomass distributions in phytoplankton. *Wat. Sci. Tech.*, **32**, 4: 177-182.
- Jauhiainen M. (2004): *Relationships of particle size distribution curve, soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity and their implications on water balance of forested and agricultural hillslopes*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Espoo (Finland) (ISBN 951-22-7194-X).
- Kawecka B., Eloranta P.V. (1994): *Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych*. PWN, Warszawa.
- Kerker M. (1969): *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. Academic Press, New York.
- Kim H.W., Choi M. (2003): In situ line measurement of mean aggregate size and fractal dimension along the flame axis by planar laser light scattering. *Journal of Aerosol Science*, **34**: 1633-1645.
- Kizil M.S., Peterson J., English W. (2000): The effect of coal particle size on colorimetric analysis of roadway dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**: 387-394.

- Kokhanovsky A.A., Weichert R. (2001): Multiple light scattering in laser particle sizing. *Applied Optics*, **40**, 9: 1507-1513.
- Kowalski W.P. (2004): Investigation of fine grains distribution using the sedimentation analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, **157-158**, 561-565.
- Kulczycki P. (2005): *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*. WNT, Warszawa.
- Lackowski M., Balachandran W., Krupa A., Kulon J., Jaworek A. (2002): Oczyszczanie gazów z drobnych cząstek przy użyciu naładowanych kropli, *Mat. VI Sympozjum Emisje zagrażające środowisku*, Kudowa Zdrój.
- Lee D.G., Bonner J.S., Garton L. S., Ernest A.N.S., Autenrieth R.L. (2000): Modeling coagulation kinetics incorporating fractal theories: a fractal rectilinear approach. *Water Research*, **34**, 7, 1987-2000.
- Leuschner R.G.K, Weaver A.C., Lillford P. J. (1999): Rapid particle size distribution analysis of Bacillus spore suspensions. *Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces*, **13**: 47-57.
- Li D.H., Ganczarczyk J.J.(1989): Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes. *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 1385-1389.
- Lilkov V., Dimitrowa E., Gaidardzhiev S. (1999): Microscopic and laser granulometric analyses of hydrating. *Cement and Concrete Research*, **29**: 3-8.
- Logan, B.E., Wilkinson D.B. (1990): Fractal geometry of marine snow and other biological aggregates., *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 130-136.
- Lunven M., Gentien P., Kononen K., Le Gall E., Daniélou M.M. (2003): In situ video and diffraction analysis of marine particles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**: 1127-1137.
- Madsen J., Harbo J., Nonn T.I., Blondel D., Hjertager B.H, Solberg T. (2003): *Measurement of droplet size and velocity distributions in sprays using Interferometric Particle Imaging (IPI) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)* ICLASS 2003, July 13-17, 2003, Sorrento, Italy
- Mauromicale G., Ierna A., Marchese M. (2006): Chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in field-grown potato as affected by nitrogen supply, genotype, and plant age. *Photosynthetica*, **44**, 1: 76-82.
- Maxwell K., Johnson G.N. (2000): Review article. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, **51**, 354: 659-668.
- McGarvey M., McGregor D., McKay R.B. (1997): Particie size analysis by laser diffraction in organic pigment technology. *Progress in Organic Coatings*, **31**: 228-231.

- McCave, I.N., Bryant, R.S., Cook, H.F., Coughanowr, C.A. (1986): Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, **56**: 61-564.
- McCrae C.H., Lepoetre A. (1996): Characterization of dairy emulsion by forward lobe laser light scattering – Application to milk and cream. *Inst. Dairy Journal*, **6**: 47-256.
- Mishchenko, M.I., Hovenier J.W., Travis L.D., (Eds.) (2000): *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications*. Academic Press, San Diego.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A. (2002): *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Moon B.H., Seo G.T., Lee T.S., Kim S.S., Yoon C.H. (2002): Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water Science and Technology*, **47**, 1: 65-70.
- Neis U., Tiehm A. (1997): Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents. *Wat. Sci. Tech.*, **36**, 4: 151-158.
- Neu T.R., Woelfl S., Lawrence J.R. (2004): Three-dimensional differentiation of photo-autotrophic biofilm constituents by multi-channel laser scanning microscopy (single-photon and two-photon excitation). *Journal of Microbiological Methods*, **56**: 161-172.
- Nobbmann U. (2006): *Protein Sizing by Light Scattering, Molecular Weight and Polydispersity*. Malvern, Worcestershire WR14 1XZ.
- Orzechowski Z. (1990): *Przeptywy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabatyczne*. PWN, Warszawa.
- Pedros R., Goulas Y., Jacquemoud S., Louis J., Moya I. (2004): A new leaf fluorescence model. In: *2nd International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence, 17-19 November 2004, Canadian Space Agency Conference Center, St-Hubert, Québec, Canada*.
- Pesic P. (2005): The sky is falling: Newton's droplets, Clausius's bubbles and Tyndall's "sky matter". *Eur. J. Phys.*, **26**: 189-193.
- Pluta M. (1982): *Mikroskopia optyczna*. PWN, Warszawa.
- Podhorecki R, Moniuk W., Bielski P., Sobieszuk P. Dąbrowiecki G. (2000): Bubble diameter correlation via numerical experiment. *Chemical Engineering Journal*, **113**, 1, 35-39.
- Porod G. (1951): Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloiden Systemen. I. Teil. *Kolloid Z.*, **124**: 83-114.



- Porod G. (1952): Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloiden Systemen. II. Teil. *Kolloid Z.*, **125**: 108-122.
- Porter J., Deere D., Hardman M., Edwards C., Pickup R. (1997): Mini review. Go with the flow - use of cytometry in environmental microbiology. *FEMS Microbiology Ecology*, **24**: 94-101.
- Porter J., Pickup P.W. (2000): Nucleic acid-based fluorescent probes in microbial ecology: application of flow cytometry. *Journal of Microbiological Methods*, **42**, 75-79.
- Praca zbiorowa (1974): *Encyklopedia fizyki*. PWN, Warszawa.
- Provencher, S. W. (1982): A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations. *Comput. Phys. Commun.* **27**: 213-227.
- Pye K., Blott S.J. (2004): Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. *Forensic Science International*, **144**: 19-27.
- Racinowski R., Szczypek T., Wach J. (2001): *Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędowych*. Wydaw. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Rawle A. (2005): *Basic principles of particle size analysis*. Malvern, Worcestershire WR14 1XZ.
- Rideal G. R. (2007): *Particle characterization. Setting the standard – the development of particle size reference standards*. [http://whitehousescientific.com/pdf%20reports/intlabmate\\_0806\\_particlecharact.pdf](http://whitehousescientific.com/pdf%20reports/intlabmate_0806_particlecharact.pdf).
- Rideal G. R., Jones R., M. (2000): The production and application of particle size reference standards. *International Laboratory (ISC)*, June 2000, 1-4.
- Robens E., Benzler B., Buchel G., Reichert H., Schumacher K. (2002): Investigation of characterizing methods for the microstructure of cement. *Cement and Concrete Research*, **32**: 87-90.
- Sadar M. (2002): *Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology*. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 - May 2, 2002, Reno, NV.
- Sampei M. i in. (2002): Seasonal and spatial variability in the flux of biogenic particles in the North Water, 1997-1998. *Deep-Sea Research II*, **49**: 5245-5257.
- Santos N.C., Castanho M. A. R. B. (1999): Teaching light scattering spectroscopy: The dimension and shape of tobacco mosaic virus. *Biophysical Journal*, **71**, 9: 1641-1646.
- Selomulya C. (2001): *The effect of shear on flocculation and floc size/structure*. The University of New South Wales, Australia (tezy rozprawy doktorskiej).



- Sorensen C. M. (2000): The optics of single particles and fractal aggregates. *Journal of Aerosol Science*, **31**: 952-954.
- Sorensen C. M. (2001): Light scattering by fractal aggregates: a review. *Aerosol Science and Technology*, **35**: 648-687.
- Sozański M.M, (Red.) (1999): *Technologia usuwania i unieszkodliwiania osadów z uzdatniania wody*. Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Stasicka Z. (2001): *Procesy fotochemiczne w środowisku*. Wydaw. Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Swithenbank J., Beer J.M., Taylor D.S., Abbot D., McGreath G.C. (1977): A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distributions. In: B.J. Zinn (Ed.), *Experimental Diagnostics in Das Phase Combustion Systems: Progress in Astronautics and Aeronautics*, **53**: 421-447.
- Syroeshkin A.V., Popov P.I., Grebennikova T.V., Frolov V.A., Pleteneva T.V. (2005): Laser diffraction for standardization of heterogeneous pharmaceutical preparations. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **37**: 927-930.
- Szewald O., Kotsis I. (2001): Setting the optimal technological parameters for producing ceramic substrates. *Ceramics International*, **27**: 467-471.
- Tang S., Ma Y., Sebastine I.M. (2001): The fractal nature of Escherichia coli biological flocs. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **20**: 211-218.
- Tani K., Kurokawa K., Nasu M. (1998): Development of a direct in situ PCR method for detection of specific bacteria in natural in environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**: 1536-1540.
- Using laser diffraction analysis in pigment sizing. Particle characterization. Application information A-1994A.* Beckman Coulter Inc.
- Vesey G., Hutton P., Champio, A., Ashbolt N., Williams K.L., Warton A., Veal D. (1994): Application of flow cytometric methods for the routine detection of Cryptosporidium and Giardia in water. *Cytometry*, **16**: 1-6.
- Viklander M. (1999): Dissolved and particle-bound substances in urban snow. *Wat. Sci. Tech.*, **39**, 12: 27-32.
- Vives-Rego J., Lebaron P, Nebe-von Caron G. (2000): Current and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology. *FEMS Microbiology Reviews*, **24**: 429-448.
- Vyas H.K., R.J. Bennett R.J., A.D. Marshall A.D. (2000): Influence of feed properties on membrane fouling in crossflow microfiltration of particulate suspensions. *International Dairy Journal*, **10**: 855-861.

- Waite T.D. (1999): Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment. *Colloids Surf. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **151**: 27-41.
- Weiss, E.L., Frock, H.N. (1976): Rapid analysis of particle-size distributions by laser light scattering. *Powder Technology*, **14**: 287-293.
- Wilson R, Leschonski K, Alex W, Allen T, Koglin B, Scarlett B. (1980): *BCR (Community Bureau of Reference) Quartz Reference Standards: Certification Report on Reference Materials of Defined Particle Size*, Commission of the European Communities, Document EUR 6825 EN.
- Wiłun Z. (2001): *Zarys geotechniki*. Wydaw. Komunikacji i Łączności Warszawa.
- Wright D.L., Jr (2000): Retrieval of optical properties of atmospheric aerosols from moments of the particle size distribution. *J. Aerosol Sci.*, **31**, 1: 1-18.
- Wu R.M., Lee D.J., Waite T.D. Guan J. (2002): Multilevel structure of sludge flocs. *J. Col. Inter. Sci.*, **252**: 383-392.
- Zaidi S.H., Altunbas B.J., Azzopardi B.J. (1998): A comparative study of phase Doppler and laser diffraction techniques to investigate drop size in annular two-phase flow. *Chemical Engineering Journal*, **71**: 135-143.
- Zhang H., Hu X. (2004): Catalytic oxidation of carbon monoxide in a fixed bed reactor. *Separation and Purification Technology*, **34**, 1-3: 105-108
- Zobrist J., Müller S.R., Ammann A., Mottier V., Ochs M., Schoenenberger R., Eugster J. (2000): Quality of roof runoff for groundwater infiltration. *Wat. Res.*, **34**, 5: 1455-1462.





ISSN 0208-8029

ISBN 978-83-89475-14-6

5

Bibl. podlegna

45903

IBS PAN  
Sema