

# OCENA PRZYDATNOŚCI GRANULOMETRU LASEROWEGO DO ANALIZY ZAWIESIN ZANIECZYSZCZAJĄCYCH WODY OPADOWE ODPROWADZANE Z TERENÓW ZURBANIZOWANYCH

Ewa BURSZTA-ADAMIAK, Magdalena KĘSZYCKA, Jacek SZWED

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Budownictwa i Infrastruktury

*Słowa kluczowe: granulometr laserowy, spływy powierzchniowe, wody opadowe, zawiesiny*

## Streszczenie

Zagospodarowanie wód opadowych w miejscu ich powstawania wymaga znajomości ilości i wielkości cząstek zanieczyszczeń, występujących w spływach opadowych i roztopowych, odprowadzanych z różnych powierzchni. Obserwacje oraz badania fizykochemiczne opadów, z pominięciem analiz składu granulometrycznego opadu mokrego, są prowadzone w sieci 25 punktów pomiarowych w stacjach synoptycznych IMGW na terenie całego kraju. Dzięki intensywnemu rozwojowi technik instrumentalnych powstają nowe możliwości identyfikacji ilości i wielkości cząstek zawiesin. Przykładem jest granulometr laserowy, który pozwala identyfikować zróżnicowane formy zawiesin w wodzie.

W pracy przedstawiono badania wykonane z wykorzystaniem granulometru laserowego Mastersizer 2000. Ocenę przydatności tej analizy instrumentalnej przeprowadzono na podstawie wyników badań spływów wód opadowych i roztopowych, uzyskanych z trzech stanowisk pomiarowych na terenie Dolnego Śląska i jednego stanowiska w województwie lubuskim.

## WSTĘP

Głównym źródłem informacji o parametrach jakościowych wód opadowych jest krajowy monitoring właściwości chemicznych opadów atmosferycznych i depozycji zanieczyszczeń do podłoża, koordynowany przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Jednostką nadzorującą sieć monitoringu diagnostycznego na terenie całego kraju jest Wrocławski Oddział Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Wyniki prowadzonych badań są

---

Adres do korespondencji: dr inż. E. Burszta-Adamiak, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Budownictwa i Infrastruktury, pl. Grunwaldzki 24, 50–363 Wrocław; tel. +48 (71) 320-55-55, e-mail: ewa.burszta-adamiak@up.wroc.pl

podstawą do podejmowania działań na rzecz poprawy stanu środowiska oraz ochrony wód powierzchniowych przed zanieczyszczeniami w poszczególnych województwach [Raport..., 2002; Program..., 2003; TWAROWSKI i in., 2005].

Dotychczasowe analizy, obejmujące oznaczenie barwy, mętności oraz zawiesiny ogólnej, dostarczają niepełnej informacji o zawiesinach występujących w wodach naturalnych. Wciąż brakuje wyników badań informujących o ilości i wielkości cząstek zawiesin odprowadzanych wraz ze spływami powierzchniowymi z różnych powierzchni utwardzonych. Wiedza na ten temat jest przydatna między innymi w projektowaniu kanalizacji deszczowej oraz urządzeń podczyszczających wody opadowe odprowadzane z terenów zurbanizowanych.

Wielkość cząstek jest głównym czynnikiem wpływającym na fizyczne zachowanie danej zawiesiny. Zgodnie z prawem Stokesa, prędkość opadania cząstek jest funkcją potęgową średnicy, podczas gdy gęstość jest funkcją liniową [BALE, 1996]. Najstarsze metody pomiaru wielkości cząstek, które chętnie stosuje się do dziś, to: metoda przesiewowa (na sucho i mokro), osiadanie w tubie, analiza pipetowa [ZIELINA, 2005] oraz analiza wagowa [ORZECZOWSKI, 1990].

Ze względu na czas i pracochłonność wspomnianych analiz uziarnienia, obecnie coraz częściej korzysta się z innych, nowocześniejszych i bardziej zautomatyzowanych metod badań. Największe znaczenie mają metody optyczne, w których wykorzystuje się pomiar rozproszenia wiązki światła, przechodzącej przez ośrodek występowania zawiesiny. Urządzenia optyczne, m.in. cytometry przepływowe i rentgenowski analizator cząstek, najlepiej nadają się do analizy drobniejszych osadów, cząstek gliny, mułów, podczas gdy granulometr laserowy jest zdolny do analizy szerszego zakresu wielkości cząstek [PYE, BLOTT, 2004].

Granulometry laserowe automatyzują żmudne przygotowanie próbek, co umożliwia użytkownikowi lepsze skoncentrowanie się na analizie oraz powoduje skrócenie czasu analiz, w którym można uzyskać duży zbiór danych. Dodatkowo wykorzystanie specjalnych technik obróbki zbiorów wyników, dostępnych dzięki oprogramowaniu będącym na wyposażeniu granulometru, sprawia, że możliwe jest „wydobycie” dodatkowych informacji z zebranych danych pomiarowych. Dzięki temu, jak również dzięki dużemu zakresowi wielkości analizowanych cząstek, metodę granulometrii laserowej stosuje się powszechnie w różnych dziedzinach nauki i techniki, np. farmacji, przemyśle spożywczym, chemicznym itp.

Celem artykułu jest ocena przydatności granulometru laserowego do badań ilości i wielkości cząstek zawiesin w wodach opadowych, odprowadzanych wraz ze spływami z powierzchni dachów i dróg, znajdujących się na terenach zurbanizowanych.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Ze względu na warunki atmosferyczne próbek nie pobierano systematycznie, ale w zależności od warunków pogodowych – w trakcie trwania opadu w przypadku deszczu, a w przypadku śniegu w trakcie jego topnienia. Badania prowadzono od października 2006 do maja 2007 r. Próbki wód opadowych pobierano do wysterylizowanych butelek i analizowano za pomocą granulometru laserowego natychmiast po zakończeniu opadu i zebraniu niezbędnej do badań objętości wody.

Wody opadowe zbierano na specjalnie przygotowanych foliach wyścielających zagłębienia terenu o powierzchni 1 m<sup>2</sup>. W przypadku poboru wód opadowych, spływających

z dachów, wylot rury spustowej osłaniano folią w celu uniknięcia dostawania się do wód dodatkowych zanieczyszczeń przenoszonych wraz z wiatrem.

Ilość i wielkość zawiesin występujących w wodach opadowych oznaczono za pomocą granulometru Mastersizer 2000 (model APA 2000). W czasie pomiarów cząstki zawiesin przechodzą przez celę pomiarową i analizującą wiązkę laserową. Intensywność rozproszonego światła mierzy się za pomocą szeregu detektorów. Liczba i położenie detektorów w tym typie granulometru są tak zoptymalizowane, aby uzyskać maksymalny rozkład w szerokim zakresie wielkości cząstek. Odwzorowanie intensywności rozproszenia w stosunku do kąta rozproszenia jest podstawowym źródłem informacji, wykorzystywanym do obliczenia rozmiaru cząstki. Cząstka rozprasza światło pod kątem, który jest odwrotnie proporcjonalny do jej wielkości. Granulometr ten umożliwia badanie cząstek zarówno suchych, jak i znajdujących się w roztworze, o rozmiarach od 0,02 do 2 000  $\mu\text{m}$ . Jest on sterowany przez oprogramowanie SOP (Standardowe Procedury Operacyjne). Większą rozdzielczość, niż mają inne urządzenia tego typu, zapewnia system detekcji z podwójną długością fali. Urządzenie do pomiaru wykorzystuje źródło światła niebieskiego i czerwonego [Operators guide, 1999].

System operacyjny zapewnia optymalne stężenie analizowanej próbki dla dokładnego pomiaru cząstek. Jednorazowy pomiar trwa kilka sekund. Analizator pokazuje czas wykonania pomiaru oraz odstępy czasu między kolejnymi pomiarami. W praktyce wykonuje się kilka pomiarów na każdej próbce i w ten sposób wyznacza większą grupę rozkładów wielkości cząstek zawiesin w każdorazowo analizowanej próbce. Dzięki temu można zaobserwować, czy zawiesiny w badanej próbce są trwale lub czy łatwo ulegają rozbiciu albo też mają tendencję do łączenia się w większe aglomeraty. Czas między kolejnymi pomiarami podczas analizy danej próbki jest wyznaczany przez użytkownika granulometru laserowego i wynosi najczęściej ok. 30 sekund. Dzięki oprogramowaniu można uzyskać średni udział cząstek o określonej wielkości, co czyni uzyskiwany wynik bardziej wiarygodnym.

## **LOKALIZACJA I OPIS PUNKTÓW POMIAROWYCH**

Próbki wód opadowych do badań pobierano z czterech stanowisk. Stanowisko pomiarowe nr 1 zlokalizowano w Gorzowie Wielkopolskim w województwie lubuskim. Budynek, z dachu którego pobierano próbki, to dom wolnostojący dla rodziny czteroosobowej, znajdujący się w okolicy, która nie jest w pełni uzbrojona. Jego dach jest pokryty dachówką cementową, jego średni spadek wynosi 40%. Opad atmosferyczny był przyjmowany na ok. 141,5  $\text{m}^2$  powierzchni dachu, a następnie odprowadzany do 6 przewodów rynnowych poziomych, a dalej prowadzony do 6 przewodów spustowych i w efekcie końcowym odprowadzany na posesję.

Stanowisko pomiarowe nr 2 znajdowało się na autostradzie A4 (E40) w okolicy zjazdu na drogę lokalną 396 w kierunku Oława/Strzelin (175+000 km). Odcinek autostrady A4, z którego pobierano próbki, należy do dróg szybkiego ruchu o dużym natężeniu (38 091  $\text{poj} \cdot \text{d}^{-1}$ ) [Infrastruktura...]. Opad atmosferyczny był przyjmowany na nawierzchnię jezdni, a następnie kierowany spływem powierzchniowym zgodnie ze średnim nachyleniem jezdni do biegnącej równoległe do pasa jezdni betonowej rynny, a dalej prowadzony do studzienki zbiorczej i w efekcie końcowym po podczyszczeniu w osadniku i separatorze tłuszczów

odprowadzany do odbiornika. Punktem poboru próbek wód opadowych był wlot do betonowej rynny.

Stanowisko pomiarowe nr 3 znajdowało się w Oławie w województwie dolnośląskim. Budynek, z dachu którego pobierano próbki, to altana ogrodu działkowego, niepodłączona do sieci kanalizacyjnej. Dach jest dwuspadowy (dwupołaciowy), pokryty blachą ocynkowaną, jego średni spadek wynosi 20%. Opad atmosferyczny był przyjmowany na ok. 12,9 m<sup>2</sup> powierzchni dachu, a następnie odprowadzany do 2 przewodów rynnowych poziomych, a dalej prowadzony do 2 przewodów spustowych i w efekcie końcowym odprowadzany do gruntu na ogrodzie działkowym.

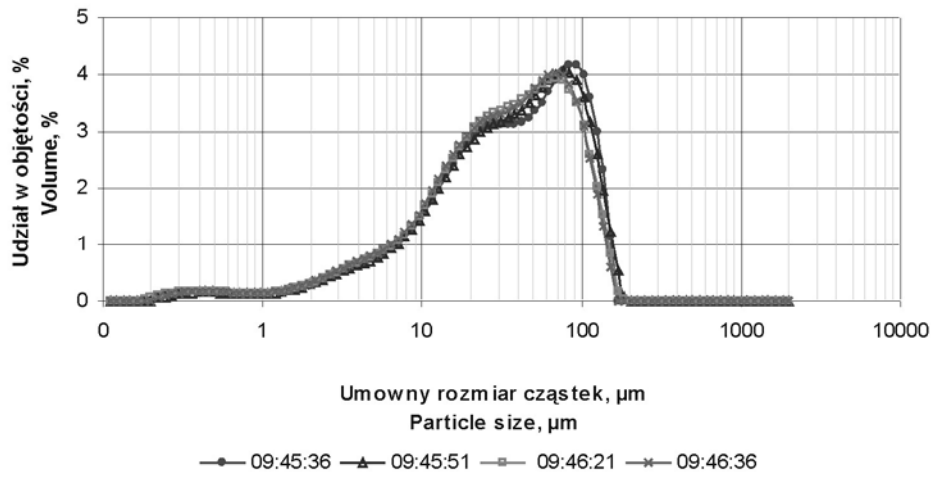
Stanowisko badawcze nr 4 znajdowało się na drodze krajowej nr 94 na odcinku przebiegającym przez miasto Oława. Odcinek, z którego pobierane były próbki, leży na obszarze zabudowanym, na którym dozwolona prędkość maksymalna wynosi 50 km·h<sup>-1</sup>. Jest to droga o średnim natężeniu ruchu (10 719 poj.:d<sup>-1</sup>) [Infrastruktura...]. Opad atmosferyczny był przyjmowany na asfaltową nawierzchnię jezdni, a następnie kierowany spływem powierzchniowym zgodnie z nachyleniem jezdni do rynny przykrawężnikowej z kostki brukowej i dalej prowadzony do wpustów ulicznych i w efekcie końcowym odprowadzany siecią kanalizacyjną do gruntu. Punkt poboru wód opadowych – wlot do wpustu ulicznego – zlokalizowano pod wiaduktem kolejowym.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Analizowane wody opadowe, odprowadzane z powierzchni dachów, zawierały najwięcej cząstek z przedziału wielkości 50–100 µm w przypadku spływu z dachu pokrytego dachówką (stanowisko nr 1) i 30–60 µm w próbkach pobranych z dachu wykonanego z blachy ocynkowanej (stanowisko nr 3) – rysunki 1., 2. Na obu stanowiskach pomiarowych cząstki do 50 µm stanowiły znaczną część (ok. 70%) objętości wszystkich cząstek występujących w badanych zawiesinach. Tylko w jednej z oznaczanych próbek, pobranych ze stanowiska nr 1, stwierdzono największą ilość cząstek z przedziału wielkości 1 200–1 400 µm (15.12.2006 r.). Cząstki te stanowiły blisko 23% objętości próbki.

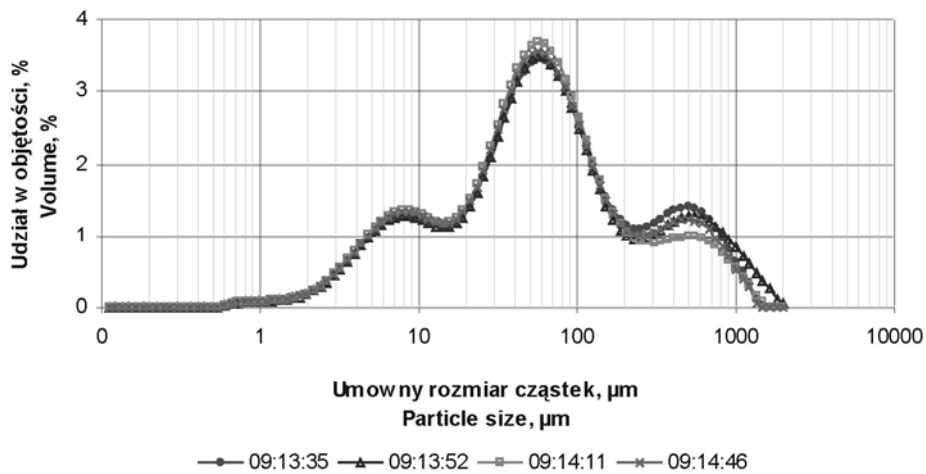
Analiza granulometryczna wód opadowych pobranych z dróg wykazała – podobnie jak w przypadku spływów pobranych z dachów – występowanie w większości badanych próbek największego udziału cząstek z przedziału wielkości 20–100 µm w próbkach z autostrady A4 (stanowisko nr 2) i 10–50 µm w próbkach zebranych z drogi krajowej nr 94 (stanowisko nr 4). W pojedynczych próbkach na obu stanowiskach można było zidentyfikować także cząstki większe, z zakresu 1 000–2 000 µm, które stanowiły ok. 15% objętości próbki.

Stosowanie granulometru laserowego umożliwia obserwację składu granulometrycznego zawiesin w ustalonych odstępach czasu i poznanie trwałości zawiesin oraz dynamiki procesów rozpadu lub łączenia się poszczególnych cząstek ze sobą. Analiza składu granulometrycznego badanych próbek spływu wykazała występowanie w większości badanych próbek cząstek nietrwałych, które podczas badania ulegały znacznemu rozpadowi (rys. 3, 4). Cząstki organiczne stanowiły w tych próbkach znaczną część objętości. Rozpadowi ulegały głównie cząstki o wielkości ponad 300 µm. W pojedynczych próbkach można było zaobserwować naprzemienny proces aglomeracji i rozpadu cząstek (rys. 5).



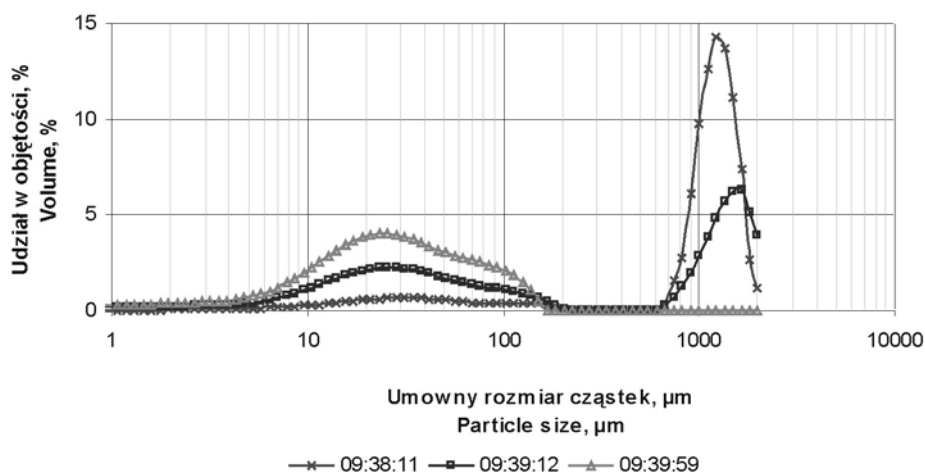
Rys. 1. Zmiany rozkładu wielkości cząstek zawiesin występujących w wodach opadowych (śnieg), pobranych 22.02.2007 r. ze stanowiska nr 1

Fig. 1. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (snow) collected on 22.02.2007 from sampling post no. 1



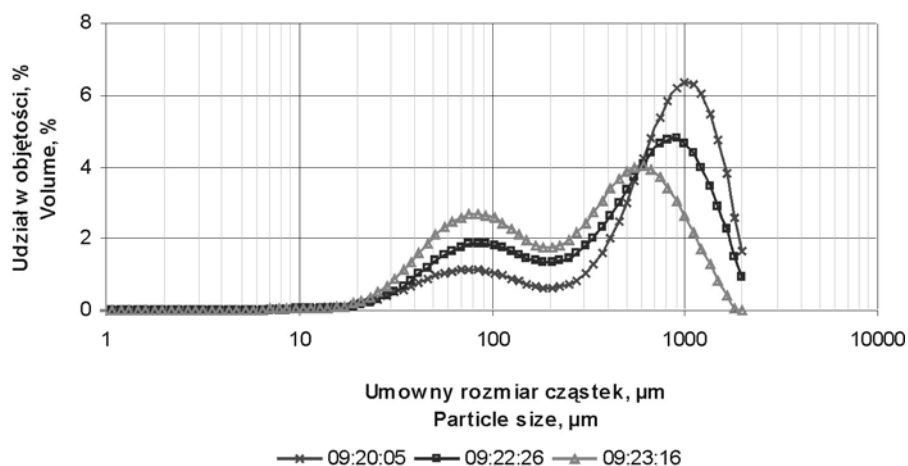
Rys. 2. Zmiany rozkładu wielkości cząstek zawiesin występujących w wodach opadowych (deszcz), pobranych 29.04.2007 r. ze stanowiska nr 3

Fig. 2. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (rain) collected on 29.04.2007 from sampling post no. 3



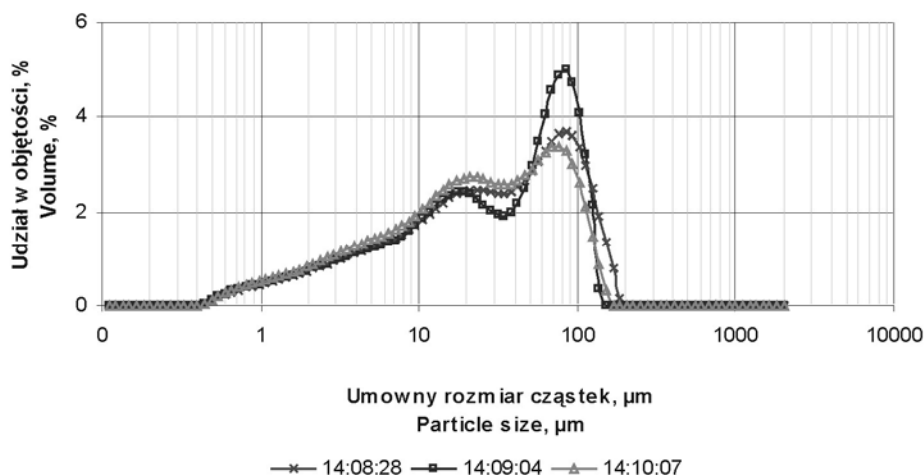
Rys. 3. Zmiany rozkładu wielkości cząstek zawieszonych występujących w wodach opadowych (deszcz), pobranych 12.12.2006 r. ze stanowiska nr 2 – rozpad cząstek

Fig. 3. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (rain) collected on 12.12.2006 from sampling post no. 2 – particle disintegration



Rys. 4. Zmiany rozkładu wielkości cząstek zawieszonych występujących w wodach opadowych (deszcz), pobranych 5.01.2007 r. ze stanowiska nr 4 – rozpad cząstek

Fig. 4. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (rain) collected on 5.01.2007 from sampling post no. 4 – particle disintegration



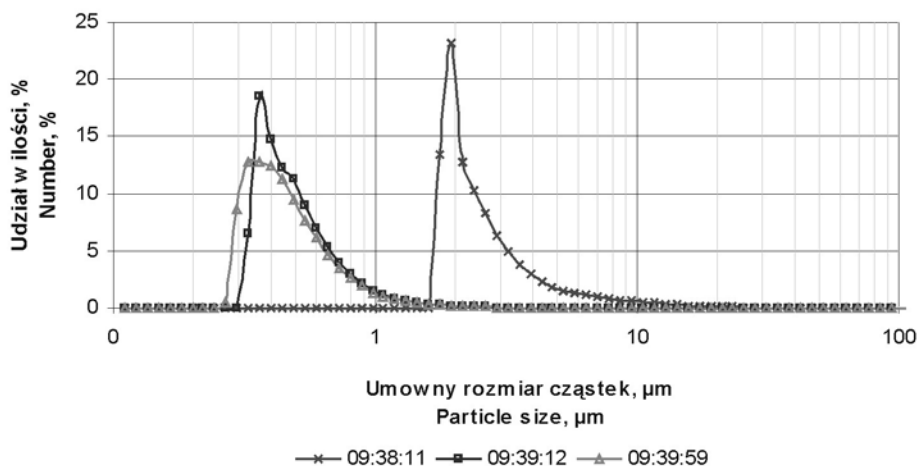
Rys. 5. Zmiany rozkładu wielkości cząstek zawiesin występujących w wodach opadowych (deszcz), pobranych 20.03.2007 r. ze stanowiska nr 2 – rozpad i koagulacja cząstek

Fig. 5. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (rain) collected on 20.03.2007 from sampling post no. 2 – particle disintegration and coagulation

Otrzymane w wyniku pomiarów za pomocą granulometru rozkłady wielkości cząstek w odniesieniu do ich objętości w analizowanych próbkach wód opadowych można transponować na rozkłady ilości cząstek z wybranego zakresu wielkości. Należy jednak pamiętać, aby szczególnie ostrożnie postępować podczas przekładu wyników. W niektórych przypadkach transformacji rozkładów objętości do rozkładów wielkości cząstek może się zdarzyć, że otrzymane wartości zostaną przeszacowane [Operators guide, 1999]. Ostrożność ta dotyczy sytuacji, gdy w badanym materiale znajduje się ponad 15% cząstek submikronowych oraz gdy istnieją w rozkładzie wielkości cząstek tzw. niezmierzone obszary (rys. 3 w zakresie cząstek o wielkości od 200 do 800  $\mu\text{m}$ ).

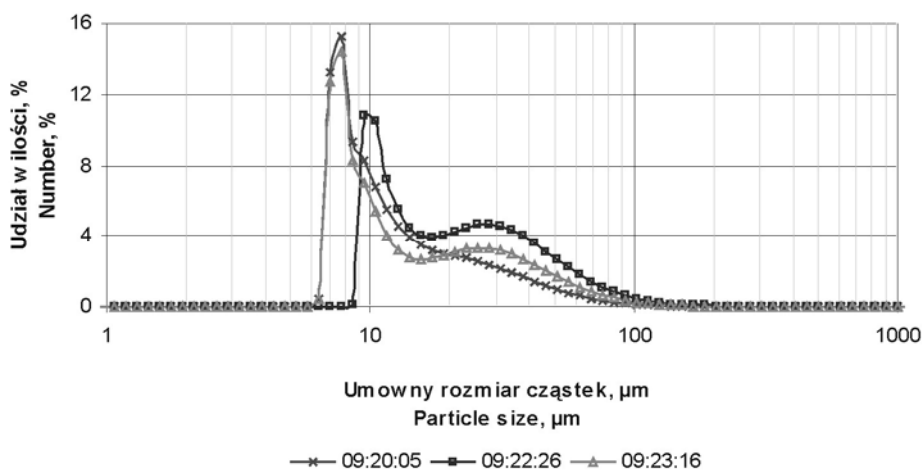
Transpozycje rozkładu wielkości cząstek w odniesieniu do ich objętości na rozkład ilości cząstek dostatecznie dobrze dowodzą istnienia dynamicznych zmian w strukturze zawiesin (rys. 6, 7). Krzywe pokazują zmiany rozkładu w czasie – zwiększa się udział cząstek o mniejszej średnicy zastępczej.

Wyniki badań dowodzą, że mimo znacznego udziału cząstek o większych rozmiarach w objętości próbek analizowanych wód opadowych, największy udział ilościowy mają cząstki o średnicach mniejszych, do 10  $\mu\text{m}$  (rys. 6) i do 100  $\mu\text{m}$  (rys. 7). Jak wynika z wcześniejszych analiz rozkładu wielkości cząstek, przeprowadzonych na tych samych próbkach (rys. 3, 4), udział cząstek do 10  $\mu\text{m}$  w ogólnej objętości zawiesin był pomijany.



Rys. 6. Zmiany rozkładu wielkości cząstek zawiesin występujących w wodach opadowych (deszcz), pobranych 12.12.2006 r. ze stanowiska nr 2 – w odniesieniu do liczby cząstek

Fig. 6. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (rain) collected on 12.12.2006 from sampling post no. 2 – with reference to the number of particles



Rys. 7. Zmiany przebiegu rozkładu wielkości cząstek zawiesin występujących w wodach opadowych (deszcz), pobranych 5.01.2007 r. ze stanowiska nr 4 – w odniesieniu do liczby cząstek

Fig. 7. Changes in particle size distribution of suspensions in storm waters (rain) collected on 5.01.2007 from sampling post no. 4 – with reference to the number of particles



## WNIOSKI

1. Rozkłady wielkości cząstek występujących w wodach opadowych z terenów zurbanizowanych charakteryzują się dużą zmiennością. Dynamikę tych układów (aglomeracja i rozpad) można zaobserwować zarówno podczas analizy wielkości zawiesin występujących w objętości próbki, jak i określania ilości cząstek zawiesin w próbce.

2. Transformacja przebiegu rozkładów wielkości cząstek umożliwia przedstawienie liczebności cząstek zawiesin drobnych, często pomijanych w rozkładach objętości. Wybór metody przyjętej w celu charakterystyki struktur zawiesin zależy od właściwości i rozmiarów cząstek oraz od wymaganej dokładności pomiaru.

3. Rodzaj nawierzchni oraz lokalizacja wpływa na skład granulometryczny zawiesin odprowadzanych z wodami opadowymi. Spływy z dachu pokrytego dachówką oraz z drogi o dużym natężeniu ruchu charakteryzowały się większymi wymiarami zawiesin w porównaniu z dwoma pozostałymi stanowiskami.

4. Uzyskane wyniki pozwalają rozszerzyć zakres informacji możliwej do praktycznego zastosowania, np. w projektowaniu urządzeń do infiltracji wód opadowych oraz urządzeń podczyszczających spływy z różnych powierzchni na terenach zurbanizowanych. Wiedza na temat struktury i wielkości cząstek zawiesin jest podstawą skutecznej eliminacji tego typu zanieczyszczeń z wód opadowych.

5. Możliwość identyfikacji zróżnicowanych form zawiesin pod względem ich ilości i wielkości cząstek oraz dynamiki układów zawiesin, a także automatyzacja wyników, eliminująca pracochłonność wykonywanych pomiarów, czynią metodę granulometrii laserowej przydatną w badaniach zawiesin występujących w wodach opadowych.

## LITERATURA

- BALE A.J., 1996. In situ laser optical particle sizing. *J. Sea Res.* 36 (1/2) s. 31–36.
- Infrastruktura drogowa (diagnoza). Cz. 3. Wrocław, sierpień 2006: [http://bip.umwd.pl/fileadmin/program\\_komunikacja/Czesc\\_III\\_Infrastruktura\\_drogowa\\_09\\_2006.doc](http://bip.umwd.pl/fileadmin/program_komunikacja/Czesc_III_Infrastruktura_drogowa_09_2006.doc)
- Operators guide, 1999. Malvern Instruments Ltd.
- ORZECHOWSKI Z., 1990. Przepływy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabaticzne. Warszawa: PWN ss. 430.
- Program monitoringu środowiska województwa mazowieckiego w latach 2004–2005, 2003. Warszawa: WIOŚ.
- PYE K., BLOTT S.J., 2004. Particle size analysis of sediments, soils related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. *Forensic Sci. Intern.* 144 s. 19–27.
- Raport o stanie środowiska województwa kujawsko-pomorskiego w 2001 roku, 2002. Bibl. Monitor. Środ. Bydgoszcz: WIOŚ.
- TWAROWSKI R., BŁACHUTA J., GENDOLLA T., LIANA E., WOSTEK K., KARZMARSKI S., 2005. Trendy zmian zanieczyszczeń atmosferycznych deponowanych z hydrometeorami na obszar Polski w latach 1999–2004. *Prz. Geol.* vol. 53 nr 11 s. 1058–1063.
- ZIELINA M., 2005. Pomiar ilości cząstek rozproszonych w wodzie podczas filtracji pospiesznej. *Monogr. Kom. Inż. Środ. PAN.* 2 Kongr. Inż. Środ. vol. 33 t. 2 s. 1095–1103.

*Ewa BURSZTA-ADAMIAK, Magdalena KĘSZYCKA, Jacek SZWED*

**AN ASSESSMENT OF THE USEFULNESS OF LASER GRANULOMETER  
TO ANALYSE SUSPENDED MATTER IN RAIN WATERS DRAINED  
FROM URBAN AREAS**

*Key words: laser granulometer, stormwater, stormwater runoff, suspensions*

**S u m m a r y**

Knowledge about the quantity and quality of pollutants in rain waters and melted snow drained from various areas is needed to assess the possibility of stormwater management in place of its formation.

Observations and physico-chemical analyses of rain waters, except for grain size composition of wet deposition, are made throughout the country in 25 sampling points located at the Institute's of Meteorology and Water Management weather posts.

New possibilities of identification of the amount and particle size of suspensions appeared thanks to new instrumental techniques. Laser granulometer allows for identifying different forms of suspensions.

This article presents the particle size analyses of rain and snow-melt waters made with laser granulometer. The usefulness of this method was assessed based on stormwater samples taken from three sites situated in the dolnośląskie province and from one in the lubuskie province.

---

**Recenzenci:**

*prof. dr hab. Jan Dojlido*

*prof. dr hab. Barbara Sapek*

Praca wpłynęła do Redakcji 19.09.2007 r.

