

Jacek PIELECHA, Remigiusz JASIŃSKI

## OCENA WPŁYWU OPERACJI LĄDOWANIA SAMOLOTU PASAŻERSKIEGO NA STĘŻENIE CZĄSTEK STAŁYCH W POBLIŻU LOTNISKA

### Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie emisji cząstek stałych z samolotów pasażerskich i ich wpływ na zanieczyszczenie powietrza w pobliżu portu lotniczego. Niedostateczne dane na temat stężenia liczbowego cząstek stałych z silników lotniczych wymusiły prace nad szczegółowym rozpoznaniem wielkości zanieczyszczenia powietrza w pobliżu lotnisk. Badania przeprowadzono na obszarze przyległym do portu lotniczego Poznań-Ławica. Pomiar stężenia cząstek stałych wykonano czterokrotnie w trakcie lądowania statków powietrznych wyposażonych w silniki odrzutowe. Analizie podlegało całkowite stężenie liczbowe oraz rozkład wymiarowy cząstek stałych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono kilkudziesięciokrotny wzrost wartości stężenia liczbowego cząstek stałych w powietrzu, spowodowany operacją lądowania pojedynczego statku powietrznego. Otrzymane charakterystyki pozwoliły stwierdzić, że wśród cząstek stałych emitowanych w fazie lądowania samolotu pasażerskiego dominują cząstki o średnicach z zakresu 5–20 nm.

### WSTĘP

Zagadnienie emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych przyciąga duże zainteresowanie w środowisku naukowym oraz angażuje opinię publiczną ze względu na znany związek między narażeniem na działanie wielu substancji zanieczyszczających powietrze, a krótko i długoterminowymi skutkami dla zdrowia człowieka [2]. Dodatkowo, zanieczyszczenia pochodzenia silnikowego mogą wpływać na pogorszenie widoczności [11] oraz pośrednio lub bezpośrednio wpływać na klimat [1]. Podczas, gdy zanieczyszczenie powietrza jest głównym problemem krajów rozwijających się, gdzie odnotowuje się znaczny wzrost populacji i zapotrzebowania na energię, to kraje rozwinięte odnotowały spadek stężenia wielu związków szkodliwych w ciągu ostatniej dekady.

Jedną z podstawowych kwestii przy ocenie jakości powietrza jest stężenie cząstek stałych. Cząstki stałe to termin ogólnie używany na typ zanieczyszczeń powietrza, składający się z kompleksu różnych mieszanin cząstek zawieszonych, które różnią się wielkością, składem i miejscem tworzenia. Do głównych źródeł tworzenia tego rodzaju zanieczyszczenia zalicza się: fabryki, elektrownie, spalarnie, pojazdy silnikowe i wiele innych. Podstawowy podział cząstek stałych wynika z ich średnicy aerodynamicznej, który pozwolił na wyznaczenie dwóch głównych grup: PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> (*Particulate Matter*) dla średnicy odpowiednio mniejszej niż 2,5 μm i 10 μm. Dynamiczny rozwój badawczy zagadnienia cząstek stałych oraz zmiany ich właściwości w zależności od wielkości wymusiły wprowadzenie bardziej szczegółowego podziału. Przyjęto, że cząstki najdrobniejsze (*ultrafine particles*) to cząstki o średnicy poniżej 0,1 μm oraz cząstki drobne (*fine particles* lub nanocząstki) to cząstki mniejsze niż 1 μm [8].

W ostatnich latach coraz większą uwagę zwraca się na emisję zanieczyszczeń na obszarach lotnisk, z uwagi na szybki wzrost wolumenu lotniczego oraz prognozy dalszego rozwoju w celu zaspokojenia potrzeb przewozowych na dalsze lata [7]. Większość prac i publikacji wskazuje na niedostateczne wyjaśnienie zjawisk [12], które są przedmiotem intensywnych badań, gdyż jak wskazuje literatura emisja lotnicza może znacząco wpływać na jakość powietrza w pobliżu portów lotniczych [3] oraz ich otoczeniu [10].

Silniki lotnicze to tylko jedno z wielu źródeł zanieczyszczeń na obszarze lotniska. Powszechnie uznano, że statki powietrzne odpowiadają za emisję większości zanieczyszczeń, jednak należy pamiętać o innych źródłach szczególnie niebezpiecznych w skali lokalnej. Wśród nich wyróżnić można produkty zużycia opon, hamulców i dróg startowych, a silne zawirowania powietrza generowane przez statki powietrzne sprzyjają ponownemu zawieszaniu się w powietrzu omawianych zanieczyszczeń. Cechy fizyczne i chemiczne cząstek stałych powstałych w procesach tribologicznych były przedmiotem badań zaledwie kilku publikacji [6], co świadczy o silnej potrzebie rozwijania tego zagadnienia.

Coraz większa wiedza z zakresu procesów powstawania zanieczyszczeń pochodzenia silnikowego oraz dynamiczny rozwój urządzeń pomiarowych wymuszają tworzenie nowych przepisów i warunków certyfikacji silników lotniczych. Pierwsze normy emisji zanieczyszczeń dla silników lotniczych wprowadzono pod koniec lat 70-tych XX wieku przez Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (ICAO – *International Civil Aviation Organization*) w ramach Komitetu Emisji Silników Lotniczych (CAEE – *Committee on Aircraft Engine Emissions*), późniejszej Komisji Lotniczej Ochrony Środowiska (CAEP – *Committee on Aviation Environmental Protection*). Kluczowe przepisy w ramach działań ograniczających emisję związków szkodliwych ze statków powietrznych zostały wprowadzone przez ICAO w tomie II załącznika 16 do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym (tzw. Konwencja Chicagowska). W omawianym dokumencie uwzględniono zalecenia dotyczące pomiaru tlenku węgla, tlenków azotu, węglowodorów oraz zadymienia spalin [9].

Powyższe działania doprowadziły do znacznego obniżenia bezpośredniej emisji związków szkodliwych ze statków powietrznych w przeciągu ostatnich dwudziestu lat. Należy jednak pamiętać, że uzyskana korzyść może zostać zrównoważona przez wzrastający ruch lotniczy, wynikający z dynamicznego rozwoju transportu lotniczego. Dodatkowo, regulacja wprowadzona przez ICAO dotyczy jedynie czterech głównych zanieczyszczeń. W celu prawidłowej oceny jakościowej i ilościowej spalin lotniczych wymagana jest dokładniejsza analiza, między innymi analiza chemiczna i fizyczna, oraz analiza liczbowa cząstek stałych [4, 5]. Dane literaturowe jednak pozostawiają wiele pytań w aspekcie emisji związków szkodliwych ze statków powietrznych w rzeczywistych warunkach ruchu,

a wynika to w szczególności ze stosowania różnej metodyki pomiaru, różnego sposobu prezentowania wyników oraz sposobu analizy wyników badań.

## 1. CEL I METODYKA BADAŃ

### 1.1. Cel badań

Lokalizacja poznańskiego lotniska wymusza częste przeloty samolotów pasażerskich nad centrum miasta. Niski poziom lotu nie pozwala na rozcieńczenie związków szkodliwych, jak ma to miejsce w górnych warstwach atmosfery na standardowym pułapie przelotowym. Można zatem przyjąć, że transport lotniczy ma negatywny wpływ na jakość powietrza nad obszarem lotnisk (a szczególnie w aglomeracji poznańskiej).

Duże wartości stężenia zanieczyszczeń w powietrzu na terenie Poznania potwierdzają raporty Wielkopolskiego Inspektoratu Ochrony Środowiska. W 2014 roku stwierdzono ponad dwukrotnie większą niż dopuszczalna, liczbę dni z przekroczoną normą stężenia pyłu PM10. Na zły stan powietrza wpływają różnego rodzaju źródła zanieczyszczeń, między innymi statki powietrzne.

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu lądujących statków powietrznych na stężenie liczbowe cząstek stałych w okolicy poznańskiego lotniska.

### 1.2. Obiekty badań

Obiektami badań były rejsowe samoloty pasażerskie, Boeing 737-500 (rys. 1) oraz Boeing 737-800 (rys. 2) lądujące na lotnisku w porcie lotniczym Poznań-Ławica. Powyższe statki powietrzne zostały wybrane ze względu na ich dużą częstotliwość lądowań w Poznaniu, co pozwoliło na zwiększenie próby pomiarów.



Rys. 1. Widok samolotu pasażerskiego Boeing 737-500



Rys. 2. Widok samolotu pasażerskiego Boeing 737-800

Wybrane wersje Boeinga 737 oprócz różnic w budowie płatowca, różniły się zastosowanymi silnikami odrzutowymi. W przypadku Boeinga 737-500 był to silnik CFM56-3, natomiast Boeing 737-800 wyposażony był w silniki CFM56-7B. Podstawowe parametry techniczne powyższych silników zawarto w tabeli 1.

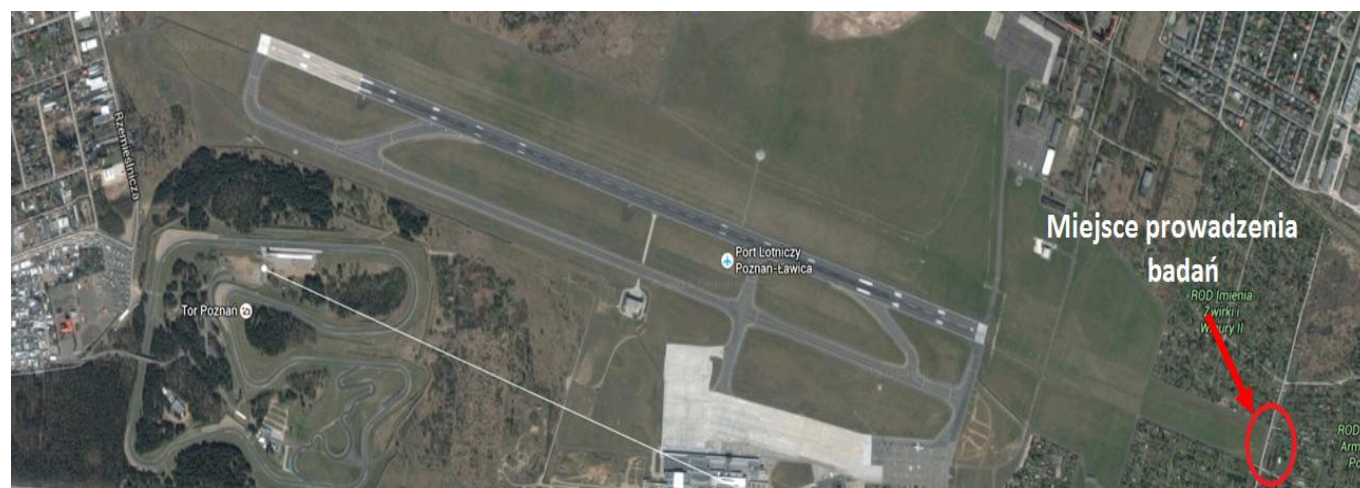
Tab. 1. Parametry techniczne silników odrzutowych [13]

Parametr	CFM56-3 (Boeing 737-500)	CFM56-7B (Boeing 737-800)
Ciąg maksymalny [kN]	89	95
Stopień dwuprzepływowości	6,0	5,3
Strumień masy spalin (faza startu) [kg/s]	300	320

### 1.3. Metodyka badań

Pomiary zostały przeprowadzone w pobliżu portu lotniczego Poznań-Ławica w odległości około 2 km od punktu przyziemienia statków powietrznych (rys. 3). Warunki meteorologiczne w dniu prowadzenia pomiarów nie miały znaczącego wpływu na wyniki, gdyż nie odnotowano opadów, a prędkość wiatru nie przekraczała 12 km/h. Aparatura pomiarowa została ustawiona w osi podejścia do lądowania samolotów pasażerskich. Pomiary stężenia liczbowego cząstek stałych wykonano 4-krotnie po lądowaniu poszczególnych samolotów.

Do pomiaru rozkładu wymiarowego cząstek stałych oraz ich całkowitego stężenia w powietrzu na obszarze przeprowadzonych badań wykorzystano spektrometr masowy firmy TSI Incorporated – EEPS 3090 (Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer) (rys. 4). W celu ograniczenia wpływu pyłów znajdujących się przy ziemi, sondę pomiarową umieszczono na statywie o wysokości 4 m.



Rys. 3. Miejsce prowadzonych badań



Rys. 4. Spektrometr masowy EEPS 3090

## 2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania przeprowadzono na czterech samolotach w kolejności przedstawionej w tabeli 2. W każdym z czterech przypadków zmierzono całkowite liczbowe stężenie cząstek stałych przed lądowaniem (tło pomiarowe) oraz w trakcie lądowania statku powietrznego. Dodatkowo zmierzono rozkład wymiarowy cząstek stałych tła pomiarowego oraz jego zmianę po przelocie danego samolotu.

Tab. 2. Lista badanych samolotów

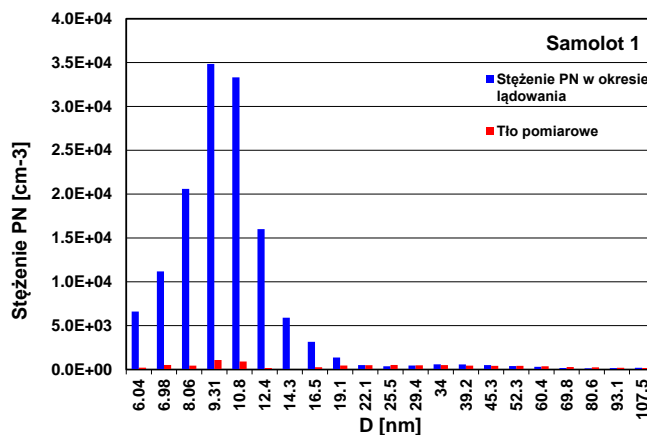
Lp.	Data	Samolot	Silnik
1	17.09.2015	Boeing 737-800	CFM56-7B
2	17.09.2015	Boeing 737-800	CFM56-7B
3	17.09.2015	Boeing 737-800	CFM56-7B
4	17.09.2015	Boeing 737-500	CFM56-3

Całkowite średnie stężenie cząstek stałych w powietrzu bezpośrednio przed operacją lądowania samolotu pierwszego wynosiło  $3,2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$ . W okresie lądowania wartość stężenia PN wzrosła 47-krotnie do wartości  $1,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$  (rys. 5). Zwiększone stężenie cząstek stałych utrzymywało się przez około 60 s.



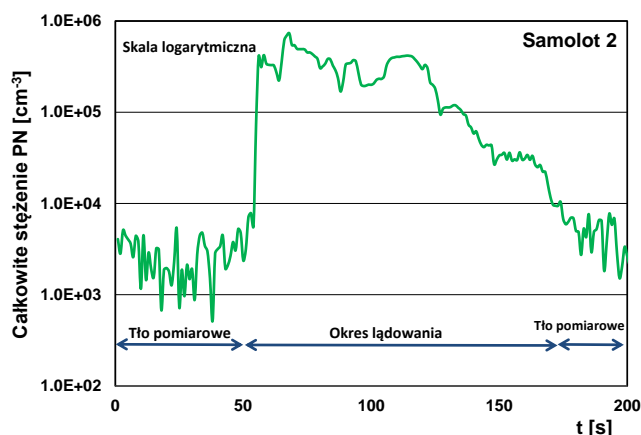
Rys. 5. Średnie stężenie cząstek stałych otrzymane dla pierwszego samolotu

W przypadku rozkładu średnicowego cząstek stałych samolotu pierwszego dominują cząstki o wymiarach 5–15 nm (rys. 6). Charakterystyczna wartość średnicy cząstek stałych (najczęściej występująca) otrzymanego rozkładu wyniosła 9 nm. Cząstki o średnicach większych niż 20 nm stanowiły pomijalnie małą część całkowitego stężenia PN.



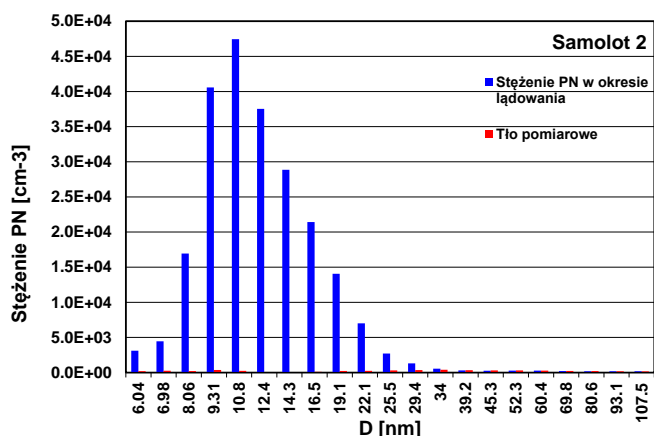
Rys. 6. Rozkład średnicowy cząstek stałych w okresie lądowania pierwszego samolotu

Średnie stężenie PN w powietrzu przed lądowaniem samolotu drugiego różniło się nieznacznie w porównaniu do stężenia przed lądowaniem samolotu pierwszego i wyniosło  $2,8 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$  (rys. 7). Średnie stężenie cząstek stałych w okresie lądowania wyniosło  $2,7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Stwierdzono 96-krotne zwiększenie stężenia liczbowego cząstek stałych (PN – *particle numer*) spowodowane operacją lądowania samolotu drugiego. Istotna różnica między wartościami stężenia PN po lądowaniu samolotu pierwszego i drugiego spowodowana była różnicą wysokości lotu badanych statków powietrznych. Zwiększone stężenie utrzymywało się przez około 110 s.



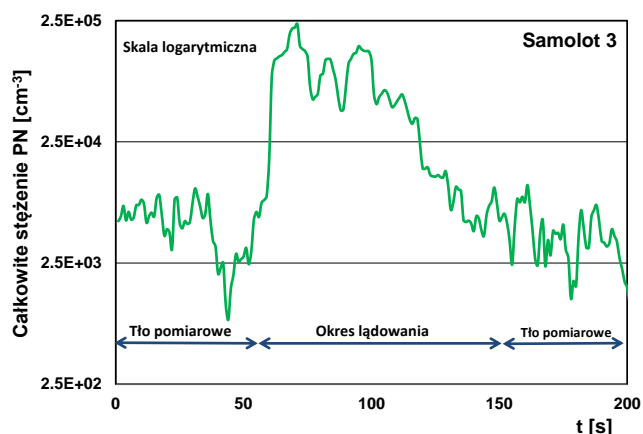
Rys. 7. Średnie stężenie cząstek stałych otrzymane dla drugiego samolotu

Rozkład wymiarowy cząstek stałych w okresie lądowania samolotu drugiego nie różnił się znacząco od rozkładu uzyskanego dla samolotu pierwszego (rys. 8). Podobnie, dominują cząstki o najmniejszych średnicach (5–20 nm). Za wartość charakterystyczną otrzymanego rozkładu przyjęto 10 nm. Nie stwierdzono wzrostu stężenia cząstek stałych o średnicach większych niż 40 nm.



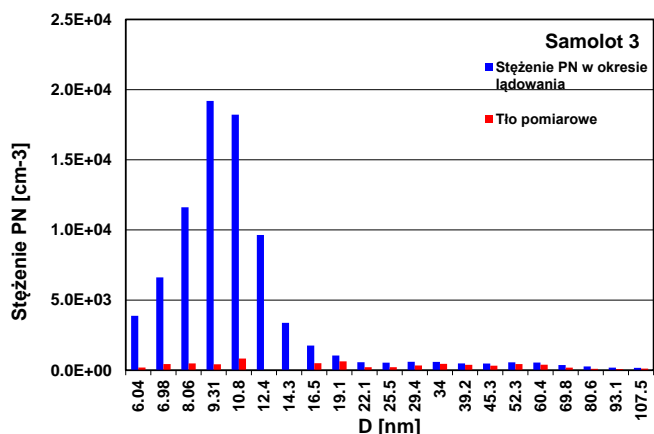
Rys. 8. Rozkład średnicowy cząstek stałych w okresie lądowania drugiego samolotu

Skutkiem lądowania trzeciego samolotu było 20-krotne zwiększenie średniego stężenia cząstek stałych z poziomu  $3,8 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$  do  $7,9 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$  (rys. 9). Zwiększone stężenie cząstek stałych na obszarze badań utrzymywało się przez około 100 s.



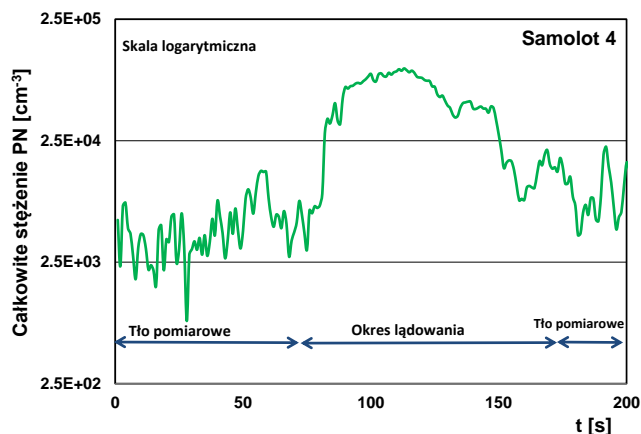
Rys. 9. Średnie stężenie cząstek stałych otrzymane dla czwartego samolotu

Rozkład średnicowy podobnie jak w przypadku pozostałych samolotów wyposażonych w silnik CFM56-7B charakteryzował się występowaniem cząstek stałych z zakresu 5–15 nm (rys. 10). Wartości stężenia cząstek o wymiarach powyżej 20 nm były pomijalnie małe.



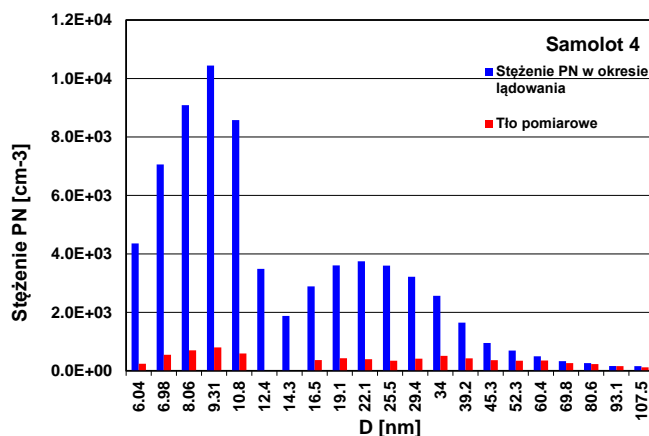
Rys. 10. Rozkład średnicowy cząstek stałych w okresie lądowania czwartego samolotu

Bezpośrednio przed lądowaniem czwartego samolotu średnie stężenie cząstek stałych na obszarze prowadzonych pomiarów wynosiło  $3,7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$  i było wyznacznikiem tła pomiarowego. Skutkiem przelotu samolotu pasażerskiego był 18-krotny wzrost wartości średniego stężenia liczbowego cząstek stałych do średniej wartości  $6,9 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$  (rys. 11). Zwiększona wartość stężenia utrzymywała się przez okres około 60 s.



Rys. 11. Średnie stężenie cząstek stałych otrzymane dla trzeciego samolotu

Rozkład średnicowy otrzymany w wyniku pomiarów w okresie lądowania czwartego statku powietrznego znacząco różnił się od rozkładów otrzymanych dla pozostałych statków powietrznych. Oprócz dominującej liczby cząstek stałych w zakresie 6–10 nm zauważyć można zwiększone stężenie liczbowe cząstek stałych o wymiarach 15–40 nm (rys. 12). Na podstawie otrzymanego rozkładu wyróżnić można dwie średnice charakterystyczne o wartościach 10 i 22 nm. Nie odnotowano znaczącego wzrostu stężenia cząstek stałych o wymiarach większych niż 50 nm. Różnice między otrzymanym rozkładem średnicowym dla samolotu czwartego a rozkładami uzyskanymi dla pozostałych obiektów badawczych wynika z różnic w konstrukcji silnika samolotu czwartego. Rozkład wymiarowy cząstek stałych otrzymany dla statku powietrznego wyposażonego w starszy model silnika CFM56 (obiekt czwarty) wykazuje podobieństwo do charakterystycznych rozkładów średnicowych cząstek stałych zawartych w spalinach pojazdów samochodowych.



Rys. 12. Rozkład średnicowy cząstek stałych w okresie lądowania trzeciego samolotu

## PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych pomiarów stwierdzono istotny wpływ statków powietrznych na stężenie liczbowe cząstek stałych na obszarze przyległym do portu lotniczego. Pojedyncza operacja lądowania samolotu wyposażonego w silnik odrzutowy powoduje kilkudziesięciokrotny wzrost wartości stężenia liczby cząstek stałych. Podwyższona liczba cząstek stałych utrzymuje się w powietrzu przez okres nie mniejszy niż 60 s.

Uzyskane rozkłady wymiarowe cząstek stałych świadczą o emitowaniu przez silniki lotnicze cząstek stałych charakteryzujących się wymiarami w zakresie 5–40 nm. Powyższy fakt jest o tyle istotny, że są to cząstki najbardziej szkodliwe dla zdrowia człowieka. Stwierdzono istotne zmiany w rozkładach wymiarowych PN w zależności od zastosowanego silnika odrzutowego. Silniki starszej generacji emitują cząstki stałe o rozkładzie zbliżonym do rozkładów uzyskiwanych z silników pojazdów samochodowych.

Fakt prowadzenia pomiarów w odległości około 2 km od punktu przyziemienia statków powietrznych pozwala przypuszczać, że obszary drogi startowej, dróg kołowania i płyt postojowych mogą być znacznie bardziej zanieczyszczone niż obszar, na którym zostały przeprowadzone badania. Jest to szczególnie istotne w kontekście bezpieczeństwa pracowników obsługi naziemnej.

## BIBLIOGRAFIA

- Ramanathan V., Feng Y., *Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives*. Atmospheric Environment 2009, vol. 43.
- Masiol M., Harrison R.M., *Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review*. Atmospheric Environment 2014, vol. 95.
- Unal A., Hu Y., Chang M.E., Odman M.T., Russel A.G., *Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport*. Atmospheric Environment 2005, vol. 39.
- Mazaheri M., Johnson G.R., Morawska L., *An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport*. Atmospheric Environment 2011, vol. 45.
- Agrawala H., Sawanta A.A., Jansena K., Millera J.W., Cocker D.R., *Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines*. Atmospheric Environment 2008, vol. 42.
- Bennett M., Christie S.M., Graham A., Thomas B.S., Vishnyakov V., *Composition of Smoke Generated by Landing Aircraft*. Environmental Science and Technology 2011, vol. 45.
- Amato F., Moreno T., Pandolfi M., Querol X., Alastuey A., Delgado A., Pedrero M., Cotsc N., *Concentrations, sources and geochemistry of airborne particulate matter at a major European airport*. Journal of Environmental Monitoring 2010, vol. 12.
- Kampa M., Castanas E., *Human health effects of air pollution*. Environmental Pollution 2008, vol. 151.
- ICAO, *Environmental Protection (Annex 16) Aircraft Engine Emission, International Standards and Recommended Practices*. 2008, vol. 2.
- Peace H., Maughan J., Owen B., Raper D., *Identifying the contribution of different airport related sources to local urban air quality*. Environmental Modelling & Software 2006, vol. 21.
- Hyslop N.P., *Impaired visibility: the air pollution people see*. Atmospheric Environment 2009, vol. 43.
- Lee D.S., Pitari G., Grewec V., Gierens K., Penner J.E., Petzold A., Prather M.J., Schumann U., Bais A., Berntsen T., Iachetti D., Lim L.L., Sausen R., *Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation*. Atmospheric Environment 2010, vol. 44.
- <http://www.cfmaeroengines.com/> (dostęp 16.10.2015).

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF PASSENGER AIRCRAFT LANDING OPERATION ON PARTICULATE MATTER CONCENTRATION NEAR AIRPORT

### Abstract

*The paper presents the issue of particulate matter emissions from passenger aircraft and their impact on air pollution near the airport. The study was conducted in an area adjacent to the airport Poznan-Lawica. The measurement of particle concentration was performed four times during landing aircrafts equipped with jet engines. The main subject of analysis were total concentration and size distribution of particulate matters. Based on the survey was found several dozen fold increase in the concentration of particles in the air, caused by the operation of a single aircraft landing. Obtained characteristics showed that during stage of landing the particles with diameters of 5–20 nm are dominating.*

### Autorzy:

dr hab. inż. prof. PP **Jacek Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, [jacek.pielecha@put.poznan.pl](mailto:jacek.pielecha@put.poznan.pl), tel. 61-665 21 18

mgr inż. **Remigiusz Jasiński** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, [remigiusz.w.jasinski@doctorate.put.poznan.pl](mailto:remigiusz.w.jasinski@doctorate.put.poznan.pl), tel. 61-665 21 18