

Szymon Kamocki^{1*}, Tomasz Jankowski¹, Magdalena Płocińska¹

*E-mail: szkam@ciop.pl ¹Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Czerniakowska 16, Warszawa, Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się rozwój firm opierających swoją działalność na wytwarzaniu addytywnym, nazywanym również drukiem 3D oraz produkcją przyrostową. Podmioty te przyjmują zlecenia na od kilku sztuk do paru tysięcy elementów dla których nieuzasadnione ekonomicznie byłoby przygotowywanie form do innych, oplotniejszych przy produkcji wielkoskalowej metod wytwarzania. Działalność tego typu odpowiada potrzebom dynamicznie zmieniającego się rynku. Pomimo że technologia druku 3D znalazła się już w świadomości ogółu społeczeństwa, zagrożenia z nią związane nie są jeszcze dobrze poznane. Jednocześnie rozwijająca się nanotechnologia pozwala na opracowanie nowych materiałów, które mogą być wykorzystywane jako dodatek do tych metod produkcji. Powstałe lub uwalniane podczas procesów produkcyjnych nanocząstki (cząstki o wymiarze poniżej 100 nanometrów) oraz ich aglomeraty i agregaty mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia. Tego typu czynniki z łatwością dostają się do krwioobiegu a następnie do poszczególnych organów głównie przez układ oddechowy. Do narażenia może dochodzić również przez oczy, skórę oraz nerw węchowy [1]. Udowodniono, że niektóre substancje o niskiej toksyczności po rozdrobnieniu do nanoskali wykazywały znacznie większą toksyczność.

Metodyka

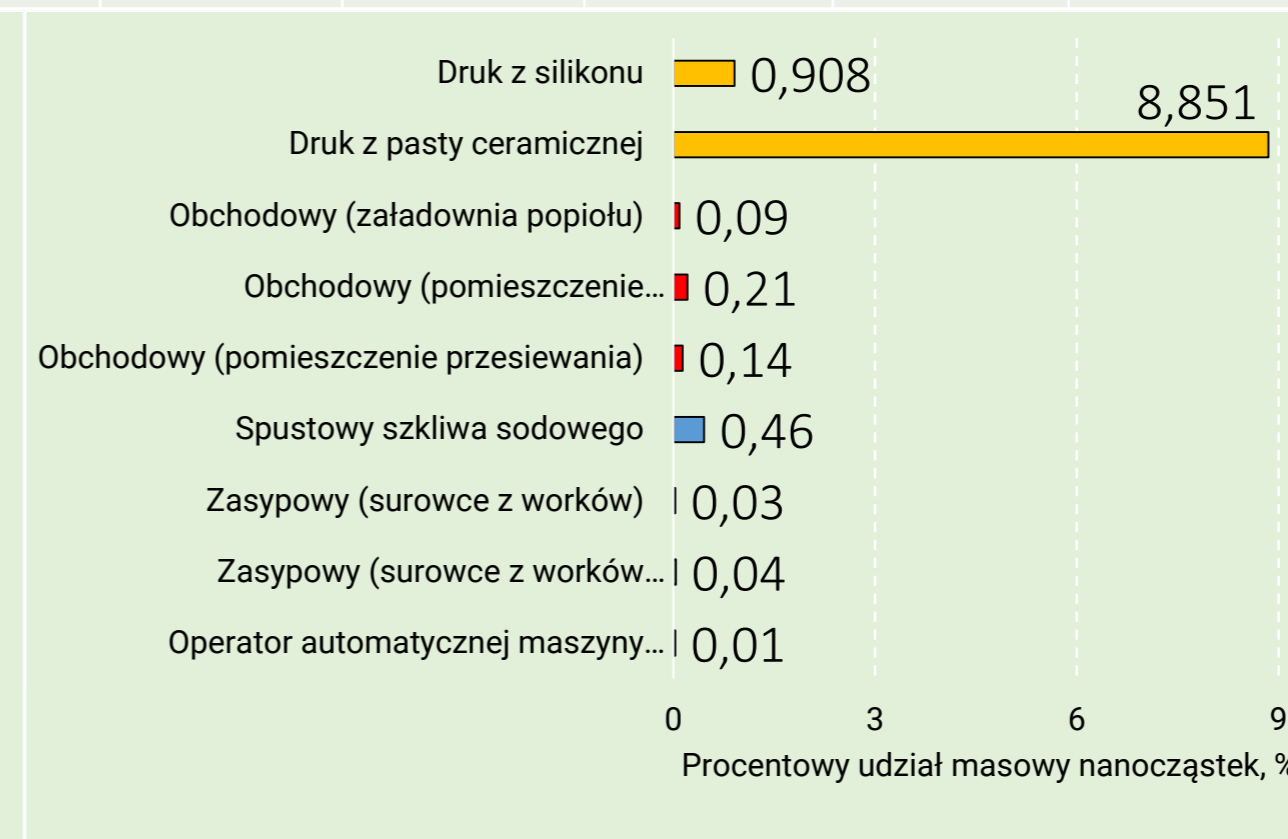
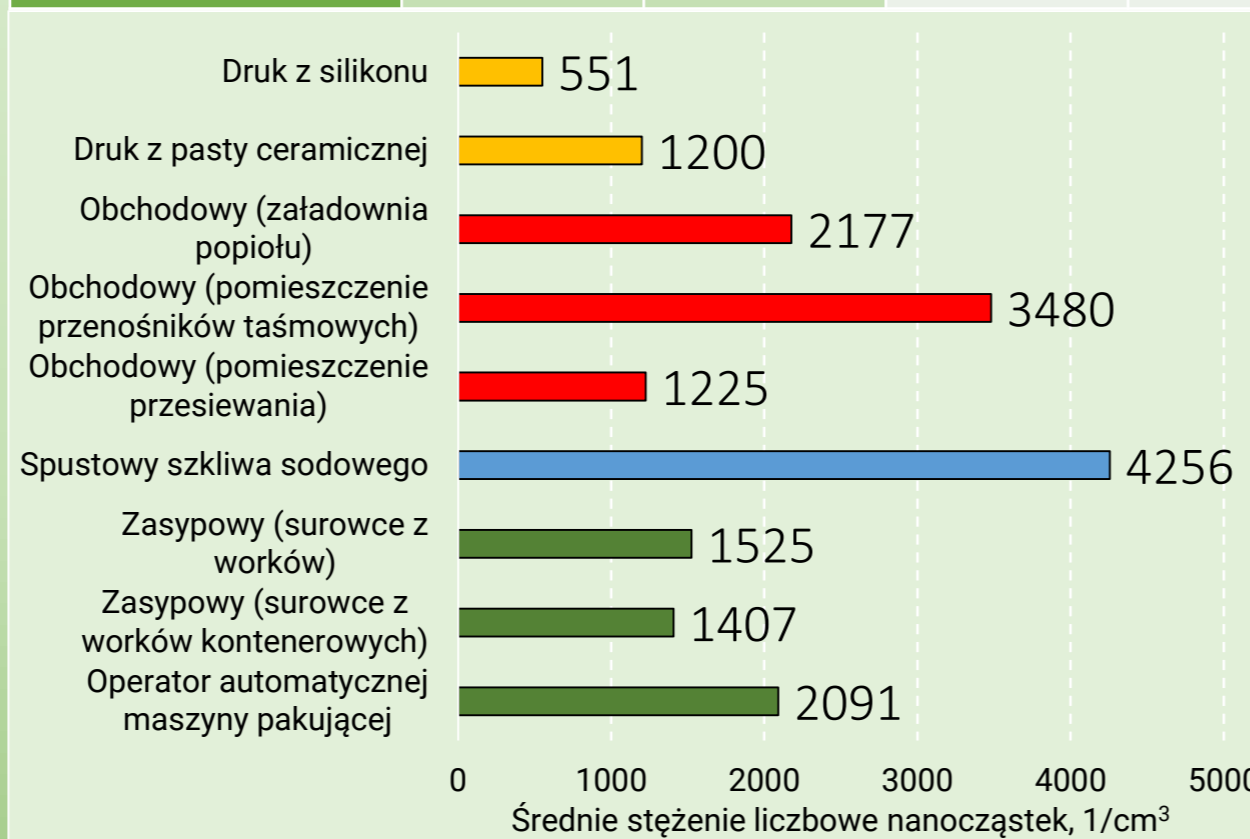
Celem poniższej pracy było zbadanie stężenia liczbowego i masowego nanoobjektów podczas wytwarzania addytywnego oraz porównanie tych wartości z przykładowymi procesami gałęzi przemysłu energetycznego, rolniczego oraz szklarskiego. Ze względu na niską czułość metod grawimetrycznych w oznaczaniu nanoobjektów zdecydowano się na metodę licznikową. Pomiary oparto na spektrometrze aerozoli o szerokim zakresie wymiarowym od 10 nm do 35 µm. Urządzenie to łączy w sobie dwa czujniki: optyczny licznik cząstek działający na zasadzie zakłócania natężenia strumienia światła przez poruszające się cząstki oraz spektrometr mobilności elektrycznej z puszką Faradaya określający wielkość cząstek na podstawie ilości zgromadzonego ładunku elektrycznego na ich powierzchni. Pomiary prowadzono w sposób stacjonarny i ciągle przez czas 6h. Na stanowisku pracy pobierano próbkę powietrza do obrazowania mikroskopowego SEM w celu określenia morfologii emitowanych w procesie cząstek.

Piśmiennictwo

- [1] L. Zapór, „Nanometryczne struktury metali i tlenków metali”, 2013, [Online]. Dostępne na: https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/76572/chempyl_Nano_metryczne_struktury.pdf
- [2] WHO guidelines on protecting workers from potential risks of manufactured nanomaterials. Geneva, 2017.
- [3] P. Broekhuizen i B. Hendrikx, „Nano reference values in the Netherlands”, Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, t. 73, s. 407–414, paź. 2013.
- [4] C. Schumacher i D. Pallapies, „IFA - Technical information: Ultrafine aerosols and nanoparticles at the workplace”. Dostęp: 5 września 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/nanopartikel-am-arbeitsplatz/index-2.jsp>

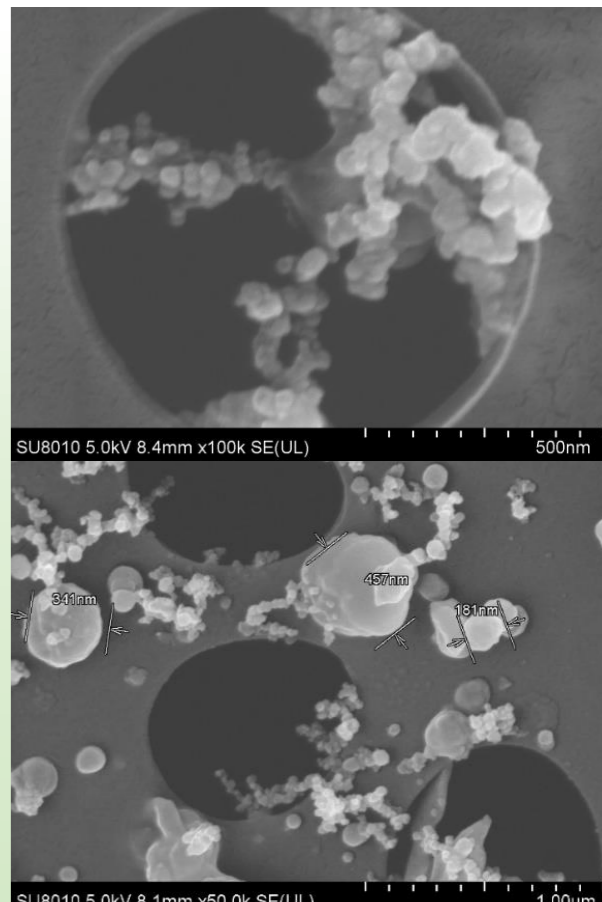
Porównanie procesów przemysłowych

Gałąź przemysłu	Druk 3D	Druk 3D	Szklarski	Energetyczny (biomasowy)	Energetyczny (biomasowy)	Energetyczny (biomasowy)	Rolniczy (produkcja paszy)	Rolniczy (produkcja paszy)	Rolniczy (produkcja paszy)
Proces	Druk z pasty ceramicznej	Druk z silikonu	Spustowy szkliva sodowego	Obchodowy (pomieszczenie przesiewania)	Obchodowy (pomieszczenie przenośników taśmowych)	Obchodowy (załadownia popiołu)	Operator automatycznej maszyny pakującej	Zasypowy (surowce z worków kontenerowych)	Zasypowy (surowce z worków)
Opis czynności	Przygotowywanie maszyny drukującej, wytwarzanie pasty ceramicznej lub silikonu, kontrola procesu i jakości wydruku, prace porządkowe		Kontrola oraz nadzór tworzenia tafli szkła, prace porządkowe w przypadku przerwania tafli.	Przeprowadzanie obchodu instalacji zgodnie z harmonogramem, diagnoza usterek, prace porządkowe w zależności od potrzeb			Obsługa automatycznego urządzenia pakującego gotową paszę uzupełnianie paszy w niedoważonych workach	Zасыpywanie surowców z worków kontenerowych lub worków w miarę potrzeby procesu.	
Procentowy udział liczbowy nanocząstek, %	73	81	63	70	82	71	66	62	68
Średnie stężenie masowe cząstek, mg/m ³	0,00505	0,00908	0,647	0,733	1,439	2,144	6,370	4,771	3,441



Wszystkie 9 badanych procesów spełniało rekomendacje WHO, CIOP-PIB, IFA dotyczące bezpiecznego stężenia nanoobjektów [2-4]. Limit stężenia liczbowego nanocząstek z rekomendacji wynosi 40 000 nanocząstek/cm³. Największe średnie stężenie liczbowe cząstek odnotowano dla stanowiska spustowego szkliva sodowego z przemysłu szklarskiego, które wynosiło 4256 1/cm³ co było wartością prawie 5-krotnie mniejszą od sugerowanego limitu. Porównując procentowe udziały masowe nanocząstek z zakresu rozmiarów od 10 do 100 nm, zauważono wielokrotnie większe wartości dla druku 3D z pasty ceramicznej oraz silikonu względem pozostałych procesów z wybranych gałęzi przemysłu. Zbadane procesy wytwarzania addytywnego charakteryzowały się również wielokrotnie niższym stężeniem masowym oraz liczbowym cząstek (zarówno całkowitym, jak i frakcji nano). Wyniki powyższych badań mogą sugerować na większą intensywność generowania nanoobjektów w procesach wytwarzania addytywnego. Przy znaczącym zwiększeniu produkcji możliwe byłoby przekroczenie sugerowanych limitów stężeń nanocząstek. Z drugiej jednak strony procesy druku 3D generowały bardzo niskie zapalenie stąd wartość procentowego udziału masowego nanocząstek mogła być wysoka. Warto zauważyć że różnice w tym parametrze pomiędzy procesami wytwarzania przyrostowego są duże. Może to sugerować duże znaczenie wykorzystywanego materiału na powstające nanoobjekty. Z przeprowadzonych badań wynika że zapylenie w procesach wytwarzania addytywnego jest mniejsze niż w przykładowych procesach z wybranych gałęzi przemysłu. Na podstawie wyników z badań tworzona jest baza CHEMPYL będąca użytecznym narzędziem wspomagającym ocenę narażenia oraz ryzyka zawodowego związanego z występowaniem czynników chemicznych i pyłowych na stanowiskach pracy.

Analiza Mikroskopowa



Pierwszy z kolei obraz mikroskopowy przedstawia fragment próbki z procesu druku z silikonu. Natomiast drugi obraz pochodzi z analizy próbki z procesu druku z pasty ceramicznej. W badaniach widoczne były aglomeraty zbudowane z cząstek sferoidalnych o rozmiarach od 34 do 69 nm. Występowały także cząstki większe w formie niezagregowanej o rozmiarach od 181 do 457 nm. Nie zaobserwowano występowania żadnych nanowłókien lub nanopłytek, przez co materiały nie powinny wykazywać zwiększonej toksyczności.

Finansowanie

Zrealizowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Zadanie nr: 3.ZS.06 pod tytułem: Badanie zawartości frakcji nano w aerozolach środowiska pracy oraz środowiska zewnętrznego. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.