



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII CHEMICZNEJ I PROCESOWEJ



Analiza modeli obliczeniowych depozycji cząstek aerozolowych w układzie oddechowym człowieka *Analysis of computational models of aerosol particle deposition in human respiratory system*

Autor: Katarzyna Strzeszewska

Promotor: prof. nzw. dr hab. inż. Tomasz Sosnowski

Cel i zakres pracy

W ramach niniejszej pracy przeanalizowano modele obliczeniowe depozycji cząstek aerozolowych w układzie oddechowym człowieka. Przedstawiono najważniejsze informacje na temat budowy układu oddechowego wraz z opisem fizjologii. Zwrócono uwagę na cechy, którymi charakteryzują się aerozole. Omówiono także mechanizmy, które odgrywają rolę w depozycji cząstek w układzie oddechowym oraz przeprowadzono przykładowe obliczenia sprawności depozycji przy wykorzystaniu ogólnodostępnego internetowego kalkulatora ARLA (University of Alberta, Kanada).

Proces depozycji cząstek aerozolowych w układzie oddechowym człowieka może różnie wpływać na stan zdrowia. We wdychanym przez człowieka powietrzu występuje wiele cząstek aerozolowych. Z każdym wdechem tysiące cząstek penetruje układ oddechowy wprowadzając do organizmu człowieka wiele substancji chemicznych. Cząstki takie mogą być silnymi toksynami, które wywołują wiele niepożądanych skutków w organizmie. Z drugiej zaś strony mogą być wykorzystywane jako nośnik substancji leczniczych. Dostając się do dróg oddechowych działają wówczas korzystnie na cały organizm. To stwierdzenie jest podstawą aerozoloterapii, przy optymalizacji której wykorzystuje się także matematyczne modelowanie depozycji cząstek aerozolowych w układzie oddechowym człowieka. Proces ten należy uznać za bardzo ważne zagadnienie, mające wpływ na stan zdrowia.

Aerozoloterapia

Aerozoloterapia jest to technika leczenia, która stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę medycyny. Wykorzystując inhalacje aerozolu leczy się przewlekłe i wybrane ostre choroby dróg oddechowych – na przykład astmę czy POChP (Przewlekła Obturacyjna Choroba Płuc). Jest to bardzo skuteczny i bezpieczny sposób dostarczania leków do objętego procesem chorobowym odcinka dróg oddechowych.

Skuteczność leczenia w terapii inhalacyjnej uwarunkowana jest depozycją cząstek aerozolowych w układzie oddechowym człowieka.

Modele depozycji

Modelowanie depozycji cząstek aerozolowych w płucach jest próbą rozwiązania problemu fizycznego w systemie biologicznym przy zastosowaniu metod matematycznych. Obecnie modele depozycji cząstek można podzielić na dwie kategorie: modele kompleksowe (całościowe) oraz modele lokalne.

Modele kompleksowe

W modelach kompleksowych płuca są postrzegane jako system rozgałęziających się rur. Z powodu niezwykle skomplikowania systemu dróg oddechowych przepływ powietrza, transport i osadzanie wdychanych cząstek są rozdzielane i rozpatrywane niezależnie. Zatem osadzanie się cząstek w poszczególnych drogach oddechowych jest tylko pośrednio powiązane z charakterem przepływu powietrza, który można określić rozwiązując równanie przepływu.

Hoffman (*Modelling inhaled particle deposition in the human lung- a review*; Journal of Aerosol Science, 2011, 42, 693-724) wyróżnia kilka rodzajów modeli kompleksowych:

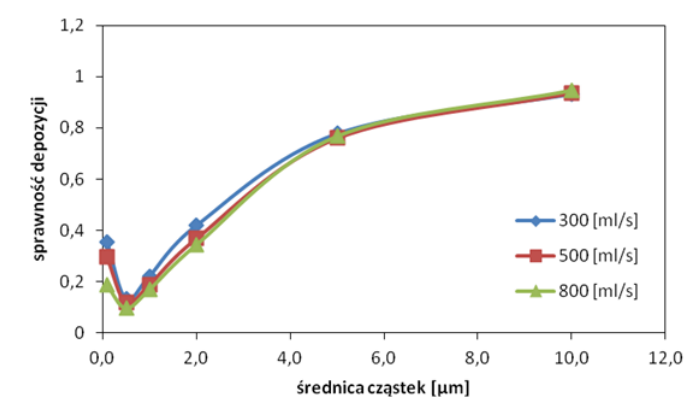
- model półempiryczny;
- jednowymiarowy model depozycji w kanale o zmiennym przekroju („trumpet model”);
- jednościeżkowy model depozycji w deterministycznej symetrycznej geometrii układu oddechowego;
- wielościeżkowy model depozycji w deterministycznej asymetrycznej geometrii układu oddechowego;
- wielościeżkowy model depozycji w stochastycznej asymetrycznej geometrii układu oddechowego.

Modele lokalne

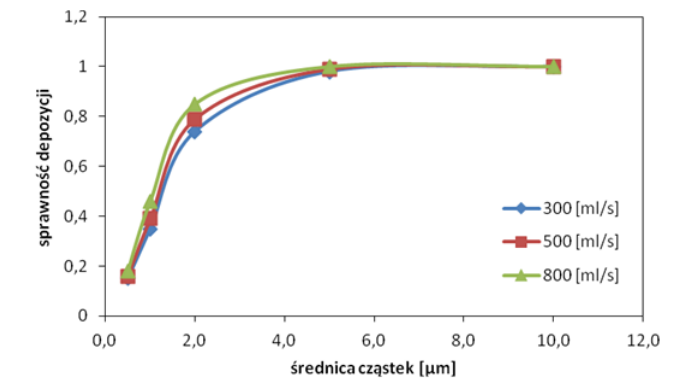
W modelach lokalnych transport cząstki i równania depozycji są rozwiązywane przy użyciu CFD, dostarczając informacji na temat depozycji cząstek w zasięgu wybranego regionu np. rozwidlenia oskrzeli. Osadzanie może być rozważane tylko w wybranych elementach dróg oddechowych, na przykład w drogach nosowych czy w oskrzelach. Takie ograniczenie przestrzenne pozwala poprzez numeryczne rozwiązanie równań określić przepływ powietrza i transport cząstek. Symulacje CFD pozwalają nie tylko zrozumieć funkcjonowanie układu oddechowego, ale także dokładnie określić sprawność depozycji różnych cząstek. Pomaga to określić wymagane cechy aerozolu oraz pozwala na efektywne wykorzystanie tych cech do poprawy i optymalizacji sposobu dostarczania aerozoli do dróg oddechowych.

Przykładowe obliczenia

W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki obliczeń depozycji cząstek przy wykorzystaniu dostępnego w internecie kalkulatora ARLA – Aerosol Research Laboratory of Alberta.



Rys. Wykres całkowitej sprawności depozycji w zależności od średnicy cząstek dla oddychania przez jamę ustną.



Rys. Wykres całkowitej sprawności depozycji w zależności od średnicy cząstek dla oddychania przez nos.

Dla oddychania przez nos sprawność wzrasta wraz z wielkością cząstek i już dla cząstek większych niż 5 µm osiąga maksimum. Natomiast dla oddychania przez jamę ustną całkowita sprawność depozycji jest największa dla cząstek o wielkości około 10 µm. Jednocześnie obserwuje się, że dla oddychania przez nos uzyskuje się wyższą sprawność przy wyższym przepływie a dla oddychania przez jamę ustną odwrotnie. Przykładowe wyniki obliczeń pokazują możliwość prostej analizy szacunkowej depozycji cząstek aerozolowych w zależności od wielkości cząstek, strumienia przepływu powietrza w układzie oddechowym, sposobu oddychania oraz innych czynników. Należy podkreślić, że wyniki uzyskane z kalkulatora ARLA są najbliższe koncepcji modeli: jednościeżkowego i półempirycznego, nie pozwalając na dokładną analizę regionalnej dystrybucji cząstek w układzie oddechowym.

Wnioski

Obliczanie depozycji wdychanych cząstek aerozolowych jest ważnym zagadnieniem przy dyskusji wpływu aerozoli na zdrowie, w tym – przy analizie efektu leczniczego osiąganego w aerozoloterapii.