

Analiza mechanizmów aglomeracji cząstek aerozolu pod wpływem sił elektrostatycznych

mgr inż. Artur Marchewicz

29.05.2023 r.

STRESZCZENIE

Aglomeracja cząstek aerozolu polega na łączeniu cząstek pierwotnych w większe skupiska zwane aglomeratami. Proces aglomeracji wykorzystuje się w układach odpylających do zwiększenia skuteczności odpylania szkodliwych cząstek aerozolu ze spalin. Jedną z metod aglomeracji jest unipolarna aglomeracja elektrostatyczna, która wykorzystuje różnice w ruchliwości elektrycznej cząstek do spowodowania zderzeń.

Między jednoimiennie naelektryzowanymi cząstkami występuje odpychająca siła elektryczna wynikająca z oddziaływań Coulomba między ładunkami niesionymi przez cząstki. Badania przedstawione w rozprawie miały na celu zweryfikować, czy pomimo tych oddziaływań możliwa jest aglomeracja jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu.

Teza rozprawy: możliwa jest aglomeracja jednoimiennie naładowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym.

Przedmiotem badań w rozprawie jest aglomeracja elektrostatyczna unipolarna w przemiennym polu elektrycznym cząstek popiołu lotnego powstających po spaleniu węgla kamiennego. Przeanalizowano teoretycznie proces aglomeracji oraz zbadano eksperymentalnie skuteczność procesu aglomeracji w jednostopniowym unipolarnym aglomeratorze elektrostatycznym, zainstalowanym w Elektrowni Łaziska Górne dla różnych parametrów elektrycznych i mechanicznych (napięcia i częstotliwości zasilania oraz natężenia przepływu spalin).

W celu udowodnienia tezy rozprawy należało rozwiązać dwa główne problemy badawcze. Po pierwsze, konieczne było wskazanie fizycznego mechanizmu, który może powodować aglomerację naładowanych jednoimiennie cząstek aerozolu. Po drugie, należało ocenić skuteczność procesu unipolarnej elektrostatycznej aglomeracji za pomocą metod eksperymentalnych.

Stosując analizę teoretyczną zbadano mechanizmy unipolarnej aglomeracji elektrostatycznej. Sformułowano model pola elektrycznego obejmującego obszar elektrod jednostopniowego unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego. Następnie wyznaczono

trajektorie ruchu pojedynczych cząstek aerozolu uwzględniając wpływ przemiennego pola elektrycznego. Wykazano, że w przemiennym polu elektrycznym o trapezowym przebiegu napięcia cząstki małe ($<1\ \mu\text{m}$) poruszają się po trajektoriach w przybliżeniu prostoliniowych, a cząstki duże ($>1\ \mu\text{m}$) poruszają się po trajektoriach oscylacyjnych, które kształtem zbliżone są do trajektorii trójkątnych, a amplituda ich oscylacji zależna jest od wielkości cząstki. W rezultacie trajektorie ruchu cząstek o różnych wielkościach mogą się przecinać, co oznacza, że cząstki mogą się zderzyć.

Wyznaczono trajektorie zderzeniowe małej cząstki aerozolu zbliżającej się do dużej cząstki kolektora poruszającej się po trajektorii oscylacyjnej. Przeanalizowano wpływ siły bezwładności, siły elektrycznej i siły oporu aerodynamicznego na ruch małej cząstki aerozolu. Wykazano, że mechanizmem, który umożliwia aglomerację cząstek jednoimiennie naelektryzowanych cząstek jest polaryzacja cząstek w zewnętrznym polu elektrycznym oraz zaindukowanie ładunku na powierzchni zbliżających się do siebie naelektryzowanych cząstek. W przypadku aglomeracji unipolarnej najczęściej dochodzi do zderzeń, gdy naładowana ładunkiem Pautheniera duża cząstka-kolektor zderza się z nienaładowaną lub słabo naładowaną mniejszą cząstką aerozolu.

W badaniach eksperymentalnych dla jednostopniowego unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego, stanowiącego jedną ze stref instalacji filtra hybrydowego w elektrowni Łaziska Górne, przeprowadzono ocenę skuteczności procesu aglomeracji za pomocą dwóch metod: badania zmian morfologii aglomeratów oraz badania zmian widmowego rozkładu wielkości cząstek.

W ramach badania zmian morfologii aglomeratów zastosowano oryginalnie opracowaną przez autora rozprawy ilościową metodę detekcji aglomeratów. Metoda opiera się na cyfrowej obróbce zdjęć mikroskopowych próbek aglomeratów pobranych z kanału spalin i pozwala na określenie położenia i wielkości kulistych cząstek pierwotnych, które następnie przyporządkowuje do poszczególnych aglomeratów. Na podstawie tej metody wyznaczono średnią liczbę cząstek pierwotnych zawartych w aglomeratach (średnią licznosc aglomeratu) dla cząstek osadzonych na stolikach mikroskopowych w trakcie pracy aglomeratora. Otrzymaną średnią licznosc aglomeratów porównano ze średnią licznosc aglomeratów cząstek osadzonych w trakcie pracy elektrofiltru płytowego. Rezultaty badań wskazują na ponad dziesięciokrotny wzrost średniej licznosci aglomeratów, co udowadnia zajście procesu unipolarnej aglomeracji elektrostatycznej w badanym aglomeratorze.

Przeanalizowano wpływ pracy aglomeratora na zmianę widmowego rozkładu wielkości cząstek w spalinach pobranych za aglomeratorem korzystając z laserowego analizatora

wielkości cząstek. Wyniki badań wykazały, że w trakcie pracy unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego następuje znaczne zmniejszenie liczbowej koncentracji cząstek w całym badanym zakresie wielkości (PM10). W miarę wzrostu napięcia zasilania elektrod aglomeratora obserwuje się znaczący spadek koncentracji cząstek w przedziale wielkości 0.25-0.6 μm . Zmiana widmowego rozkładu wielkości cząstek wskazuje na jednoczesną aglomerację oraz osadzanie się cząstek na elektrodach aglomeratora.

Zbadano frakcyjną skuteczność odpylania spalin dla jednostopniowego unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego współpracującego z elektrofiltrem płytowym. Wyniki badań wskazują na wysoką skuteczność odpylania cząstek PM10 przekraczającą wartości 97% i 99.9% odpowiednio liczbowej i masowej skuteczności odpylania cząstek.

Z badań wykonanych w ramach rozprawy wynika kilka ważnych wniosków praktycznych. Unipolarna aglomeracja elektrostatyczna może być procesem służącym do aglomeracji cząstek w wielu zastosowaniach w przemyśle, a jednostopniowy unipolarny aglomerator elektrostatyczny zastosowany w układach odpylających może poprawić skuteczność odpylania spalin zwłaszcza w zakresie submikronowym.

Zastosowany w rozprawie model teoretyczny wyznaczania trajektorii zderzeniowych może być narzędziem, które pozwala na określenie optymalnych parametrów pracy jednostopniowego unipolarnego aglomeratora elektrostatycznego. Ponadto opracowana metoda detekcji aglomeratów oprócz zastosowania w technologii odpylania może posłużyć do analizy aglomeratów cząstek kulistych również w innych zastosowaniach, m. in. w medycynie i metalurgii, nanotechnologii.

Wykonane pomiary i analiza teoretyczna dowodzą słuszności postawionej tezy rozprawy: możliwa jest aglomeracja jednoimiennie naelektryzowanych cząstek aerozolu w przemiennym polu elektrycznym.