



DZIEŃ MECHANIKA 2026



Konkurs na Najlepszą Pracę Dyplomową na Wydziale Mechanicznym UMG

Streszczenia prac konkursowych

Wpływ izokinetyczności na pobór próbki pyłu metodą grawimetryczną

Poszerzająca się globalna świadomość społeczeństwa na temat ochrony środowiska przyczynia się do rozwoju monitorowania emisji gazów i pyłów szkodliwych dla ekosystemu. Pyły, będące produktem spalania przede wszystkim paliw kopalnych, są istotnym negatywnym aspektem, mającym bezpośredni wpływ na organizmy żywe. Obecnie istnieje możliwość kontroli stężenia pyłu przy wykorzystaniu urządzeń pomiarowych zwanych pyłomierzami. Jest to aparatura posiadająca własną jednostkę sterującą, która wraz z wyposażeniem dodatkowym pozwala na wykonanie ciągłych lub okresowych pomiarów zawilżenia, prędkości, stężenia i strumienia masy pyłu czy strumienia objętości.

Referencyjną metodą poboru próbki pyłu jest metoda grawimetryczna. To jedna z najstarszych i najbardziej fundamentalnych technik stosowanych w pomiarach emisji gazów i pyłu ze źródeł spalania. Metoda grawimetryczna polega na separacji pewnej masy pyłu w określonym przedziale czasowym. Separacja ta odbywa się za pomocą filtra, który ważony jest przed poborem próbki i po nim, a różnica mas pozwala w łatwy sposób wyznaczyć ilość zebranego pyłu. W odniesieniu do objętości przepuszczonej mieszaniny gazu i pyłu (tzw. solgazu) możliwe jest wykazanie stężenia lub emisji poszczególnych składników w jednostce czasu. Uzyskanie tą metodą dość precyzyjnych wyników czyni ją obecnie najpowszechniejszą.

Warunkiem koniecznym poprawnego wykonania pomiaru jest zachowanie izokinetyczności H . Izokinetyczne pobieranie próbki oznacza utrzymanie prędkości i kierunku przepływu we wlocie toru pomiarowego, o wartościach takich samych bądź zbliżonych do tych, jakie występują w punkcie poboru próbki. Oznacza to, że wystąpienie odstępstw od tej zasady może wiązać się z obniżeniem jakości wykonania pomiaru i uznaniem go za nieważny. **Głównym celem pracy dyplomowej było przedstawienie wpływu izokinetyczności na pobór próbki pyłu metodą grawimetryczną.** Dodatkowym elementem badań była analiza mikroskopowa pobranych próbek, umożliwiająca określenie ich cech morfologicznych.

Pomiar zawartości pyłu w spalinach wykonano w Zakładzie Energetyki Ciepłej w Wejherowie, należącym do Okręgowego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej Sp. z o.o. w Gdyni. Źródłem spalania był kocioł WR 8 wyposażony w dwustopniowy system odpylania. Do realizacji pomiarów wykorzystano zestaw pyłomierza Emiotest 3114, analizator spalin Horiba PG – 350 EU, przepływomierz DFM 2006 oraz inne urządzenia pomocnicze, wspomagające określenie parametrów fizykochemicznych gazów odlotowych. Zebrany pył

został następnie poddany analizie laboratoryjnej z wykorzystaniem wagi analitycznej Axis AGN200c oraz analizatora mikroskopowego Malvern Morphologi G3SE, będący na wyposażeniu Katedry Fizyki Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni.

Treść pracy dyplomowej objęła zagadnienia związane z ochroną środowiska, fizyki, mechaniki płynów i termodynamiki. Pierwsza część pracy zgłębiła podstawy prawne, które odnoszą się do konieczności wykonywania pomiarów stężeń i emisji zanieczyszczeń pyłowo – gazowych. Nawiązano też do opisu metodyk pomiarowych, określonych w prawie jako referencyjne. Przedstawiono również wyposażenie wykorzystywane podczas badań, obejmujące zarówno aparaturę do poboru pyłu i gazów, jak i urządzenia pomocnicze.

Istotną część teoretyczną pracy stanowił opis zjawisk fizycznych występujących podczas pomiarów prowadzonych w kanałach spalinowych. Omówiono tam między innymi przepływ gazów, rozkład prędkości w przekroju kanału, turbulentność przepływu, sposoby wymiany ciepła oraz możliwość kondensacji pary wodnej. Zagadnienia te biorą bezpośredni udział podczas określania parametrów solgazu oraz planowania i prowadzenia reprezentatywnego poboru próbki. Szczególną uwagę poświęcono także ilorazowi prędkości zasysania próbki przez końcówkę aspiracyjną sondy a prędkością gazu opływającego końcówkę w kanale, czyli wskaźnikowi izokinetyczności H .

W celu określenia wpływu izokinetyczności wykonano trzy serie pomiarowe różniące się warunkami poboru próbki. Seria S1I została przeprowadzona w warunkach zbliżonych do izokinetycznych, przy wartości wskaźnika $H = 1,02$. Serię S2NI wykonano w warunkach nadizokinetycznych, dla $H = 1,29$, natomiast serię S3PI przeprowadzono w warunkach podizokinetycznych, dla $H = 0,79$. Tak dobrane warunki umożliwiły porównanie prób pobranych przy prawidłowej prędkości zasysania z próbkami uzyskanymi przy nadmiernej i niedostatecznej prędkości poboru.

Stabilna praca kotła WR 8 pozwoliła na utrzymanie niektórych parametrów fizykochemicznych zapyłonych gazów na poziomie względnie stabilnym, co umożliwiło osiągnięcie zbliżonych warunków gazowych w każdej serii. Stężenie składników gazowych, temperatury i tym samym wyznaczone gęstości nie wykazywały istotnych różnic pomiędzy seriami. Oznacza to, że zmienność wyników miała głównie związek z różnicami obranymi na potrzeby osiągnięcia wskaźnika izokinetyczności H na różnych jego poziomach.

Po zakończeniu poboru próbki, filtry poddano analizie grawimetrycznej. Oznaczenie masy zatrzymanego pyłu umożliwiło wyznaczenie jego stężenia S oraz strumienia masy $\dot{M}_p$. Wyniki wykazały wyraźny wpływ warunków izokinetyczności na uzyskiwane wartości. Najwyższe wartości stężenia i strumienia masy pyłu uzyskano dla serii S3PI, przeprowadzonej

w warunkach podizokinetycznych. Najniższe wartości odnotowano dla serii S1I, w której zachowano warunki zbliżone do izokinetycznych. W serii S2NI, wykonanej przy nadmiernej prędkości zasysania, również zaobserwowano odchylenia od wartości uzyskanych w warunkach referencyjnych.

Kolejnym etapem analizy było określenie właściwości cząstek za pomocą mikroskopu Malvern Morphologi G3SE. Badanie umożliwiło ocenę rozkładu wielkości cząstek oraz ich cech morfologicznych. Analiza wykazała, że liczbowo w każdej z badanych próbek dominowały cząstki o niewielkich średnicach, osiągających wartości rzędu kilku mikrometrów. Jednocześnie analiza udziału objętościowego wykazała udział stosunkowo nielicznej frakcji cząstek o dużych wymiarach, których średnice mogły osiągać nawet kilkaset mikrometrów. Pokazuje to, że niewielka liczba dużych cząstek może mieć istotny wpływ na całkowitą objętość i masę próbki.

Porównanie poszczególnych serii wykazało zależność powierzchniowych średnic równoważnych CED cząstek od warunków poboru. Średnia wielkość cząstek w próbce podizokinetycznej była około 50% większa niż w próbce pobranej izokinetycznie, natomiast w przypadku próbki nadizokinetycznej była większa o około 22%. Jednocześnie w obu pomiarach z odchyleniami od warunku izokinetyczności parametry średnicy objętościowej $D_{[4,3]}$ i $D_{[3,2]}$ wskazywały wartości wyższe niż w pomiarze izokinetycznym, co określa zgodność z teoretyczną zależnością skuteczności pobierania próbek pyłu do wskaźnika izokinetyczności H .

Analiza mikroskopowa polegała także na ocenie morfologii cząstek, wykorzystując między innymi parametry kołowości HSC , proporcjonalności wymiarów AR , wypukłości CN oraz bryłowości SO . Uzyskane wartości wskazywały na umiarkowanie nieregularny kształt cząstek, przy jednoczesnym występowaniu stosunkowo gładkich i zwartych struktur. Średnia wartość kołowości mieściła się w zakresie $0,65 \div 0,75$, natomiast wypukłość osiągała wartości w przedziale $0,957 \div 0,969$, a bryłowość od $0,923$ do $0,939$. Wartości AR wynoszące $0,320 \div 0,324$ wskazywały na umiarkowane wydłużenie cząstek. Analiza percentyli D_{10} i D_{90} potwierdziła zróżnicowanie kształtu badanej populacji, natomiast wartości współczynnika zmienności RSD bliskie 49% wskazywały na znaczne zróżnicowanie cech morfologicznych. W przeciwieństwie do wielkości cząstek, analiza ich kształtu nie wykazała jednoznacznego związku z wartością wskaźnika H . Oznacza to, że odchylenie od warunku izokinetyczności wpływa przede wszystkim na ilość oraz rozkład wielkości pobieranych cząstek, natomiast nie powoduje istotnych zmian ich podstawowych cech morfologicznych. Parametry kształtu można

zatem traktować przede wszystkim jako charakterystykę pyłu powstającego w procesie spalania mialu węglowego.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały wpływ warunków poboru próbek na wyniki stężenia i strumienia masy pyłów, a także na rozkład wielkości cząstek. Natomiast wpływ na pozostałe parametry morfologiczne okazał się znikomy. Niereferencyjny pobór próbek pyłu prowadzi do powstawania błędów w pomiarach, co wpływa na uzyskanie wyników niekorzystnych i nieadekwatnych do realnych warunków.

Analiza pomiarów zawartości pyłu metodą grawimetryczną wskazuje, że istotnym parametrem determinującym jakość wyniku pomiaru jest warunek izokinetyczności H . Udowodniono, że podczas pomiaru nadizokinetycznego dochodzi do zwiększenia udziału drobniejszych frakcji, co prowadzi do zawyżenia masy pyłu uzyskanego w wyniku zasysania. Wykazano, że pomiary ze zbyt niskim wskaźnikiem H prowadzą do zwiększenia udziału cząstek o większych wymiarach, a zatem zgodność prędkości zasysania zapyłonych gazów z gazami opływającymi końcówkę aspiracyjną sondy ma podstawowe znaczenie dla osiągnięcia reprezentatywności próbki. Jedynie osiągnięcie izokinetyczności pozwala na otrzymanie rzeczywistego składu strumienia spalin, ponieważ tylko w takich warunkach pobieranie cząsteczek pyłu jest proporcjonalne do rzeczywistego rozkładu w kanale.

Mikroskopowa analiza próbek pyłu pozwoliła na ocenę właściwości cząstek oraz wpływu izokinetyczności na ich morfologię. Potwierdzono zależność wielkości cząstek od pogłębiających się różnic w prędkościach uwzględnianych w wyznaczaniu wskaźnika zasysania H . Jednocześnie analiza mikroskopowa wielkości średnic równoważnych cząstek potwierdziła wpływ parametru H na wyniki pomiarów zawartości pyłu metodą grawimetryczną. Zwiększanie różnic od referencyjnego prowadzenia pomiaru pogłębia błąd w przedstawianiu stężenia S i strumienia masy pyłu $\dot{M}_p$.

Treść omawianej pracy dyplomowej pozwoliła na usystematyzowanie wiedzy z zakresu pomiarów emisji pyłu oraz wskazanie czynników wpływających na poprawność uzyskiwanych wyników, a przede wszystkim na potwierdzenie założonej tezy.