

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Adriana Tomana pt.

Oznaczenie parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych w oparciu o nową metodę badawczą

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. **Adriana Tomana** pt. „**Oznaczenie parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych w oparciu o nową metodę badawczą**” opracowana została na podstawie zlecenia Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach, z dnia 14.04.2025, zgodnie z wymaganiami ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668).

1. Treść i zakres pracy doktorskiej

Recenzowana praca składa się ze 161 stron tekstu i zawiera 11 rozdziałów merytorycznych i wnioski (rozdział 12), uzupełnionych rysunkami, fotografiami i tabelami. Rozdział zaczynający się od strony 144 stanowi spis literatury zawierający 129 pozycji, na końcu rozprawy znajduje się obszerny spis rysunków i tabel. Opis rozprawy dobrze uzupełnia wykaz ważniejszych skrótów, nazw i pojęć. Pod względem formalno-redakcyjnym rozprawa jest przejrzysta, kolorowe rysunki, fotografie i tabele zawierają informacje poprawnie zinterpretowane w tekście, dostarczają potrzebnej informacji dla lepszego zrozumienia opisu badań i prowadzonych eksperymentów.

We wprowadzeniu do pracy, Autor Rozprawy doktorskiej naświetla problematykę oceny zagrożenia wybuchem aerozoli cieczy palnych w przemyśle. Tematyka ta jest mało rozpoznana, a w świetle zapobiegania zjawisku zapalenia i wybuchu gazów, cieczy i pyłów wnikiwe poznanie procesu prowadzącego do wybuchu jest niezwykle potrzebne. Rozprawa zawiera nowe elementy poznawcze, a zapobieganie wybuchom pozwala na znaczną poprawę bezpieczeństwa pracy. W przemyśle wydobywczym, budowlanym, hutniczym czy chemicznym stosuje się wiele różnorodnych cieczy palnych, które mogą stworzyć aerozol, a w określonych warunkach mogą stanowić silne zagrożenie wybuchowe. Autor rozprawy podejmuje trudne badania eksperymentalne, prowadzące do zwiększenia wiedzy w zakresie poznania zjawiska zapalenia aerozoli cieczy palnych, znajdujących się w instalacjach przemysłowych. Dyrektywa ATEX zawiera wytyczne do podjęcia takich badań, zwłaszcza, że tematyka wybuchu aerozoli jest mało poznana, a ponadto Autor zauważa, że wciąż brak ścisłych wytycznych, zwłaszcza środków profilaktycznych zapobiegających wybuchom. Oceniając treść rozprawy doktorskiej oraz walory aplikacyjne stwierdzam, że tematyka

rozprawy mieści się w obszarze dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

W rozdziale 2 i 3 Autor formułuje cele i tezy rozprawy doktorskiej. Cel poznawczy i utylitarny rozprawy obejmował opracowanie metody badawczej pozwalającej na wyznaczenie podstawowych parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych na zaprojektowanym i zbudowanym przez Autora stanowisku do badań eksperymentalnych, oceniam to wysoko zwłaszcza w świetle planowanych eksperymentów. Ważne jest też, że Autor stwierdza brak norm i przepisów regulujących kryteria wybuchowości aerozoli, choć definicja aerozoli została zawarta w normie europejskiej.

Autor formułuje dwie tezy rozprawy:

1. Zastosowanie sterowanego, krótkiego czasu wytwarzania aerozoli bez dodatkowego medium gazowego prowadzi do bardziej precyzyjnej oceny właściwości zapalnych i wybuchowych aerozoli cieczy palnych.
2. Właściwości wybuchowe aerozoli cieczy palnych wykazują zależność od temperatury w której są oznaczane oraz stopnia rozdrobnienia cząstek osiągając różne wartości przy średniej średnicy Sautera w przedziale 10–50 μm .

Autor zamierza wykazać, że realizując kolejne zadania badawcze udowodni postawione tezy.

W rozdziale 4 Autor przedstawia podstawy teoretyczne dotyczące wybuchowości gazów, pyłów cieczy i pary cieczy oraz aerozoli, wynikające z realizacji interdyscyplinarnych badań eksperymentalnych. Tematyka tego rozdziału wprowadza czytelnika do zrozumienia mechanizmu palności i wybuchu omawianych płynów i naświetla złożoną problematykę zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych. Aerozole cieczy palnych były badane przez naukę od szeregu lat i mimo tego ich właściwości palne i mechanizmy powstawania aerozoli pozostają nie do końca wyjaśnione. W prowadzonych rozważaniach, Autor przytacza istotne pozycje literaturowe potwierdzające, że badania nad aerozolami cieczy charakteryzują się większą złożonością, w porównaniu z badaniami gazów, pyłów czy par cieczy. Dotychczas prowadzone badania, według Autora, nie doprowadziły do opracowania jednoznacznej metody prowadzenia badań zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych.

W rozdziale 5 rozprawy doktorskiej Autor, na podstawie literatury, omawia szereg zdarzeń (siedem), które dotyczyły zapalenia cieczy łatwopalnej i doprowadziło do wybuchu utworzonego aerozolu. Na podstawie przeglądu literatury Autor zauważa, że instalacje i technologie przemysłowe ulegają awariom, co prowadzi do powstania nieszczelności, a w konsekwencji do wycieku substancji palnej i powstania strumienia, aerozolu, co przy braku przeciwdziałań prowadzić może do wybuchu. Autor omawia dotychczasowe wyniki badań zwiększające stan wiedzy o warunkach wytwarzania aerozolu, pracach eksperymentalnych i pomiarowych kropeł aerozolu. Zauważa, że istotnym jest uwzględnienie źródła zapłonu oraz wyznaczenia jego parametrów. Prowadzone badania skupiały się na ocenie szybkości propagacji płomienia aerozolu, w zależności od wielkości kropeł aerozolu, według autora prowadzone badania były wyrywkowe, nie obejmowały zmian wszystkich czynników fizykochemicznych cieczy i nie prowadziły do wyznaczenia ilościowych zależności zrozumienia mechanizmów i oceny ryzyka wybuchu aerozoli. W rozdziale 5 Autor przedstawia też przebieg i wyniki prowadzonych badań eksperymentalnych, które rozpoczęto od prostych

stanowisk pomiarowych do znacznie złożonych; badania te zwiększyły wiedzę w zakresie zapłonu i wybuchu aerozoli. Prowadzone badania pozwoliły wyznaczyć parametry wybuchowości dla heptanu, heksanu, toluenu, acetonu, izopropanolu i etanolu, a eksperymenty wykonano w sferycznym naczyniu o pojemności 20 dm³. Opisane badania zostały wykorzystane przez autora w planowaniu autorskiego stanowiska eksperymentalnego i nakreśleniu szerokiego planu badawczego. Dotychczasowe badania pozwoliły na wydanie dyrektywy UE i normy ASTM, jednak nie uwzględniają badań dotyczących cieczy palnych, z których w wyniku nagłego, niekontrolowanego wypływu może powstać aerozol.

W rozdziale 6 Autor przedstawia dalsze rozważania w celu wyznaczenia charakterystyki wybuchowości poprzez oznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu $p_{\max}$ i maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{\max}$. Dla wyznaczenia wartości liczbowych parametrów podczas wybuchu aerozolu na drodze eksperymentalnej buduje specjalną aparaturę badawczą. Przedstawia przyjęte założenia, które aparatura do oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli musi spełniać, są to:

- komora spalania o geometrycznym kształcie i objętości 5 dm³,
- odpowiedni kształt i kierunek strumienia wytwarzanego aerozolu,
- znana intensywność rozpylania i zasięg strumienia paliwa dla zadanych ustawień,
- wytwarzanie aerozolu w określonym zakresie wielkości kropeł,
- wytwarzanie aerozolu za pomocą ciśnienia cieczy bez użycia medium gazowego,
- brak przyrostu ciśnienia wewnątrz komory badawczej podczas wytwarzania aerozolu,
- pomijalna turbulencja w fazie testu,
- możliwość regulacji czasu trwania wtrysku aerozolu,
- krótki czas wytwarzania aerozolu,
- zapewnienie tego samego czasu wytwarzania aerozolu dla szerokiego zakresu stężeń,
- możliwość regulacji czasu opóźnienia zapłonu,
- możliwość zmiany energii iskry inicjującej.

Wymienione powyżej założenia świadczą o znacznym stopniu złożoności aparatury badawczej, wymagającej interdyscyplinarnej wiedzy z zakresu fizyki, chemii, elektrotechniki, informatyki i manualnych zdolności do prowadzenia wielowariantowych badań. Dla zachowania powtarzalności prowadzonych eksperymentów, Autor dokładnie omawia kluczowe elementy metody badawczej, są to: sposób wytwarzania aerozolu, sposób pomiaru wielkości kropeł aerozolu oraz wybór źródła zapłonu. Autor wykonuje cząstkowe, pracochłonne badania różnych odmian wtryskiwaczy, wybierając elektromagnetyczny wtryskiwacz Bosch'a, do wytwarzania powtarzalnych kropek aerozolu. Wybrany sześciotworowy wtryskiwacz sterowany jest przez czas otwarcia wtryskiwacza i podawane ciśnienie. Podobnie postępuje z wyborem aparatury do pomiaru wielkości kropeł aerozolu, które działają w oparciu o metodę dyfrakcji laserowej. Rozważania Autora prowadzą też do wyboru źródła zapłonu, którym jest iskra, przy czym moc iskry może być regulowana.

W rozdziale 7 przedstawiono ważną część rozprawy doktorskiej, zawierającą szczegółowy opis budowy aparatury badawczej. Konstrukcja aparatury składa się z: komory badawczej, układu pompowo-wtryskowego, układu zapłonowego iskry, układu sterowania i kontroli parametrów przebiegu eksperymentu, układu akwizycji danych i układu chłodzenia. W rozdziale 7 Autor szczegółowo przedstawia i omawia zasady działania poszczególnych układów aparatury. Oceniając aparaturę badawczą należy zauważyć najważniejsze jej cechy:

- układ wytwarzania aerozolu,
- układ sterowania i akwizycji danych,
- generator iskier składający się z dwu elektrod zapłonowych,
- układ regulacji, kontroli i stabilizacji temperatury komory sferycznej o pojemności 5 litrów.
- dwa czujniki ciśnienia Kistler 4624, służące do pomiaru ciśnienia wybuchu i szybkości narastania ciśnienia i temperatury.

W uzupełnieniu powyższego należy podkreślić, że aparatura badawcza wyposażona jest w nowoczesne przyrządy pomiarowe i sterujące taką jak np.: wysokowydajną pompę wysokiego ciśnienia z systemem kontroli ciśnienia podawanej cieczy do komory badawczej. Zastosowany wtryskiwacz elektromagnetyczny Bosch HDEV jest sterowany precyzyjnym układem elektrycznym. Zastosowane urządzenia były testowane przez Autora w celu sprawdzenia ich przydatności do planowanych badań. W rozprawie zamieszczono wyniki tych badań, uzupełnione fotografiami i schematami układów pomiarowych. Należy podkreślić dużą uwagę jaką Autor wniósł do badań w zakresie wytwarzania iskier indukcyjnych i pojemnościowych stanowiących źródło zapłonu wytworzonego w komorze badawczej aerozolu, wyznaczył też wartości energii generowanych iskier. Przedstawił też opis i części składowe aparatury sterowania i kontroli wyposażone w nowoczesny wielokoanalowy system zbierania danych pomiarowych SIRIUS.

W rozdziale 8 przedstawiono kolejne etapy sprawdzenia funkcjonalności zbudowanej aparatury i przydatność do proponowanej metody badawczej. Do badań Autor wybiera naftę, izopropanol, etanol i eter dietylowy, podkreślając że wytwarzanie aerozolu silnie zależy od fizykochemicznych właściwości cieczy. Kolejno sprawdza poprawność działania układu pompowo-wtryskowego cieczy i jego wydajność. W tym celu używa szybkiej kamery, która pozwala na obserwację wytwarzanego aerozolu, to przydatna część badań i pozwala na obserwację czasowego przebiegu sekwencji tworzenia aerozoli. Prowadzi też testy za pomocą laserowego analizatora cząstek w celu wyznaczenia stężenia aerozolu poprzez precyzyjne pomiary wielkości cząstek cieczy wytworzonego aerozolu i ich rozkładu w komorze badawczej. Prowadzone wstępne badania pokazują, że Autor bardzo starannie przygotowuje eksperymenty i dąży do przyjęcia właściwych parametrów regulacji i precyzji prowadzonych badań, jednym z nich jest np. precyzyjne ustawienie czasu zapłonu i wielkość kropeł aerozolu, co zapewnia powtarzalności eksperymentów i uzyskiwanych wyników.

W rozdziale 9 Autor na podstawie uzyskanych cząstkowych wyników badań poszczególnych układów stanowiska badawczego przedstawia szczegółową procedurę badawczą, którą dobrze odwzorowuje graficzny schemat funkcjonalny (rys.9.2) stanowiska badawczego z pokazanym przepływem mediów i sygnałów sterujących przebiegiem eksperymentów. Autor wyraźnie podkreśla znaczenie powtarzalności eksperymentów co prowadzi do uzyskania tych samych wyników. Ustalony w procedurze badawczej program badań według opracowanego schematu (rys.9.8) postępowania w opracowanej metodzie badawczej pozwala na oznaczanie parametrów, takich jak:

- maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} ,
- maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$,

- dolna granica wybuchowości (DGW),
- minimalna energia zapłonu (MIE).

W rozdziale 10, Autor prowadzi zaplanowane i zgodne z przyjętą procedurą badania wybuchowości aerozoli wytworzonych z:

- nafty w szerokim zakresie stężeń $45 - 336 \text{ g/m}^3$,
- izopropanolu w szerokim zakresie stężeń $63 - 943 \text{ g/m}^3$,
- eteru dietylowego dla różnych stężeń i czasów opóźnienia zapłonu,
- etanolu dla różnych stężeń i czasów opóźnienia zapłonu.

Podczas prowadzonych badań znaczną uwagę Autor poświęcił na wyznaczeniu minimalnej wartości energii zapłonu, jest to ważny parametr dla opisu charakterystyki wybuchu. Uzyskane wyniki badań Autor przedstawił na rysunkach i w tabelach; uzyskane wyniki świadczą o przydatności zastosowanego narzędzia jakim jest skonstruowana aparatura badawcza do badania wybuchowości aerozoli.

Pracę doktorską kończy rozdział 11, w którym Autor wnikliwie omawia i analizuje uzyskane wyniki z szeregu przeprowadzonych testów dla czterech parametrów charakteryzujących wybuch aerozoli. W rozdziale 12 zawarto końcowe uwagi i uzasadnione wnioski. Na podstawie wykonanych badań i przeprowadzonej analizy porównawczej wyników badań uważam, że Autor osiągnął cele postawione w rozdziale 2 i 3 pracy, a tym samym tezy rozprawy doktorskiej zostały udowodnione.

2. Ocena szczegółowa pracy doktorskiej, podsumowanie

Celem pracy doktorskiej było rozszerzenie stanu wiedzy w zakresie poznania parametrów wybuchowości aerozoli. Stwierdzam, że w przedstawionej rozprawie doktorskiej znajdują się oryginalne rozwiązania Autora, jak np.:

- Zastosowanie eksperymentalnej metody do badania parametrów wybuchowości wybranych aerozoli w szerokim zakresie stężeń.
- Zaproponowanie oryginalnej konstrukcji stanowiska eksperymentalnego, wyposażonego w szereg elementów wzajemnie powiązanych, jak np. pompy dozującej ciecz z układem wtrysku i zapłonu iskry.
- Częstkowe badania elementów stanowiska badawczego, które pozwoliły na wyznaczenie możliwości i zakresu badawczego.
- Budowa stanowiska badawczego umożliwia powtarzalność eksperymentów, a to ważna cecha stanowiska.

Wymienione osiągnięcia stanowią o znacznej wartości merytorycznej rozprawy, w tym na widoczny aspekt praktyczny. Reasumując stwierdzam, że forma i zakres pracy są poprawne i dostosowane dla osiągnięcia celu rozprawy.

Stwierdzam, że Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotu badań oraz krytycznym podejściem do uzyskanych wyników prowadzonych eksperymentów, co umożliwiło korektę programu badań. Biorąc powyższe uwagi, wyrażam przekonanie, że

rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Tomana charakteryzuje się poprawną konstrukcją badań, a przyjęte metody badań i interpretacji wyników są właściwe dla tego rodzaju prac. Rozprawa doktorska zawiera oryginalne rozwiązania badanego problemu naukowego oraz wnosi nowe elementy poznawcze nie tylko dla nauk górniczych, zwłaszcza w zakresie oceny zagrożenia wybuchowego stosowanych w przemyśle rurociągów cieczy palnych. Uważam, że Autor osiągnął cele pracy i udowodnił postawione tezy oraz wykazał znajomość wiedzy w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

3. Uwagi i spostrzeżenia

W przedstawionej do oceny pracy w trakcie jej studiowania nasuwają się pewne pytania i spostrzeżenia:

1. Korzysta Pan z literatury oraz prowadzi Pan badania według autorskiej ustalonej procedury postępowania przedstawionej na rysunku 9.8. Ile było przypadków testów negatywnych i czego one wynikały?
2. Prowadzi Pan testy w komorze o objętości 5 litrów, czy objętość komory wpływa na uzyskane wyniki np. na maksymalne ciśnienie wybuchu utworzonego aerozolu?
3. Jednym z celów Pana rozprawy było uzupełnienie przepisów zwiększających bezpieczeństwo pracy w obecności transportu cieczy palnych. Które z uzyskanych wyników wyznaczenia charakterystyki mogą stanowić przesłanki do wprowadzenia aktów prawnych w tym zakresie.
4. W opisie wyników badań używa Pan pojęcia turbulencji, jak rozumiem jest to czynnik wpływający na mierzone wartości? Nie znalazłem, a może przeoczyłem, czy wyznaczał Pan wartość liczbową tego współczynnika, czy tylko obserwował Pan ruch cieczy i aerozolu stosując szybką kamerę.

4. Wniosek końcowy

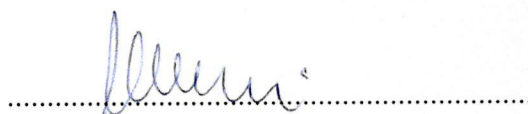
Na podstawie analizy merytorycznej i formalnej rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. **Adriana Tomana** pt. „**Oznaczenie parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych w oparciu o nową metodę badawczą**” uważam, że stanowi oryginalną pracę mieszczącą się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka i odpowiada warunkom określonym w odpowiedniej Ustawie, ponieważ:

- zawiera zwarty opis metodyki badawczej i stanowiska eksperymentalnego do badania parametrów wybuchowości aerozoli;
- powyższe stanowi o oryginalnym rozwiązaniu problemu naukowego, które umożliwia znaczne zwiększenie stanu wiedzy.
- wykazuje dobrą wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, w zakresie zwalczania zagrożeń wybuchami cieczy palnych i aerozoli;

- wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i organizacji skomplikowanych eksperymentalnych badań.

Recenzowana praca Pana mgr inż. Adriana Tomana z uwagi na oryginalne i istotne osiągnięcia naukowe i aplikacyjne w pełni zasługuje na wyróżnienie, o co wnoszę do Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnicztwa – Państwowego Instytutu Badawczego.

Recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z wymaganiami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Waław Dziurzyński