

Kraków, 31.10.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Izak
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Akademii Górniczo-Hutniczej
Dyscyplina naukowa: Inżynieria chemiczna

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalia Kraus-Namroży
pt. „Analiza skuteczności tłumienia pożaru baterii litowo-jonowych za pomocą
instalacji mgły wodnej niskociśnieniowej z dyszą DMS”.**

Ogólna charakterystyka pracy

Praca dotyczy interesującego i nowatorskiego zagadnienia dotyczącego gaszenia baterii litowo-jonowych (LIB) cieszącego się dużym zainteresowaniem naukowców na świecie, głównie ze względu na stosowanie ich w samochodach elektrycznych oraz magazynach energii. Szczegółowym tematem pracy doktorskiej była analiza kluczowych parametrów opisujących tłumienie pożaru baterii w aspekcie schładzania ich niskociśnieniową instalacją mgły wodnej. Należy zaznaczyć że pożar ogniwo litowo-jonowych jest nadal główną przeszkodą w szerszym stosowaniu tych ekologicznych źródeł energii gdyż nie opracowano jeszcze ekonomicznej i miejscowej techniki jego lokalizacji.

Z tego powodu w niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w szerokim zakresie tj. początkowo z użyciem pojedynczych ogniwo LIB, następnie niewielkich modułów i wreszcie większych zestawów baterii, na poziomie odpowiadającym małym magazynom energii, aby lepiej zrozumieć mechanizm tłumienia pożaru i szczegółowiej zdefiniować wpływ czynników zewnętrznych.

Praca doktorska mgr inż. Natalia Kraus-Namroży powstała w Katedrze Inżynierii Środowiska Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej pod kierunkiem dr hab. inż. Doroty Brzezińskiej, prof. PŁ znanego naukowca w środowisku pożarniczym. Ma typowo eksperymentalny charakter i składa się zasadniczo z trzech części:

- ogólnej, obejmującej obszerny przeglądowy opis stanu wiedzy dotyczącej tematu pracy (w czterech rozdziałach -56 stron),

- doświadczalnej w mikro i makroskali, składającej się z 3 rozdziałów zawierających opis metod badań, stosowanych materiałów, prezentację wyników badań w aspekcie stosowania metod atomizacji wody do oceny schładzania palących się ogniów (19 stron), oraz
- podsumowania, w którym zawarto wnioski z przeprowadzonych badań w tym wytyczne aplikacyjne niezbędne do zastosowania dyszy DMS w celu tłumienia i kontrolowania pożaru LIB IMN (4 strony).

Pierwsza część ogólna zawiera rozdziały i elementy podsumowujące, w których Autorka zawarła własne, często krytyczne spostrzeżenia.

W tej części ogólnej opartej na studiach literaturowych Autorka wykorzystała materiał bibliograficzny (64 pozycji) odzwierciedlający aktualny stan wiedzy w zakresie właściwości ogniów litowo-jonowych i gaszenia ich wodą. Świadczy to o dobrym zaangażowaniu w tematykę rozprawy doktorskiej mimo że znane są inne mechanizmy gaszenia pożaru płomieniowego np. poprzez eliminację rodników palenia.

W dalszej części ogólnej, zgodnie z tematem pracy, scharakteryzowana została atomizacja wody stosując rozpylacze niskociśnieniowe (IMN) oraz próby klasyfikacji mechanizmów wywołujących dyspersje strumieni wody w czasie jej ścinania. Zawierają one dość szczegółowy opis czynników mających wpływ na właściwości aerozolu, które ogólnie zakwalifikowano do czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Zagadnienia te zostały przedstawione w zwięzły i wyczerpujący sposób a w podsumowaniu na szczególne podkreślenie zasługuje interpretacja dotychczasowych osiągnięć, konstatując - że obecny stan wiedzy pozwala już na określenie zależności pomiędzy objętościowym rozpyleniem kropeł wody i ich parametrami rozkładu a rzeczywistą zdolnością do schładzania palących się ogniów. Tak powstała robocza teza pracy: **„instalacja mgłowa niskociśnieniowa z odpowiednio rozmieszczonymi dyszami DMS może tłumić i kontrolować pożar LIB”**.

Do realizacji tego celu Autorka postawiła następujące hipotezy badawcze:

- *głębsze zrozumienie zależności pomiędzy stopniem naładowania 20 ogniów a rzeczywistą zdolnością do gaszenia instalacją mgłową jest kluczowe dla efektywnej lokalizacji pożaru;*
- *efektywne gaszenie modułu LIB (51 ogniów) instalacją mgłową niskociśnieniową z ewentualnym dodatkiem środka pianotwórczego AFFF jest możliwe przez określenie średniej wielkości kropeł aerozolu;*

- *zdefiniowanie wpływu najważniejszych czynników zewnętrznych ogniw – tj. temperatury, rozkładu dysz w aspekcie ich konfiguracji warstwowej kluczowe dla lokalizacji tego typu pożaru; ponadto przeprowadzono*
- *weryfikację użyteczności stanowiska badawczego do oceny testów schładzania modułów ogniw w czasie pożaru.*

W części rozprawy poświęconej badaniom własnym w pierwszym etapie Autorka opisała technologię wytwarzania aerozoli i ich charakterystykę. Do tego zastosowała dyszę DMS oraz analizatora wielkości i kształtu kropli AWK D firmy *Kamika Instruments* z sondą pomiarową, połączonymi z blokiem pomiarowym EBP podłączonym do komputera, na którym zainstalowano odpowiednie oprogramowanie producenta. Badania te wykonano w Ośrodku Badawczo-Szkoleniowym techniki Przeciwpożarowej w Szczyrzycu.

Pomiary wielkości i rozkładu kropeł przebiegały zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 14972- 3 tzn. w czterech osiach: X+, X-, Y+, Y- , dla 9 wartości ciśnienia, w przedziale od 0,4 MPa do 1,2 MPa. Przy założeniu zasięgu strumienia dyszy wynoszącej 3 m, na każdej z osi pomiar odbywał się w sześciu punktach pomiarowych. To wystarczyło do charakterystyki zbioru aerozolu tj. obliczenia średniej średnicy objętościowej mikrokropeł, odchylenia standardowego oraz tzw. wskaźnika zbliżenia do średnicy optymalnej, wytwarzanych przez dyszę DMS w wybranych osiach pomiarowych.

Następnie określono strukturę rozpylonej wody w aspekcie zasięgu strumienia, kąta rozpylania oraz współczynnika wypływu tj. parametrów charakteryzujących dyszę DMS. Szczególną uwagę zwrócono na przeszkodę zaburzającą zasięg strumienia aerozolu umieszczając dyszę w 6 różnych odległościach od palącego się modułu baterii.

Zdaniem Autorki rozprawy wymienione parametry powinny być wystarczające do charakterystyki mgły wodnej wytwarzanej przez niskociśnieniową dyszę spiralną DMS w systemach stałych urządzeń gaśniczych SUG.

W tym celu w komorze zastosowała specjalny układ sensorów do oceny wpływu czynników wewnętrznych i zewnętrznych na proces atomizacji wody. Skupiono się na głównych parametrach opisujących aerozol w ujęciu klasycznym, że rozpylacz spełnia definicję dyszy mgłowej w szczególności przy wykorzystywaniu jej do celów protekcyjnych.

Efektywność gaśniczą pakietów ogniwi LIB przeprowadzono zarówno w skali mikro w specjalnej wspomnianej komorze jak i makro na otwartych stanowiskach badawczych.

W świetle poczynionych uwag wstępnych recenzent wyraża pogląd, że zarówno temat pracy doktorskiej mgr inż. Natalia Kraus-Namroży jak i zakres pracy należy ocenić wysoko i spełnia wymagania przyjęte dla rozpraw doktorskich w obszarze inżynierii procesowej.

Merytoryczna ocena rozprawy

Tematyka pracy związana z określeniem możliwości gaszenia pożarów baterii litowo-jonowych jest ciągle przedmiotem zainteresowania badaczy. Pomimo niewielkiej liczby prac światowych na ten temat (z ostatnich 20 lat Autorka wykorzystwała 34 oraz jest współautorem 1 publikacji z 2022 roku), zagadnienie to w dalszym ciągu nie jest do końca wyjaśnione a w szczególności dotyczącego mechanizmu palenia i gaszenia. Wynika to z faktu, że wiele czynników zewnętrznych i wewnętrznych wpływa na relacje elektrod interkalacyjnych z jonami litu a ocena każdego z nich jest bardzo trudna. Niestety tego rodzaju zagrożenia pożarowe wciąż rosną (np. w Krakowie w październiku 2024r. były dwa długotrwałe pożary) a wynikają z coraz większej liczby samochodów elektrycznych. Problem jest tym większy że pożary takich samochodów nie da się w prosty sposób ugasić ze względu na wydzielanie się różnego rodzaju palnych gazów. Po drugie, choć moc pożaru samochodu spalinowego i elektrycznego jest porównywalna to szybkość rozprzestrzeniania się pożaru tego drugiego jest zdecydowanie większa. Stąd wynika duże zagrożenie zwłaszcza w garażach.

Dlatego na szczególną uwagę zasługują wyniki dotyczące możliwości schładzania baterii jonowo-litowych aby utrudnić tzw. zjawiska ucieczki termicznej (*thermal runaway*) i zlokalizować pożar w obrębie zaledwie kilku cel. Jeśli do tego celu użyć bardzo ekonomicznej niskociśnieniowej techniki mgłowej to jest to bardzo innowacyjne rozwiązanie.

Także dokonano prawidłowego wyboru czynnika chłodzącego z punktu widzenia zjawisk fizycznych. Woda bowiem ma bardzo wysokie ciepło parowania (540kcal/g =>2000kJ/kg) a mgła wodna nie przewodzi prądu i nie wywołuje zwarcia.

Kinetyka schładzania układu przez odbieranie ciepła (pochłanianie i parowanie wody) jednakże nie idzie w parze z ryzykiem zwarcia elektrycznego. Stąd istotnym w takiej technologii jest szczegółowa analiza atomizacji wody przez dyszę DMS oraz rozkład struktury aerozolu w przestrzeni. Doktorantka wykonała to zadanie bardzo dobrze. Wykorzystała bowiem parametr średniej wielkości kropeł $Dz_{0.9}$ która jest charakterystyczna dla danej dyszy w różnych warunkach atomizacji (ciśnienie, kąt rozpylania, itp.). Należy zaznaczyć, że określona w pomiarach całkowita średnica objętościowa kropeł \bar{D}_v była zbliżona do tzw. zalecanej literaturowo średnicy optymalnej 100 μm (102 μm) co dobrze świadczy o doborze dyszy.

Opierając się na tych wynikach autorka stwierdziła że wytypowana dysza spiralna DMS spełnia definicję dyszy mgłowej i w dalszych badaniach oceniała skuteczność schładzania pakietów ogniw LIB. Wykonała stosowne stanowisko i przeprowadziła testy gaszenia pożaru instalacja mgłową dla 20 otwartych ogniw (skala micro) oraz 59 otwartych ogniw w układzie modułowym (skala macro) w różnych wariantach. Badania w skali mikro wykazały ponadto że w zależności od stopnia naładowania istotnie różni się rozwój pożaru. Przede wszystkim temperatura palących się ogniw jest niższa przy próbkach mniej naładowanych a to zwiększa skuteczność gaszenia.

Schładzanie otwartych pakietów ogniw LIB przeprowadziła przy zastosowaniu trzech dysz mgłowych bez i z dodatkiem środka pianotwórczego Orchidex AFFF ECO w dwóch stężeniach tj. 3 i 5 %. Tym razem pojedynczych ogniw było 59 ułożonych warstwami. Autorka wykazała że system IMN z dyszami DMS skutecznie kontrolował pożar LIB a przede wszystkim zapobiegał jego rozprzestrzenianiu. Mgła wodna obniżała temperaturę pożaru o ok. 70% (z 711°C do 186°C). Dodatek środka pianotwórczego AFFF nie wpłynął jednak na skuteczność schładzania i gaszenia co może być istotne z aplikacyjnego punktu widzenia.

Badania pozwoliły Autorce na sformułowanie kilku wniosków, które wnoszą znamiona nowości zarówno w zakresie mechanizmów gaszenia ogniw LIB jak i przede wszystkim na polu użytkowym.

1. System mgły wodnej niskociśnieniowej z dyszami spiralnymi może kontrolować pożar LIB.
2. Istotne jest chłodzenie całego zestawu modułu a nie tylko pojedynczej celi.
3. System IMM znacząco obniża temperaturę pożaru ogniw litowo-jonowych.

W ogólności rozprawa doktorska jest bardzo dobrze napisana i w zasadzie nie znalazłem żadnych rażących błędów merytorycznych ani formalnych poza jednym przypadkiem gdzie zamieniono oznaczenia Dv na dv (str. 50). Również pod względem edytorskim jest wykonana wyśmienicie, choć niektóre nazewnictwo jest zaczerpnięte z opisu potocznego. Spray może nie być mgłą (str. 31). Określenie aerozol wodny (mgła) jest bardziej poprawne pod względem naukowym gdyż fazą rozpraszającą jest gaz (powietrze) a wielkość kropeł w skali mikrometrycznej.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując mogę stwierdzić, że postawione hipoteza pracy przez Doktorantkę została udowodniona, a wnioski wypływające z pracy prawidłowo udokumentowane.

Podkreślić należy, że Autorka w sposób właściwy sformułowała problem naukowy i przedstawiła jego prawidłowe rozwiązanie. Przyjęty sposób postępowania wskazuje na dużą wiedzę Autora w zakresie inżynierii bezpieczeństwa i badań fizykochemicznych, które w sposób prawidłowy zastosowała do rozwiązania postawionego sobie problemu.

Oczywiście problem gaszenia ogniw litowo-jonowych nie został jeszcze ostatecznie rozwiązany. Przede wszystkim konstrukcja takich ogniw jest z reguły zamknięta która utrudnia dostęp aerozolu wodnego. Ale przedstawione badania wnoszą istotny wkład w mechanizm lokalizacji.

Zdaniem recenzenta, jest to dobra pod względem naukowym rozprawa doktorska, i wnosi nowe elementy prowadzące do wyjaśnienia skomplikowanych zagadnień dotyczących gaszenia i schładzania pożarów LIB za pomocą niskociśnieniowych układów mgłowych.

Kończąc ocenę rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalia Kraus-Namroży stwierdzam, że mimo miernego dorobku naukowego spełnia ona warunki stawiane przez ustawę rozprawom doktorskim *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. ze zm.*, i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynierii Bezpieczeństwa Akademii Pożarniczej