

Prof. dr hab. inż. Jolanta Biegańska  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
Wydział Energetyki i Paliw  
Katedra Energetyki Wodorowej  
e-mail: [biega@agh.edu.pl](mailto:biega@agh.edu.pl)

Kraków, 14.06.2021 r.

## Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Jakuba MICHALSKIEGO**  
pt.: „*Badania pirostatyczne materiałów miotających z wykorzystaniem  
plazmowego układu zapłonowego*”

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Zbigniew Leciejewski, prof. WAT a promotorem pomocniczym dr inż. Zbigniew Surma.

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest Pismo Pana Prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 29 kwietnia 2021 roku, dotyczące wykonania recenzji wspomnianej rozprawy.

### 2. Celowość podjęcia tematu

Podjęcie tematu „Badania pirostatyczne materiałów miotających z wykorzystaniem plazmowego układu zapłonowego” jest ważne i celowe z utylitarne punktu widzenia, ze względu na wzrastające wyzwania wymagań bezpieczeństwa związanego z eksploatacją amunicji artyleryjskiej.

Opracowanie sposobu zapłonu prochów małowrażliwych (wymagają silnych układów zapłonowych) z wykorzystaniem plazmy o wysokiej energii i temperaturze, spełnia ww. wymagania. Szczególnie uwzględniając jej wpływ na rozpalanie i spalanie prochu ładunku miotającego. Badania tego rodzaju, tzw. badania pirostatyczne, prowadzi się w zamkniętej komorze o znanej objętości spalając określoną masę materiału miotającego. Materiałem zapłonowym jest zazwyczaj proch czarny a oceną efektywności jest wynik ciśnienia gazów prochowych powstających w wyniku spalania próbki materiału. Pomiar ciśnienia rejestrowany jest w funkcji czasu.

Aktualnie w Polsce nie prowadzi się badań tego typu.

Doktorant wprowadził, we wstępie, do tematu rozprawy i przedstawił motywację podjęcia badań tzn. analizując tendencje nowych konstrukcji uzbrojenia w Polsce i możliwość szerszego stosowania nowoczesnych materiałów miotających do produkcji amunicji, zauważył znaczenie opracowania stanowiska badawczego i przeprowadzenia badań pirostatycznych z wykorzystaniem plazmowego układu zapłonowego.

Przeprowadzone badania wpływu zapłonu plazmowego na charakter spalania prochów, nie są rozpowszechnione w literaturze – jest ograniczona liczba materiałów źródłowych.

Doktorant sformułował problem badawczy, naświetlił cel rozprawy i ustalił zadania badawcze.

Głównym celem było zbadanie wpływu zapłonu plazmowego wytworzonego przez układ o niskiej energii wyładowania na dynamikę spalania materiałów miotających.

Przyjęte cele cząstkowe to:

- Opracowanie i przebadanie układu generacji plazmy o niskiej energii wyładowania.
- Wykonanie pirostatycznych badań porównawczych dla różnych rodzajów prochów z wykorzystaniem zapłonu plazmowego i czarnoprochowego.
- Porównanie wybranych charakterystyk dynamiki spalania badanych prochów.

Zrealizowanie celu pracy Doktorant zaplanował, wyznaczając zadania badawcze polegające na:

- Analizie oddziaływania zapłonu plazmowego na miotające materiały wybuchowe.
- Analizie konstrukcji generatorów plazmy wykorzystywanych w badawczych układach pirostatycznych i pirodynamicznych.
- Opracowaniu i wykonaniu układu badawczego oraz przeprowadzeniu badań wstępnych.
- Wykonaniu badań pirostatycznych trzech rodzajów stałych materiałów miotających w warunkach różnych gęstości ładowania.
- Opracowaniu i analizie otrzymanych wyników.

Doktorant, po przeprowadzeniu szczegółowej analizy danych literaturowych dotyczących wykorzystania plazmy w balistyce wewnętrznej, charakterystyki typów generatorów plazmy i rozwiązań konstrukcyjnych takich generatorów (analiza patentów), ukierunkował swoje badania na zastosowanie układu o niskim napięciu na kondensatorach.

Takie podejście miało zapewnić aplikacyjny charakter badań – do tej pory stosowano generatory z wysokimi energiami wyładowania a praca z układami o niskim napięciu na kondensatorach, gwarantuje bezpieczeństwo prowadzenia badań i skuteczność stosowania praktycznego dla użytkowników.

Zakres rozprawy przedstawiono w sposób zwięzły, przejrzysty i wyczerpujący.



### 3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 117 stron; zawiera 93 rysunki i 20 tabel. Zastosowano wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz skrótów, podział na cztery rozdziały zawierające podrozdziały, podsumowanie końcowe i wnioski, bibliografię, spis tabel i rysunków.

W bibliografii (51 pozycji) znaczną część (73%) stanowią publikacje obcojęzyczne. Doktorant wykorzystał również 6 pozycji literaturowych własnych we współautorstwie.

### 4. Ocena merytoryczna rozprawy

#### Metodyka pracy

Doktorant przedstawił koncepcję struktury generacji plazmy ustalając, że będzie to generator plazmy typu CPG (ang. Capillary Plasma Generator) wykonany w ułożeniu osiowym o napięciu układu ładowania i rozładowania 4,5 kV z powtarzalnością impulsu zapłonowego. Tak zaprojektowany układ powinien umożliwiać również zapłon paliwa czarnoprochowego.

Materiał (drut), z którego wykonano element inicjujący powstawanie plazmy przebadano pod kątem rozmiaru obłoku generowanej plazmy. Wytypowano cztery substancje: miedź, żelazo, wolfram i nikiel, które posłużyły do sporządzenia prekursora plazmy.

Każdy z wytypowanych materiałów, w postaci przewodów odpowiedniej średnicy, instalowano na stanowisku badawczym i przy pomocy kamery Phantom v12 do rejestracji zdjęć z dużą częstotliwością (ponad 44 000 fps), utrwalano obraz chmury wytwarzanej plazmy.

Po przeanalizowaniu filmów, klatka po klatce, oceniano uzyskany obłok i na tej podstawie wytypowano, do dalszych badań, przewód miedziany – najlepszy z przebadanych materiałów inicjujący powstawania plazmy w generatorach CPG.

Doświadczalnie dobrano parametry wyjściowe układu generatora plazmy w taki sposób, żeby impuls jarzenia plazmy był odpowiednio długi a jednocześnie nie powodował przeładowania kondensatorów. W tym celu wykonano specjalne cewki (zalne żywicą epoksydową) o podwyższonej wytrzymałości – umożliwiały bezpieczne i wielokrotne wykorzystanie w warunkach przebiegów szybkozmiennych przy dużych wartościach natężenia prądu.

Badania pirostatyczne prowadzono na stanowisku badawczo-pomiarowym. Materiał miotający spalano w komorze manometrycznej o pojemności 150 cm<sup>3</sup>, którą zamykano korkiem wyposażonym w generator plazmy; proces odbywał się w stałej objętości.

Do generowania impulsu elektrycznego zastosowano układ z baterią 16 kondensatorów o pojemności 30  $\mu\text{F}$  każdy, umożliwiającą ich ładowanie i rozładowanie.

Zamianę ciśnienia na ładunek elektryczny prowadzono stosując piezoelektryczny czujnik ciśnienia 5QP 5000M nr 2106 (zakres pomiarowy 600 MPa i czułości 2,29 pC/bar).

Zamianę wejściowych wartości ładunku na wartości napięcia wyjściowego prowadzono wzmacniaczem ładunku elektrycznego TA-3/D nr J1233.

W oparciu o rejestrator (komputer PC z przetwornikiem analogowo-cyfrowym lub oscyloskop TDS 2024 nr C101756) prowadzono zapis procesu spalania.

Badania wstępne pozwoliły uzyskać temperaturę wytwarzanej plazmy na poziomie 15 000 K.

Zasadnicze badania pirostatyczne prowadzono z wykorzystaniem:

- prochu jednobazowego 5/7cfl – zawiera minimum 90% nitrocelulozy (stosowany w amunicji artyleryjskiej 23x152 mm dedykowanej zestawom przeciwlotniczym ZU-23-2 i ZSU 23-4),
- dwubazowego JA-2 (USA) – zawiera nitrocelulozę i do 40% nitrogliceryny (stosowany do elaboracji 120 mm amunicji czołgowej M829A1/A2 z pociskiem APFSDS-T).
- małowrażliwego prochu kompozytowego SC (polski zamiennik JA-2) – zawiera heksogen jako główny składnik energetyczny; jest on opracowywany w ramach projektu badawczo-rozwojowego NCBR.

Wymienione prochy spalano w komorze pirostatycznej z wykorzystaniem zapłonu czarnoprochowego i plazmowego. Szczególny nacisk położono na fazę zapłonu – poddano szczegółowej analizie.

Szeroki zakres badań dotyczył: przebiegu ciśnienia w funkcji czasu (do osiągnięcia ciśnienia maksymalnego, równego 10% ciśnienia maksymalnego i do osiągnięcia ciśnienia 3 MPa), wartości współczynnika  $u_1$  liniowego prawa prędkości spalania, współczynnika prędkości spalania  $r(p)$  wyznaczonej według STANAG 4115. Oprócz tego analizowano dynamiczną żywość prochu L (w całym zakresie spalania, w zakresie 0 – 0,2  $p/p_{\text{max}}$  z opisem fazy rozpalania się ziarna), względną dynamiczną żywość prochu i wyznaczano grubość warstwy przegrzanej.

Dokładność układu pomiarowego oceniano w oparciu o aparat matematyczny opisujący równaniami istotne zależności wpływające na błędy (błąd systematyczny pomiaru ciśnienia). Podkreślenia wymaga fakt prowadzenia trudnych prac z szybkozmiennymi procesami (spalanie prochów to proces dynamiczny), których rejestracja wymaga sprawdzenia czy mierzony sygnał pochodzący od ciśnienia gazów prochowych nie uległ zniekształceniu. Doktorant przeprowadził również statystyczną ocenę rozrzutu wyników pomiaru ciśnienia.



Biorąc pod uwagę: dobór tematu, problem badawczy, cel rozprawy jak również zastosowane metody i uzyskane wyniki, wyrażam przekonanie, że:

- rozpatrywany problem stanowi zagadnienie naukowe w dyscyplinie: „inżynieria mechaniczna” – badania pirostatyczne oceniające wpływ skutków zastosowania plazmowego układu zapłonowego na charakter wczesnej fazy spalania prochu,
- problem badawczy obejmujący opracowanie plazmowego układu zapłonowego i zbadanie wpływu zapłonu plazmowego, wytworzonego przez układ o niskiej energii wyładowania, na dynamikę spalania materiałów miotających został rozwiązany poprawnie,
- poprawnie dobrano i zastosowano metody badawcze,
- poprawna jest interpretacja uzyskanych wyników – w przypadku tej pracy podkreślić należy jej charakter obliczeniowo-eksperymentalny, co wymagało przeprowadzenia wielu prób w trudnych warunkach.

#### **Zagadnienia naukowe rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta**

Rozdziały od 2 do 4 to najważniejsza część rozprawy – stanowi rezultat samodzielnej pracy Doktoranta. Przedstawia wyniki pracy, do których należą:

- opracowanie układu generatora plazmy CPG i opis przyjętej metodyki badań laboratoryjnych,
- wyniki badań wstępnych układów zapłonowych (proch czarny i plazma jako medium zapłonowe) – czas generacji impulsu zapłonowego, ciśnienie generowane przez układ plazmowy, wpływ plazmy na powierzchnię wybranych materiałów,
- wyniki badań pirostatycznych nad określeniem wpływu układu zapłonowego na charakter wczesnej fazy spalania prochu i wpływu składu badanych prochów na dynamikę ich spalania.
- graficzne zobrazowanie otrzymanych wyników w postaci wykresów (ponad 50), umożliwiających interpretację istotnych zależności.

Dodatkowym wartościowym elementem pracy jest przedstawienie, po raz pierwszy na świecie, wykresów dynamicznej żywości prochów co umożliwia analizę i porównanie specyfiki początkowego okresu ich spalania dla różnych rodzajów zapłonu.

### **Prawidłowość rozważań, uzyskanych wyników i wniosków**

W pracy został sformułowany problem badawczy i postawione cele cząstkowe oraz zadania badawcze.

Został sformułowany następujący cel naukowy pracy – zbadanie wpływu zapłonu plazmowego wytworzonego przez układ o niskiej energii wyładowania na dynamikę spalania materiałów miotających

Wybrane metody oznaczenia istotnych parametrów oraz analiza statystyczna danych eksperymentalnych pozwoliły uzyskać wiarygodne wyniki, które umożliwiły osiągnięcie zamierzonego celu rozprawy.

### **Ocena znajomości przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta i uwagi krytyczne**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 117 stron. W pracy dokonano szczegółowego przeglądu literatury (dotyczącego charakterystyki przedmiotowego generatora plazmy) stanowiącego 21 stron. W bibliografii zawierającej 51 pozycji ponad 30% stanowią publikacje z ostatnich lat, w tym 6 pozycji literaturowych Doktoranta jako współautora.

Doktorant podkreśla, że opisane w literaturze rozwiązania konstrukcyjne generatorów plazmy dotyczyły wysokich energii wyładowania i istnieje deficyt doświadczeń z niskimi wartościami energii, co umożliwia prowadzenie nowatorskich badań. Ponadto układ o niskim napięciu na kondensatorach jest bezpieczny dla prowadzących badania.

Na potrzeby rozwiązania postawionego celu opracowano stanowisko badawczo-pomiarowe, zaprojektowano nową wersję korka zamykająco-zapłonowego (możliwość zapłonu czarnoprochowego i plazmowego), doświadczalnie dobrano materiał inicjujący powstawanie plazmy w generatorze oraz określono warunki pracy opracowanego układu generatora plazmy.

Złożoność tych zagadnień stanowiło wyzwanie do przeprowadzenia badań pirostatycznych z wykorzystaniem trzech rodzajów prochów przy zastosowaniu niskoenergetycznego zapłonu plazmowego i czarnoprochowego (klasyczny), wykonania obliczeń matematycznych istotnych parametrów wpływających na przebieg procesu spalania w tych warunkach, analizy i porównania otrzymanych wyników, co wymagało dużej wiedzy Doktoranta.

Doktorant wypracował procedurę badawczą i potwierdził jej przydatność.

Dostrzegł możliwości aplikacyjne opracowanego sposobu zapłonu – plazmowy układ zapłonowy charakteryzuje się wysoką powtarzalnością chwili zapłonu.



## 5. Uwagi dyskusyjne i wątpliwości

Po przeczytaniu ocenianej rozprawy doktorskiej nasuwają mi się pytania.

Wiadomo, że plazma wytwarzana jest metodą eksplodującego drutu w generatorze plazmy typu CPG. W dalszej konsekwencji następuje odparowanie i rozgrzanie par miedzi i zmiany ciśnienia generowane przez układ plazmowy. Moje pytanie brzmi:

1. Jak Doktorant rozumie sformułowanie „...plazma przestała się jarzyć” zamieszczone na str. 55 w 8g?

W kanale, w którym znajduje się drut miedziany umieszczona została rurka polietylenowa. Moje pytanie brzmi:

2. Jaka rolę spełnia ta rurka w generatorze plazmy? Czy materiał, z którego została wykonana (polietylen) jest pomocny w generacji plazmy – jeżeli tak to w jaki sposób pomaga? Może nie ma on wpływu na proces kreowania plazmy?

W Podsumowaniu końcowym i wnioskach Doktorant planuje wykonać stanowiska do badań pirodynamicznych i przebadanie (str. 107 w 2d) „wpływu rodzaju zapłonu na zjawisko strzału”. Moje pytanie brzmi:

3. Jakie stosowne badania prowadzone będą w tym zakresie?

## 6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Rozprawa została starannie zredagowana przez Doktoranta, ale nie uniknął jednak drobnych błędów redakcyjnych:

- str. 8 – (wiersz 15d) jest „... [1, 2, 3, 4, 5].”, powinno być „... [1-5].”;
- str. 13 – (wiersz 8d) jest „temperatury...”, powinno być „do temperatury...”;
- str. 20 – (wiersz 9d) jest „Rys. 1.9. Generatorsa...”, powinno być „Rys. 1.9. Generator...”;
- str. 26 – (wiersz 5g) jest „... badaniom został proch ...”, powinno być „... badaniom został poddany proch ...”;
- str. 29 – (wiersz 6d) jest „... do 9,5 kg pozwalającego ...”, powinno być „... do 9,5 kg pozwalające ...”;
- str. 47 – (wiersz 10g) jest „... [44, 45, 46, 47] ...”, powinno być „... [44-47] ...”;
- str. 79 – (wiersz 6g) jest „... własnościami plazmy... ”, powinno być „... właściwościami plazmy... ”;
- str. 85 – (wiersz 3g) jest „Podobnie jak w przypadku ...”. Zdanie nie jest zrozumiałe.
- str. 93 – (wiersz 4g) jest „Porównując wykres ..., wyraźna jest tu nieregularność”, powinno być „Porównując wykres ..., zauważa się wyraźną nieregularność”;

- str. 100 – (wiersz 5d i w 4d) jest „... skrócenie czasu wynosiło ok. 30%., ... 20%., powinno być „... skrócenie czasu wynosiło ok. 30% w stosunku do ...”, ... 20% w stosunku do...”,
- str. 114 – (wiersz 17d) jest „Rys. 1.9. Generators plazmy ...”, powinno być „Rys. 1.9. Generator plazmy ...”,
- str. 117 – (wiersz 10d) jest „Rys. 4.41. ...”, powinno być „Rys. 4.42. ...”.  
 (wiersz 7d) jest „Rys. 4.42. ...”, powinno być „Rys. 4.41. ...”,  
 (wiersz 5d) jest „Rys. 4.43. Wykresy grubości warstwy przegrzanej ...”, powinno być „Rys. 4.43. Wykresy prędkości spalania  $r(p)$  dla gęstości ładowania  $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$ ”; Rys. 4.43. powinien być Rys. 4.44.,  
 (wiersz 3d) jest „Rys. 4.44. ...”, powinno być „Rys. 4.45. ...”,  
 (wiersz 2d) jest „Rys. 4.13. ...”, powinno być „Rys. 4.46. ...”.

Zawarte w recenzji uwagi nie pomniejszają wartości wyników osiągniętych przez Doktoranta – mogą być pomocne w rozwoju dalszej pracy naukowej.

## 7. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podjęcie tematu badawczego i założenia rozprawy doktorskiej uważam za celowe, prawidłowo uzasadnione i mieszczące się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Dowiódł umiejętności samodzielnego formułowania problemów naukowych oraz prowadzenia badań dla ich rozwiązania wraz z analizą i prezentowaniem wyników. Opanował warsztat matematyczny i umiejętność wyciągania wniosków z otrzymanych wyników badań.

**W moim przekonaniu, przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Michalskiego pt.: „Badania pirostatyczne materiałów miotających z wykorzystaniem plazmowego układu zapłonowego”, przygotowana pod opieką promotora – dr hab. inż. Zbigniewa Leciejewskiego i promotora pomocniczego dr inż. Zbigniewa Surmy, spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Wnioskuje o przyjęcie rozprawy przez Radę Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

**Wnioskuje również o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy.**

