

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki**KATEDRA CHEMII NIEORGANICZNEJ**

dr hab. inż. Anita Trenczek-Zajac, prof. AGH

Kraków, dn. 02.06.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej**mgr inż. Hanny Zagórskiej****pt. „Nowe nanostruktury hybrydowe do fotokatalitycznego generowania wodoru”**

Fotokatalityczne otrzymywanie wodoru jest jednym z istotnych kierunków badań nad materiałami zdolnymi do bezpośredniej i „zielonej” konwersji energii. Zainteresowanie tym obszarem wynika zarówno z potrzeby poszukiwania alternatywnych nośników energii, jak i z konieczności ograniczania wykorzystania paliw kopalnych. Wodór jako paliwo o wysokiej gęstości energii oraz potencjalnym znaczeniu dla gospodarki niskoemisyjnej, zajmuje w tych badaniach szczególne miejsce. Jego otrzymywanie z wykorzystaniem światła i odpowiednio zaprojektowanych fotokatalizatorów stanowi atrakcyjną alternatywę wobec metod opartych na surowcach kopalnych. Jednocześnie jest to nadal zagadnienie wymagające intensywnych badań podstawowych, ponieważ efektywność wielu znanych układów pozostaje ograniczona.

Choć sama idea wykorzystania półprzewodników w procesach fotokatalitycznych jest dobrze ugruntowana, w praktyce nadal dużym wyzwaniem jest opracowanie materiałów, które łączą wysoką aktywność, trwałość oraz możliwość efektywnego wykorzystania promieniowania. Ograniczenia te wynikają między innymi z szybkiej rekombinacji par elektron-dziura, niewystarczającej liczby dostępnych miejsc aktywnych na powierzchni fotokatalizatora, ograniczonej absorpcji światła oraz niekorzystnej kinetyki reakcji powierzchniowych. Z tego względu szczególnego znaczenia nabierają badania nad materiałami hybrydowymi, kontrolą morfologii nanostruktur oraz wprowadzaniem odpowiednio dobranych fotokatalizatorów metalicznych. Takie podejście pozwala modyfikować zarówno właściwości optyczne i elektronowe materiałów, jak i sposób przebiegu procesów zachodzących na ich powierzchni.

Interesujące w tym zakresie są struktury asymetryczne, w tym układy typu Janus. Ich niejednorodna budowa może sprzyjać przestrzennemu rozdzieleniu funkcji poszczególnych fragmentów nanostruktury, ułatwiać kierunkowy transport ładunku i ograniczać



rekombinację fotogenerowanych nośników. Jednocześnie odpowiedni dobór składników takich struktur pozwala wpływać na liczbę i charakter miejsc reakcyjnych, co ma bezpośrednie znaczenie dla reakcji wydzielania wodoru. Projektowanie tego typu materiałów wymaga więc nie tylko sprawnej syntezy, lecz także umiejętnego powiązania ich morfologii, składu i właściwości powierzchniowych z obserwowaną aktywnością fotokatalityczną.

W tym kontekście rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Hanny Zagórskiej zatytułowana *Nowe nanostruktury hybrydowe do fotokatalitycznego generowania wodoru* dobrze wpisuje się w aktualne kierunki badawcze. Podjęta problematyka jest ważna zarówno z punktu widzenia rozwoju nowych materiałów funkcjonalnych, jak i lepszego zrozumienia czynników decydujących o skuteczności procesu fotokatalitycznego.

Pani mgr inż. Hanna Zagórska przygotowała swoją rozprawę na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Adrian Zaleskiej-Medynskiej. Rolę promotora pomocniczego pełniła pani dr inż. Anna Gołąbiewska. Praca ma charakter rozprawy opartej na cyklu czterech artykułów naukowych, opublikowanych w renomowanych czasopismach – *Journal of Photochemistry & Photobiology A*, *Applied Surface Science* i *International Journal of Hydrogen Energy* – w latach 2024-2026.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, w tym: streszczenia artykułów stanowiących jej podstawę, wykazu najważniejszych skrótów, symboli i akronimów, cytowanych pozycji literaturowych, dorobku naukowego Autorki, kopii artykułów oraz oświadczeń współautorów dotyczących udziału w przygotowaniu rzeczonych publikacji.

Rozdział pierwszy obejmuje dwustronicowe wprowadzenie do pracy. Rozdział drugi dotyczy problematyki materiałów stosowanych w fotokatalitycznym generowaniu wodoru i wymagań im stawianych. Szczególna uwaga poświęcona została materiałom o strukturze perowskitu i nanocząstkom typu Janus oraz układom hybrydowym na nich bazujących. Znaleźć tu można między innymi obszernie zestawienia obejmujące właściwości fotokatalityczne dostępnych w literaturze układów hybrydowych na bazie perowskitów oraz nanomateriałów hybrydowych typu Janus wraz z metodami ich otrzymywania. Na szczególne podkreślenie zasługują w tej części duża szczegółowość zebranych przez Doktorantkę danych oraz wizualizacje struktur typu Janus ułatwiające zrozumienie różnic pomiędzy nimi. W rozdziale trzecim przedstawiony został cel pracy, za który pani mgr inż. Hanna Zagórska postawiła sobie pogłębienie wiedzy na temat związku pomiędzy szeroko rozumianą budową struktur hybrydowych a ich aktywnością fotokatalityczną w kierunku generowania wodoru. Realizacji tego celu towarzyszyły również założenia z pogranicza zielonej chemii dotyczące prostych i niskoenergochłonnych metod syntezy fotoaktywnych materiałów. W rozdziale czwartym znaleźć można zestawienie zastosowanych metod syntezy i metod badawczych oraz dokładny opis procedury badania aktywności fotokatalitycznej. Wyniki badań i dyskusja wyników przedstawione zostały w rozdziale piątym, na który składają się szczegółowe opisy czterech artykułów stanowiących podstawę rozprawy wraz z podsumowaniami. Rozdział szósty przedstawia wnioski płynące z przeprowadzonych badań. W dalszej części zebrana została literatura obejmująca 152 pozycje oraz dorobek naukowy pani mgr inż. Hanny Zagórskiej. Składa się na niego lista publikacji, zgłoszeń patentowych, wystąpień konferencyjnych i projektów, w których Doktorantka brała udział, a także staży naukowych, szkoleń oraz nagród i wyróżnień.



Kolejno dołączone zostały kopie artykułów naukowych stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej oraz oświadczenia współautorów, w tym również Autorki rozprawy, w których w sposób jasny i niebudzący zastrzeżeń określono zakres udziału poszczególnych osób w przygotowaniu artykułów.

Rozprawa doktorska pani mgr inż. Hanny Zagórskiej bazuje na poniższych artykułach naukowych:

- A1. H. Głowienke, A. Pancielejko, M. Miodynska, A. Gołąbiewska, E. Gontarek-Castro, T. Klimczuk, M. Krawczyk, M. Pawlyta, A. Zaleska-Medynska, *Novel room-temperature synthesis of pioneering CsPbX₃@(Ce)UiO-66-Y hybrid nanomaterials for boosted photocatalytic hydrogen evolution*, Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry, 454 (2024) 115731
- A2. H. Zagórska, M. Pawlyta, T. Klimczuk, P. Mazierski, A. Zaleska-Medynska, A. Gołąbiewska, *Shape engineering of Janus-like nanoparticles based on SrTiO₃ perovskite*, Applied Surface Science, 689 (2025) 162475
- A3. H. Głowienke, S. Livraghi, W. Lisowski, T. Klimczuk, A. Mikołajczyk, D. Falkowski, G. Trykowski, M. Pawlyta, A. Zaleska-Medynska, A. Gołąbiewska, *From Janus nanoparticles to multi-headed structure – photocatalytic H₂ evolution*, International Journal of Hydrogen Energy, 59 (2024) 808-824
- A4. H. Zagórska, P. Mazierski, K. Matus, M. Pawlyta, M. Parlińska-Wojtan, J. Depciuch, K. Nikiforow, T. Klimczuk, A. Zaleska-Medynska, A. Gołąbiewska, *Multifunctional Pt-Ag Janus nanoparticles: photocatalytic H₂ generation and nanomotors activity observed by in-situ LC-TEM*, International Journal of Hydrogen Energy, 222 (2026) 154272

Analiza danych bibliometrycznych powyższych prac wskazuje, że zostały one opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, indeksowanych w bazie JCR, o współczynniku wpływu IF mieszczącym się w przedziale od 4,7 do 10,7 (sumarycznie 28,2). Łączna wartość IF wszystkich opublikowanych artykułów, których współautorką jest Doktorantka wynosi 60,6. Potwierdza to, że wyniki badań zostały opublikowane w czasopismach o wysokiej rozpoznawalności w obszarze fotokatalizy i materiałów funkcjonalnych oraz o wysokim poziomie badań prowadzonych przez Autorkę. Doktorantka brała również czynny udział w czterech międzynarodowych konferencjach naukowych, podczas których prezentowała wyniki swoich badań w formie plakatu naukowego. Dwukrotnie pełniła również rolę kierownika projektu badawczego oraz dwukrotnie była wykonawczynią w projektach krajowych i międzynarodowych. Doktorantka odbyła staż naukowy na Uniwersytecie w Turynie (Włochy) i ukończyła liczne szkolenia.

Wszystkie prace dołączone do rozprawy doktorskiej mają charakter wieloautorski (6 do 10 współautorów), co nie jest zaskakujące w przypadku eksperymentalnych prac naukowych wykorzystujących zaawansowaną aparaturę badawczą. Na podstawie dołączonych do pracy oświadczeń współautorów artykułów stwierdzam, że indywidualny wkład Autorki w przygotowanie poszczególnych publikacji nie budzi zastrzeżeń i pracę doktorską na nich bazującą można traktować jako samodzielną i wyodrębnioną część pracy zbiorowej. Podkreślić należy również, że we wszystkich artykułach pani mgr inż. Hanna Zagórska figuruje jako pierwsza autorka, co potwierdza jej istotny wkład w powstanie przedstawionych prac.



Praca A1 poświęcona jest otrzymywaniu hybrydowych fotokatalizatorów $\text{CsPbX}_3@(\text{Ce})\text{UiO-66-Y}$, w których halogenkowe perowskity CsPbBr_3 lub CsPbI_3 połączono z cerowymi strukturami MOF różniącymi się grupą funkcyjną linkera. Materiały przygotowano metodą ligand-assisted reprecipitation w temperaturze pokojowej. Rozbudowana preparatyka uwzględniała wpływ rozpuszczalnika, stabilizatorów, oczyszczania oraz kolejności dodawania reagentów. Takie podejście pozwoliło na określenie wpływu warunków syntezy na właściwości otrzymanych próbek. Wykazano, że zastosowanie $(\text{Ce})\text{UiO-66-NH}_2$ prowadzi do poprawy aktywności fotokatalitycznej względem pojedynczych komponentów układu hybrydowego. Na podkreślenie zasługuje tu przede wszystkim kompleksowa optymalizacja syntezy hybryd perowskit/MOF, obejmująca nie tylko dobór składu, lecz także warunki przygotowania materiału. Istotne jest również wykazanie, że połączenie CsPbI_3 z $(\text{Ce})\text{UiO-66-NH}_2$ wpływa zarówno na aktywność, jak i na czas pracy fotokatalizatora.

Na perowskitach, a konkretnie na tytanianie strontu SrTiO_3 , bazuje również praca A2, która poświęcona jest otrzymywaniu nanostruktur modyfikowanych srebrem, złotem oraz układem Ag/Au . Podjęto w niej temat oceny aktywności fotokatalitycznej heteroukładów w kierunku wydzielania wodoru. W pracy otrzymano oraz poddano badaniom proszki SrTiO_3 znacznie różniące się rozmiarem i morfologią. Aby otrzymać charakterystyczne struktury typu Janus modyfikowano warunki prowadzenia syntezy co okazało się skuteczne. W pracy tej wykazano, że sposób osadzenia metalu na powierzchni SrTiO_3 zależy zarówno od parametrów syntezy, jak i od rozmiaru oraz kształtu cząstek perowskitu. Najkorzystniejsze wyniki fotokatalityczne uzyskano dla układu łączącego małe cząstki SrTiO_3 ze srebrem. Powiązane zostały również w sposób systematyczny warunki syntezy z morfologią struktur $\text{SrTiO}_3\text{-Ag}/\text{Au}$ oraz ich aktywnością fotokatalityczną. Szczególnie istotne wydaje się być wykazanie, że o efektywności generowania wodoru nie decyduje jedynie obecność metalu szlachetnego, ale istotny jest także sposób jego osadzenia na powierzchni SrTiO_3 .

Metale szlachetne są motywem powracającym w artykule A3, który poświęcony jest syntezie nanostruktur ZnS-Ag oraz określeniu wpływu stężenia prekursora srebra na ich morfologię, skład powierzchniowy i aktywność fotokatalityczną. W pracy wykazano, że warunki syntezy cząstek srebra na powierzchni ZnS decydują o morfologii układu i prowadzić mogą do uzyskania struktur typu snowman, układów typu Janus z kilkoma głowami oraz struktur wielogłowych. Z kolei fotoaktywność struktur powiązana jest z ich morfologią, w szczególności zaś z asymetrią struktur ZnS-Ag . Na podkreślenie zasługuje tu uzyskanie kontrolowanego przejścia od struktur typu snowman do układów wielogłowych poprzez zmianę stężenia prekursora srebra.

Kontynuację badań przedstawionych w pracach A2 i A3 stanowi praca A4, która poświęcona jest otrzymywaniu nanocząstek typu Janus Pt-Ag oraz ich zastosowaniu jako kokatalizatorów osadzonych na SrTiO_3 w reakcji fotokatalitycznego wydzielania wodoru. Otrzymane nanostruktury składają się z nanokostki platyny połączonej z domeną srebra, której rozmiar zależy od ilości użytego prekursora AgNO_3 . Na bazie tych nanocząstek przygotowano serie fotokatalizatorów $\text{SrTiO}_3@(\text{Pt-Ag})$ i $\text{SrTiO}_3@(\text{Pt})$ o różnej zawartości platyny względem SrTiO_3 . Na podkreślenie zasługuje tu połączenie w jednej klasie nanostruktur typu Janus Pt-Ag funkcji fotokatalitycznej i samoczynnego poruszania się cząstek. Zastosowana metoda in-situ LC-TEM dała możliwość obserwacji ruchu nanocząstek w środowisku H_2O_2 w czasie rzeczywistym.



Po zapoznaniu się z artykułami stanowiącymi podstawę rozprawy doktorskiej stwierdzam, że tworzą one spójny cykl poświęcony projektowaniu, otrzymywaniu i charakterystyce nanomateriałów hybrydowych do fotokatalitycznego generowania wodoru. Ich wspólnym elementem jest poszukiwanie zależności pomiędzy budową badanych układów, w tym morfologią, składem powierzchniowym i charakterem interfejsu, a ich aktywnością fotokatalityczną. W mojej ocenie założony cel rozprawy został osiągnięty, ponieważ przedstawione wyniki pozwalają lepiej zrozumieć wpływ struktury materiałów hybrydowych na efektywność procesu wydzielania wodoru. Analiza treści rozprawy pani mgr inż. Hanny Zagórskiej doprowadziła mnie do sformułowania następujących pytań.

1. W jakim stopniu materiał $\text{SrTiO}_3\text{@Pt-Ag}$ można uznać za stabilny po 20 h reakcji, biorąc pod uwagę, że analiza ICP-MS wskazuje częściowe wymywanie Pt i Ag? Czy po reakcji potwierdzono zachowanie rzeczywistej struktury typu Janus Pt-Ag na powierzchni SrTiO_3 ?
2. Czy poprawę aktywności fotokatalitycznej heterostruktur Pt-Ag/ SrTiO_3 można jednoznacznie przypisać asymetrycznej architekturze typu Janus, a nie wyłącznie efektowi bimetaliczności? Czy wykonano próbę kontrolną z nieasymetryczną mieszaniną nanocząstek Pt i Ag osadzonych na SrTiO_3 ?
3. Na ile ruch nanomotorów obserwowany techniką LC-TEM można przypisać samoelektroforezie wynikającej z asymetrycznej struktury Pt-Ag? Czy zostały przeprowadzone eksperymenty pozwalające wykluczyć wpływ przepływu cieczy, oddziaływania wiązki elektronowej lub lokalnych gradientów stężenia H_2O_2 ?
4. W układach ZnS-Ag większa ilość AgNO_3 prowadzi do wzrostu zawartości srebra i poszerzenia absorpcji w zakresie światła widzialnego, ale jednocześnie do spadku aktywności fotokatalitycznej. Który czynnik może o tym decydować?
5. Jak można wyjaśnić wzrost aktywności próbki ZnS-Ag-2 w kolejnych cyklach generowania wodoru, mimo obserwowanej przebudowy powierzchni materiału?
6. W pracy A2 zaobserwowano odmienne działanie Ag i Au w modyfikacji SrTiO_3 : Ag wyraźnie zwiększa aktywność fotokatalityczną, natomiast Au w serii STO1 ją obniża. Jak można wyjaśnić tak wyraźną różnicę w oddziaływaniu tych metali z SrTiO_3 ?
7. Dla hybryd $\text{CsPbX}_3\text{@(Ce)UiO-66-Y}$ najkorzystniejszy efekt uzyskano dla materiału funkcjonalizowanego grupą $-\text{NH}_2$. Czy można wskazać, które cechy strukturalne lub elektronowe tego układu mają kluczowe znaczenie dla poprawy aktywności fotokatalitycznej?
8. W pracy A1 wykazano, że zmiana kolejności dodawania reagentów nie wpływa znacząco na strukturę krystaliczną, natomiast wyraźnie zmienia aktywność fotokatalityczną. Które właściwości materiału mogą mieć kluczowe znaczenie dla tych różnic aktywności?

Rozprawa doktorska autorstwa pani mgr inż. Hanny Zagórskiej zawiera bogaty materiał badawczy. Doktorantka bardzo dobrze opanowała nietatwy warsztat badawczy oraz nabyła umiejętność analizy wyników badań otrzymanych z wykorzystaniem zaawansowanych technik pomiarowych. Sposób prowadzenia analizy wyników oraz formułowania opartych na niej wniosków świadczy o dużej dojrzałości naukowej Autorki. Na podkreślenie zasługuje



również fakt, że praca została napisana spójnym, naukowym językiem i jest starannie opracowana. Podsumowując, pracę oceniam bardzo wysoko.

Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę wszystkie wskazane walory recenzowanej pracy, stwierdzam, że rozprawa doktorska pani mgr inż. Hanny Zagórskiej spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). W związku z tym wnoszę do Rady Dyscypliny Nauki Chemiczne Uniwersytetu Gdańskiego o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Biorąc pod uwagę wysoki poziom przeprowadzonych badań, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Hanny Zagórskiej.

Uzasadnienie wyróżnienia

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Hanny Zagórskiej jest uzasadniony wysokim poziomem naukowym przeprowadzonych badań, ich spójnością tematyczną oraz znaczącą wartością poznawczą w obszarze projektowania nanomateriałów hybrydowych do fotokatalitycznego generowania wodoru. Założony cel pracy, dotyczący pogłębienia wiedzy na temat związku pomiędzy budową struktur hybrydowych a ich aktywnością fotokatalityczną, został osiągnięty. Doktorantka wykazała, że efektywność badanych układów wynika nie tylko z ich składu chemicznego, lecz także z morfologii, składu powierzchniowego, właściwości optycznych oraz charakteru kontaktu międzyfazowego.

Na szczególne podkreślenie zasługuje szeroki zakres wykonanych prac eksperymentalnych, obejmujących syntezę wielu serii materiałów, kontrolę morfologii nanostruktur oraz zaawansowaną charakterystykę fizykochemiczną. Szczególnie wartościowe jest podjęcie badań nad układami typu Janus i Janus-like, w tym nad strukturami Pt-Ag/SrTiO₃ oraz ZnS-Ag, a także wykazanie, że sama obecność metalu szlachetnego nie jest wystarczająca do uzyskania wysokiej aktywności fotokatalitycznej.

O wysokiej wartości rozprawy świadczy również fakt, że jej podstawę stanowią cztery artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, indeksowanych w bazie JCR. We wszystkich tych pracach Doktorantka jest pierwszą autorką, co potwierdza jej wiodący udział w realizacji badań i przygotowaniu publikacji. Biorąc pod uwagę oryginalność podjętej tematyki, jakość zgromadzonego materiału doświadczalnego, poziom zastosowanych metod badawczych oraz dużą dojrzałość naukową Autorki, uznaję wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej za w pełni uzasadniony

A. Trewnicki-Lafae
.....