

dr hab. inż. Klaudiusz Grübel, prof. UBB
Uniwersytet Bielsko-Bialski
Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

Bielsko-Biała, 1.12.2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Zahra Askarniya
pt. „Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique
for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid”
(Badania nad zastosowaniem kawitacji akustycznej, jako techniki wstępnego
przetwarzania wsadu na bazie odpadów spożywczych do procesu fermentacji
w celu produkcji kwasu mlekowego)**

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 27/2025 z dnia 8 października 2025 roku Politechniki Gdańskiej oraz pismo numer 783/WILiŚ/2025 z dnia 20 października 2025 roku Pani Dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska prof. dr hab. inż. Ewy Wojciechowskiej.

Ocena tematyki podjętych badań

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy aktualnego problemu możliwości prowadzenia kofermentacji odpadów spożywczych z osadami ściekowymi. Doktorantka podjęła się wyjaśnienia możliwości zastosowania ultradźwięków do indukowania zjawiska kawitacji akustycznej w celu wstępnego przetworzenia wsadu do procesu fermentacji. W tym celu zostały wykorzystane odpady spożywcze oraz ryż wstępnie dezintegrowane ultradźwiękami.

Jak powszechnie wiadomo, zastosowanie metod dezintegracyjnych (do których zalicza się wykorzystanie ultradźwięków) do osadów ściekowych oraz odpadów przed procesem stabilizacji beztlenowej przyczynia się do przyspieszenia pierwszego etapu fermentacji, tj. hydrolizy, a tym samym do intensyfikacji procesu fermentacji (zwiększonej produkcji biogazu, zwiększonego wydatku). Doktorantka skupiła się w swojej pracy nie tyle na intensyfikacji procesu, co na ukierunkowaniu badań w celu produkcji kwasu mlekowego.

Kawitacja akustyczna ma znaczny potencjał do zastosowania jako technika obróbki wstępnej przed procesem fermentacji. Jej powstawanie w trakcie generowania fali ultradźwiękowej jest dynamicznym procesem obejmującym szybkie powstawanie, wzrost i zapadanie się pęcherzyków kawitacyjnych w cieczy. Towarzyszą temu intensywne efekty mechaniczne, w tym powstawanie mikrostrumieni, fali uderzeniowych i naprężeń ścinających. Te ekstremalne warunki powodują szybki transfer energii, zrywanie wiązań molekularnych i rozkład materiałów organicznych. Kompresja gazu i pary wewnątrz pęcherzyków wytwarza lokalne, wysokie temperatury i ciśnienia, co prowadzi do zmian cząsteczek wody i wytwarzania reaktywnych form, takich jak $\cdot\text{OH}$, $\text{HO}_2\cdot$ i H_2O_2 , uważanych za chemiczny efekt kawitacji.

Te reaktywne formy mogą inicjować reakcje łańcuchowe, które z kolei mogą rozkładać złożone cząsteczki na prostsze związki. Rozbijając struktury komórkowe, a tym samym powodując uwalnianie materiałów wewnątrzkomórkowych, kawitacja zwiększa rozpuszczanie materii organicznej. W rezultacie związki te stają się łatwiej dostępne i mogą być szybko oraz skutecznie metabolizowane przez drobnoustroje odpowiedzialne np. za proces fermentacji, powodując bardziej wydajny i przyspieszony proces biokonwersji.

Doktorantka w pracy podjęła się porównania dwóch częstotliwości stosowanych ultradźwięków (częstotliwość 24 kHz lub 120 kHz) wykorzystanych w celu zwiększenia wstępnie rozpuszczonej (dostępnej) materii organicznej, wyrażonej, jako stężenie rozpuszczonego chemicznego zapotrzebowania na tlen (sChZT) we wsadzie do procesu fermentacji.

Poza badaniami wpływu częstotliwości i mocy ultradźwięków na uwalnianie materii organicznej i późniejszą produkcję kwasu mlekowego oraz lotnych kwasów tłuszczowych w procesie fermentacji, Doktorantka podjęła się zbadania również wpływu ultradźwięków w połączeniu z odczynnikami chemicznymi, w tym kwasem (HCl), zasadą (NaOH) i substancją utleniającą (H₂O₂). Dla wytypowanych warunków procesowych, z zastosowaniem wsadu w postaci modelowego odpadu (ryżu) i rzeczywistych odpadów żywnościowych, przeanalizowała wpływ czasu trwania procesu w reaktorze ultradźwiękowym na wzrost rozpuszczonego sChZT oraz późniejszą produkcję kwasu mlekowego i lotnych kwasów tłuszczowych.

Wyniki badań jednoznacznie wykazały duży potencjał kawitacji akustycznej jako skutecznej techniki wstępnej obróbki wsadu, zapewniającej intensyfikację produkcji kwasu mlekowego w procesie fermentacji odpadów żywnościowych. Doktorantka w ramach swojej pracy przeprowadziła również analizę mikrobiologiczną (16S rRNA) w celu identyfikacji dominujących mikroorganizmów w fermentowanych próbkach. Końcowym elementem badań było wykonanie analizy ekonomicznej w celu określenia opłacalności i zasadności zastosowania wstępnej obróbki ultradźwiękowej do procesów fermentacji.

W nawiązaniu do powyższego, uważam, że podjęta przez Doktorantkę tematyka badawcza jest aktualna oraz interesująca pod względem poznawczym oraz praktycznym.

Charakterystyka i struktura rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Zahra Askarniya pt. „Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid” (Badania nad zastosowaniem kawitacji akustycznej jako techniki wstępnego przetwarzania wsadu na bazie odpadów spożywczych do procesu fermentacji w celu produkcji kwasu mlekowego) zawiera 123 strony, plus dodatkowo wykaz osiągnięć Doktorantki. Rozprawa podzielona jest na pięć głównych części wraz z rozdziałami i podrozdziałami oraz została uzupełniona o spis tabel i rysunków, zestawienie użytych skrótów i oznaczeń oraz bibliografię.

W pierwszej części rozprawy Doktorantka przedstawiła zagadnienia dotyczące charakterystyki odpadów spożywczych oraz metod postępowania z nimi, tj. opisany został proces spalania, zgazowania, kompostowania, produkcji biodiesla, produkcji adsorbentów i biopolimerów, odzysku enzymów oraz fermentacji beztlenowej. W dalszej kolejności Doktorantka dokonała charakterystyki procesów wstępnej obróbki, takich jak: metody mechaniczne (mielenie), metody biologiczne, metody termiczne (ogrzewanie i promieniowanie mikrofalowe), metody chemiczne (z wykorzystaniem kwasów i zasad, środków utleniających, zjawiska kawitacji) oraz wybranych tzw. zaawansowanych metod utleniania – procesów opartych na wykorzystaniu nadtlenu wodoru i ozonu. Opisany został również proces Fentona.

Ostatnim rozdziałem w tej części jest charakterystyka ultradźwięków i powstającej kawitacji akustycznej. Doktorantka szczegółowo przedstawiła podstawowe parametry ultradźwięków, tj. stosowane częstotliwości, stosowane moce ultradźwięków, czas trwania procesu dezintegracji ultradźwiękowej oraz stężenia surowców w reaktorach ultradźwiękowych.

Po części wstępu teoretycznego (od 6 do 44 strony), którego treść jest związana z podejmowanym zagadnieniem badawczym, zamieszczona została część praktyczna. Rozpoczyna się ona od celu pracy, następnie przedstawiona została metodyka prowadzonych badań oraz uzyskane wyniki wraz z dyskusją i wnioskami.

W tym miejscu należy stwierdzić, że sformułowane przez Doktorantkę cele pracy zostały poprawnie zrealizowane i dowiedzione.

Przedstawiony przez Doktorantkę zakres zastosowanej metodologii badawczej jest precyzyjny i poprawnie przedstawiony. W metodyce brakuje jednak informacji o czasie trwania pierwszej fazy hydrolizy i metody określenia jej zakończenia. Również nie opisano zbyt starannie, czy próbka poddana procesowi dezintegracji ultradźwiękowej przy pomocy sonotrody była mieszana – jest to istotna informacja, ponieważ sonotrody działają w niewielkim obszarze, a stosowane odpady spożywcze na pewno cechowały się wysoką gęstością. Dodatkowo brakuje w pracy charakterystyki uzyskiwanej „pulpy” ryżowej (masy, gęstości, uwodnienia) oraz mieszanki spożywczej (suchej masy i suchej masy organicznej). W pracy jest podany tylko skład ze względu na pochodzenie.

Uzyskane wyniki przedstawione zostały w formie graficznej oraz tabelarycznej. Sposób prezentacji uzyskanych wyników jest w większości pracy poprawny. Można tylko mieć drobne zastrzeżenia co do rysunku 9, 10, 11, 18, 19, gdzie na osi X, wyniki nie zostały przedstawione w sposób rosnący lub kolejności działań badawczych (ciągu logicznego), co ułatwiłoby interpretację. Nie umniejsza to jednak prezentacji uzyskanych rezultatów. Rozdziały prezentują ciąg logiczny: uzasadnienie problemu → metodologia → wyniki → analiza → wnioski. Interpretacje są poprawne i oparte na danych, co dowodzi samodzielnego myślenia naukowego.

Doktorantka zakończyła rozprawę zwięzłym podsumowaniem oraz wyszczególnieniem najważniejszych wniosków, które wynikają z przeprowadzonych eksperymentów badawczych.

Doktorantka skorzystała z 230 pozycji literaturowych, które zostały wyszczególnione na końcu rozprawy.

Stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska posiada właściwą strukturę, a zidentyfikowane drobne błędy redakcyjne nie wpływają negatywnie na jej wartość merytoryczną. Rozprawa doktorska prezentuje posiadanie przez Panią mgr inż. Zahra Askarniya ogólnej wiedzy teoretycznej.

Główne osiągnięcie wynikające z rozprawy doktorskiej

W ramach niniejszej pracy Doktorantka przeprowadziła badania wpływu zastosowania ultradźwiękowej dezintegracji odpadów spożywczych, a następnie oceny intensyfikacji produkcji kwasu mlekowego w procesie kofermentacji. Praca wypełnia zidentyfikowaną przez Doktorantkę „lukę” badawczą dotyczącą wiedzy w zakresie zastosowania ultradźwięków, indukujących kawitację akustyczną, do intensyfikacji produkcji kwasu mlekowego z fermentacji odpadów spożywczych. Zaproponowane przez Doktorantkę przekształcanie odpadów w wartościowe produkty, to skuteczny sposób na zmniejszenie ich ilości i wsparcie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Jak słusznie zauważyła Doktorantka, jedną ze skutecznych metod recyklingu odpadów spożywczych jest wykorzystanie ich jako surowca w procesach biotechnologicznych, takich jak fermentacja beztlenowa. W tych procesach hydroliza jest kluczowym, początkowym etapem, często działającym jako etap limitujący/ograniczający szybkość całego procesu, ze względu na złożoność strukturalną materiału organicznego poddawanego fermentacji. Aby sprostać temu wyzwaniu, stosować można metody obróbki wstępnej w celu modyfikacji struktury surowców, zwiększenia tempa hydrolizy i poprawy ogólnych warunków procesowych.

Kwas mlekowy, to cenny związek o szerokim zastosowaniu. Mieszanina izomerów kwasu mlekowego, głównie kwasu L-mlekowego i kwasu D-mlekowego, może być wytwarzana przez mikroorganizmy fermentujące. Podjęty temat jest ważny, ponieważ kwas mlekowy ma duże znaczenie przemysłowe i biomedyczne. Podczas beztlenowego rozkładu bakterie kwasu mlekowego wykorzystują cukry do wytwarzania kwasu mlekowego, ale powolna hydroliza jako pierwszy etap fermentacji, może ograniczyć produkcję tego związku.

Doktorantka w przeprowadzonych badaniach wykorzystując ryż (modelowy odpad żywnościowy), a także rzeczywiste odpady żywnościowe (pochodzące ze stołówki) jako surowce, starała się ocenić wpływ ich dozowania na proces fermentacji. Doktorantka przeprowadziła badania obejmujące wielowymiarową analizę parametrów, tj. częstotliwości ultradźwięków, zastosowanej mocy, czasu trwania procesu dezintegracji, stężenia wsadu oraz synergistycznego działania połączonych ultradźwięków z HCl, NaOH lub H₂O₂. Wszystkie te parametry starała się przeanalizować pod kątem uwalniania sChZT, produkcji kwasu mlekowego oraz LKT.

W pracy nie zostały postawione wprost, w formie klasycznej, „tezy badawcze”, ale cel pracy i problemy badawcze są jasno zdefiniowane w rozdziale „*Aim and objectives*”. Doktorantka nie używa słowa „hipoteza” ani „teza”, jednak formułuje zestaw celów

szczegółowych, które pełnią tę samą funkcję. Zatem te tezy badawcze, wraz z ich udowodnieniem, można zapisać jako:

1. Kawitacja akustyczna może skutecznie zwiększyć rozpuszczalność (sChZT) odpadów spożywczych, co przełoży się na intensyfikację produkcji kwasu mlekowego i LKT w procesach fermentacyjnych.

Potwierdzenie w rozprawie: W badaniach dotyczących wpływu mocy ultradźwięków na uwalnianie ChZT i wynikającą z tego produkcję kwasu mlekowego i LKT w procesie fermentacji ryżu przez osad beztlenowy, uzyskana wysoki wzrost efektywności. Zwiększenie mocy ultradźwięków ze 100 W/L do 400 W/L spowodowało ciągły wzrost wartości ChZT i ilości produkowanego kwasu mlekowego. Wstępna obróbka w sono-LF przy gęstości mocy 400 W/L i stężeniu ryżu 5% w/v przez 30 minut, doprowadziła do wzrostu rozpuszczonego sChZT o 555%, a następnie w procesie fermentacji, do wzrostu o 92% stężenia kwasu L-mlekowego (z 5,2 g ChZT/L do 10 g ChZT/L), o 43% wzrostu stężenia kwasu D-mlekowego i o 15% wzrostu całkowitych LKT, w porównaniu z procesem kontrolnym (fermentacja bez obróbki wstępnej).

2. Reaktor niskoczęstotliwościowy (sono-LF; 24 kHz) jest skuteczniejszy od wysokoczęstotliwościowego (sono-HF; 120 kHz) w procesie uwalniania materii organicznej. Potwierdzenie w rozprawie: Sono-LF (24 kHz) spowodowało wzrost sChZT o 477%, a zastosowanie Sono-HF (120 kHz) spowodowało wzrost sChZT o 48%.

3. Zwiększenie gęstości mocy ultradźwięków prowadzi do wzrostu rozpuszczonej materii organicznej sChZT i wydajności fermentacji – ale do pewnego optymalnego progu/poziomu. Potwierdzenie w rozprawie: Zastosowane moce ultradźwięków 100, 300 i 400 W/L spowodowały wzrost rozpuszczonej materii organicznej (sChZT) odpowiednio o 82%, 477% i 555%. Doktorantka zauważyła, że różnica między 300 a 400 W/L była niewielka, co wytłumaczyła efektem nasycenia.

4. Połączenie ultradźwięków z reagentami chemicznymi (HCl, NaOH, H₂O₂) dodatkowo zwiększa solubilizację i produkcję kwasu mlekowego.

Potwierdzenie w rozprawie: Połączenie ultradźwięków (sono-LF, 400 W/L, 5% w/v ryżu) z kwasem (HCl, pH=3) i zasadą (NaOH, pH=11) podczas obróbki wstępnej, doprowadziło do znacznego wzrostu ChZT surowca, odpowiednio o 750% i 625%, po 30 minutach obróbki wstępnej. Obróbka wstępna ryżu, przy pomocy kwasu oraz ultradźwięków, spowodował 100% wzrost kwasu D-mlekowego i 29% wzrost całkowitych LKT. Z kolei, połączenie zasady i ultradźwięków na etapie obróbki wstępnej, spowodowało wzrost produkcji kwasu D-mlekowego o 104%. Dodatkowo, połączenie ultradźwięków z H₂O₂ (500 ppm) przyczyniło się do wzrostu sChZT o 615%, a produkcja kwasu D-mlekowego wzrosła w procesie fermentacji o 109%. Doktorantka odnotowała jednak, że nie zawsze wzrost uwolnienia materii organicznej przekładał się na wyższy uzysk kwasu mlekowego.

W przypadku rzeczywistych odpadów spożywczych, przy użyciu ultradźwięków (sono-LF, 400 W/L, 5% w/v), wydłużenie czasu trwania obróbki wstępnej ultradźwiękami z 10 do 30 minut, doprowadziło do wzrostu uwolnionego sChZT z 275% do 492%. Fermentacja

rzeczywistych odpadów spożywczych, przeprowadzona za pomocą osadu tlenowego oraz osadu beztlenowego, przyczyniła się do produkcji kwasu L-mlekowego. W próbce z osadem tlenowym i obróbką wstępną surowca, przez 30 minut odnotowano 40% wzrost ilości produkowanego kwasu L-mlekowego. Jednakże, dla próbek z osadem beztlenowym, odnotowany wzrost ilości produkowanego kwasu D-mlekowego i LKT, był wyraźnie wyższy. W tych warunkach dla surowca poddanego wstępnej obróbce (przez 10 minut), odnotowano 190% wzrost produkcji kwasu D-mlekowego i 284% wzrost całkowitych LKT.

Co więcej, zwiększenie stężenia odpadów spożywczych w reaktorze ultradźwiękowym (sono-LF, 400 W/L, 30 minut), z 3% do 7% w/v, znacznie podniosło uwolnioną materię organiczną sChZT - z 213% do 582%. Doprowadziło to również do dalszego wzrostu produkcji kwasu mlekowego (dla dawki 7% w/v odnotowano 88% wzrostu kwasu L-mlekowego i 200% wzrostu kwasu D-mlekowego – przy osadzie beztlenowym, oraz 103% wzrost produkcji kwasu L-mlekowego i 156% wzrost produkcji kwasu D-mlekowego – przy osadzie tlenowym). Dodatkowo zmieniła się mikroflora w mieszankach fermentacyjnych, tzn. nastąpił spadek liczebności *Limosilactobacillus*, wzrost *Lactobacillus* i *Clostridium*.

5. Czas trwania i stężenie wsadu, mają istotny wpływ na efektywność kawitacji i produkty fermentacji.

Potwierdzenie w rozprawie: Doktorantka wytypowała jako optymalny czas wstępnej dezintegracji, 20–30 min trwania procesu wstępnego i 5% w/v do fermentacji. Wynioskowała również, na podstawie przeprowadzonych badań, że dłuższy czas procesu wstępnego, lub wyższe stężenie, powoduje mniejsze efekty, tłumacząc to efektem nasycenia i pojawianiem się inhibitorów.

Doktorantka, dodatkowo dokonała analizy ekonomicznej procesów. W przypadku wykorzystania ryżu, jako modelowego substratu, połączenie ultradźwięków (sono-LF, 400 W/L) z 500 ppm H₂O₂, okazało się ekonomicznie opłacalne, przynosząc oszczędności netto w wysokości 156 EUR na tonę (wstępnie poddanego obróbce surowca). W przypadku rzeczywistych odpadów spożywczych, najbardziej opłacalnym wariantem, okazała się 10-minutowa ultradźwiękowa obróbka wstępna (sono-LF, 400 W/L), a następnie fermentacja z osadem beztlenowym, co przyniosło oszczędności w wysokości 216 euro na tonę (wstępnie przetworzonego surowca).

Tak szerokie wykorzystanie metod eksperymentalnych i analitycznych, potwierdza wysoki poziom naukowy pracy. Przedstawione przez Doktorantkę wyniki badań stanowią wkład w rozwój metod kofermentacji, z ukierunkowaniem na produkcję kwasu mlekowego i tym samym rozszerzają dostępną wiedzę w zakresie metod stabilizacji beztlenowej, w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Badania te wskazują na znaczny potencjał poprawy gospodarowania odpadami, poprzez zaoferowanie praktycznej metody obróbki wstępnej, zwiększającej możliwość przekształcania odpadów spożywczych w produkty o wysokiej wartości uzyskiwane w procesach fermentacji. Uważam, że przeprowadzone badania pozwoliły Doktorantce opanować odpowiedni zakres wiedzy oraz

pozyskać umiejętność prowadzenia badań naukowych, w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Przedstawione w dysertacji wyniki badań, są pierwszymi kompleksowymi badaniami wpływu kawitacji akustycznej na produkcję kwasu mlekowego z odpadów żywnościowych. Ogólnie rzecz ujmując, badania te stanowią solidną podstawę do przyjęcia zaawansowanych technik obróbki wstępnej w bioinżynierii, co może mieć wpływ na przyszłe badania nad produkcją energii odnawialnej i syntezą bioproduktów.

Wysoka ranga publikacji wynikowych (łączny IF 49.5 z 6 publikacji) potwierdza, że wyniki mają charakter oryginalny i interesujący dla międzynarodowej społeczności naukowej. Ponadto udział w konferencjach i stażu zagranicznym (Denmark, Aarhus University of Technology, Department of Biological and Chemical Engineering - Environmental Engineering), wskazuje na aktywność naukową, umiejętność prezentowania wyników i współpracy ze środowiskiem badawczym.

Zagadnienia wymagające wyjaśnienia (uwagi dyskusyjne)

Rozdział 3.1.2.

1. Nie podano czasu gotowania ryżu – nie wiadomo, co oznacza jednolita konsystencja. Uzyskano „pulpę” ryżową, ale nie podano jej charakterystyki.
2. Ile razy pobierano surowiec ze stołówki? Ile powtórzeń?

Rozdział 3.1.3

3. Czy osad tlenowy był napowietrzany? Jak długo go przechowywano? Został wykorzystany do tlenowej stabilizacji?
4. Osad dla fermentacji z ryżem charakteryzował się wysokim udziałem VSS - 79,18%, czy tak jest zawsze? Taka jest charakterystyka osadu?
5. Jakie było stężenie TSS i VSS dla osadów rzeczywistych?
6. Dlaczego osad przechowywano w 20°C? Czy w takich warunkach prowadzono stabilizację tlenową?
7. Co oznaczają optymalne warunki dla wydajności mikrobiologicznej? Chodzi o krzywą wzrostu mikroorganizmów? Jak, w takim razie, ustalono optimum?
8. Nie podano, jak mieszano ryż i odpady spożywcze z osadami? Na jakiej podstawie wybrano dawki?

Rozdział 3.2.

9. Dlaczego zastosowano sonotrodę, a nie np. wanny ultradźwiękowe lub kanały? Jak zapewniano równomierną dezintegrację?

Rozdział 3.4.

10. Na jakiej podstawie wybrano stosunek inoculum do substratu 1:4, a później 1:6?
11. Czy na pewno w procesie fermentacji, temperatura była zawsze 35°C? Nie ulegała lekkim wahaniom? Jak ją utrzymywano? Reaktory fermentacji miały pojemność 500 ml – ile jednocześnie reaktorów fermentowało?
12. Jak ustalano pH równe 7? Z jakiej wartości należało je korygować?

Rozdział 3.5.6.

13. Czy biomasa fermentująca zmieniła się wskutek wprowadzenia ryżu lub odpadów spożywczych? Jak długo przed fermentacją pracowały osady? Czy nie było to nagłe i szokowe?
14. Jak Doktorantka ustaliła, że 5 lub 7 dni to koniec etapu hydrolizy?

Pytania pozostałe:

15. Zakładając przeniesienie wyników badań do skali technicznej, jak Doktorantka wyobraża sobie wydzielenie produkcji kwasu mlekowego na potrzeby gospodarcze? Jak go oddzielić od procesu fermentacji? Czy jego wyodrębnienie nie spowoduje zatrzymania procesu? Co zrobić dalej po 5-7 dniach z mieszkanką fermentacyjną? Czy ewentualne wyodrębnienie kwasu mlekowego nie spowoduje zahamowania fermentacji i produkcji biogazu/wydatku?
16. Jakie są potencjalne zastosowania kwasu mlekowego pozyskanego z takiego procesu i jakie korzyści daje tak wyprodukowany kwas mlekowy, w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym?
17. Czy metodyka ekonomiczna nie pomija kluczowych kosztów, ważnych przy ocenie zastosowań przemysłowych (np. utrzymania reaktora ultradźwiękowego, zapotrzebowania energetycznego, kosztu odczynników)?
18. Czy dwukrotne powtórzenie badań jest wystarczające i pozwala wyciągnąć poprawne wnioski? Brakuje wyraźnego, statystycznego potwierdzenia wyników (np. testów ANOVA, p-value), ale z kontekstu wynika, że różnice były znaczące i interpretacja uzasadniona. Zapewne analiza statystyczna również nie została przeprowadzona, z powodu przeprowadzenia tylko dwóch serii badań.
19. Jakie są ograniczenia kawitacji akustycznej w skali przemysłowej i czy mogą one stanowić jakieś zagrożenia technologiczne?
20. Dlaczego wybrano dane stężenia H_2O_2 , NaOH i HCl przy eksperymentach hybrydowych?
21. Czy wzrost sCOD korelował liniowo z produkcją kwasu mlekowego?
22. Czy przy wyższych koncentracjach/stężeniach wsadu nie pojawi się efekt tłumienia kawitacji?

Wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Zahra Askarniya pt. „Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid” (Badania nad zastosowaniem kawitacji akustycznej, jako techniki wstępnego przetwarzania wsadu na bazie odpadów spożywczych do procesu fermentacji w celu produkcji kwasu mlekowego) spełnia wymagania określone art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.).

Doktorantka posiada odpowiednią wiedzę oraz umiejętności do prowadzenia badań naukowych, w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Przedstawione w recenzji drobne uwagi i wątpliwości posiadają charakter dyskusyjny i nie wpływają negatywnie na wartość merytoryczną przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej. Praca spełnia wymogi oryginalności stawiane rozprawie doktorskiej, prezentuje wysoki poziom badań eksperymentalnych, dobrze udokumentowanych i naukowo uzasadnionych. Stanowi cenny wkład w rozwój metod biologicznego zagospodarowania i przetwarzania odpadów spożywczych.

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Zahra Askarniya pt. „Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid” (Badania nad zastosowaniem kawitacji akustycznej, jako techniki wstępnego przetwarzania wsadu na bazie odpadów spożywczych do procesu fermentacji w celu produkcji kwasu mlekowego) i dopuszczenie Jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Klaudiusz Grübel, prof. UBB

dr hab. inż. Klaudiusz Grübel, prof. UBB
Uniwersytet Bielsko-Bialski
Wydział Inżynierii Materiałów,
Budownictwa i Środowiska
ul. Willowa 2
43-309 Bielsko-Biała

Bielsko-Biała, 1.12.2025 r.

WNIOSEK O WYRÓŻNIENIE

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Zahra Askarniya

pt. „Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid”

(Badania nad zastosowaniem kawitacji akustycznej, jako techniki wstępnego przetwarzania wsadu na bazie odpadów spożywczych do procesu fermentacji w celu produkcji kwasu mlekowego).

promotor: dr hab. inż. Grzegorz BOCZKAJ, prof. PG

Zgodnie Regulaminem wyróżniania rozpraw doktorskich Politechniki Gdańskiej dla Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Kandydatka – mgr inż. Zahra Askarniya – spełnia dwa z warunków niezbędnych do wnioskowania o wyróżnienie i sprecyzowanych w Regulaminie tj.:

- rozprawa doktorska charakteryzuje się szczególnymi walorami poznawczymi i aplikacyjnymi,
- kandydatka jest pierwszym współautorem 6 artykułów o charakterze badawczym, opublikowanych w czasopismach posiadających Impact Factor, uwzględnionych w aktualnym wykazie czasopism naukowych. Cztery spośród tych artykułów znajdują się w kwartylu Q1 klasyfikacji czasopism wg wskaźnika CiteScore bazy Scopus,



Ph.D., D.Sc., Eng. Klaudiusz Grübel, prof. UBB
University of Bielsko-Biala
Faculty of Materials, Civil and Environment Engineering
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

Bielsko-Biala, 1 December 2025

Review of the doctoral dissertation of Zahra Askarniya, MSc, Eng.
„Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid”

The basis for the review is the Resolution of the Council of the Scientific Discipline of Environmental Engineering, Mining and Energy No. 27/2025 of 8 October 2025 of the Gdańsk University of Technology and the letter number 783/WILIŚ/2025 of 20.10.2025 by the Dean of the Faculty of Civil and Environmental Engineering, Prof. Ewy Wojciechowskiej.

Evaluation of the subject matter of the research undertaken

The doctoral dissertation focuses on the issue of co-fermenting food waste and sewage sludge. The PhD student set out to demonstrate how ultrasound can be used to induce acoustic cavitation as a pre-treatment for the fermentation process. For this purpose, food waste and rice pre-disintegrated by ultrasound were employed.

It is well known that applying disintegration methods (including ultrasound) to sewage sludge and waste before anaerobic stabilisation accelerates the first fermentation step (i.e. hydrolysis) and thus intensifies the fermentation process, increasing biogas production and yield of biogas. However, in her work, the PhD student focused more on producing lactic acid and volatile fatty acids than on intensifying the fermentation process.

Acoustic cavitation shows considerable potential as a pre-treatment technique prior to fermentation. It is formed during the generation of an ultrasonic wave, which involves the rapid formation, growth and collapse of cavitation bubbles in a liquid. This is accompanied by intense mechanical effects, including the formation of micro-jets, shock waves, and shear stresses. These extreme conditions result in the rapid transfer of energy, the breaking of molecular bonds and the breakdown of organic materials. The compression of gas and steam inside the bubbles creates high local temperatures and pressures, which lead to changes in water molecules and the production of reactive forms such as $\cdot\text{OH}$, $\text{HO}_2\cdot$ and H_2O_2 , which are considered to be the chemical effects of cavitation. These reactive forms can initiate chain reactions that break down complex molecules into simpler compounds. By breaking down cellular structures and thus causing the release of intracellular materials, cavitation increases the dissolution of organic matter.

These reactive forms can initiate chain reactions that break down complex molecules into simpler compounds. Cavitation increases the dissolution of organic matter by breaking down cellular structures and thus causing the release of intracellular materials. These compounds then become more readily available and can be quickly and efficiently

metabolised by the microorganisms responsible for processes such as fermentation, resulting in accelerated and more efficient bioconversion.

In the dissertation, the PhD student compared two frequencies of applied ultrasound (24 kHz and 120 kHz) in order to increase the concentration of dissolved chemical oxygen demand (COD) in the feed for the fermentation process.

Besides investigating the effect of ultrasound frequency and power on the release of organic matter and the subsequent production of lactic acid and volatile fatty acids in the fermentation process, the doctoral student also undertook to investigate the effect of ultrasound in combination with chemical reagents, including acid (HCl), alkali (NaOH) and oxidizing substance (H₂O₂). Using a batch of model waste (rice) and actual food waste under the selected process conditions, she analysed the effect of process duration in the ultrasonic reactor on the increase of dissolved COD and the subsequent production of lactic acid and volatile fatty acids.

The results of the study clearly demonstrated the great potential of acoustic cavitation as an effective feed pre-treatment technique for intensifying lactic acid production in the fermentation of food waste. Additionally, a 16S rRNA microbiological analysis was conducted to identify the dominant microorganisms in the fermented samples. Finally, an economic analysis was performed to determine the cost-effectiveness of applying ultrasonic pre-treatment to fermentation processes.

I therefore believe that the PhD student's research topic is both up to date and interesting in terms of both cognition and practice.

Characteristics and structure of the doctoral dissertation

Zahra Askarniya, MSc, Eng., has submitted her doctoral dissertation, entitled 'Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid', for evaluation. The dissertation contains 123 pages, plus a list of the doctoral student's achievements. The dissertation is divided into five main parts comprising chapters and sub-chapters and is supplemented by a list of tables and figures, a list of abbreviations and designations used, and a bibliography.

In the first part of the dissertation, the PhD student presented issues related to the characteristics of food waste and methods of dealing with it. The processes of incineration, gasification, composting, biodiesel production, the production of adsorbents and biopolymers, enzyme recovery, and anaerobic digestion were described. Subsequently, the PhD student characterised the pretreatment processes, including mechanical methods (grinding), biological methods, thermal methods (heating and microwave radiation), chemical methods (using acids, alkalis and oxidising agents) and selected advanced oxidation methods based on the use of hydrogen peroxide and ozone. The Fenton process was also described.

The final chapter of this section covers the characterisation of ultrasound and the resulting acoustic cavitation. The PhD student presented the basic parameters of ultrasound in detail, including the frequencies and ultrasonic powers used, the duration of the ultrasonic disintegration process, and the concentrations of raw materials in ultrasonic reactors.

Following the theoretical introduction (6–44 pages), which is related to the research issue, the practical section begins. This begins with the aim of the work and then presents the research methodology and results, along with a discussion and conclusions.

It should be noted at this point that the PhD student's goals have been correctly implemented and proven.

The doctoral student's research methodology is precise and well-presented. However, the methodology lacks information on the duration of the first phase of hydrolysis and how its completion is determined. It is also unclear whether the sample subjected to ultrasonic disintegration using a sonotrodes was mixed, which is important because sonotrodes operate in a small area and the food waste used was certainly high-density. Additionally, there is no explanation of the obtained rice 'pulp' (mass, density and hydration) or the food mixture (total solids, volatile solids). The paper only provides composition based on origin.

The results obtained are presented in graphical and tabular form. The presentation of the results is mostly correct. There are only minor reservations regarding Figures 9, 10, 11, 18 and 19, where the results are not presented in ascending order or in the order of the research activities (i.e. the logical sequence) on the X-axis. This would make the results easier to interpret. However, this does not detract from the presentation of the results. The chapters follow a logical sequence: justification of the problem, methodology, results, analysis and conclusions. The interpretations are correct and data-driven, proving independent scientific thinking.

The doctoral student concluded her dissertation with a concise summary and a list of the most significant findings resulting from the research experiments. She used 230 references, which are listed at the end of the dissertation.

I conclude that the submitted dissertation has the appropriate structure and that the minor editorial errors identified do not affect its substantive value. The doctoral dissertation presents the possession of general theoretical knowledge by Zahra Askarniya, MSc. Eng.

The main achievement resulting from the doctoral dissertation

As part of this work, the doctoral student conducted research into the impact of ultrasonically disintegrating food waste and assessed the effect on the intensification of lactic acid production in the co-fermentation process. This study addresses a research gap concerning the application of ultrasound to induce acoustic cavitation and intensify lactic acid production from food waste fermentation. Converting waste into valuable products is an effective way to reduce its quantity and support the principles of the circular economy, as proposed by the doctoral student. As the student rightly pointed out, an effective method of recycling food waste is to use it as a raw material in biotechnological processes, such as anaerobic fermentation. In these processes, hydrolysis is a key initial step which often acts as a rate-limiting step due to the structural complexity of the organic material being fermented. Pretreatment methods can address this challenge by modifying the structure of the raw materials, increasing the rate of hydrolysis and improving overall process conditions.

Lactic acid is a valuable compound with a wide range of applications. A mixture of lactic acid isomers, primarily L- and D-lactic acids, can be produced by fermenting microorganisms. This topic is important because lactic acid is of great industrial and biomedical significance. During anaerobic decomposition, lactic acid bacteria use sugars to produce lactic acid. However, slow hydrolysis in the initial stage of fermentation can restrict the production of this compound.

In her research, the doctoral student used rice (a model food waste product) and actual food waste (from a school canteen) as raw materials to assess the impact of their dosage on the fermentation process. The doctoral student conducted research involving a multidimensional analysis of parameters such as ultrasound frequency, power used, duration of the disintegration process, feedstock concentration, and the synergistic effect of combined ultrasound with HCl, NaOH, or H₂O₂. She attempted to analyse all these parameters in terms of sCOD release, lactic acid production, and VFA.

While the work does not explicitly state 'research theses' in the classical sense, the chapter 'Aim and objectives' clearly defines the work's aim and the research problems. Rather than using the words 'hypothesis' or 'thesis', the doctoral student formulates a set of specific objectives that serve the same function. Therefore, these research theses, together with their proof, can be written as follows:

1. Ultrasound (US) can effectively increase the solubility (sCOD) of food waste, intensifying lactic acid and VFA production in fermentation processes.

Confirmation in the dissertation: Studies on the effect of ultrasound power on COD release and the subsequent production of lactic acid and volatile fatty acids (VFA) during the anaerobic digestion of rice revealed a significant increase in efficiency. Increasing the ultrasonic power from 100 W/L to 400 W/L led to a continuous rise in COD values and lactic acid production. Pretreatment in sono-LF at a power density of 400 W/L and a rice concentration of 5% w/v for 30 minutes led to a 555% increase in dissolved COD. This was followed by a 92% increase in L-lactic acid concentration (from 5.2 g COD/L to 10 g COD/L), a 43% increase in D-lactic acid concentration and a 15% increase in total VFA, compared to the control process (fermentation without pretreatment).

2. The low-frequency reactor (sono-LF; 24 kHz) is more effective than the high-frequency reactor (sono-HF; 120 kHz) at releasing organic matter.

Confirmation in the dissertation: The use of Sono-LF (24 kHz) caused an increase in sCOD of 477%, while Sono-HF (120 kHz) caused an increase of 48%.

3. Increasing the power density of ultrasound leads to an increase in dissolved organic matter (sCOD) and fermentation efficiency—but only up to a certain optimal threshold/level.

Confirmation in the dissertation: Increasing the power density of ultrasound results in an increase in dissolved organic matter (sCOD) by 82%, 477% and 555% for ultrasound powers of 100, 300 and 400 W/L respectively. The doctoral student noted that the difference between 300 W/L and 400 W/L was not significant, which she attributed to the

saturation effect. Here, the increase in sCOD and fermentation efficiency is limited to a certain optimal threshold.

4. The use of ultrasound in combination with chemical reagents (HCl, NaOH, H₂O₂) leads to an enhancement in solubilisation and lactic acid production.

Confirmation in the dissertation: The combination of ultrasound (sono-LF, 400 W/L, 5% w/v rice) with acid (HCl, pH=3) and alkali (NaOH, pH=11) during pretreatment led to a significant increase in COD of the raw material, by 750% and 625%, respectively, after 30 minutes of pretreatment. Pre-treatment of rice with acid and ultrasound resulted in a 100% increase in D-lactic acid and a 29% increase in total VFA. Conversely, the combination of alkali and ultrasound during pretreatment resulted in a 104% increase in D-lactic acid production. Furthermore, the combination of ultrasound and H₂O₂ (500 ppm) contributed to a 615% increase in sCOD and a 109% increase in D-lactic acid production during fermentation. However, the doctoral student noted that an increase in the release of organic matter did not always result in a higher lactic acid yield. In the case of real food waste, extending the duration of ultrasonic pretreatment from 10 to 30 minutes using ultrasound (sono-LF, 400 W/L, 5% w/v) led to an increase in released sCOD from 275% to 492%. Fermentation of the food waste was carried out using both aerobic and anaerobic sludge, which contributed to the production of L-lactic acid. An increase of 40% in the amount of L-lactic acid produced was observed in the sample with aerobic sludge and 30 minutes of raw material pretreatment. However, for samples with anaerobic sludge, the increases in D-lactic acid and VFA production were significantly higher. Under these conditions, a 190% increase in D-lactic acid production and a 284% increase in total VFA were observed for raw material pretreated for 10 minutes. Furthermore, increasing the concentration of food waste in the ultrasonic reactor (sono-LF, 400 W/L for 30 minutes) from 3% to 7% w/v significantly increased the amount of organic matter released as sCOD, from 213% to 582%. This also led to an increase in lactic acid production: for a 7% w/v dose, an 88% increase in L-lactic acid and a 200% increase in D-lactic acid were recorded with anaerobic sludge, and a 103% increase in L-lactic acid production and a 156% increase in D-lactic acid production were recorded with aerobic sludge. Additionally, the microflora in the fermentation mixtures altered; specifically, the number of *Limosilactobacillus* decreased while the number of *Lactobacillus* and *Clostridium* increased.

5. The duration and concentration of the feedstock significantly impact the efficiency of cavitation and fermentation products.

Confirmation in the dissertation: 20–30 minutes was the optimal time for the preliminary disintegration process and that a feedstock concentration of 5% w/v was optimal for fermentation. Based on her research, she also concluded that longer preliminary processes or higher concentrations result in lower effects, explaining this by reference to the effects of saturation and the appearance of inhibitors.

The doctoral student also conducted an economic analysis of the processes. Using rice as a model substrate, the combination of ultrasound (sono-LF, 400 W/L) and 500 ppm H₂O₂

was found to be economically viable, yielding net savings of €156 per tonne of pretreated raw material. For actual food waste, the most cost-effective option was 10 minutes of ultrasonic pre-treatment (sono-LF, 400 W/L), followed by fermentation with anaerobic sludge. This resulted in savings of €216 per tonne of pre-treated raw material.

The extensive use of experimental and analytical methods confirms the work's high scientific standard. The results of the doctoral student's research contribute to the development of co-fermentation methods focused on lactic acid production, thus expanding the available knowledge in the field of anaerobic stabilisation methods within the scientific disciplines of environmental engineering, mining and energy. This research indicates significant potential for improving waste management by offering a practical pre-treatment method that increases the conversion of food waste into valuable products in fermentation processes. I believe that this research has enabled the doctoral student to master the relevant knowledge and develop the skills necessary for conducting scientific research in this field.

The research results presented in this dissertation constitute the first comprehensive study of the impact of acoustic cavitation on the production of lactic acid from food waste. Overall, the study establishes a robust foundation for the adoption of advanced pre-treatment techniques in bioengineering, potentially influencing future research in renewable energy production and bioproduct synthesis.

The high ranking of the resulting publications (total Impact Factor (IF) of 49.5 across six publications) confirms that the results are original and of interest to the international scientific community. Participation in conferences and an internship abroad at Aarhus University of Technology's Department of Biological and Chemical Engineering (Environmental Engineering) indicates scientific activity, the ability to present results and cooperation in the research environment.

Issues requiring clarification (discussion notes)

Chapter 3.1.2.

1. No cooking time for rice is given – don't know what uniform consistency means. Rice "pulp" was obtained, but its characteristics were not given.
2. How many times was the raw material taken from the canteen? How many repetitions?

Chapter 3.1.3

3. Was the activated sludge taken from the oxygen chambers aerated? How long was it stored for? Was it used for aerobic stabilisation?
4. The sludge from rice co-fermentation was characterised by a high VSS - 79.18%. Was this value always obtained? What are the characteristics of the sludge?
5. What was the TSS and VSS for the raw activated sludge?
6. Why was the activated sludge stored at 20 degrees? Was oxygen stabilization carried out in such a system?
7. What do optimal conditions mean in terms of microbiological performance? Does it relate to the growth curve of microorganisms? How was the optimum then determined?
8. How were the rice and food waste mixed with the sludge? What was the basis for selecting the doses?

Chapter 3.2.

9. Why was a sonotrode used instead of an ultrasonic bath or channel? How was uniform disintegration ensured?

Chapter 3.4.

10. What was the basis for choosing the inoculum-to-substrate ratio of 1:4, and later 1:6?
11. Can you confirm that the temperature of digestion process was consistently 35 degrees? Did it not fluctuate at all? How was it maintained? The fermentation reactors had a capacity of 500 ml – how many were in use at any one time?
12. How was a pH level of 7 determined? From what value should it be changed?

Chapter 3.5.6.

13. Did introducing rice or food waste cause a change in the fermenting biomass? How long did the sludge working/fermented before fermentation? Did it connection/mixing suddenly and shockingly?
14. What was the basis for the doctoral student's conclusion that the hydrolysis stage was complete after 5 or 7 days?

Other questions:

15. Assuming the research results can be transferred to a technical scale, how would the doctoral student propose separating lactic acid production for economic purposes? How can it be separated from the fermentation process? Would separating it not cause the process to stop? What should be done with the fermentation mixture after 5–7 days? Would separating lactic acid not inhibit fermentation and biogas/yield production?
16. What are the potential applications of lactic acid obtained from such a process, and what benefits does it offer in the context of the circular economy?
17. Does the economic methodology overlook key costs that are important when evaluating industrial applications (e.g., ultrasonic reactor maintenance, energy requirements, reagent costs)?
18. Is repeating the tests twice sufficient and does it allow for correct conclusions to be drawn? There is no clear statistical confirmation of the results (e.g., ANOVA tests, p-value), but the context suggests that the differences were significant and the interpretation justified. Statistical analysis was also probably not performed because only two series of tests were conducted.
19. What are the limitations of acoustic cavitation on an industrial scale, and could they pose any technological risks?
20. On what basis were the concentrations of H₂O₂, NaOH, and HCl selected for the hybrid experiments?
21. Was the increase in sCOD linearly correlated with lactic acid production?
22. Will cavitation suppression occur at higher feedstock concentrations?

Final conclusions

The doctoral dissertation of Zahra Askarniya, MSc, Eng., entitled "Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food

waste-based feedstocks to produce lactic acid", presented for evaluation, meets the requirements set out in Article 187 of the Law on Higher Education of 20 July 2018 (Journal of Laws of 2024, item 1571, as amended).

The PhD student has the appropriate knowledge and skills to conduct scientific research in the scientific discipline of Environmental Engineering, Mining and Energy. The minor remarks and doubts presented in the review are of a debatable nature and do not adversely affect the substantive value of the doctoral dissertation presented for evaluation. The work meets the requirements of originality set for a doctoral dissertation, presents a high level of experimental research, well documented and scientifically justified. It is a valuable contribution to the development of methods of biological management and processing of food waste.

I request the acceptance of the doctoral dissertation of Zahra Askarniya, MSc, Eng., entitled "Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid" and permitting her to present her case in a public forum.



Ph.D., D.Sc., Eng. Klaudiusz Grübel, prof. UBB

Ph.D., D.Sc., Eng. Klaudiusz Grübel, prof. UBB Bielsko-Biala, 1 December 2025
University of Bielsko-Biala
Faculty of Materials, Civil and Environment Engineering
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

APPLICATION FOR DISTINCTION

doctoral dissertation of Zahra Askarniya, MSc, Eng.

„Studies on the application of acoustic cavitation as a pre-treatment technique for the fermentation of food waste-based feedstocks to produce lactic acid”

(Badania nad zastosowaniem kawitacji akustycznej, jako techniki wstępnego przetwarzania wsadu na bazie odpadów spożywczych do procesu fermentacji w celu produkcji kwasu mlekowego).

supervisor: Ph.D., D.Sc., Eng. Grzegorz BOCZKAJ, prof. PG

In accordance with the Doctoral dissertation distinction rules Gdansk University of Technology Environmental Engineering, Mining and Energy

I request a distinction for doctoral dissertation

in the field of engineering and technical sciences, the discipline of environmental engineering, mining and energy. The candidate – Zahra Askarniya, MSc, Eng. – meets two of the requirements necessary to apply for the distinction and specified in the Regulations, i.e.:

- the doctoral dissertation is characterized by special cognitive and application values,
- the candidate is the first co-author of 6 research articles published in journals with an Impact Factor, included in the current list of scientific journals assigned by the Ministry of Science and Higher Education. Four of these articles are in quartile Q1 according to the Scopus CiteScore index.

Klaudiusz Grübel
