



Warszawa, 29/03/2025

Prof. dr hab. Piotr Szymczak  
tel. (22)55 32 909, 504464665  
e-mail: Piotr.Szymczak@fuw.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej Tetuko Kurniawana**  
**“Droplet Generation in Microfluidic Cross-Junctions: Mechanisms and Applications as Cell Incubators”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tetuko Kurniawana zatytułowana “Droplet Generation in Microfluidic Cross-Junctions: Mechanisms and Applications as Cell Incubators” jest poświęcona tematyce mikrofluidyki kropelkowej. Praca, wykonana pod kierunkiem dr. hab. Piotra M. Korczyka i dr. inż. Sławomira Błońskiego, bada mechanizmy fizyczne stojące za powstawaniem kropel w mikrofluidycznych złączach krzyżowych, zwłaszcza przy niskich liczbach kapilarnych, i wykorzystuje odkryte prawidłowości do opracowania praktycznej platformy do inkubacji komórek. Dzięki połączeniu badań eksperymentalnych, analizy matematycznej i usprawnień technologicznych Rozprawa wnosi wkład zarówno w fizykę dynamiki płynów, jak i praktyczne zastosowania mikrofluidyki.

Rozdział 1 rozprawy zawiera wprowadzenie przygotowujące grunt pod badania. Autor przedstawia historię mikrofluidyki, poczynając od wczesnych innowacji, takich jak analizatory gazów oparte na krzemie w latach 70. XX wieku, aż po rozwój mikrofluidyki kropelkowej w XXI wieku, podkreślając jej rosnącą rolę w dziedzinach, takich jak analiza pojedynczych komórek i diagnostyka. Autor jasno określa motywację dla swoich badań, wskazując na potrzebę zrozumienia procesów powstawania kropel poza dobrze rozpoznanym w literaturze reżimem ściskania oraz ulepszenia platform mikrofluidycznych do zastosowań biologicznych. Autor definiuje konkretne cele rozprawy – badanie dynamiki kropel przy niskich wartościach  $Ca$  i optymalizacja inkubatorów komórkowych – oraz stawia hipotezę, że złącza krzyżowe wykazują unikatowe zachowania przepływowe przy niskich  $Ca$  z powodu ich geometrii. Plan rozprawy przedstawiono w logiczny sposób, zapewniając płynne przejście od podstaw do wyników, co ułatwia czytelnikowi śledzenie kierunku rozwoju badań. Rozdział ten umiejętnie integruje fizykę z zastosowaniami, osadzając pracę w kontekście praktycznych wyzwań, a jednocześnie opisując fizykę badanych zjawisk.

Rozdział 2 zawiera szczegółowy przegląd literatury, który stanowi solidną podstawę dla prowadzonych badań. Zaczyna się od omówienia podstaw dynamiki płynów w mikrokanalikach, wyjaśniając najpierw koncepcję przepływu jednofazowego, a następnie wprowadza przepływ wielofazowy, koncentrując się na kluczowych zjawiskach fizycznych, takich jak napięcie powierzchniowe, ciśnienie Laplace’a i zwilżanie – elementach istotnych dla formowania kropli. Autor przedstawia przegląd mikroprzepływowych generatorów kropli (podrozdział 2.2), porównując metody aktywne i pasywne, a w podrozdziale 2.3 przejrzysto wyjaśnia, czym różnią się złącze krzyżowe i złącze T pod względem schematów przepływu. Następnie Autor zagłębia się w prawa skalowania, podsumowując wcześniejsze badania nad ściskaniem i przeciekaniem w złączach T, co stanowi punkt wyjścia dla dalszych analiz. W kolejnej części rozdziału omówiono wykorzystanie kropli jako inkubatorów komórkowych oraz wprowadzono problem transportu masy przez PDMS, który Autor podejmuje w następnych rozdziałach. Rozdział ten stanowi cenne źródło wiedzy, łącząc zasady fizyki z szerokim przeglądem dziedziny i przygotowując czytelników do analizy oryginalnych wyników.

Rozdział 3 rozprawy szczegółowo opisuje materiały i metody, oferując praktyczny przewodnik po układzie eksperymentalnym. Autor opisuje wytwarzanie układów za pomocą frezowania CNC i litografii miękkiej, podając szczegółowe kroki do tworzenia wysokiej jakości form za pomocą naświetlania bezmaskowego. Uwagi na temat procedur, np. czyszczenia wafla krzemowego czy przygotowywania fotorezystora (np. tabele 3.1–3.3), odzwierciedlają zdobyte przez Autora doświadczenia praktyczne, co czyni ten rozdział szczególnie użytecznym dla badaczy rozpoczynających pracę z mikroprzepływami. Autor jasno objaśnia szczegóły konstrukcji układów służących do tworzenia kropli i inkubacji komórek, ilustrując wywód diagramami pokazującymi, jak kontrolowane i mierzone są natężenia przepływu. Usprawnienia wprowadzone przez Autora – takie jak zastosowanie końcówki pipety jako wlotu oraz systemu podciśnieniowego (rys. 3.8) – rozwiązują wyzwania związane z procesem eksperymentalnym, takie jak agregacja komórek, wynikające z sedymentacji i stabilności przepływu. Wreszcie, podrozdział 3.5 przedstawia techniki analizy obrazu, szczegółowo opisując, jak mierzone są długość kropli i ewolucja szyjki pomiędzy kroplami.

Sercem rozprawy jest rozdział 4, w którym Autor prezentuje szczegółową analizę formowania tworzenia się kropli przy bardzo niskich liczbach kapilarnych (Ca). Rozdział ten skupia się na szczegółowym badaniu reżimu wycieków w złączach krzyżowych, w którym to reżimie objętość kropli wykazuje silną zależność od Ca. Dzięki serii starannie zaprojektowanych eksperymentów Autor wykazuje, że przy niskich wartościach Ca szyjka formującej się kropli znacząco się wydłuża przed odcięciem, a proces ten jest silnie uzależniony od współdziałania napięcia powierzchniowego i sił lepkości. To wydłużenie, szczegółowo opisane w sekcji 4.1.3, prowadzi do wzrostu czasu zwężania i początkowej objętości kropli, które są kwantyfikowane za pomocą technik obrazowania o wysokiej rozdzielczości i analizy obrazu opisanych w rozdziale 3.

Na tych wynikach eksperymentalnych oparta jest analiza teoretyczna przedstawiona w podrozdziale 4.2, gdzie w szczególności wyprowadzone zostaje uogólnione prawo skalowania (równanie 4.30), które rozszerza znany z literatury model ściskania o człony zależne od liczby kapilarnej. Prawo to wiąże czas zwężania i początkową długość kropli na skrzyżowaniu z parametrami fizycznymi, takimi jak napięcie powierzchniowe i przepływ fazy ciągłej w rogach układu, omijający kroplę (przeciekanie). To uogólnione prawo zostaje następnie zweryfikowane eksperymentalnie dla różnych geometrii kanału. Jednym z kluczowych elementów w wyprowadzeniu prawa skalowania jest równanie ewolucji powierzchni rozdziału faz (4.7), które zostaje pomysłowo zweryfikowane za pomocą eksperymentów polegających na zatrzymaniu przepływu i obserwacji dynamiki procesu relaksacji szyjki kropli wywołanej działaniem sił kapilarnych. Model wprowadzony przez Autora nie tylko wyjaśnia zależność dynamiki w reżimie przeciekania od liczby kapilarnej ale także dostarcza narzędzia do przewidywania zachowania kropeł, co będzie bez wątpienia przydatne przy projektowaniu urządzeń mikrofluidycznych. Rozdział 4 kończy się stosunkowo krótką sekcją (4.3) poświęconą zastosowaniom, w tym optymalizacji urządzeń ze złączami krzyżowymi do inkubacji komórek. Autor wprowadza system podciśnienia i nieprzepuszczalne wkładki, aby zminimalizować straty wody w układzie, zapewniając przeżywalność ponad 92% komórek po 18 godzinach. Ta sekcja łączy spostrzeżenia fizyczne – takie jak transport masy przez PDMS – z rezultatami praktycznymi, zwiększając użyteczność rozprawy.

Choć w ogólności wywody Autora są przejrzyste, to jednak w kilku miejscach przydałyby się, jak sądzę, dodatkowe wyjaśnienia. I tak,

- Rys. 4.13 przedstawia kształt szyjki kropli w kolejnych chwilach czasu. Autor przekonuje, że kształt ten jest samopodobny, szkoda jednak, że nie próbuje nałożyć tych kształtów na siebie poprzez odpowiednie skalowanie, co pozwoliłoby zweryfikować to stwierdzenie.
- W analizie kształtu szyjki kropli zupełnie pomijany jest trzeci wymiar. Jest to zrozumiałe ze względu na dużą złożoność problemu, jednak interesujące byłoby zobaczenie całej powierzchni rozdziału faz, a nie tylko jej dwuwymiarowych przekrojów. Czy efekty trójwymiarowe mogą wpływać na prawa skalowania, a jeśli tak, to w jaki sposób?
- Równanie na krzywiznę (nad wzorem 4.6) zawiera literówkę – badana funkcja raz nazywana jest  $h$ , a raz  $f$ . Nie jest też jasne, czemu człon z pierwszą pochodną jest w tym równaniu pomijany.
- W równaniu ruchu 4.7 porównywane są siły z gradientami ciśnienia. Obie wielkości są wektorowe, warto więc wyjaśnić, dlaczego składowe związane z poszczególnymi współrzędnymi są sumowane.
- Dlaczego zamiast wyprowadzonej w równaniu 4.25 zależności  $\tau(Ca)$  używana jest prostsza zależność 4.26? Wydaje się, że pełna forma (4.25) nie powinna również sprawiać trudności.

- Wywód w sekcji 4.2.6 opiera się na licznych założeniach upraszczających, których zasadność nie jest dla mnie w pełni jasna. W szczególności, dlaczego  $\epsilon$  jest liniową funkcją czasu oraz dlaczego jego przyrost jest proporcjonalny do przyrostu  $\omega$ , skoro układ znajduje się poza reżimem samopodobnym? Przydałyby się tu dodatkowe wyjaśnienia.
- Na stronie 79 Autor odnosi się do rysunku 7.33, co jest chyba pomyłką (wydaje się, że chodzi o rysunek 7.24)

Powyższe uwagi mają charakter drobny i nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o rozprawie. Rozprawa mgr inż. Tetuko Kurniawana charakteryzuje się innowacyjnymi metodami, jasnym ukierunkowaniem na fizykę problemu oraz istotnym znaczeniem aplikacyjnym. Wnosi cenny wkład w badania nad formowaniem się kropli przy niskich liczbach kapilarnych, pogłębiając wiedzę o ewolucji geometrii powierzchni rozdziału faz w złączach krzyżowych.

Nie ulega wątpliwości, że rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie inżynierii mechanicznej i spełnia wymagania zawarte w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Tetuko Kurniawana do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*P. Szymoralski*