Warszawa, 25-03-2026

Autor rozprawy doktorskiej: **Maria Celeste Tirelli**

Promotor: **dr hab. Marco Costantini**

Temat rozprawy doktorskiej: **"Microfluidic-Assisted 3D Printing of Functionally Graded Porous Biomaterials"**

Streszczenie

Inżynieria metamateriałów porowatych opartych na strukturach sferycznych, w sposób ekonomiczny oraz z kontrolowaną architekturą w wielu skalach długości, pozostaje jednym z głównych wyzwań w zaawansowanym wytwarzaniu addytywnym, w tym w biofabrykacji. Konwencjonalne metody wytwarzania rusztowań zazwyczaj opierają się na stochastycznych strategiach tworzenia szablonów, które zapewniają jedynie ograniczoną kontrolę nad rozkładem wielkości porów, organizacją przestrzenną oraz gradientami składu, co utrudnia odtworzenie złożonej struktury hierarchicznych materiałów biologicznych. Aby przezwyciężyć te ograniczenia, niniejsza rozprawa doktorska przedstawia platformę druku 3D wspomaganą mikrofluidyką do wytwarzania na żądanie porowatych biomateriałów funkcjonalnie gradientowych.

Zaprojektowano mikrofluidyczny generator kropli typu flow-focusing, zdolny do generowania wysoce monodyspersyjnych emulsji, które determinują powstającą architekturę porów. Poprzez precyzyjną regulację natężeń przepływu fazy ciągłej i rozproszonej wielkość kropli była dokładnie dostrajana, co umożliwiało kontrolę rozkładu wielkości porów w otrzymywanych materiałach. W oparciu o tę koncepcję generator kropli został zintegrowany z systemem druku 3D opartym na ekstruzji, umożliwiając bezpośrednie osadzanie tuszy emulsyjnych w zdefiniowanej architekturze oraz jednoczesną kontrolę makroskopowej geometrii rusztowania i mikroskopowej architektury porów, przy jednoczesnym umożliwieniu przetwarzania materiałów o stosunkowo niskiej lepkości. Poza systemami hydrożelowymi, wszechstronność platformy została dodatkowo wykazana poprzez wytwarzanie porowatych struktur ceramicznych metodą druku templowanego, a następnie ich spiekania, z zachowaniem zaprojektowanej architektury porów. Na koniec system został

rozszerzony poprzez integrację pasywnego mikrofluidycznego miksera, który umożliwia modulację składu matrycy w czasie rzeczywistym podczas ekstruzji, co pozwala na wytwarzanie miękkich biomateriałów funkcjonalnie gradientowych o przestrzennie kontrolowanych właściwościach fizykochemicznych i mechanicznych w ramach jednego procesu druku.

Wszystkie te rozwiązania technologiczne składają się na zintegrowaną mikrofluidycznie strategię wytwarzania, zdolną do programowania porowatości, składu i architektury w ramach jednego procesu technologicznego, umożliwiając kontrolę strukturalną od tworzenia szablonów porów w skali mikro po projektowanie rusztowań w skali makro oraz zapewniając skalowalną drogę do wytwarzania hierarchicznych, porowatych materiałów funkcjonalnie gradientowych dla przyszłych zastosowań biomedycznych.