

PH.D. THESIS

**Numerical analysis of conjugate heat
and mass transfer phenomena in food
freezing using hydrofluidisation
impingement method**

Author:
Michal STEBEL

Supervisors:
Jacek SMOLKA
Trygve M. EIKEVIK
Michal PALACZ



**Silesian
University
of Technology**

Scientific discipline: Environmental Engineering, Mining and Energy

Gliwice, Poland, 2022

Streszczenie

Zamrażanie i schładzanie to obecnie najczęstsze metody osiągnięcia długiego okresu przydatności do spożycia produktów spożywczych. Jest to również pierwszy element całego łańcucha chłodniczego dla żywności. Jednakże, według najnowszych danych, w sytuacji gdy 46% światowej produkcji żywności powinno być schładzane, mniej niż połowa tej liczby jest poddana temu procesowi. W rezultacie, powoduje to marnowanie ogromnych ilości żywności, które według szacunków stanowią około 13% światowej produkcji. Nowatorskie metody zamrażania żywności powinny być rozwijane w taki sposób, aby były energooszczędne, atrakcyjne pod kątem ekonomicznym oraz gwarantowały wysoką jakość zamrożonych produktów spożywczych. Metodą gwarantującą takie warunki jest hydrofluidyzacja (HF), która została zaproponowana do szybkiego schładzania i zamrażania drobnych produktów spożywczych. Polega ona na zamrażaniu w ciekłym medium, które jest dodatkowo wzburzone przepływem przez grupę kryz umieszczonych na dnie zbiornika HF. W efekcie możliwe jest osiągnięcie bardzo wysokich współczynników wnikania ciepła (WWC) przekraczających $2\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Ponadto produkty spożywcze zachowują się jak złoża fluidalne, co pozwala na indywidualne zamrażanie pojedynczych produktów i uzyskanie jednolitego procesu zamrażania dla wszystkich produktów w całej grupie.

Niniejsza praca skupia się na różnych aspektach badania numerycznego procesu hydrofluidyzacji. W pierwszej kolejności zamodelowano przepływ strugi wokół próbki produktu o kulistym kształcie. Na tym etapie sformułowano model przepływu płynu, stosując odpowiednie podejście do modelowania turbulencji, czyli model $K-\omega$ SST. Zbadano również kilka sposobów formułowania domeny numerycznej. Model numeryczny przepływu płynu został zwalidowany poprzez porównanie otrzymanych numerycznie pól prędkości z eksperymentalnymi pomiarami pól prędkości. Dokładność modelowania pola prędkości płynu wyniosła około 11,5%, co jest bardzo zadowalającym wynikiem, biorąc pod uwagę bardzo duże gradienty prędkości w analizowanym obszarze. W dalszych krokach domena geometryczna zbiornika hydrofluidyzacyjnego obejmowała pełny układ kryz i kilka produktów spożywczych w konfiguracji statycznej oraz w realistycznym ruchu. Konfiguracja statyczna pozwoliła na zbadanie kilku parametrów geometrycznych takich jak stosunek odległości produktów spożywczych od otworów do średnicy kryzy (H/d), czy wpływ rozstawu kryz (S) lub odległości pomiędzy próbkami żywności (z) na WWC. Wykazano, że parametry H/d i S znacząco wpływają na WWC, ale czas zamrażania nie podlega skracaniu, gdy WWC przewyższa $2\ 500\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. W drugim scenariuszu zbadano realistyczny proces HF dla grupy

sferycznych próbek o średnicy 20 mm przy użyciu makroskopowego modelu cząstek (MPM) do modelowania Lagrange'owskiego ruchu poszczególnych drobin. W tym przypadku przetestowano różne masowe natężenia przepływu czynnika chłodniczego w zakresie od $0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ do $2,0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Ponadto porównano trzy różne roztwory wodne, tj. wodny roztwór etanolu (stężenie masowe 30%), wodny roztwór gliceryny (40%) oraz wodny roztwór mieszaniny etanolu i glukozy (15%/25%). W przypadku roztworu etanolu zachowanie produktów spożywczych w zbiorniku HF było zależne od natężenia przepływu, ze względu na mniejszą gęstość tego roztworu w porównaniu z gęstością produktu spożywczego (ziemniaka). W przypadku innych płynów, które są gęstsze niż mrożone produkty, próbki tworzyły statyczną grupę w górnej części zbiornika. WWC dla takich warunków mieściły się w przedziale od $1\ 000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ do $4\ 000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dla bardzo wysokiego masowego natężenia przepływu płynu $2,0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Drugim aspektem, który był badany w niniejszej pracy, jest zjawisko wymiany ciepła i masy w produkcie spożywczym podczas procesu zamrażania. Najpierw opracowano model wymiany ciepła oparty na podejściu pozornej pojemności cieplnej, aby scharakteryzować rozkład temperatury w produkcie spożywczym podczas procesu zamrażania. Opracowany model poddano walidacji za pomocą pomiarów temperatury próbki ziemniaka. Okazało się, że zgodność z pomiarami była bardzo wysoka. W związku z tym, model posłużył do wyznaczenia czasu zamrażania w różnych warunkach. W wodnym roztworze etanolu o temperaturze -15°C czas zamrażania kulki ziemniaczanej o średnicy 20 mm wynosił 6 min. W przypadku mniejszych produktów, czas był jeszcze krótszy, np. 1,5 min dla próbki o średnicy 10 mm. Uzyskane czasy zamrażania porównano z metodą zamrażania zanurzeniowego (IF), która również realizowana jest w cieczy, ale w której przepływ płynu nie jest wymuszony. Wyniki udowodniły, że proces zamrażania może być znacznie szybszy, gdy stosuje się metodę HF zamiast IF. Czas zamrażania został skrócony o około 40% dla sferycznych próbek żywności o średnicy 30 mm i aż o 60% dla mniejszych produktów spożywczych o średnicy 10 mm. W kolejnym etapie badania model produktu spożywczego został uzupełniony o analizę transportu masy. Umożliwiło to ilościowe określenie niepożądanego efektu ubocznego metody HF, jakim jest wchłanianie składników roztworu przez produkt spożywczy. Model oparto na kilku założeniach i porównano z danymi literaturowymi dla podobnych warunków w celu potwierdzenia jego wiarygodności. W zależności od WWC i wielkości produktu spożywczego (5-30 mm) wchłanianie składników roztworu mieści się w zakresie $15\text{-}26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ produktu dla roztworu etanolu (30%) oraz $20\text{-}35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ produktu dla roztworu gliceryny (40%). Zastosowanie roztworu mieszaniny etanolu z cukrem (15%/25%) pozwoliło na utrzymanie stężenia etanolu w produkcie spożywczym w zakresie $9\text{-}15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ oraz stężenia glukozy w zakresie $16\text{-}24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla tych samych przypadków. Ponadto wyniki potwierdziły, że obniżenie temperatury czynnika chłodniczego z -10°C do -20°C pozwala na zmniejszenie wchłaniania masy o około 40%. Warto zauważyć, że metoda HF pozwoliła na znaczne zmniejszenie wchłaniania masy w stosunku do metody zanurzeniowej.