

Streszczenie pracy doktorskiej

Koszalin, 25 czerwiec 2021

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego

Tytuł: ANALIZA NUMERYCZNA I BADANIA EKSPERYMENTALNE PRZEPLYWU BRZECZKI PIWNEJ W KADZI WIROWEJ O ZMODYFIKOWANEJ KONSTRUKCJI

Autor: Marta Stachnik

Promotor: dr hab. inż. Marek Jakubowski, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr inż. Monika Sterczyńska

Konsumenci stale poszukują nowych doświadczeń, a rynek w odpowiedzi dostarcza nowe typy piw. Surowce inne niż słód jęczmienny znacząco wpływają na etapy produkcji, szczególnie są to operacje filtracji, klarowania, gotowania i transportu.

W trakcie gotowania brzezki z chmielem powstaje osad gorący, który jest oddzielany w kadzi wirowej. Rozwój nowych technik pomiarowych oraz narzędzi komputerowych pozwala na szerszą analizę oraz poprawę warunków separacji tej zawiesiny.

W niniejszej pracy proponuje się modyfikacje dennicy kadzi wirowej, które mają na celu poprawę warunków klarowania brzezki piwnej po jej gotowaniu z chmielem. Wykorzystując wycinki rzutu spirali Ekmana na powierzchnię zbudowano 5 ramion, których krotności (2, 3, 4 i 5) utworzyły formy geometryczne modyfikujące dennicę kadzi klasycznej. Przeprowadzono pomiary rozkładu prędkości przepływu pierwotnego za pomocą metody PIV oraz symulacji komputerowych. Wyznaczono także charakterystykę reologiczną brzezki i osadu.

W kadzi wirowej zachodzą dwa zjawiska: przepływ wirowy ze swobodną powietrzną oraz sedymentacja osadu gorącego. Początkowo zbudowano trójfazowy model komputerowy, który składał się z dwóch faz ciągłych (powietrze i brzezka) oraz fazy rozproszonej (osad). Wykorzystano w tym celu podejście Euler-granularny, czyli połączenie śledzenia swobodnej powierzchni brzezka-powietrze oraz model granularny dla opisu fazy rozproszonej. Równania matematyczne opisujące przepływ w kadzi zostały rozszerzone o udział poszczególnych faz/frakcji. Na podstawie symulacji prześledzono zmiany udziału frakcji rozproszonej oraz formowanie się stożka osadu w kolejnych krokach czasowych. Model komputerowy pozwala także przeanalizować charakterystykę pionowego przepływu wtórnego, którego nie da się ocenić za pomocą eksperymentu.

Wstępne obliczenia przeprowadzono dla kadzi klasycznej. Ze względu na długi czas obliczeń analizę wpływu modyfikacji na przepływ przeprowadzono za pomocą eksperymentalnych pomiarów PIV. Na podstawie analizy map wektorowych przepływu zdefiniowano pięć kategorii oceny: symetryzacja przepływu pierwotnego z uwzględnieniem maksymalnych wartości przepływu; symetryzacja przepływu pierwotnego pod względem miejsca występowania maksymalnych wartości przepływu; stabilizacja strefy centralnej; obniżenie wartości prędkości przepływu pierwotnego; obniżenie wartości prędkości strefy centralnej.

Największym obniżeniem maksymalnych wartości prędkości przepływu pierwotnego charakteryzowały się formy geometryczne zbudowane z krótszych fragmentów spirali. Do najmniejszej redukcji tych wartości przyczyniły się formy geometryczne najdłuższego fragmentu spirali. Pod względem oceny symetryzacji położenia maksymalnych wartości prędkości przepływu pierwotnego najmniejsze odchylenia zidentyfikowano dla najkrótszych fragmentów spirali, z czego wariant zlokalizowany najbliżej osi z trzema ramionami był najkorzystniejszy. Pod względem symetryzacji maksymalnych wartości prędkości przepływu pierwotnego każdy wariant przyczynił się do pogorszenia warunków względem kadzi klasycznej. Natomiast w kategorii symetryzacji położenia nawet najmniej korzystne rozwiązanie przyczyniło się do poprawy warunków przepływu względem kadzi klasycznej. Najkorzystniejsze pod względem stabilizacji centrum wiru były formy geometryczne z najkrótszych fragmentów spirali, z czego najlepszy był wariant z trzema ramionami położony najbliżej osi. Natomiast modyfikacje dennicy przy pomocy fragmentów spirali ułożonych bliżej ściany zbiornika przyczyniły się do pogorszenia warunków przepływu w stosunku do kadzi klasycznej. Natomiast największą redukcję wartości prędkości centrum wiru zidentyfikowano dla form geometrycznych z najdłuższych fragmentów spirali.

Przeanalizowano także wartości wirowości. Mimo, iż przepływ w kadzi traktowany jest jako obrót ciała sztywnego, to można zaobserwować lokalne zawirowania. Do identyfikacji wirów wykorzystano kryterium λ_{ci} , który rozróżnia struktury wirowe od strefy przepływu o wysokim ścinaniu. Najniższe wartości tego kryterium (porównane jako wartości bezwzględne) zidentyfikowano dla najkrótszych fragmentów zlokalizowanych najbliżej osi. Natomiast dłuższe fragmenty spirali przyczyniły się do formowania lokalnych zawirowań o większej sile niż w kadzi klasycznej. Z badań eksperymentalnych wynika, iż korzystniejsze warunki przepływu pierwotnego tworzyły najkrótsze fragmenty spirali umieszczone bliżej osi w konfiguracji 3 lub 4 ramion. Z drugiej strony dłuższe fragmenty spirali przyczyniły się do największej redukcji prędkości centrum wiru.

Symulacje komputerowe wybranych wariantów modyfikacji prowadzono dla kadzi niskiej, gdzie wysokość słupa cieczy jest równa promieniowi zbiornika. Najkorzystniejszy efekt

na przepływ w kadzi wirowej uzyskano dla dłuższych fragmentów spirali, a najmniej korzystny dla najkrótszych elementów. W związku z tym najmniejsze zagęszczenie stożka uzyskano w wariancie z najkrótszymi fragmentami spirali. Natomiast największe zagęszczenie zidentyfikowano dla wariantu z najdłuższymi fragmentami spirali. Była to sytuacja odwrotna do wyników uzyskanych dla kadzi o smukłości $H/D = 1$. Założono, iż wybrana wysokość elementów zabudowy nie zaburzy dośrodkowego przepływu namywającego. Na podstawie symulacji komputerowych stwierdzono, iż elementy modyfikujące dno hamowały przepływ przydenny. To przyczyniło się do namywania osadu przy fragmentach spirali.

W dalszej części pracy opisano wyniki pomiarów właściwości reologiczne osadów gorących z przemysłowej warzelnii. Porównano cztery rodzaje osadów, wykonane z trzech kombinacji surowców (wsad ze słody jęczmiennego, 30% oraz 45% dodatek niesłodowanego jęczmienia). Dwa osady były wykonane z tego samego wsadu, ale różniły się ekstraktem. Oceniono wpływ temperatury oraz szybkość ścinania na zmianę wartości lepkości osadu. Zmierzono także wartości lepkości brzeczek w 20°C oraz w funkcji temperatury. Wartości z badań wykorzystano jako dane dla symulacjach komputerowych.

Osad gorący wykazał właściwości rozrzedzania ścinaniem oraz znaczną tiksotropię. W każdej temperaturze najwyższe wartości lepkości pozornej odnotowano dla osadu pochodzącego ze słodowanego wsadu. Natomiast najniższe wartości lepkości pozornej odnotowano dla osadu z 30% dodatkiem niesłodowanego jęczmienia. Zwiększenie dodatku niesłodowanego o 15% oraz ekstraktu do 16,1 i 18,2° nieznacznie podwyższyło lepkość pozorną osadu. Zidentyfikowano również istnienie granicy płynięcia w materiale. Jej wartość obniżała wraz ze wzrostem temperatury, jednak nie na tyle by zaburzyć sedimentację osadu. Na koniec dobrano model reologiczny, który najlepiej oddaje właściwości reologiczne osadu. Takim modelem okazał się model Cross.

Badania ze strony technologicznej sugerują, iż na strukturę osadu ma wpływ nie tylko wsad surowcowy, ale także skala produkcji. Konsumenci chętnie sięgają po wyroby zakładów rzemieślniczych czy minibrowarów. Poszukują także nowych smaków. Popularne stają się nietypowe surowce, jak gryka czy owies. Zmiana ilości białka oraz innych związków ma wpływ na wytracanie osadu i jego charakterystykę. Stąd też ważne jest, aby analizować formowanie się stożka osadu wraz z uwzględnieniem m. in. jego parametrów reologicznych. W perspektywę badań są symulacje oraz eksperymenty z uwzględnieniem różnych wartości lepkości breczki oraz osadu. A także wpływu tego parametru na przepływ pierwotny i wtórny oraz sedimentację i formowanie się stożka osadu gorącego w kadzi wirowej.

Słowa kluczowe: kadź wirowa, osad gorący, przepływ wirowy, przepływ wielofazowy, reologia

Marta Stępnik