



**Politechnika Koszalińska**  
**Wydział Mechaniczny**  
**Katedra Inżynierii Spożywczej i Tworzyw Sztucznych**

mgr inż. Marek Jakubowski

**Rozprawa doktorska**

**Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych  
na proces zawirowań w kadzi wirowo – osadowej  
podczas klarowania zawiesin**

Promotor:  
Prof. dr hab. inż. Jarosław Diakun

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę  
w latach 2007 - 2008 jako projekt badawczy Nr N502 008 32/0963

Koszalin 2008

## SPIS TREŚCI

Wykaz stosowanych oznaczeń .....	4
Wprowadzenie .....	6
1 Klarowanie na przykładzie usuwania osadu gorącego .....	8
1.1 Klarowanie brzezki - operacja procesu technologicznego .....	8
1.2 Usuwanie gorącego osadu .....	9
1.2.1 Gorący osad .....	10
1.2.2 Metody usuwania gorącego osadu .....	11
1.2.2.1 Taca osadowa .....	11
1.2.2.2 Kadź osadowa .....	12
1.2.2.3 Whirlpool .....	13
1.2.2.4 Whirlpool-kocioł .....	14
1.2.2.5 Whirlship .....	15
1.2.2.6 Wirówki .....	16
1.2.3 Zagospodarowanie gorącego osadu .....	17
1.3 Problemy usuwania osadu gorącego .....	19
2. Kadź z zawirowaniem whirlpool .....	21
2.1 Zasada działania i budowa .....	21
2.2 Historia rozwoju i zastosowania whirlpoola .....	25
2.3 Klasyfikacja konstrukcji .....	26
2.4 Przegląd konstrukcji .....	28
2.4.1 Kadzie laboratoryjne .....	29
2.4.2 Kadzie wirowe na warzelniach mikro i minibrowarów .....	29
2.4.3 Kadzie wirowe w instalacjach warzelni browarów średnich .....	37
2.4.4 Kadzie wirowe w instalacjach warzelni browarów dużych .....	40
2.5 Podsumowanie przeglądu konstrukcji .....	43
3 Analiza teoretyczna i badanie ruchu wirowego płynu w whirlpoolu .....	44
3.1 Modele ruchu obrotowego przestrzeni ograniczającej płyn .....	44
3.2 Model ruchu płynu w warstwie Ekmana .....	45
3.3 Modele ruchu wirowego płynu w ograniczonej przestrzeni .....	47
3.4 Modele eksperymentalne i badania na obiektach rzeczywistych .....	49
3.4.1 Badania teoretyczno - doświadczalne .....	49
3.4.2 Pomiar z wykorzystaniem arkusza światła .....	51
3.4.3 Anemometria laserowa LDA .....	53
3.4.4 Modelowanie przepływu .....	56
3.5 Podsumowanie .....	56
4. Cele, hipoteza i zakres pracy .....	57
4.1 Cele pracy .....	57
4.2 Hipoteza badawcza .....	57

4.3 Zakres pracy .....	57
5. Stanowisko badawcze i badania eksperymentalne.....	58
5.1 Stanowisko badawcze i realizacja pełnego cyklu pracy .....	58
5.1.1 Laboratoryjna kadź wirowa whirlpool.....	59
5.2 Warunki wirowania .....	60
5.3 Badania dotyczące formowania stożka osadu .....	60
5.4 Badania rozkładu prędkości .....	62
6. Model ruchu płynu w kadzi wirowej .....	67
6.1 Model matematyczny .....	67
6.1.1 Układ współrzędnych .....	67
6.1.2 Równania bilansu masy, pędu i energii .....	68
6.1.3 Równania opisujące turbulencję.....	70
6.1.4 Warunki brzegowe modelu.....	72
6.2 Wybór metody dyskretyzacji i narzędzia modelowania .....	73
6.2.1 Narzędzie modelowania .....	74
6.2.2 Założenia i uproszczenia modelu.....	76
6.3 Model numeryczny - układ równań bilansu CFD .....	77
7 Badania symulacyjne wstępne .....	81
7.1 Wybór rodzaju siatki i jej podział.....	81
7.2 Warunki początkowe.....	83
7.2.1 Kształt swobodnej powierzchni .....	83
7.2.2 Rozkład prędkości kroku zerowego.....	85
7.3 Weryfikacja modelu.....	87
7.4 Modele o zmiennej lepkości i gęstości .....	93
8. Analiza numeryczna wpływu parametrów konstrukcyjnych.....	95
8.1 Model podstawowy .....	95
8.1.1 Analiza układu zawirowań.....	96
8.1.2 Analiza zmiany wartości prędkości przepływów .....	102
8.2 Modele o zmiennych proporcjach wymiarowych .....	107
8.2.1 Modele o stałej średnicy zbiornika.....	107
8.2.2 Modele o stałej objętości nalewu.....	114
8.3 Modele o zmodyfikowanej geometrii dna zbiornika .....	121
8.3.1 Zaokrąglone połączenie pobocznic i dna zbiornika.....	122
8.3.2 Stożkowe połączenie pobocznic i dna zbiornika .....	129
8.4 Modele o kształtach charakterystycznych występujących w konstrukcjach przemysłowych .....	138
9 Podsumowanie (wnioski naukowe, użytkowe i perspektywy dalszych badań) .....	148
Wykaz literatury.....	153

## Wykaz stosowanych oznaczeń

D - średnica zbiornika

d - średnica dyszy zasilającej lub otworu spustowego

$f_m$  - siły masowe

g - przyspieszenie ziemskie normalne,  $g = 9,80665$  [m/s<sup>2</sup>]

h- wysokość słupa cieczy w rurce piętrzącej

H- wysokość zbiornika

$H_m$  - maksymalna wysokość napełnienia

$H_n$  - nominalna wysokość napełnienia

$H_N$  - wysokość napełnienia zbiornika

$h_p$  - wysokość słupa cieczy w rurce piętrzącej

k - energia kinetyczna turbulencji

P - ciśnienie

q - ilość par zawieszonych przyściennych

r - promień

R - promień zbiornika

t - czas

u - prędkość

$V_m$  - objętość maksymalna zbiornika

$V_N$  - objętość napełnienia (nalewu)

$V_n$  - objętość nominalna zbiornika

$\alpha$  - współczynnik prędkości dla rurki piętrzącej (dla wody  $\alpha \cong 0,92$ )

$\mu$  - lepkość dynamiczna

$\rho$  - gęstość

$\nabla$  - operator Hamiltona, dla współrzędnych cylindrycznych  $\nabla = \vec{e}_r \frac{\partial}{\partial r} + \vec{e}_\varphi \frac{\partial}{r \partial \varphi} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z}$

$\omega$  - prędkość kątowna

$\nu$  - kinematyczny współczynnik lepkości

$\varepsilon$  - dyssypacja energii turbulencji

$\tau$  - naprężenia

**Indeksy dolne dotyczą:**

$x, y, z$  - współrzędnych układu kartezjańskiego

$r, \varphi, z$  - współrzędnych układu cylindrycznego

E - wielkości związanych z zasilaniem zbiornika

O - wielkości związanych z opróżnianiem zbiornika

max - wartości maksymalnej

w.max - występowania wartości maksymalnej

ap. - powstawania zjawiska

k - energii kinetycznej turbulencji

$\varepsilon$  - ewolucji dyssypacji energii turbulentnej

**Indeksy górne dotyczą:**

→ - oznaczenia wektora

↔ - oznaczenia tensora

+ - wielkości bezwymiarowych

– - wartości średniej

**Skróty**

Blg - stopnie Ballinga

CCD - matryca światłoczuła (Charge Coupled Device)

CFD - numeryczna mechanika płynów (Computational Fluid Dynamics)

LDA - dopplerowska anemometria laserowa (Laser Doppler Anemometry)

pp - przepływ pierwotny

pw - przepływ wtórny (drugorzędowy) namywający stożek

## **Wprowadzenie**

Praca dotyczy aspektów konstrukcyjnych aparatu do klarowania brzezki piwnej, w którym wykorzystano mechanizm specyficznego formowania się osadu w postaci stożka. To osobliwe zjawisko występujące w życiu codziennym Albert Einstein określił w 1926 roku mianem „efekt filiżanki herbaty” [Einstein 1926]

Kadź wirowo - osadowa została wprowadzona jako wyposażenie warzelni w latach 60, XX wieku. W chwili obecnej klarowanie brzezki piwnej z wykorzystaniem kadzi wirowo - osadowej stanowi metodę powszechnie stosowaną ze względu na jej najniższą energochłonność wśród pozostałych metod usuwania osadu gorącego.

Praca stanowi rozwinięcie tematyki badawczej realizowanej w ramach prac własnych Katedry Inżynierii Spożywczej i Tworzyw Sztucznych Politechniki Koszalińskiej. W Katedrze zbudowano stanowisko badawcze wyposażone w laboratoryjną kadź wirowo - osadową. Prowadzono badania dotyczące możliwości wykorzystania kadzi wirowo - osadowej w przemyśle spożywczym [Diakun 2000], ustalenia wpływu koncentracji zawiesiny na stopień rozdziału separowanej mieszaniny [Kowalczyk, Diakun 2000], ograniczeń w zastosowaniu do klarowania cieczy [Diakun, Kowalczyk 2001] oraz wykorzystania whirlpoola do wspomaganie klarowania surowego soku jabłkowego [Diakun, Jakubowski 2003]. Równoległe zespół projektowy składający się z członków Katedry zrealizował projekt konstrukcji przemysłowego whirlpoola dla browaru Brok w Słupsku.

Tematyka pracy wpisuje się w aktualne tendencje rozwoju technologii produkcji piwa. W chwili obecnej coraz popularniejsze staje się warzenie brzeczki o wysokim ekstrakcie metodą „high gravity”. Wymagania jakościowe stawiane tego typu brzeczkom powodują, iż konieczne stało się uzyskanie skrajnie niskich wartości pozostałości osadu gorącego.

W ramach pracy kwalifikacyjnej zostało opracowanych dziewięć rozdziałów, z których trzy pierwsze stanowią rozpoznanie tematu, w kolejnym zostaje sformułowane zadanie badawcze, a następne rozdziały dotyczą badań i rozwiązania problemu.

W rozdziale pierwszym przedstawiono operację usuwania osadu gorącego, jako przykład klarowania zawiesiny w procesie technologicznym produkcji piwa. Przedstawiono metody usuwania osadu gorącego oraz problemy z techniczną i technologiczną realizacją operacji.

Rozdział drugi dotyczy bezpośrednio kadzi wirowo - osadowej. Przedstawiono zasadę jej działania, krótki rys historyczny ewoluowania konstrukcji oraz zastosowania w browarnictwie. Dokonano klasyfikacji konstrukcji i przeglądu aparatów tego typu w browarach w Polsce.

W rozdziale trzecim przedstawiono dotychczasowy stan wiedzy w zakresie modeli teoretycznych ruchu zawirowanego płynu zbliżonych do zagadnienia ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej. Przedstawiono także stan aktualny w zakresie badań eksperymentalnych dotyczących ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej.

Na podstawie analizy literatury i rozpoznania konstrukcji przemysłowych w rozdziale czwarty określono cele pracy, hipotezę badawczą i zakres niniejszej rozprawy.

W rozdziale kolejnym przedstawiono stanowisko badawcze i badania eksperymentalne prowadzone przez autora. Badania dotyczyły wizualizacji formowania się stożka osadu oraz badania nad ustaleniem rozkładu prędkości w początkowym etapie wirowania płynu.

W rozdziale szóstym przedstawiono model matematyczny osiowosymetrycznego, zawirowanego, turbulentnego ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej. Przetawiono warunki brzegowe modelu, wybór metody dyskretyzacji, narzędzie modelowania oraz model numeryczny w postaci układu równań bilansu CFD.

Rozdział siódmy zawiera wstępne badania symulacyjne. Ich przedmiotem był dobór siatki dyskretyzującej geometrię modelu, określenie warunków początkowych dla zerowego kroku symulacji oraz weryfikacja eksperymentalna modelu.

Rozdział ósmy zawiera zasadnicze badania symulacyjne. W ramach tego rozdziału przedstawiono analizę wyników symulacji dla modeli o zróżnicowanych parametrach konstrukcyjnych geometrii zbiornika kadzi wirowo - osadowej. Na podstawie analiz dokonano wnioskowania dotyczącego wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na warunki przepływu i formowania się zawirowań w kadzi wirowo - osadowej.

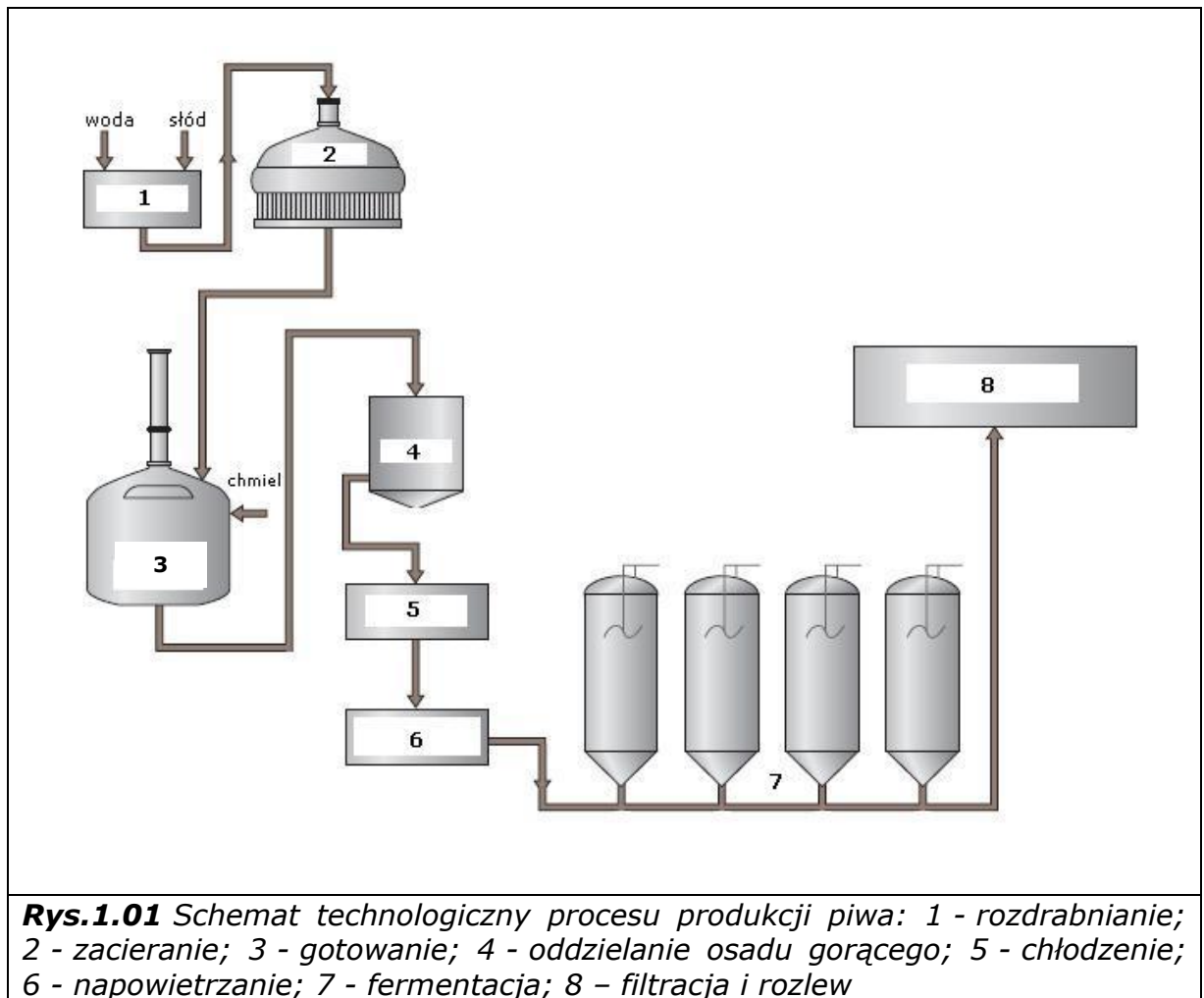
Ostatni rozdział zawiera podsumowanie, w ramach którego zaprezentowano wnioski z pracy o charakterze naukowym i użytkowym. Przedstawiono także perspektywę dalszych badań dotyczących kadzi wirowo - osadowej.

## 1 Klarowanie na przykładzie usuwania osadu gorącego

Klarowanie jest procesem separacyjnym mającym na celu wydzielenie i usunięcie z zawiesiny ciał stałych poprzez ich osadzenie na dnie naczynia (sedymentacja) oraz odebranie sklarowanej cieczy znad osadu (dekantacja). Klarowanie znajduje szerokie zastosowanie w wielu branżach przemysłu spożywczego, między innymi realizowane jest w browarnictwie i technologii winiarskiej. W poniższym rozdziale zostanie przedstawione klarowanie brzezki piwnej, którego celem jest usunięcie osadu białkowego powstającego podczas jej gotowania (warzenia).

### 1.1 Klarowanie brzezki - operacja procesu technologicznego

Proces technologiczny produkcji piwa można zasadniczo podzielić na dwa etapy: wytwarzanie brzezki oraz jej fermentację. Schemat technologiczny produkcji piwa został przedstawiony na rys. 1.01 [Kunze 1999].



Wytwarzanie brzezki odbywa się w warzelnii. Słód jęczmienny jest rozdrabniany (1) w młynku na śrutę i wraz z wodą trafia do kadzi zaciernej. Po zatarciu i wyługowaniu (2) możliwie największej ilości



rozpuszczalnych cukrów, roztwór (brzeczka) zostaje przepompowany do kotła warzelnego. W nim następuje jej gotowanie (3) z dodatkiem chmielu w postaci granulatu lub ekstraktów chmielowych. Objętość kotła warzelnego określana jest jako tzw. warka. Końcową fazą gotowania jest jej tzw. wybicie, w ramach którego następuje przepompowanie gorącej brzeczki do kadzi wirowo - osadowej (zwanej również kadzą wirową, kadzią z zawirowaniem lub whirlpoolem). W niej następuje oddzielenie tzw. osadu gorącego(4), który jest nazywany także osadem grubym lub przełomem. Jest on ubocznym produktem operacji gotowania brzeczki powstającym na skutek tzw. chmielenia brzeczki. Osad gorący został opisany w podrozdziale 1.2.1.

Operacja separacji osadu gorącego w kadzi wirowej rozpoczyna się od opróżnienia kotła i przepompowania gorącej brzeczki do kadzi wirowo - osadowej. Napełnianie zbiornika jest realizowane po stycznej do ściany zbiornika whirlpoola. W konsekwencji takiego sposobu napełniania brzeczka porusza się w zbiorniku ruchem wirowym. Gorący osad formuje się w postaci stożka, w centralnym obszarze dna zbiornika. Separacja brzeczki w warunkach przemysłowych, w zależności od objętości i parametrów przełomu trwa od 20 do 45 minut. Ten etap operacji oddzielania osadu gorącego nosi nazwę tzw. postoju lub wirowania (w terminologii branżowej spotyka się też określenia: „przerwy w whirlpoolu” lub „spoczynku”). Po tym przedziale czasu whirlpool jest opróżniany, a nagromadzony osad jest usuwany.

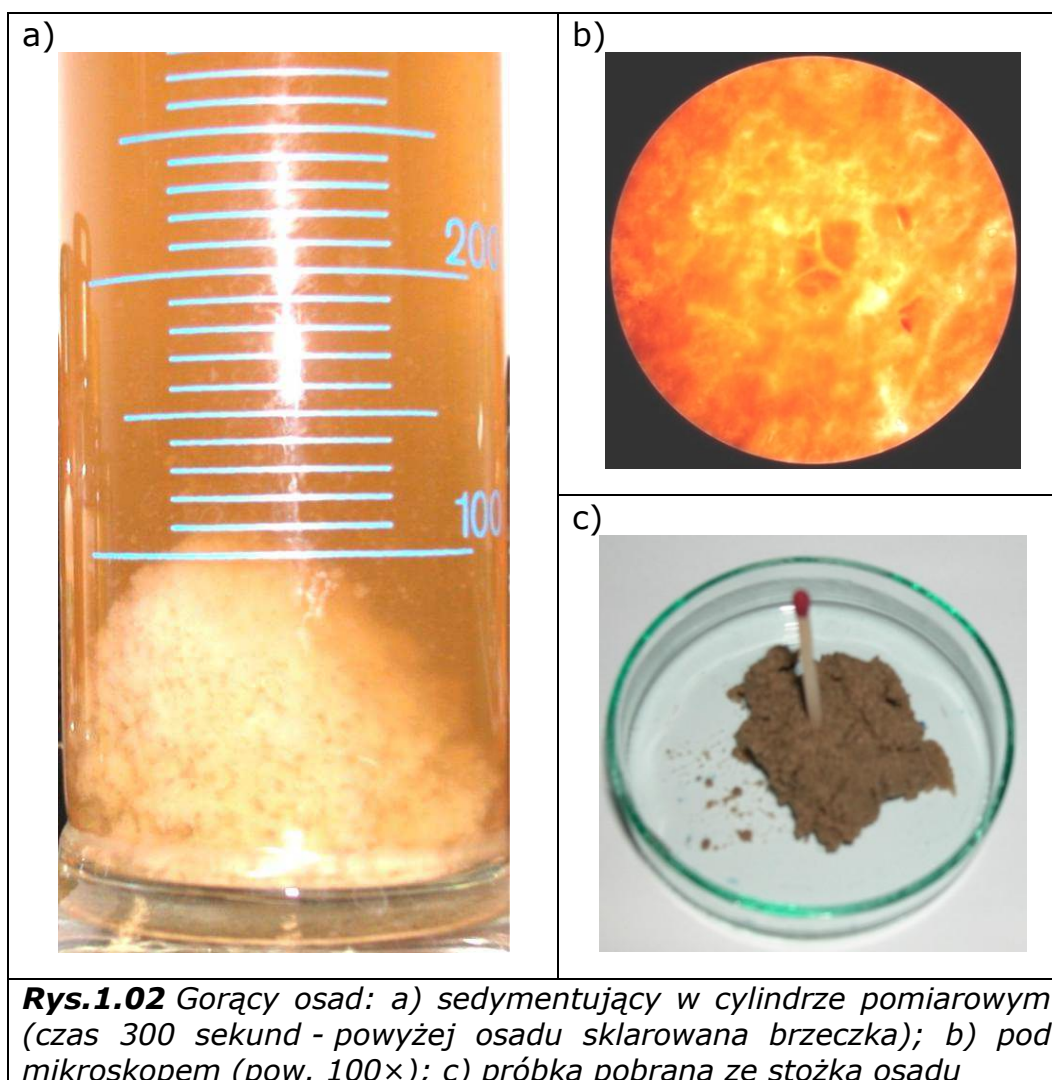
Drugim etapem procesu technologicznego produkcji piwa jest fermentacja brzeczki. Odbywa się ona w dziale produkcyjnym nazywanym fermentownią. Brzeczka schłodzona (5) do tzw. temperatury nastawienia i napowietrzona (6) wpompowywana jest do pionowych zbiorników cylindrycznych zwanych tankami. Do brzeczki nastawnej dodawane są drożdże. Następuje proces fermentacji (7), który trwa od 17 do 21 dni. Po fermentacji następuje filtracja i rozlewanie gotowego piwa (8).

## **1.2 Usuwanie gorącego osadu**

Rozwój metod oddzielania gorącego osadu z brzeczki trwa zasadniczo od początku browarnictwa przemysłowego. Pierwszymi aparatami do realizacji tej operacji była tzw. chłodnicza taca osadowa, którą zastąpiła kadź osadowa i kadź do wybicia. Poprzez rozwinięcie koncepcji klarowania brzeczki w zbiorniku powstała na początku lat sześćdziesiątych XX wieku konstrukcja zbiornika wykorzystująca specyficzny mechanizm przepływu (ruch wirowy klarowanej brzeczki powstający w wyniku napełniania zbiornika po stycznej). Realizacja operacji z wykorzystaniem kadzi wirowo - osadowej jest rozwiązaniem niewymagającym dodatkowych nakładów energetycznych, jak ma to miejsce w przypadku metod oddzielania z wykorzystaniem wirówki separacyjnej, dekantera, czy też prasy filtracyjnej.

### 1.2.1 Gorący osad

Gorący osad (rys. 1.02) powstający w wybitej brzeczce nazywany jest przełomem, jak również grubym osadem, lub gotowanym osadem. Pod względem chemicznym osad gorący składa się głównie z białek (40 - 65%), węglowodanów (4 - 10%), polifenoli (4 - 8%), substancji goryczkowych w postaci izo- i alfa - kwasów (4 - 8%) oraz kwasów tłuszczowych (1 - 2%). Pod względem fizycznym stanowi on zespół konglomeratów białkowych oraz pozostałości po chmieleniu brzeczki w postaci np. resztek koszyczków chmielowych (rys 1.02b). Wytrąca się on w trakcie gotowania brzeczki na skutek oddziaływania substancji garbnikowych zawartych w słodzie i chmielu. Występuje w postaci cząstek o wielkości od 30 do 80  $\mu\text{m}$ , które posiadają gęstość o wyższej wartości od gęstości brzeczki, a więc dobrze się osadzają tworząc zwartą masę osadu (rys 1.02a i rys 1.02c). Wymaga to jednak dostatecznie długiego okresu czasu sedimentacji oraz właściwych warunków temu sprzyjających [Kunze 1999; Briggs et al. 2004].



**Rys.1.02** Gorący osad: a) sedymetujący w cylindrze pomiarowym (czas 300 sekund - powyżej osadu sklarowana brzeczka); b) pod mikroskopem (pow. 100 $\times$ ); c) próbka pobrana ze stożka osadu

Ilość gorącego osadu w brzeczce po wybiciu wynosi od 0,06 do 0,08 kg/hl, a po jego usunięciu powinna wynosić poniżej 0,01 kg/hl. Z punktu widzenia prawidłowej realizacji procesu technologicznego produkcji dąży się do jego całkowitego usunięcia. Wiele browarów jednak nie osiąga wartości minimalnej, a w sporadycznych przypadkach udział osadu w schłodzonej brzeczce wzrasta do 0,02 kg/hl, co poważnie utrudnia prawidłową realizację procesu produkcyjnego.

Istnieją także metody chemicznego wspomaganie usuwania osadu gorącego przy wykorzystaniu dodatku klarującego w postaci kappa - karagenu i innych mieszanin substancji wspomagających klarowanie [Andrews 2006]

Problematyka związana z przyczynami i skutkami niedostatecznego stopnia separacji gorącego osadu została przedstawiona w podrozdziale 1.3.

### **1.2.2 Metody usuwania gorącego osadu**

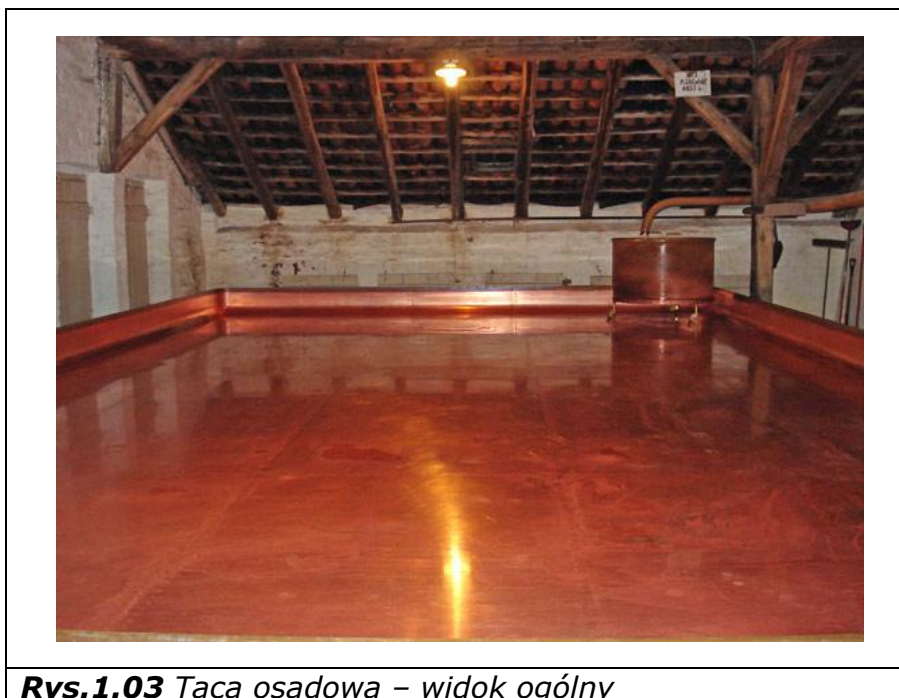
Na przestrzeni wielu lat metody usuwania osadu gorącego ewoluowały wraz z postępowaniem w dziedzinie technologii produkcji piwa. W ujęciu historycznym usuwanie gorącego osadu odbywało się przy wykorzystaniu tacy osadowej lub kadzi osadowej. W chwili obecnej najbardziej rozpowszechnioną metodą jego usuwania jest wirowanie brzeczki wybitej w whirlpoolu. Sporadycznie wykorzystuje się do tego celu wirówki klarujące lub filtrację. Przypadki takie mają jednak charakter jednostkowy. W kolejnych podrozdziałach przedstawione zostały aparaty do usuwania osadu gorącego.

#### **1.2.2.1 Taca osadowa**

Taca jest historycznie najstarszym aparatem do usuwania osadu gorącego. Jest płaskim, otwartym naczyniem (rys 1.03), do którego zostaje wybita brzeczka na wysokość od 0,15 do 0,25 m. Brzeczka pozostawała na tacy przez 0,5 do 2 h.

Gorący osad osadzał się tym szybciej, im mniejsza była wysokość napełnienia tacy. Bardzo często wybitą warkę pozostawiano na tacy przez całą noc, a następnego dnia opróżniano ją z wykorzystaniem otworów umiejscowionych w rynnie spustowej. Problemem związanym z eksploatacją tacy był odbiór z niej, pod koniec opróżniania, brzeczki zawierającej duże ilości osadu. Końcowa, spływająca brzeczka nazywana jest mętną brzeczka. Jej dalsze przetwarzanie wymaga dodatkowych zabiegów oczyszczających. Innym problemem powstającym podczas realizacji klarowania brzeczki przy wykorzystaniu tacy jest zanieczyszczenie brzeczki sklarowanej, która także bywała często zakażona bakteryjnie. Taki stan rzeczy wynikał z długiego czasu postoju w warunkach bezpośredniego dostępu powietrza atmosferycznego. W związku z tym poddawano ją dodatkowej obróbce

termicznej w sterylizatorze, co jednak zwiększało nakłady energetyczne, a więc podnosiło koszty realizacji operacji.



**Rys.1.03** Taca osadowa – widok ogólny

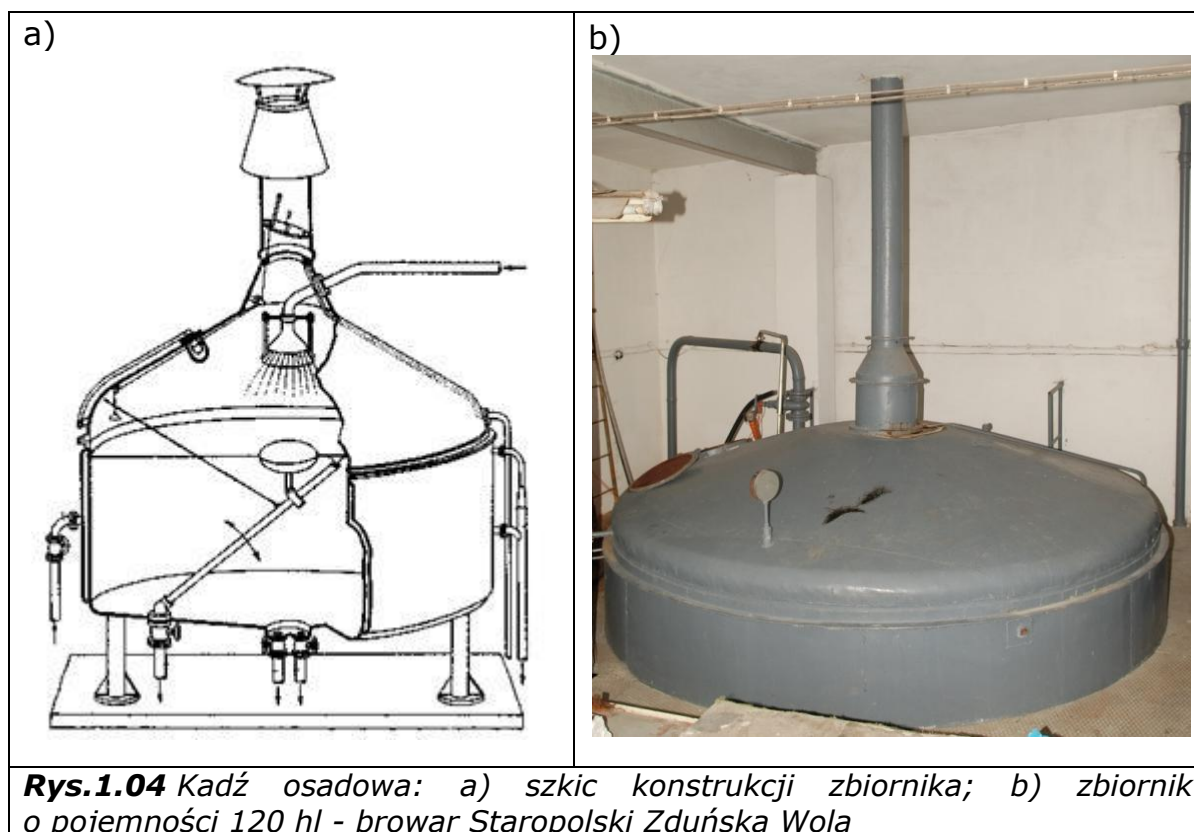
W chwili obecnej nie wykorzystuje się już tac osadowych, ze względu na bardzo częste występowanie zakażenia brzeczki i bardzo duży nakład pracy związany z eksploatacją tego urządzenia. Wyjątek stanowią nieliczne, małe browary, które produkują piwo w oparciu o technologię tradycyjną, niezmienną od początków przemysłowej realizacji procesu produkcji.

#### **1.2.2.2 Kadź osadowa**

Tacę osadową, której zastosowanie wymagało dość dużo powierzchni produkcyjnej, zastępowano z czasem kadzią osadową (rys. 1.04), która zajmowała znacznie mniej miejsca. Zbiornik taki posiada płaskie dno i jest zamknięty, co zmniejszało ryzyko zakażenia brzeczki. Dodatkowo kadź osadową wyposażano w wężownicę lub płaszcz chłodniczy. Brzeczka o temperaturze około 95°C była wybijana do kadzi osadowej na wysokość od 1,5 do 2 D. Przez wężownicę lub płaszcz chłodniczy podawano zimną wodę produkcyjną. Brzeczka ulega schłodzeniu do temperatury około 30°C, natomiast woda była podgrzewana i można było ją wykorzystać jako, np. wodę do zacierania lub wodę do mycia.

W kadzi osadowej gorący osad sedymentował dość długo, co było związane ze znaczną wysokością napełnienia zbiornika. Ze względu na to, że górne warstwy brzeczki są mniej zanieczyszczone cząstkami osadu niż dolne, brzeczkę z kadzi osadowej odbierano przy pomocy przewodu spustowego wyposażonego w pływak (rys. 1.04a). Zastosowanie pływaka pozwalało na umiejscowienie przewodu spustowego tuż poniżej swobodnej powierzchni

brzezki. Mętna brzezka pozostawała, i podobnie jak w przypadku tacy, poddana była dodatkowej obróbce. Kadź osadową zastępowano także tzw. kadzią do wybicia. Był to zbiornik pośredniczący (znajdujący się często poniżej poziomu warzelnii) pozbawiony instalacji chłodniczej, do którego wybita warka spływała z kotła warzelnego. W nim następowało oddzielenie osadu gorącego, przy czym takie rozwiązanie stwarzało problemy z odbiorem sklarowanej brzezki.



Kadzie osadowe i kadzie do wybicia są rozwiązaniami przestarzałymi i nie są już produkowane. W niektórych przypadkach małe browary, ze względów ekonomicznych, adaptują posiadane kadzie osadowe przystosowując je do specyfiki pracy kadzi wirowo - osadowej. Przykład modyfikacji konstrukcji zbiornika kadzi osadowej został przedstawiony w podrozdziale 2.4.2.

### 1.2.2.3 Whirlpool

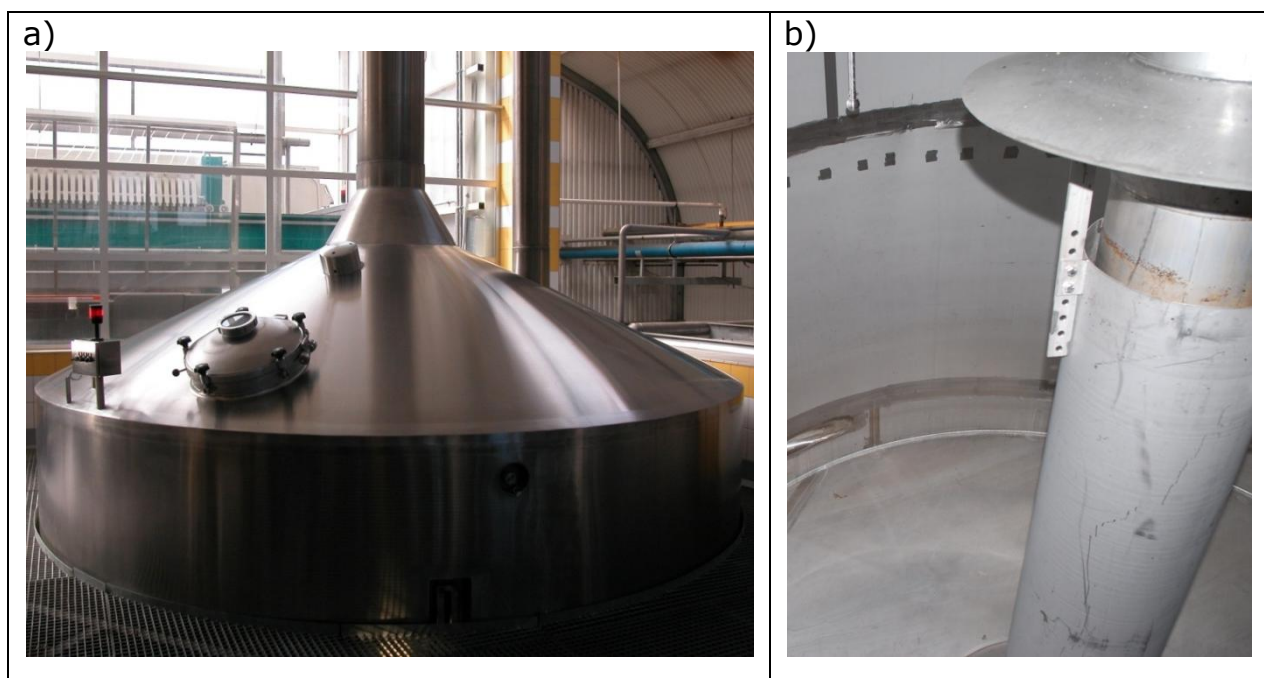
Współcześnie najbardziej rozpowszechnionym aparatem do usuwania osadu gorącego jest kadź wirowo - osadowa. Usuwanie gorącego osadu w whirlpoolu stanowi najpopularniejszą metodę zarówno pod względem technologicznym jak i ekonomicznym. Jest to metoda najbardziej efektywna i najtańsza.

Ponieważ niniejsza praca dotyczy konstrukcji zbiorników whirlpoola poświęcono tej tematyce rozdział.

#### 1.2.2.4 Whirlpool-kocioł

Szczególną odmianą kadzi whirlpool jest tzw. whirlpool-kocioł (rys. 1.05a). W tym przypadku brzczenka pozostaje w kotle warzelnym, który jednocześnie przejmuje zadanie whirlpoola. Brzczenka jest wprawiana w ruch wirowy poprzez obieg cyrkulacyjny. Jako whirlpool-kotły można stosować kotły warzelne z płaskim dnem pozbawione elementów zabudowy w postaci wewnętrznego podgrzewacza brzczenki (kochera) oraz warunkowo kotły wyposażone w wewnętrzny parasol dyfuzyjny (rys. 1.05b).

Istnieje także potencjalna możliwość wykorzystania do tego celu kotłów warzelnych z dnem wypukłym, tzw. kotły klasycznej konstrukcji, przy czym wykorzystanie konstrukcji innych niż posiadających płaskie dno jest zależne od występowania w danej konstrukcji sprzyjających warunków tworzenia się przepływów wtórnych pozwalających na odpowiednio dobre wydzielanie osadu i formowanie stożka.



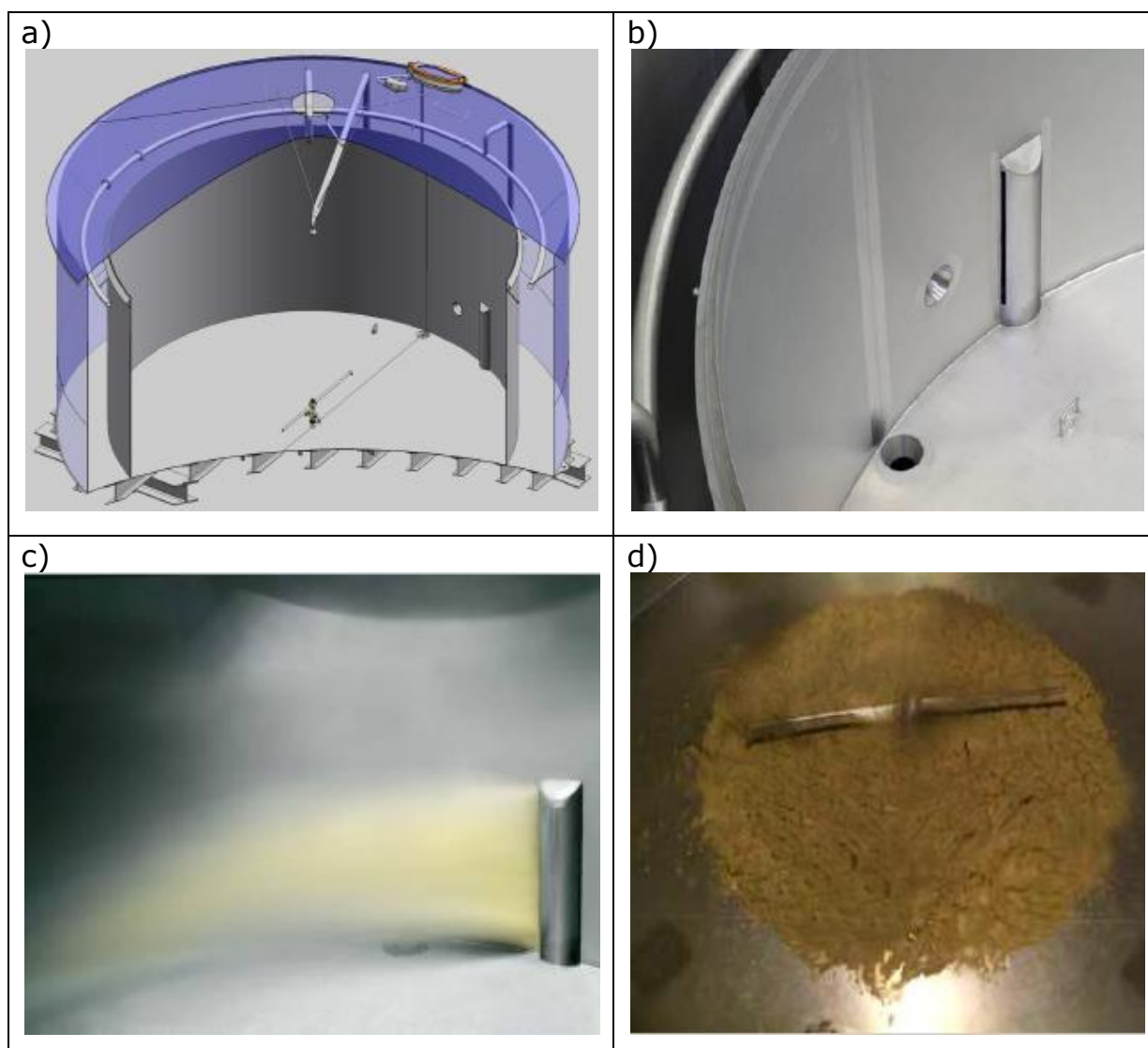
**Rys.1.05** Whirlpool-kocioł o wybiciu nominalnym 530 hl: a) widok ogólny; b) przewód zasilający parasol dyfuzyjny (typ Ziemann)

Whirlpool-kocioł jako koncepcja konstrukcyjna opierająca się na połączeniu dwóch operacji w ramach jednego naczynia nie jest już rozwijana. Spowodowane to jest aktualną tendencją (wynikającą z ekonomiki produkcji) gotowania brzczenki w naczyniach wyposażonych w wewnętrzny podgrzewacz, co uniemożliwia wykorzystanie kotła warzelnego do realizacji operacji usuwania osadu gorącego [Kunze 1999].

### 1.2.2.5 Whirlship

Najnowszy rozwiązaniem konstrukcyjnym modyfikacji klasycznej konstrukcji whirlpoola jest urządzenie o nazwie Whirlship Calypso (rys. 1.06a). Konstrukcja ta jest przedmiotem zastrzeżenia patentowego należącego do firmy Steinecker. Jest to zbiornik whirlpoola połączony z koncepcją wykorzystania płaszcza chłodniczego znanego z kadzi osadowej. W naczyniu tym można realizować jednocześnie usuwanie gorącego osadu i chłodzenie brzezki do temperatury nastawienia.

W tej konstrukcji nowatorskim rozwiązaniem jest wykonanie otworu dolotowego w postaci szczeliny (rys. 1.06b i rys.1.06c), aby w ten sposób zintensyfikować rotację brzezki. Na uwagę zasługuje także nietypowe rozwiązanie dyszy do usuwania osadu gorącego wykonanego w postaci obrotowego ramienia (rys. 1.06d)



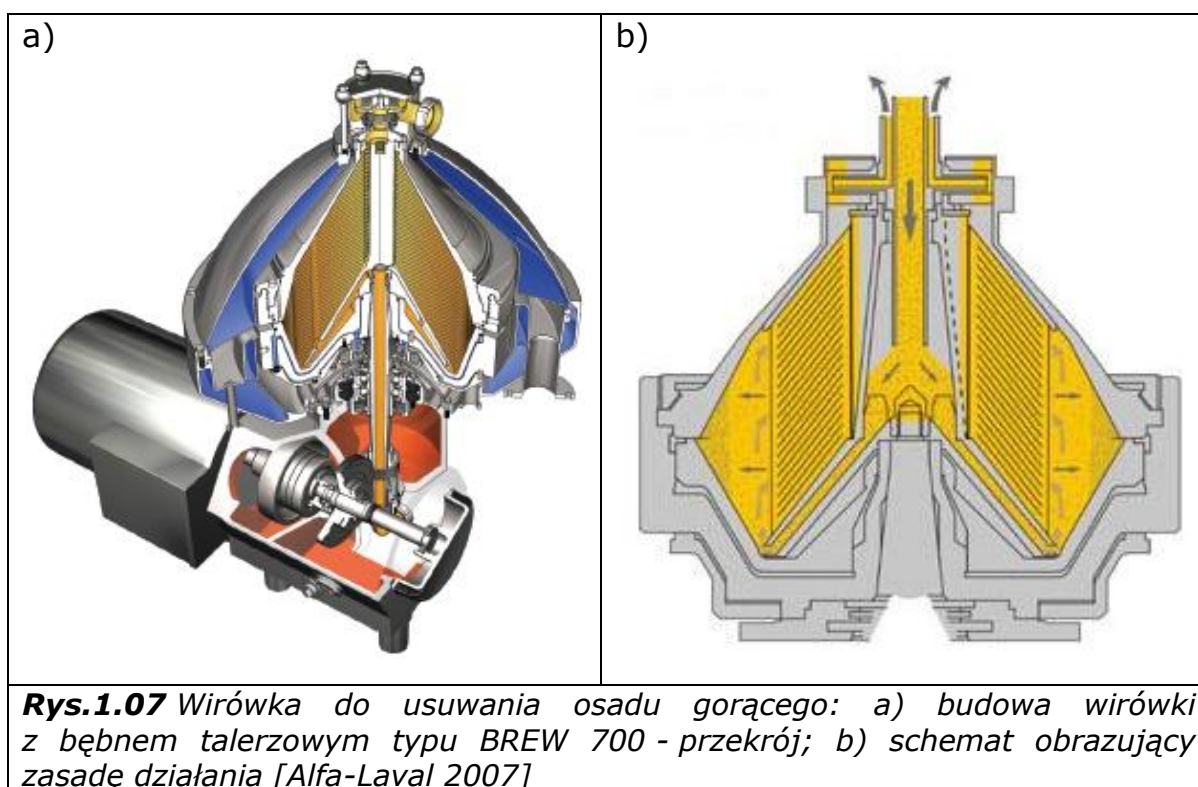
**Rys.1.06** Whirlship: a) szkic konstrukcji zbiornika - przekrój, b) rozwiązanie konstrukcyjne szczeliny zasilającej i otworów spustowych, c) początek etapu napełniania, d) stożek osadu [Steinecker 2008]

Whirlship jest absolutną nowością konstrukcyjną. Z dostępnych informacji wynika, iż w chwili obecnej jedyna tego typu instalacja pracuje w linii technologicznej warzelni browaru Bischofshof Brauerei w Regensburgu (Niemcy). Brak jest natomiast informacji dotyczących skuteczności jego działania w odniesieniu do jednoczesnego schładzania brzezki, a więc występowania tzw. zimnego zmętnienia w temperaturze poniżej 60°C. Według dostępnej w tym zakresie literatury jednoczesne ochładzanie brzezki podczas formowania się cząstek osadu gorącego wpływa niekorzystnie na jego sedymentację [Kunze 1999, Narziß 1980].

### 1.2.2.6 Wirówki

Grawitacyjne oddzielanie osadu gorącego może zostać zastąpione przez oddzielanie w wirówkach. Do tego celu można zastosować wirówkę z bębnem talerzowym.

Wirówka z bębnem talerzowym i funkcją samoczynnego usuwania osadu (rys.1.07a) jest urządzeniem samoopróżniającym się, które posiada wkładki (talerze) umożliwiające skrócenie drogi osadzania się osadu. Wirówki talerzowe (w zależności od modelu) wyposaża się w bęben o średnicy do 0,8 m, wirujący w zakresie od 2500 do 10000 obr./min. Średnica bębna i liczba obrotów stanowią w tym urządzeniu określoną proporcję wynikającą z parametrów wytrzymałościowych materiału, z którego bęben jest wykonany.



**Rys.1.07** Wirówka do usuwania osadu gorącego: a) budowa wirówki z bębnem talerzowym typu BREW 700 - przekrój; b) schemat obrazujący zasadę działania [Alfa-Laval 2007]



Bębny talerzowe zawierają do 200 stożkowych wkładek talerzowych posiadających kąt nachylenia od 50 do 60°. Kąt ten jest zależny od szorstkości powierzchni talerzy i współczynnika tarcia ślizgowego cząstek stałych (osadu). Grubość talerzy wynosi od 0,4 do 0,6 mm, odstęp pomiędzy nimi wynosi od 0,3 do 0,4 mm. W środku talerza umiejscowione są tzw. otwory wznoszenia, które po złożeniu pakietu tworzą kanały służące rozdziałowi wirowanej cieczy.

Zasada działania została przedstawiona na rys. 1.07b. Sedymentacja osadu następuje podczas przepływu zawiesiny w przestrzeniach między talerzami. Ruch mieszaniny separowanej odbywa się ku górze. Cząstki osadu jako cięższe przemieszczają się po ścianie talerza i zsuwają się po jego dolnej stronie na zewnątrz. Oczyszczona brzezka spływa po powierzchni talerza do środka. Z uwagi na krótką drogę sedymentacji proces ten przebiega bardzo szybko. Osad zbiera się na obwodzie wirującego bębna i jest usuwany w sposób okresowy lub ciągły.

Zaletami zastosowania wirówki jest znaczne skrócenie czasu koniecznego do usunięcia osadu oraz brak konieczności zainstalowania dodatkowego zbiornika do usuwania osadu. Stosując wirówkę klarującą można także zmniejszyć potencjalne ryzyko infekcji brzezki. Najważniejszą jednak zaletą tej metody klarowania jest minimalizacja zaniku podczas usuwania osadu gorącego do poziomu poniżej 0,03 całkowitej objętości wirowanej warki [Narziß 1980; Alfa - Laval 2007].

Wadą zastosowania wirówki są wysokie koszty inwestycyjne i produkcyjne. Szczególnie wysokie jest zużycie energii elektrycznej do napędu bębna wynoszące około 0,08 - 0,1 kWh/hl, co przy wybiciu na poziomie 500 000 hl (średniej wielkości browar) daje od 40 000 do 50 000 kWh/rok. Ponadto złożoność urządzeń instalacji do usuwania gorącego osadu powoduje, iż koszty eksploatacyjne takiego rozwiązania nie równoważą zysków w postaci zmniejszenia zaniku brzezki [Kunze 1999].

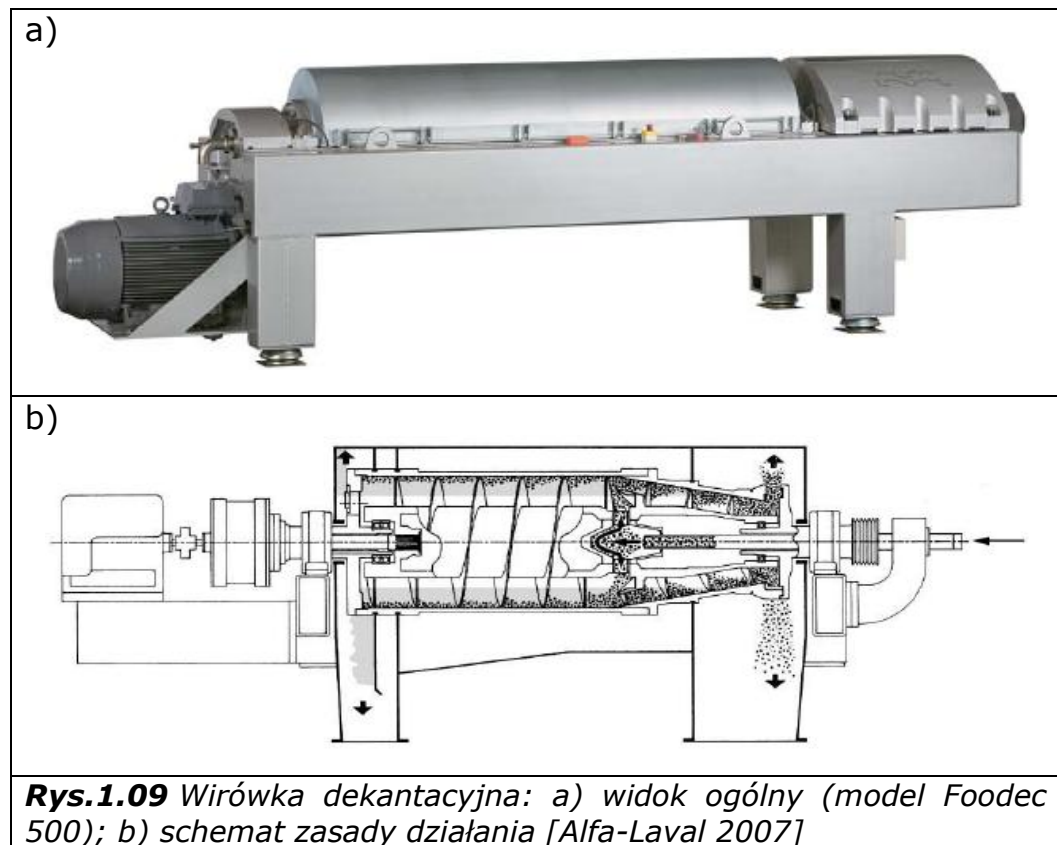
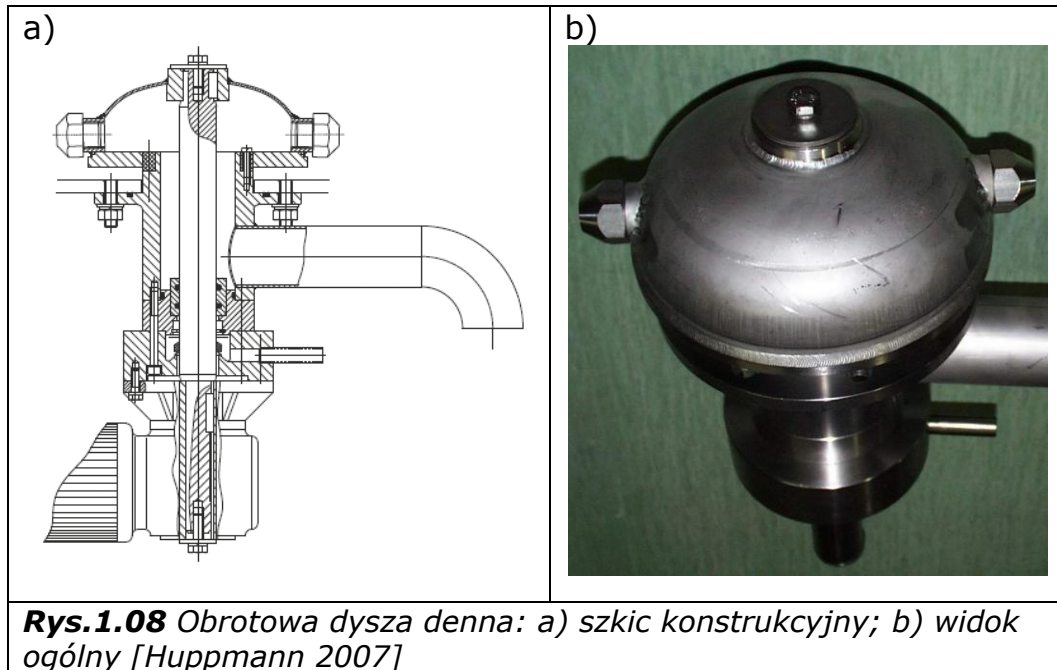
### **1.2.3 Zagospodarowanie gorącego osadu**

Na koniec usuwania gorącego osadu pozostaje osad nazywany mętą brzezka. Jest to mulista mieszanina o przybliżonej zawartości 0,75 brzezki i 0,25 osadu. Osad należy oddzielić i pozyskać brzezka, o ile jest to uzasadnione względami ekonomicznymi [Priest, Stewart 2000].

Do usuwania osadu ze zbiornika whirlpoola wykorzystuje się obrotową dyszę umiejscowioną na dnie w osi symetrii zbiornika. Jej działanie jest dodatkowo wspomagane przez dyszę myjącą. Na rysunku 1.08 przedstawiono przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne dyszy do usuwania osadu.

W dużych browarach do obróbki mętnej brzezki stosuje się najczęściej wirówkę dekantacyjną (rys. 1.09a). Osad usunięty z whirlpoola

jest odwirowywany (rys.1.09b), a brzczywka odzyskana w ten sposób jest zawracana do kotła warzelnego (w celu ponownego wyjąłwienia), poniewaŹ istnieje prawdopodobieństwo jej zakaŹenia. W ten sposób unika się dodatkowych nakładow finansowych związanvch z jej sterylizacją w osobnym urzãdzeniu.



Innym rozwiązaniem jest metoda dodawania nie poddanej obróbce mętnej brzezki do następnej warki na etapie ługowania wysłodzin w kadzi filtracyjnej. Metoda ta umożliwia pozbycie się osadu w ten sposób, że zostanie on zmieszany ze znacznie większą ilością wysłodzin. Takie postępowanie może jednak wpływać negatywnie na cechy jakościowe gotowego piwa, a także obniża przydatność wysłodzin jako ubocznego produktu o przeznaczeniu paszowym.

Sporadycznie wykorzystuje się do zagęszczania mętnej brzezki prasę filtracyjną, przy czym zastosowanie tej metody wymaga wysokich nakładów energetycznych, a efekt ekonomiczny jest niewspółmierny do poniesionych nakładów.

Z punktu widzenia ekonomiki produkcji dużego browaru, każda ilość odzyskanej brzezki ma znaczenie. Jeżeli z każdej warki będzie można odzyskać chociaż jeden hektolitr, to przy ilości 1500 warek w roku, będzie to stanowiło 1 500 hl brzezki dodatkowo.

Obróbka osadu gorącego ma też dodatkowy aspekt proekologiczny. Mętna brzezka stanowi ściek wysokoobciążony, który według obowiązujących regulacji prawnych należy bezwzględnie zagospodarować poprzez poddanie go procesom odnowy wody.

### **1.3 Problemy usuwania osadu gorącego**

Z punktu widzenia technologicznej realizacji procesu produkcji brzezki piwnej gorący osad powinien zostać bezwzględnie usunięty, gdyż dla dalszego jej przetwarzania jest szkodliwy. Dotyczy to parametrów jakościowych gotowego produktu, czyli piwa. Obecność osadu gorącego znacznie utrudnia klarowanie brzezki po schłodzeniu, powoduje zlepianie drożdży podczas fermentacji, oraz podwyższa globalną ilość osadu, co prowadzi do globalnego zwiększenia zaniku piwa. Ponieważ zawiera kwasy tłuszczowe słodu negatywnie oddziałuje na smak, zapach i kolor gotowego piwa. Utrudnia, lub w skrajnych przypadkach uniemożliwia także jego filtrację.

Oddzielenie cząstek osadu gorącego zależy przede wszystkim od zachowania się ich w brzezce, a więc zdolności do wydzielania się, czyli tworzenia konglomeratów, a także od postępowania aglomeracji skoagulowanych cząstek białkowych.

O podatności brzezki na klarowanie decydują zasadniczo czynniki technologiczno - surowcowe oraz procesowo - konstrukcyjne.

Najważniejszy wpływ na parametry technologiczne i chemiczne brzezki mają zastosowane w procesie technologicznym surowce (słód, woda i chmiel). Ich jakość wpływa, w sposób decydujący, na jakość brzezki,

a w konsekwencji na jakość produktu finalnego. Znany jest powszechnie wpływ wartości pH, zawartość rozpuszczonych soli mineralnych i zawartość polifenoli w brzeczce na jej poprawne klarowanie. Najczęstszymi przyczynami nieprawidłowego tworzenia się przełomu są:

- a) niekorzystny skład chemiczny śruty słodowej, w wyniku którego powstaje tzw. mętna filtracja;
- b) niewłaściwy skład chemiczny wody technologicznej;
- c) dawka chmielu pozbawiona dostatecznej ilości substancji garbnikowych odpowiedzialnych za kłaczkowanie gorącego osadu.

Wśród czynników procesowych i konstrukcyjnych należy wymienić:

- a) czas i temperaturę realizacji operacji;
- b) kształt i wysokość napełnienia zbiornika, w którym jest operacja realizowana;
- c) odpowiedni dobór średnicy dyszy zasilającej;
- d) dobór odpowiedniej prędkości napełnienia;
- e) uwarunkowania konstrukcyjne przewodów doprowadzających klarowaną brzeczke (np. ilość kolanek i promień zaokrąglenia połączeń kątowych) [*Denk 1997*].

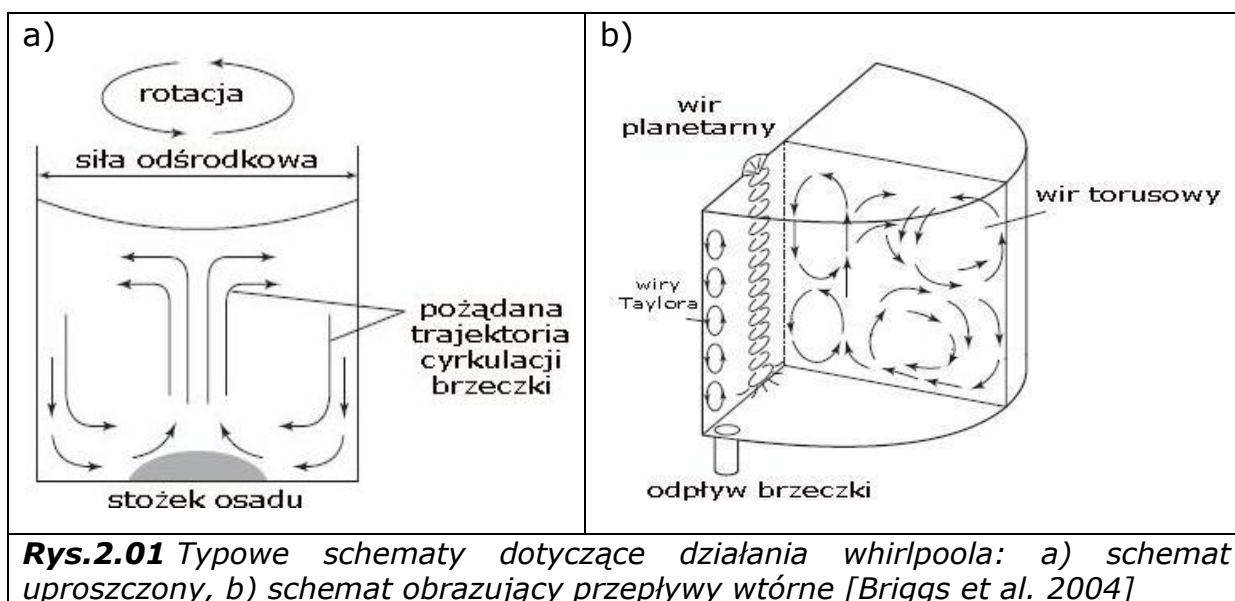
Ponieważ niniejsza praca dotyczy zasadniczo kadzi wirowo - osadowej dalsze rozważania na temat wpływu parametrów konstrukcyjnych na klarowanie brzeczki wybitej ograniczono zasadniczo do jej konstrukcji.

## 2. Kadź z zawirowaniem whirlpool

Whirlpool jest powszechnie wykorzystywany w browarnictwie już od ponad 40 lat. Mimo tak długiego okresu czasu znamienym jest fakt, iż tylko część tego typu aparatów pracuje w sposób zadawalający. Największym mankamentem tych urządzeń jest niewłaściwy kształt uformowania się stożka osadu w trakcie realizacji klarowania oraz jego rozmywanie się podczas końcowego etapu opróżniania zbiornika. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy poszukiwać w obszarze niewłaściwie dobranych parametrów procesowych realizacji operacji oraz niekorzystnych geometrycznie warunków formowania się przepływu w zbiorniku. Powyższe czynniki decydują więc, np. o braku uformowania się stożka osadu, zbyt małej jego zwięzłości (konsystencji) lub skrajnie długim okresie czasu koniecznego do sklarowania zawiesiny osadu.

### 2.1 Zasada działania i budowa

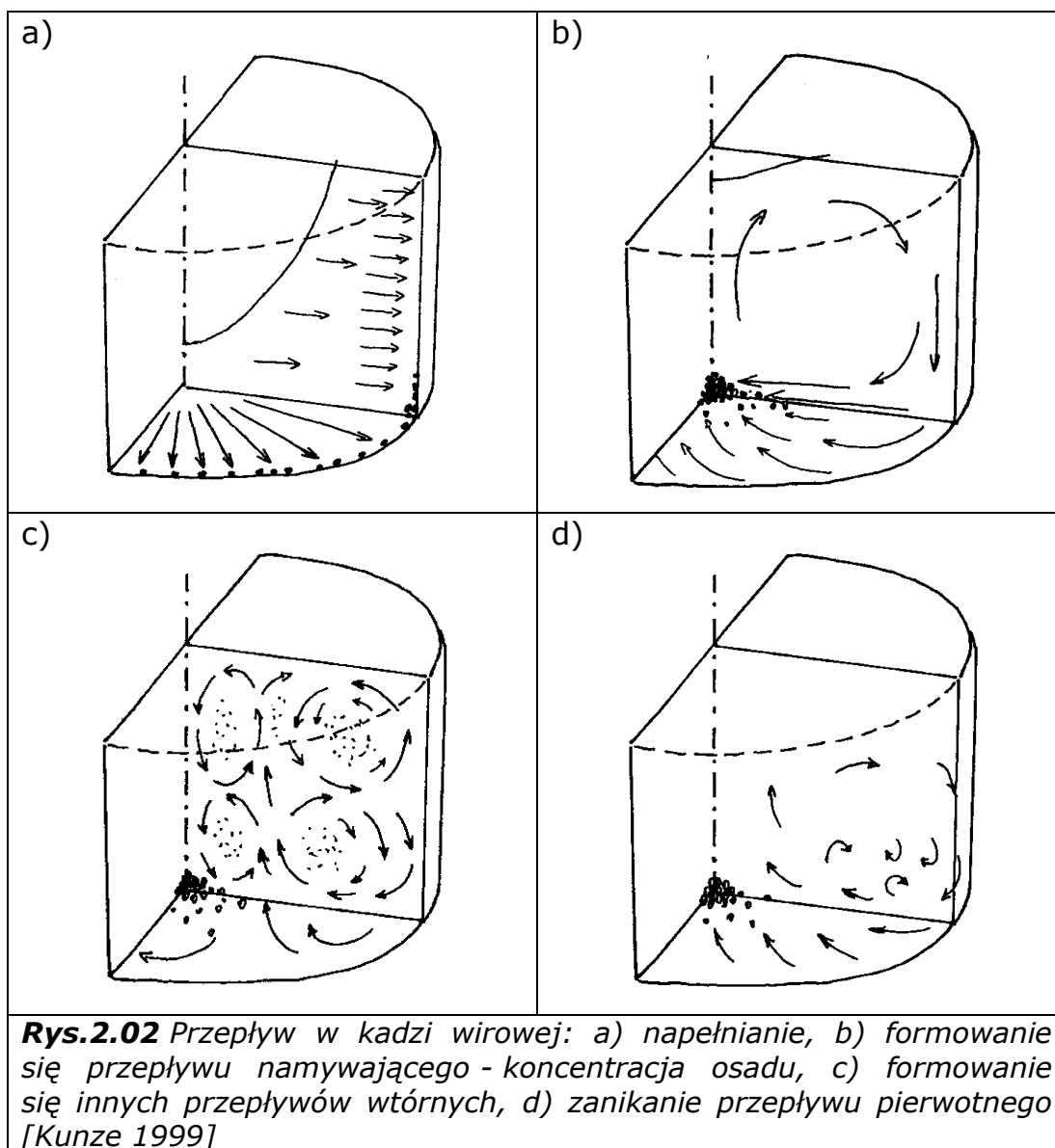
Większość dostępnych opracowań w zakresie sposobu działania kadzi wirowo – osadowej podaje jedynie uproszczony schemat i założenia jej funkcjonowania. Na rysunku 2.01a przedstawiono przykład takiej prezentacji. Bardziej złożony natomiast jest schemat prezentujący system przepływów w whirlpoolu. Są to przepływy o charakterze drugo- i trzeciorzędowym, występujące w kadzi wirowo – osadowej. Ten sposób prezentacji pochodzi z opracowań Prof. Viktora Denka i jest powszechnie wykorzystywana w podręcznikach browarnictwa, oraz w większości publikacji naukowych dotyczących kadzi wirowo – osadowej.



**Rys.2.01** Typowe schematy dotyczące działania whirlpoola: a) schemat uproszczony, b) schemat obrazujący przepływy wtórne [Briggs et al. 2004]

Działanie whirlpoola przedstawiono schematycznie na rysunku 2.02. Brzeczka wybita zostaje przepompowana z kotła warzelnego do whirlpoola, który zostaje napełniony przez dysze zasilającą umiejscowioną stycznie,

prostopadle do tworzącej ściany zbiornika. Sposób napełnienia determinuje występowanie ruchu wirowego (rys.2.02a) w brzeczce (przepływu pierwotnego), którego cechą charakterystyczną jest tworząca się swobodna powierzchnia w kształcie zbliżonym do paraboloidy obrotowej (na rysunku przedstawionej w nienaturalnych proporcjach). W początkowej fazie cząstki osadu gorącego zostają przemieszczone (w wyniku oddziaływania siły ośrodkowej) na zewnątrz, w okolice ściany zbiornika.

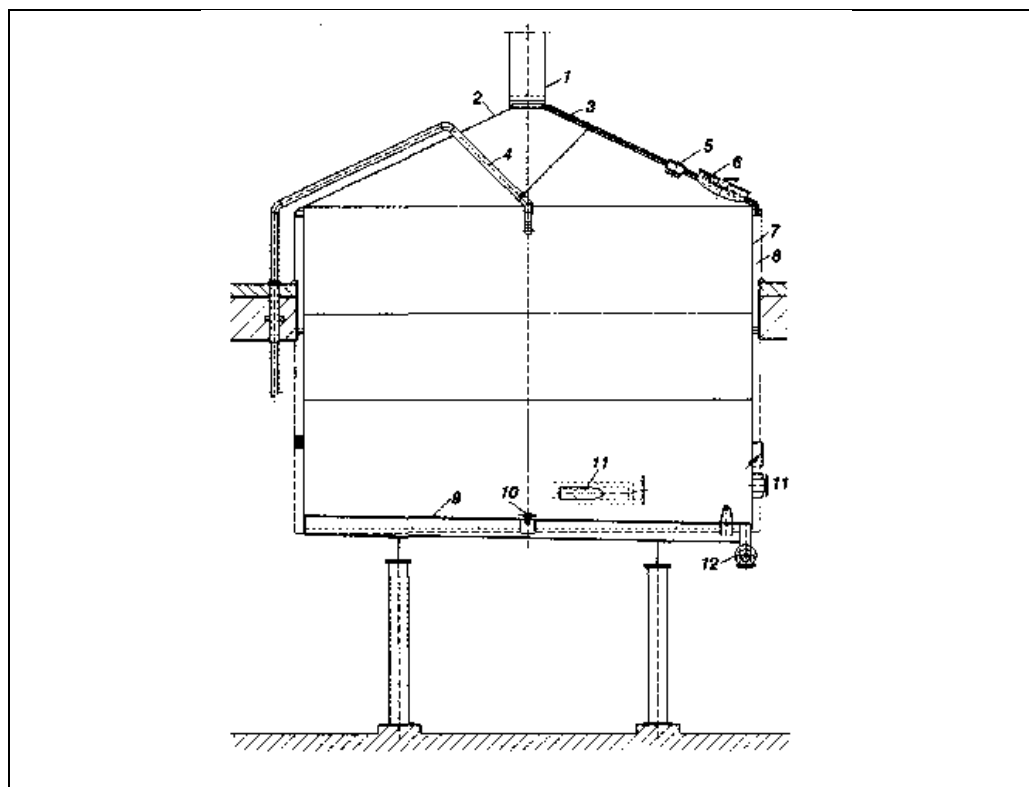


W miarę wyhamowywania przepływu pierwotnego powstaje silny przepływ wtórny, który powoduje, iż opadający osad zostaje zgarniany w kierunku centralnego obszaru dna zbiornika. Podczas wyhamowywania rotacji klarowanej brzeczki, obok przepływu namywającego osad, występują w whirlpoolu także inne zawirowania tworzące cały system przepływów o charakterze drugorzędowym (rys. 2.02c). Niektóre z nich mogą utrudniać efekt whirlpoola i tym samym wytrącenie osadu gorącego i formowanie stożka. Według dostępnych źródeł literaturowych dotyczących przepływów

formujących się w whirlpoolu szczególnie ujemnie oddziałują przepływy (wir) torusowy o zmiennym położeniu, który wprawia w ruch także inne, chwilowo występujące przepływy [Dürholt 1988, Denk 1997, Kunze 1999].

W miarę upływu czasu wirowania zanika przepływ pierwotny, zanikają także zawirowania drugorzędowe oraz inne przepływy występujące chwilowo i lokalnie. Przepływ namywający stożek utrzymuje się jednak przez cały okres czasu wirowania. Schematyczna prezentacja działania whirlpoola przedstawiona na rysunku 2.02 nie uwzględnia występujących przepływów określanych w literaturze jako trzeciorzędowe (są to wiry przyścienne Taylora oraz wiry planetarne).

Na rysunku 2.03 przedstawiono schemat budowy kadzi wirowo - osadowej w wersji konstrukcyjnej posiadającej płaskie dno o  $1^\circ$  spadku w kierunku otworu odpływowego. Konstrukcja ta posiada dysze zasilającą umiejscowioną przy dnie, otwory spustowe umiejscowione na ścianie zbiornika oraz w pobliżu połączenia pobocznic i dna zbiornika.



**Rys.2.03** Szkic konstrukcyjny whirlpoola: 1 - komin wyciągu; 2 - kopuła; 3 - odpływ wody kondensacyjnej, 4 - dysza CIP; 5 - oświetlenie; 6 - otwór rewizyjny; 7 - płaszcz izolacyjny; 8 - izolacja; 9 - dno zbiornika, 10 - dysza denną CIP; 11 - dysza zasilająca; 12 - przewód odbierający [Kunze 1999]

Stosunek wysokości napełnienia breczki ( $H_N$ ) do średnicy ( $D$ ) wynosi dla tej konstrukcji maksymalnie 1. Generalnie dla konstrukcji whirlpoola może on wynosić od 0,5 do 2, a w skrajnych przypadkach nawet 5. Zbiorniki whirlpoola są całkowicie izolowane, co przeciwdziała niekorzystnemu

ochładzaniu się brzezki podczas realizacji operacji usuwania osadu gorącego.

Wyróżnia się zasadniczo cztery etapy realizacji operacji usuwania osadu gorącego z wykorzystaniem whirlpoola. Są to: napełnianie, postój, odbiór sklarowanej brzezki i usuwanie osadu. Poprawna realizacja trzech pierwszych etapów decyduje o skuteczności całej operacji. Czas napełniania, wirowania zasadniczego i opróżniania jest uzależniony od objętości roboczej whirlpoola oraz wypracowanych parametrów procesowych realizacji operacji.

Pierwszym z etapów pracy jest napełnianie. Jest to etap decydujący o warunkach przepływu, jakie ustalą się po jego zakończeniu. Jego czas trwania zależy od objętości warki. Prędkość napełniania jest na tyle zróżnicowana, że zasadniczo nie istnieje żaden standard w tym zakresie. Według literatury whirlpoole zasilane są brzezka z prędkością od 1,5 do 3,5 m/s [Kunze 1999], podawany jest także przedział od 2 do 5 m/s [Hardvick 1994], a skrajnych przypadkach realizacji operacji w warunkach przemysłowych do 14 m/s [Chlavaček, Lhotsky 1970]. Zasilanie realizowane jest najczęściej przy zastosowaniu pompy brzeznej, co jednak stoi w sprzeczności z wnioskami wielu autorów publikacji na temat technologii browarniczej, a które to wnioski jednoznacznie wskazują na negatywny wpływ przepompowywania mechanicznego brzezki objawiający się rozbijaniem kłaczkującego osadu wytrąconego w procesie gotowania [Narziß 1980; Dürholt 1988; Kunze 1999]. Przepompowywanie wymuszone jest jednak względami konstrukcyjnymi pomieszczenia warzelni, które projektowane i wykonywane są w układzie jednopoziomowym. W przypadku whirlpool-kotłów przepompowywanie w obiegu cyrkulacyjnym jest jedyną możliwością wprowadzenia brzezki w ruch wirowy. Problemem przy wykorzystaniu pomp brzezki jest właściwy dobór parametrów jej pracy, czyli taki, który będzie powodował możliwie najmniejszy stopień homogenizacji osadu. Wysokość na której umiejscowiony jest wlot brzezki jest także zróżnicowany. Istnieją konstrukcje, w których wlot umiejscowiony jest powyżej zwierciadła swobodnego nalanej brzezki do wysokości nominalnej. Znaczna część urządzeń posiada wlot na wysokościach od 0,2 do 0,7  $H_n$ . Średnica wlotu jest także zmienna w zależności od konstrukcji i objętości nalewu nominalnego.

Kolejnym etapem, najważniejszym, z punktu widzenia realizowanej operacji, jest etap wirowania, dla którego początkowa prędkość maksymalna przepływu napędowego (w obszarze zbliżonym do ściany zbiornika) wynosi 0,9 wartości prędkości napełniania [Michel 1988]. Na tym etapie wykształca się system przepływów wtórnych. Warunki jakie ustalają się po realizacji napełniania w połączeniu z warunkami geometrycznymi zbiornika determinują poprawność działania whirlpoola. Praca aparatu na tym etapie jest właściwie niesterowalna. Czas realizacji tego etapu wynosi od 10 do 45 minut i jest uzależniony od wielu czynników, między innymi do uwarunkowań konstrukcyjnych danego zbiornika (smukłości), rodzaju brzezki (zawartości ekstraktu i technologii jej produkcji).



Trzecim etapem realizacji operacji jest odbiór sklarowanej brzezki (zwany spustem brzezki). Z punktu widzenia poprawności realizacji operacji jest on równie ważny jak napełnienie i wirowanie. Opróżnianie whirlpoola realizowane jest najczęściej sekwencyjnie przy wykorzystaniu otworów spustowych umiejscowionych na różnej wysokości ściany zbiornika. Najistotniejszym elementem tego etapu jest odbiór brzezki z wysokości, na której umiejscowiony jest stożek osadu. Ten etap jest wyjątkowo wymagający, z uwagi na możliwość występowania rozmywania stożka. Pod koniec realizacji opróżniania whirlpoola najczęściej wykorzystuje się otwór spustowy umiejscowiony w dnie zbiornika. Często, aby uniknąć rozmywania stożka, pod koniec opróżniania celowo zmniejszane jest natężenie przepływu odbieranej brzezki. W skrajnych przypadkach, dla osadów luźnych, pozostawia się część brzezki odstępując od jej całkowitego odebrania, co jednak w sposób istotny zwiększa zanik brzezki.

## 2.2 Historia rozwoju i zastosowania whirlpoola

Pierwszy opis zjawiska formowania cząstek osadu, w naczyniu cylindrycznym, w postaci stożka pochodzi z 1926 roku. Autorem pierwszej wzmianki o istnieniu w naczyniu cylindrycznym przepływu wtórnego przy dnie, skierowanego do środka naczynia był Albert Einstein. Określił on obserwowane zjawisko mianem „paradoksu filiżanki herbaty”. Paradoks, zdaniem Einsteina, polegał na tym, iż fusy herbaciane przemieszczały się w kierunku przeciwnym, niż wynikałoby to z oddziaływania siły odśrodkowej [Einstein 1926].

Pierwsze przemysłowe zastosowanie zbiornika cylindrycznego, w którym wykorzystano świadomie zjawisko koncentracji osadu w postaci stożka uformowanego na dnie miało miejsce w Karlsruhe, w 1930 roku. Wykorzystano tam zbiornik o średnicy  $D = 30$  m zasilany stycznie, do separacji cząstek stałych w procesie odnowy wody. Konstrukcja tego zbiornika stała się przedmiotem patentu należącego do Geiger Fabrik [Geiger 1984]. Do chwili obecnej firma oferuje tego typu urządzenie pod nazwą „Passavant Rundsandfang”. Jest to piaskownik zasilany stycznie wykonywany w kilku wariantach konstrukcyjnych o średnicy od 2,0 do 7,3 m i pojemności od 240 do 11 400 m<sup>3</sup> [Geiger 2007].

Pierwsza publikowana informacja na temat zastosowania whirlpoola w browarnictwie pochodzi z 1960 roku. Przedstawiono w niej eksperymentalną konstrukcję kadzi wirowo - osadowej zainstalowaną w browarze Molson - Montreal, w Kanadzie. W publikacji tej brak było jednak informacji na temat skuteczności separacji jak i parametrów realizacji procesu rozdzielania [Hudston 1960].

Pionierskie prace na temat operacyjnego wykorzystania whirlpoola w browarach Niemieckich pochodzą z drugiej połowy lat sześćdziesiątych

ubiegłego wieku. Zawierają one pierwsze próby doświadczalnego podejścia do wyjaśnienia mechanizmu powstawania przepływu drugorzędowego. Postulatem stawianym na podstawie wyników badań było wydłużenie przedziału czasu rotacji brzezki w zbiorniku (czasu postoju) powyżej wartości przedziału czasu swobodnej sedymentacji grawitacyjnej cząstek osadu gorącego, co miało na celu umożliwienie transportu przez przepływ drugorzędowy wszystkich cząstek osadu do formującego się stożka [Huber 1965; Münch 1967].

Istnieją także publikacje na temat badań doświadczalnych związanych z przepływem drugorzędowym namywającym osad, w których postulowano istnienie tzw. obszarów zaporowych koncentracji osadu. Istota występowania takiego obszaru sprowadza się do założenia, iż istnieje taki promień, dla którego nie można zrealizować formowania się osadu w postaci stożka, bez względu na wielkość cząstki [Tonn 1967]. Taki sposób podejścia jednoznacznie wskazuje na brak znajomości mechanizmu tworzenia się przepływu wtórnego. Teza o istnieniu „obszarów zaporowych” była jednak w latach późniejszych często przyjmowana bezkrytycznie przez innych autorów [Petersen 1987].

Pierwszymi pracami w zakresie teoretycznej mechaniki płynów, a dotyczącymi bezpośrednio systemu przepływów w zbiorniku whirlpoola są publikacje pochodzące z naukowych ośrodków Niemieckich, głównie z Katedry Mechaniki Technicznej Uniwersytetu w Monachium [Stefaniak 1968; Tröster 1969; Nielsen 1968]. Uzupełnienie stanowią publikacje anglojęzyczne w tym zakresie [Hudston 1969; Handley, Hough 1969], które oprócz teoretycznych podstaw dostarczają interesującego materiału bazowego w zakresie badań modelowych whirlpoola, a także charakterystyki osadu gorącego. Publikacje te będą omawiane szerzej w podrozdziałach pracy dotyczących modelu ruchu płynu w whirlpoolu.

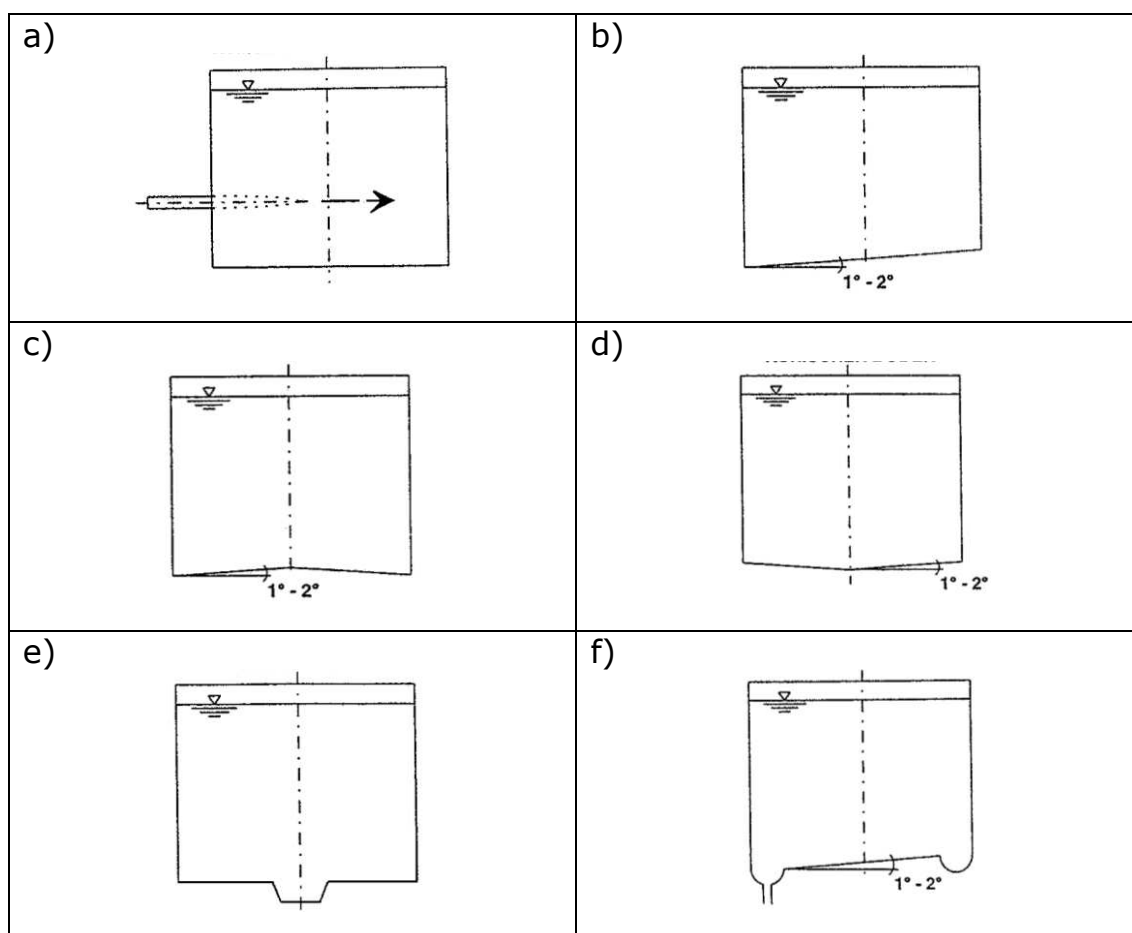
Większość publikacji dotyczących zastosowania kadzi wirowej w technologii browarniczej koncentrowało się głównie w zakresie niepoprawnego funkcjonowania bądź niedostatecznego stopnia separacji osadu gorącego. W większości przypadków wiele parametrów technologicznych realizacji procesu zmieniano jednocześnie w tym samym czasie, a więc trudno było ustalić błędne wartości parametrów lub wpływ poszczególnych na niepoprawne funkcjonowanie aparatu. Także konstrukcja samych zbiorników nie była dotychczas przedmiotem dogłębnej analizy.

### **2.3 Klasyfikacja konstrukcji**

Istnieje wiele wariantów konstrukcyjnych kadzi wirowo - odsadowej. Wyróżnić można szereg odmian konstrukcyjnych, w zależności od smukłości zbiornika, zróżnicowanego kształtu dna, umiejscowienia i ilości oraz średnicy dysz zasilających i otworów spustowych.

Powszechnie stosowany jest podział ze względu na kształt zbiornika i jego objętość roboczą.

Najczęściej spotykane kształty whirlpoola został przedstawione na rysunku 2.04. Kształt podstawowy to cylindryczny zbiornik z płaskim dnem (rys. 2.04a). Jego kształt wywodzi się z kadzi osadowych i jest charakterystyczny dla konstrukcji zbiorników adaptowanych jako kadzie z zawirowaniem. Większość konstrukcji whirlpoola posiada kształt z płaską dennicą pochyloną w kierunku otworu spustowego umiejscowionego w dnie, w pobliżu jego połączenia z pobocznicą (rys. 2.04b). Kąt pochylnia w poszczególnych wariantach konstrukcji whirlpoola wynosi od 1 do 2°. Kształty przedstawione na rysunku 2.04c i 2.04f są charakterystyczne dla wariantu konstrukcyjnego whirlpool-kotła (opisanego w podrozdziale 1.2.2.4). Kształt na rysunku 2.04e z tzw. kubkiem osadowym (jest to wgłębienie pośrodku dna kadzi, w którym może się zbierać osad) nie znalazł powszechniejszego zastosowania. Do tego rozwiązanie takie pogarsza efekt whirlpoola, ponieważ powoduje zaburzenia w obszarze warstwy granicznej przy dnie zbiornika, a także utrudnia właściwe odsączenie stożka osadu i oczyszczanie zbiornika po realizacji klarowania [Denk 1997].



**Rys.2.04** Najczęściej występujące kształty zbiornika whirlpoola: a) podstawowy; b) z pochyloną dennicą; c) ze stożkowym (wypukłym) dnem; d) ze stożkowym (wklęsłym) dnem; e) z dnem, z misą osadową; f) z dnem, z pochyloną półką osadową [Denk 1997]

Podział ze względu na objętość zbiornika ma ścisłe powiązania z wielkością i zdolnością produkcyjną warzelni. Ze względu na wielkość można podzielić kadzie wirowo - osadowe pracujące na:

- a) warzelniach laboratoryjnych;
- b) warzelniach browarów restauracyjnych (mikrobrowarów) i minibrowarów (produkujących do 20 000 hl brzezki rocznie);
- c) warzelniach browarów średnich (produkujących od 20 000 do 1 000 000 hl brzezki rocznie);
- d) warzelniach browarów dużych (produkujących powyżej 1 000 000 hl brzezki rocznie).

Dobór pojemności whirlpoola do wydajności warzelni zostaje określony na podstawie objętości pojedynczej warki, a więc pojemność jednego wybicia powinna wypełnić każdą wirową w zakresie optymalnych parametrów realizacji operacji.

Kształty, pojemności i uzbrojenie (wyposażenie) whirlpooli zależą także od zasobności browarów. Część browarów małych adaptuje istniejące zbiorniki na potrzeby wykorzystania ich jako kadzie wirowe lub wykonuje we własnym zakresie nowe konstrukcje oparte o doświadczenie i spostrzeżenia osób pracujących na warzelni. Browary średnie zamawiają najczęściej gotowy, uzbrojony zbiornik, w jednej z kilku firm polskich specjalizujących się w rozwiązaniach konstrukcyjnych dla browarnictwa (Kates Olsztyn, Spomasz Pleszew i Milfor Olsztyn), Browary duże korzystają z usług potentatów światowych oferujących kompletne wyposażenie całej warzelni (GEA - Huppmann, Ziemann, lub Steinecker).

## **2.4 Przegląd konstrukcji**

Zbiornik kadzi wirowej stanowi integralną część linii technologicznej warzelni. Jego dobór powinien stanowić przedmiot rozważań i obliczeń już na poziomie koncepcji projektowania warzelni. Umieszczenie, pojemność, kształt powinien odpowiadać potrzebom praktyki produkcyjnej, która wymaga jak najkrótszego czasu postoju brzezki w zbiorniku a także możliwości bezproblemowego usunięcia samego stożka osadu po opróżnieniu kadzi wirowej

Poniżej przedstawiono rozpoznanie dotyczące konstrukcji kadzi wirowo - osadowych z podziałem na wielkości aparatów. Rozpoznanie dotyczy większości instalacji pracujących na warzelniach browarów w Polsce oraz przedstawia kilka rozwiązań w zakresie konstrukcji wykorzystywanych na świecie, a dotyczących instalacji laboratoryjnych, których brak w Polsce.

### 2.4.1 Kadzie laboratoryjne

Warzelnie szkoleniowe stanowią wyposażenie piwowarskich instytutów badawczych oraz jednostek kształcących przyszłych browarników. Na rysunku 2.05. przedstawiono kadź wirową stanowiącą część instalacji warzelni szkoleniowej laboratorium Uniwersytetu Stanowego w Oregonie. Zbiornik o pojemności 1 hl posiada klasyczną konstrukcję o pochyleniu dna wynoszącym 1°.

W przypadku warzelni szkoleniowych wyposażane są one w miniatury urządzeń instalowanych na warzelniach w browarach normalnych rozmiarów. Aby umożliwić monitorowanie procesu technologicznego poszczególne urządzenia są wyposażone w dodatkowe otwory inspekcyjne lub są one wykonane jako częściowo oraz całkowicie otwarte.



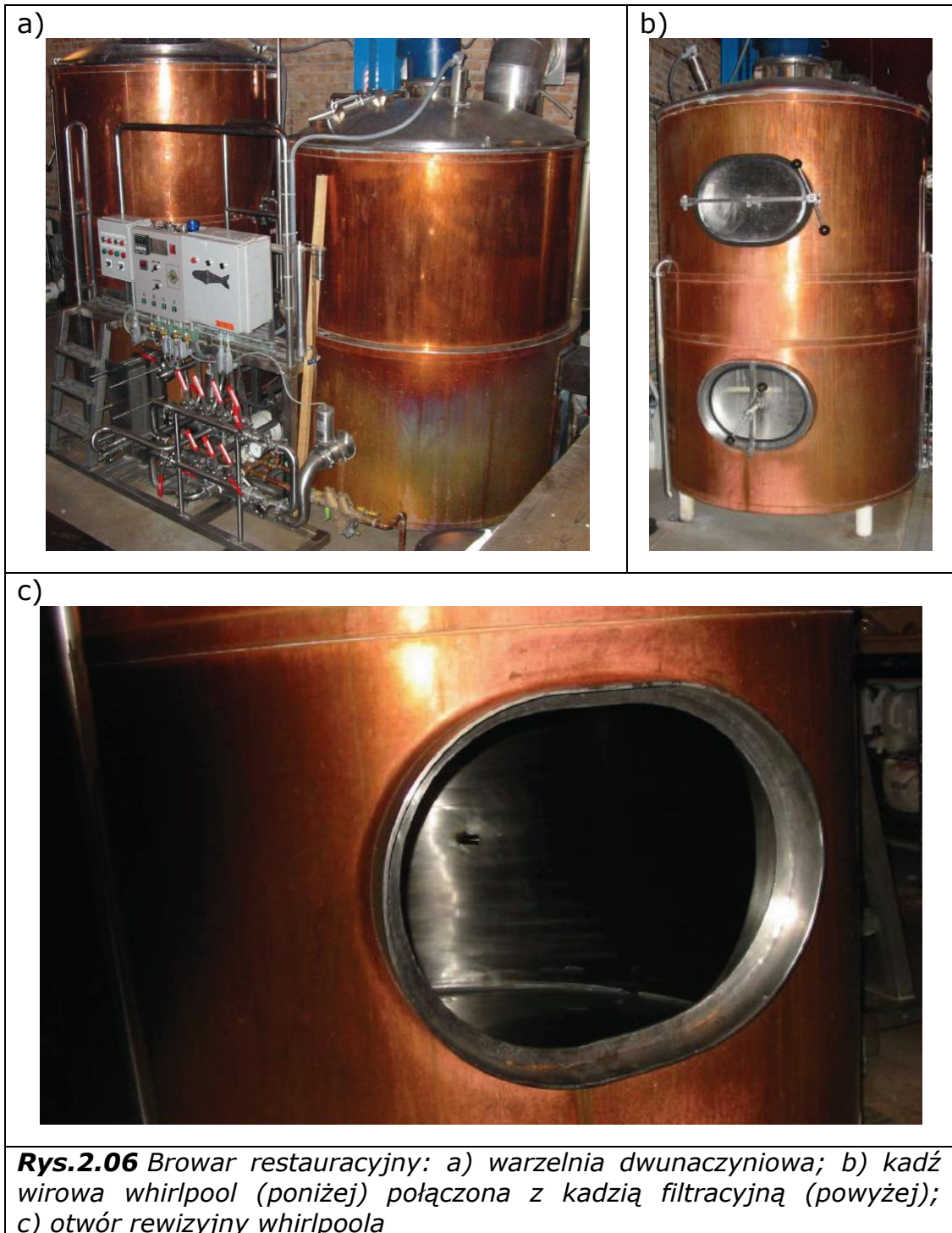
**Rys.2.05** Zbiornik whirlpoola (drugie naczynie od lewej) w linii laboratoryjnej warzelni (pojemność whirlpoola 1 hl)

W chwili obecnej, w Polsce nie ma żadnej warzelni szkoleniowej. Instytuty prowadzące badania z zakresu browarnictwa oraz szkoły średnie lub wyższe kształcące przyszłych browarników wykorzystują warzelnie zakładów produkcyjnych lub laboratoria wyposażone w pojedynczy model urządzenia.

### 2.4.2 Kadzie wirowe na warzelniach mikro i minibrowarów

Warzelnie browarów restauracyjnych (o wydajności od 400 do 3 500 hl breczki rocznie) wyposażone są najczęściej w dwa naczynia: kocioł warzelny oraz zespoloną kadź filtracyjną i whirlpool. Tego typu instalacja została przedstawiona na rysunku 2.06. Jest to urządzenie pracujące w browarze restauracyjnym Keweenaw Brewing Company w Houghton

w stanie Michigan. Warzelnie tego typu są rozpowszechnione z uwagi na niewielką powierzchnię konieczną do realizacji procesu produkcyjnego. Wykonywane są często z materiałów przezroczystych, aby umożliwić klientowi restauracji bezpośrednią obserwację poszczególnych operacji procesu produkcyjnego.



Innym rozwiązaniem warzelni mikrobrowaru jest warzelnia wielonaczyniowa, która stanowi odwzorowanie (tak jak w przypadku warzelni szkoleniowych) pełnowymiarowej warzelni. W takiej warzelni naczynia wyglądają dokładnie

tak samo jak w dużych warzeniach, przy czym ich pojemności są znacznie mniejsze. Na rysunku 2.07 przedstawiono przykład takiej konstrukcji. Jest to kadź wirowa w browarze restauracyjnym Wiena Brau w Austrii. Zbiornik o pojemności 3 hl wyposażony w pojedynczą dyszę zasilającą i trzy otwory spustowe

W chwili obecnej, w Polsce znajduje się 12 browarów restauracyjnych. Wszystkie posiadają warzelnie w układzie dwunaczyniowym.



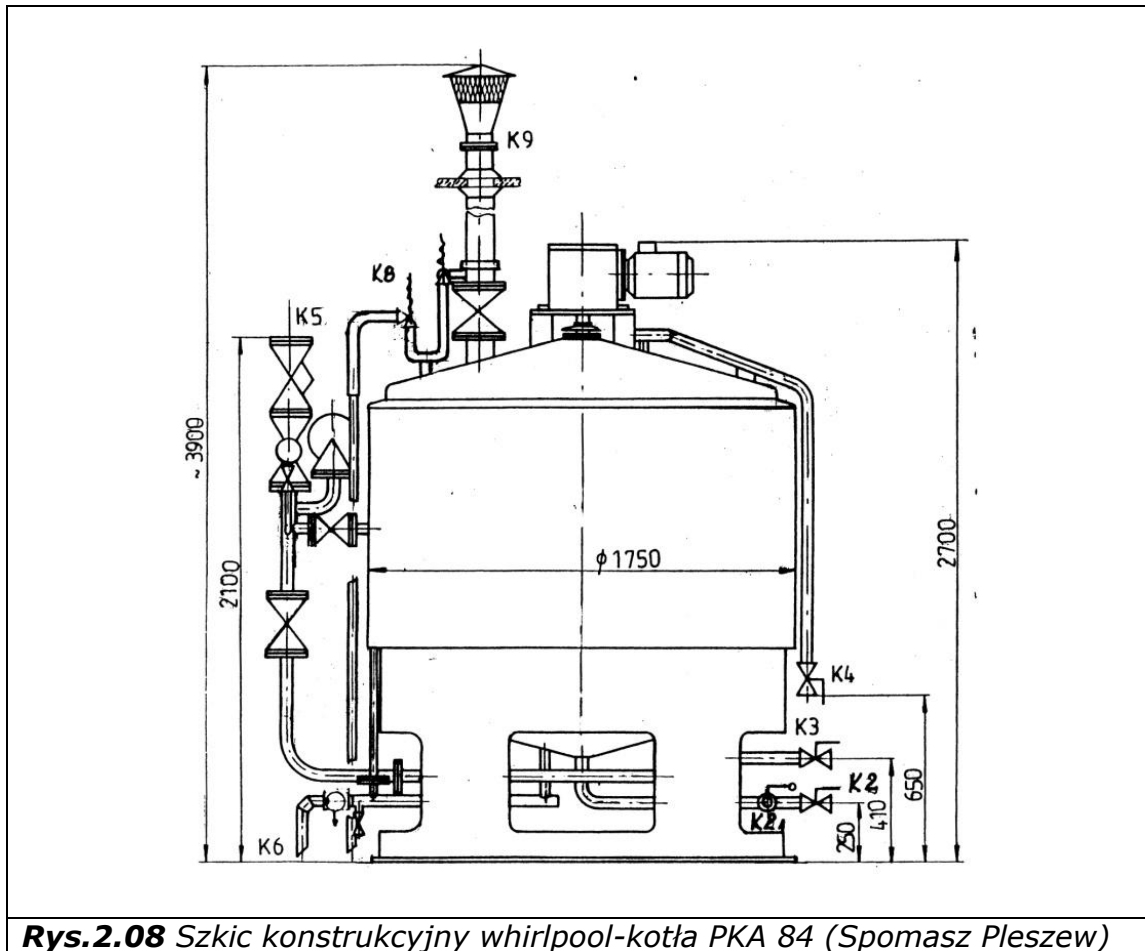
**Rys.2.07** Zbiornik whirlpoola w browarze restauracyjnym

Warzelnie minibrowarów (o wydajności od 4 000 do 20 000 hl brzezki rocznie) są wyposażone w kadzie wirowo - osadowe o pojemności od 17 do 200 hl.

Z punktu widzenia analizy konstrukcji kadzi wirowo - osadowych wykorzystywanych w praktyce produkcyjnej warzelnie minibrowarów są najbardziej interesujące. Wynika to z różnorodności konstrukcji adaptowanych zbiorników, modyfikacji istniejących oraz szerokiej gamy rozwiązań konstrukcyjnych.

Przykładem polskiej konstrukcji wykorzystywanej w minibrowarach jest whirlpool-kocioł firmy Spomasz Pleszew (rys. 2.08), oznaczony przez producenta jako PKA 84. Jest to konstrukcja o  $V_m = 25$  hl i pojemności roboczej  $V_n = 18$  hl. Zbiornik posiada dno stożkowe o kącie pochylenia wynoszącym  $20^\circ$ , średnicę  $D = 1\,700$  mm i  $H_n = 900$  mm, co przekłada się na smukłość  $H_n : D = 0,53$ . Whirlpool-kocioł PKA 84 posiada dyszę zasilającą  $d_E = 38$  mm umiejscowioną 700 mm powyżej dna zbiornika, dwa otwory spustowe, z czego pierwszy o  $d_o = 50$  mm umiejscowiony w dnie, powyżej

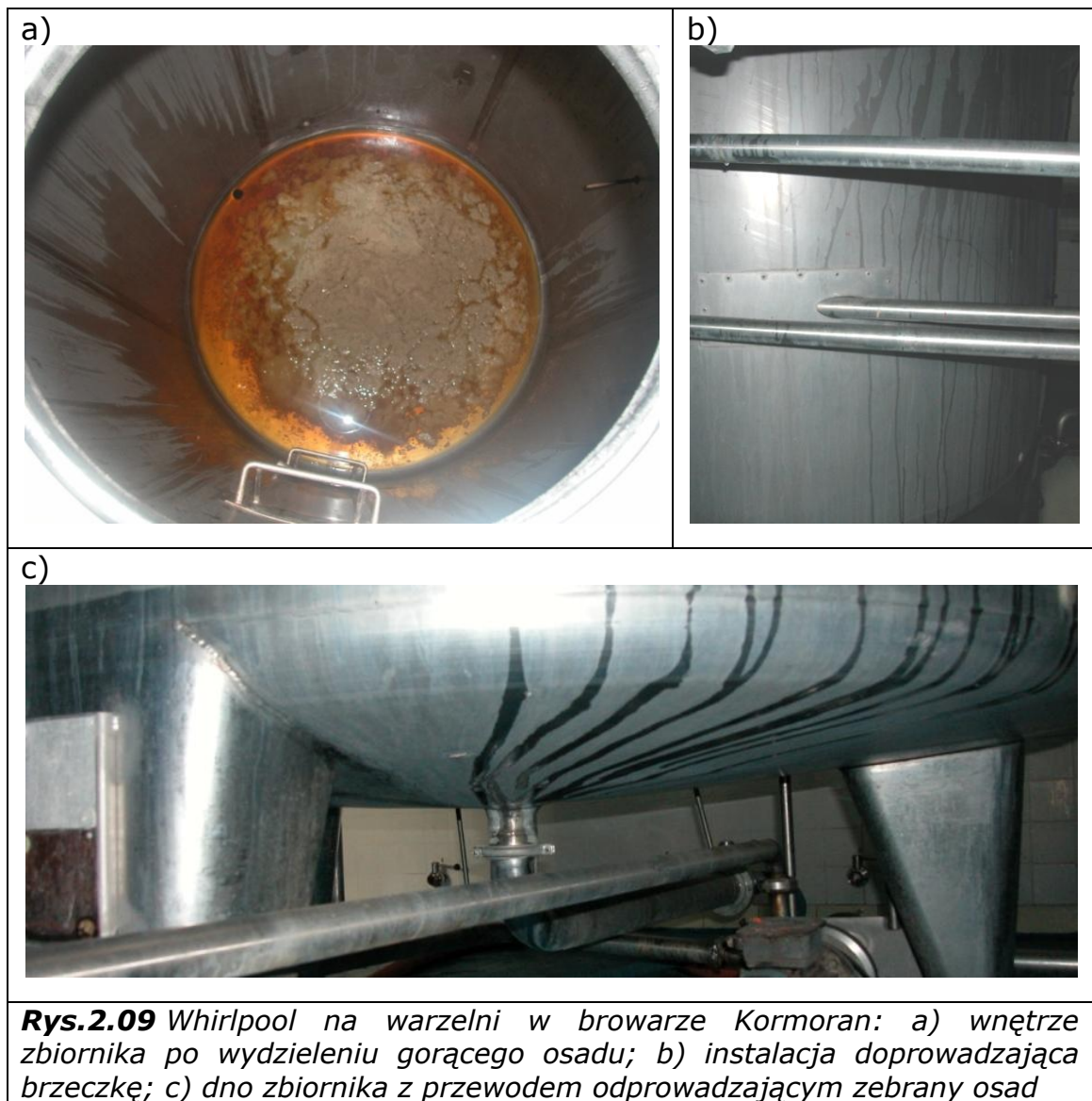
przewidywanego poziomego osadu, oraz drugi o  $d_o = 30$  mm umiejscowiony w dnie, w osi zbiornika.



Z dostępnych danych wynika, iż operacja usuwania osadu gorącego z wykorzystaniem tej konstrukcji jest realizowana w czterech minibrowarach w Polsce.

Kolejnym przykładem rozwiązania seryjnego jest kadź wirowo – osadowa zainstalowana na warzelnii browaru Kormoran w Olsztynie. Jest to konstrukcja zaprojektowana i wykonana przez Milfor Olszyn. Jest to zbiornik o pojemności roboczej wynoszącej do 40 hl. Jego średnica wynosi 1800 mm, a  $H_n = 1600$  mm. Smukłość napełnienia  $H_n : D$  wynosi 0,89. Kształt dna zbiornika jest płaski z zaokrągleniem w obszarze połączenia pobocznic i dna (rys. 2.09a). Posiada stycznie umiejscowioną dyszę dolotową o  $d_E = 40$  mm, dwa otwory spustowe brzezki o  $d_o = 40$  mm z przewodami rurowymi odprowadzającymi (rys. 2.09b) oraz otwór spustowy w dnie do usuwania osadu o  $d_o = 40$  mm wyposażony w instalację odprowadzającą i myjącą (rys. 2.09c). Brzezka jest podawana z kotła warzelnego pompą. Czas napełniania zbiornika wynosi około 15 minut, a czas postoju w zależności od ekstraktu brzezki wynosi od 30 do 45 minut.

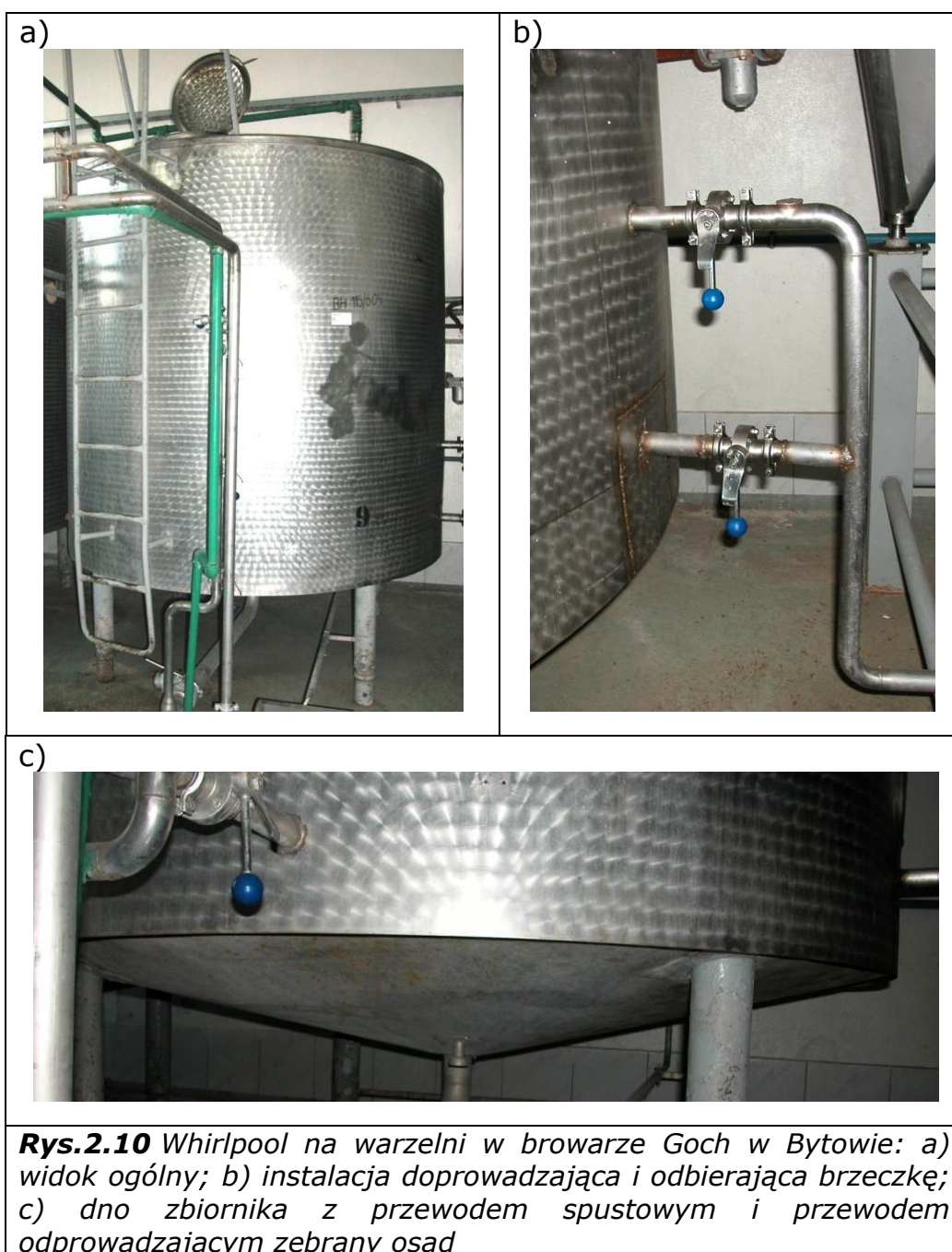




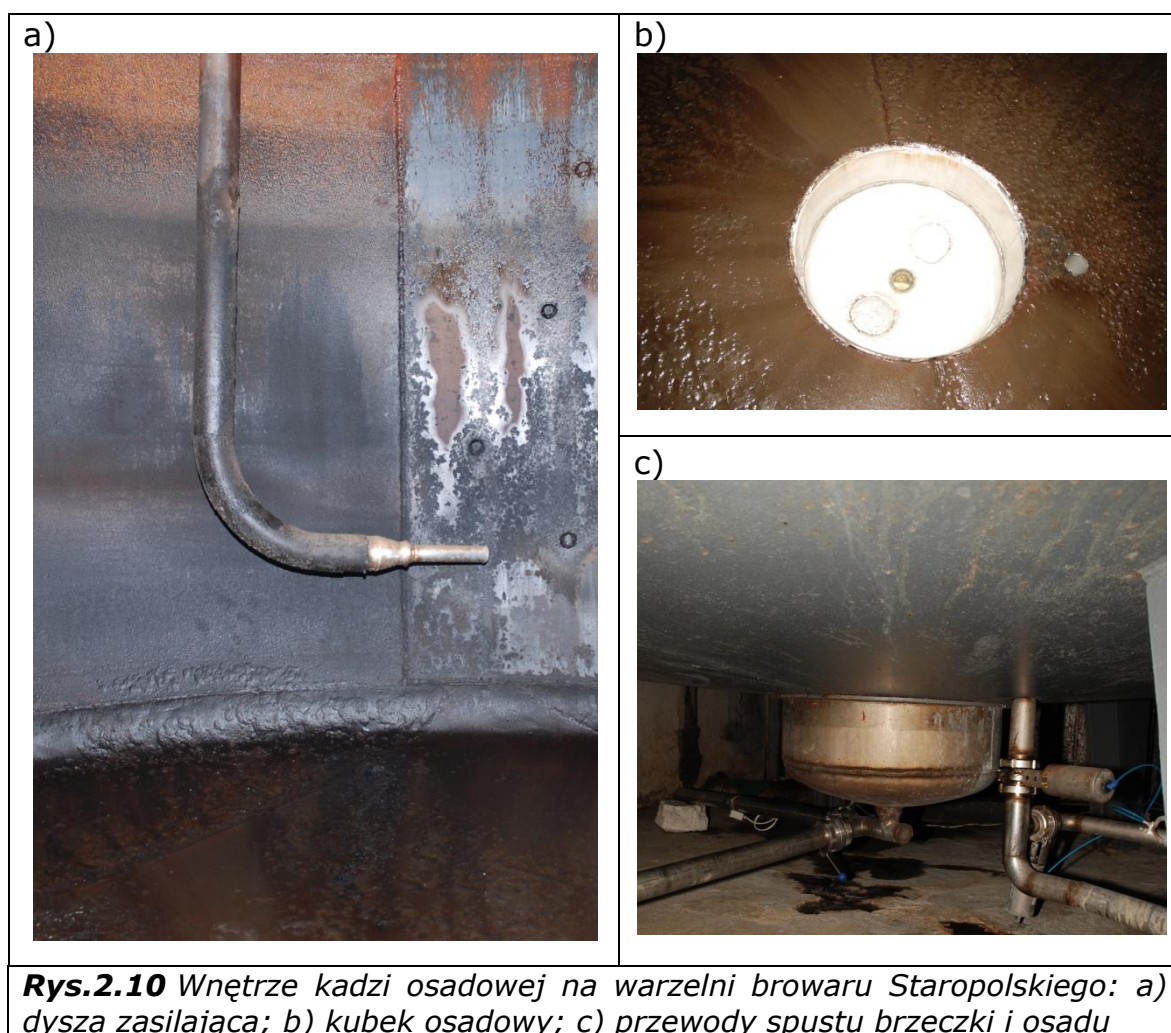
Whirlpool tego typu został zidentyfikowany w czterech minibrowarach na terenie Polski. Z przeprowadzonego rozpoznania wynika, iż we wszystkich zbiornikach tego typu obserwuje się niekorzystne (dla klarowanych brzeczek o ekstrakcie poniżej 12°Blg) rozmywanie stożka osadu występujące pod koniec opróżniania. Aby przeciwdziałać przedostawaniu się osadu gorącego do otworu spustowego konieczne jest, w przypadku tych konstrukcji, wcześniejsze zakończenie odbioru, co nie pozostaje bez wpływu na zanik brzeczki.

Przykładem rozwiązania opartego na adaptacji istniejącego zbiornika jest whirlpool zainstalowany w minibrowarze Goch w Bytowie (rys. 2.10a). Jest to przerobiony we własnym zakresie izolowany zbiornik (tzw. tank) magazynowy do mleka (browar mieści się w byłej mleczarni) o pojemności maksymalnej 45 hl. Pojemność robocza wynosi ok. 39 hl. Średnica (D) zbiornika wynosi 1 700 mm,  $H_n = 1\ 700\ \text{mm}$ , a więc whirlpool ten posiada smukłość  $H_n : D = 1$ . Konstrukcja posiada stożkowe dno, o kącie pochyleń wynoszącym 20°. Dopływ brzeczki jest realizowany z kotła warzelnego

za pośrednictwem pompy brzeźnej. Zbiornik jest wyposażony w dyszę zasilającą (rys 2.10b) o  $d_E = 30$  mm, umiejscowioną w połowie wysokości napełnienia roboczego zbiornika. Jest ona wprowadzona do zbiornika prostopadle, a następnie zakrzywiona pod kątem  $90^\circ$ . Dysza ta stanowi jednocześnie przewód odprowadzający sklarowaną brzeźkę. Poniżej znajduje się dodatkowy przewód odprowadzający. Odbiór sklarowanej brzeźki jest realizowany sekwencyjnie za pomocą przewodu zasilającego oraz dodatkowego otworu spustowego umiejscowionego przy połączeniu pobocznic i dna zbiornika (rys. 2.10c). Osad spłukiwany jest dyszą myjącą systemu CIP, a następnie odbierany przewodem spustowym o  $d_O = 60$  mm (rys 2.10c) umiejscowionym w centralnej części dna zbiornika.



Następnym przykładem adaptacji istniejącego zbiornika jest modyfikacja konstrukcji kadzi osadowej znajdującej się na wyposażeniu browaru Staropolskiego znajdującego się w Zduńskiej Woli. Na rysunku 2.10 przedstawiono szczegóły modyfikacji konstrukcji. W zbiorniku tym wprowadzono do wnętrza przewód zasilający zakończony dyszą (rys. 2.10a) skierowaną równoległe do dna zbiornika, umiejscowioną na wysokości  $0,25 H_n$ . Dzięki temu rozwiązaniu uzyskiwane jest zawirowanie brzezki. Dodatkowo dno zbiornika zostało wyposażone w misę osadową (rys. 2.10b) o pojemności 3 hl, w której gromadzi się większość osadu gorącego. Misa osadowa jest wyposażona w przewód odprowadzający osad (rys. 2.10c), który jest usuwany po częściowym uwodnieniu.



W tabeli 2.01 przedstawiono zestawienie większości urządzeń do usuwania osadu gorącego w minibrowarach w Polsce. Zestawienie jest wynikiem badań własnych opartych na rozpoznaniu ankietowym i częściowo terenowym. Stopień zaawansowania identyfikacji dla poszczególnych konstrukcji był zróżnicowany. W przypadku niektórych konstrukcji seryjnych możliwa była identyfikacja konstrukcji na podstawie danych dostarczonych przez producentów.

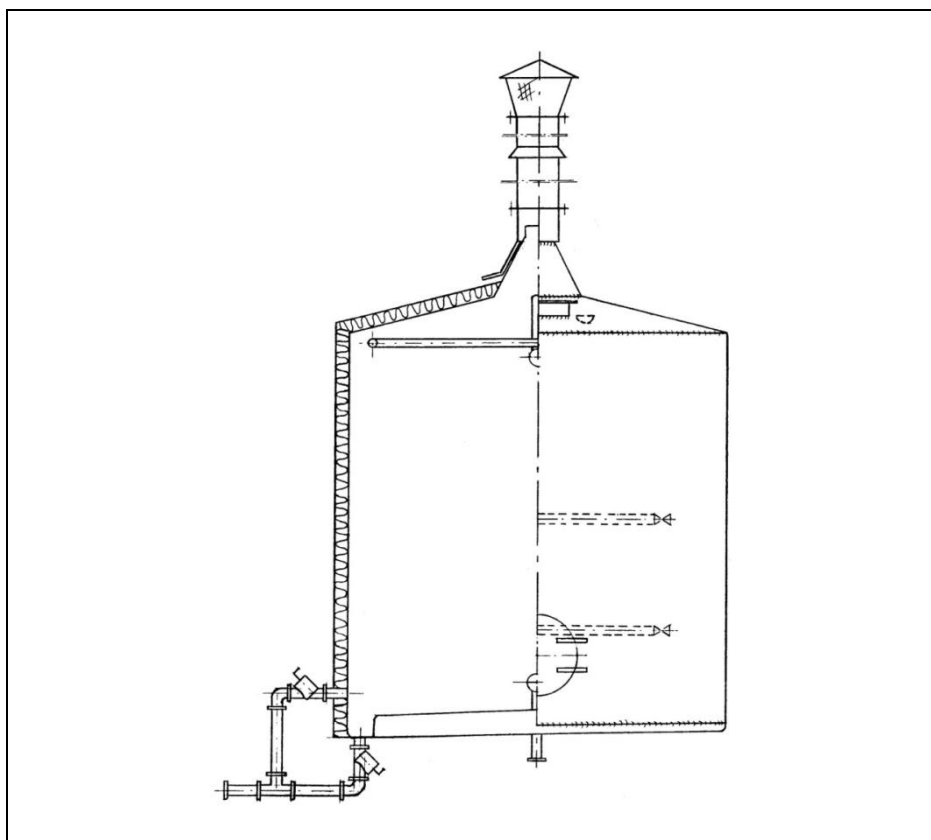
**Tab.2.01 Urządzenia do usuwania osadu gorącego na warzelniach minibrowarów**

<b>Nazwa browaru</b>	<b>Produkcja brzezki [hl/rok]</b>	<b>Urządzenie do usuwania osadu gorącego</b>	<b>Projekt i wykonanie</b>
<b>Browar Bartek - Gołuchów</b>	1 000	whirlpool-kocioł o poj. 18 hl	Spomasz Pleszew
<b>BOSS Browar - Witnica</b>	40 000	whirlpool o poj. 120 hl	brak danych
<b>Browar na Jurze Zawiercie</b>	20 000	whirlpool-kocioł o poj. 18hl	Spomasz Pleszew
<b>Browar Ciechanów</b>	25 000	whirlpool o poj. 300 hl (pojemność robocza 100 hl)	wykonana we własnym zakresie
<b>Browar Czarnków</b>	30 000	whirlpool o poj 130 hl	brak danych
<b>Browar "EDI" - Wschowa</b>	Browar odmówił udzielenia informacji - posiada whirlpool-kocioł o poj. 18hl		
<b>Browary Fortuna - Miłosław</b>	20 000	prostokątna kadź osadowa o poj. 70 hl	wykonana we własnym zakresie
<b>Browar Gab - Konopiska</b>	20 000	kadź osadowa o poj. 40 hl	brak danych
<b>Browar Goch - Bytów</b>	produkcja zawieszona	whirlpool o poj. ok. 40 hl	wykonana we własnym zakresie
<b>Browar Brzeg</b>	brak danych		
<b>Browar Gościszewo - Sztum</b>	10 000	whirlpool o poj. 38 hl	Kates Olsztyn
<b>Browary Grudziądz</b>	Browar odmówił udzielenia informacji - posiada kadź osadową klasycznej konstrukcji		
<b>Browar Grybów</b>	20 000	whirlpool o poj. 200 hl	brak danych.
<b>Browar Imielin</b>	20 000	whirlpool o poj. 20 hl.	Milfor Olsztyn
<b>Browar Jabłonowo - Wólka Kosowska</b>	Brak danych		
<b>Browar Jagiełło - Chełm-Pokrówka</b>	20 000	whirlpool o poj. 40 hl.	Milfor Olsztyn
<b>Browar Janów Lubelski</b>	brak danych		
<b>Browar Konstancin</b>	10 000	whirlpool o poj. 40 hl	Milfor Olsztyn
<b>Browar Koreb - Łask</b>	20 000	whirlpool o poj. 30 hl	wykonana we własnym zakresie
<b>Browar Kormoran - Olsztyn</b>	20 000	whirlpool o poj. 40 hl	Milfor Olsztyn
<b>Browar Krajan - Nakło</b>	brak danych		
<b>Browar Połczyn-Zdrój</b>	brak danych		
<b>Browar Racibórz</b>	20 000	whirlpool 150 hl	brak danych
<b>Browar Relakspol - Kraków</b>	brak danych	whirlpool-kocioł o poj. 18hl	Spomasz Pleszew
<b>Browar Staropolski - Zduńska Wola</b>	20 000	kadź osadowa o poj. 80 hl	brak danych
<b>Browar Zodiak - Kłodawa</b>	20 000	whirlpool o poj. 40 hl	Milfor Olsztyn

### 2.4.3 Kadzie wirowe w instalacjach warzelni browarów średnich

Warzelnie browarów średnich produkują od 100 000 do 500 000 hl brzezki rocznie. Dobór urządzeń warzelni browarów średniej wielkości oparty jest często na projektach gotowych rozwiązań dostarczanych przez wyspecjalizowane firmy projektowo - wykonawcze.

Konstrukcja kadzi wirowej posiadająca najbardziej skompilowany kształt (rys. 2.12) dna spośród konstrukcji zidentyfikowanych w polskich browarach to whirlpool, który pracował przez wiele lat w nieistniejącym już browarze Brok w Słupsku. Był to zbiornik zaprojektowany przez zespół Katerzy Inżynierii Spożywczej i Tworzyw Sztucznych Politechniki Koszalińskiej, wykonany przez Spółdzielnię Promont w Koszalinie. Jego szczególność wynika z rzadko spotykanego kształtu będącego połączeniem dna z półką osadową o kształcie stożkowym i wypukłym (połączenie kształtów przedstawionych na rysunku 2.04c i 2.04f). Dodatkowo dno pochylone było z 2° spadkiem w kierunku otworów spustowych

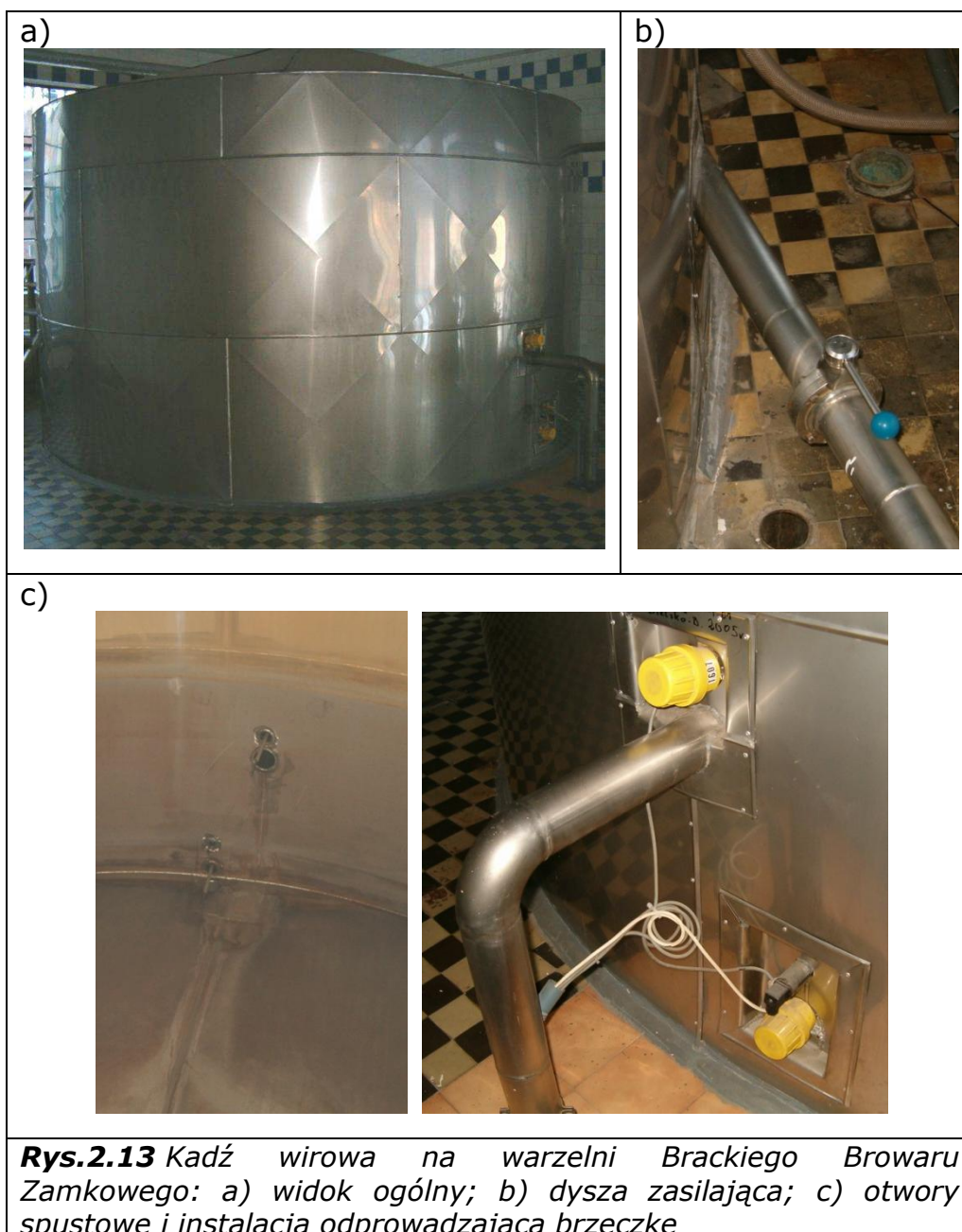


**Rys.2.12** Szkic konstrukcyjny kadzi wirowo - osadowej pracującej do 2001 roku, w browarze Brok w Słupsku

Whirlpool posiadał pojemność  $V_{nom} = 160$  hl i  $V_{max} = 195$  hl. Średnica zbiornika wynosiła  $D = 2\ 860$  mm. Dla nominalnej pojemności  $H_n = 2\ 500$  mm stopień smukłości wynosił  $H_n : D = 0,87$ , a dla pojemności maksymalnej wysokość napełnienia wynosiła  $H_m = 3\ 000$  mm ( $H_m : D = 1,06$ ). Whirlpool wyposażony był w dwie dysze zasilające

o  $d_E = 80$  mm umieszczone na wysokości 300 i 760 mm oraz dwa otwory spustowe, o  $d_O = 80$  mm, z których górny umieszczony był na wysokości 175 mm od połączenia pobocznic i na zbiornika, a dolny znajdował się bezpośrednio w dnie.

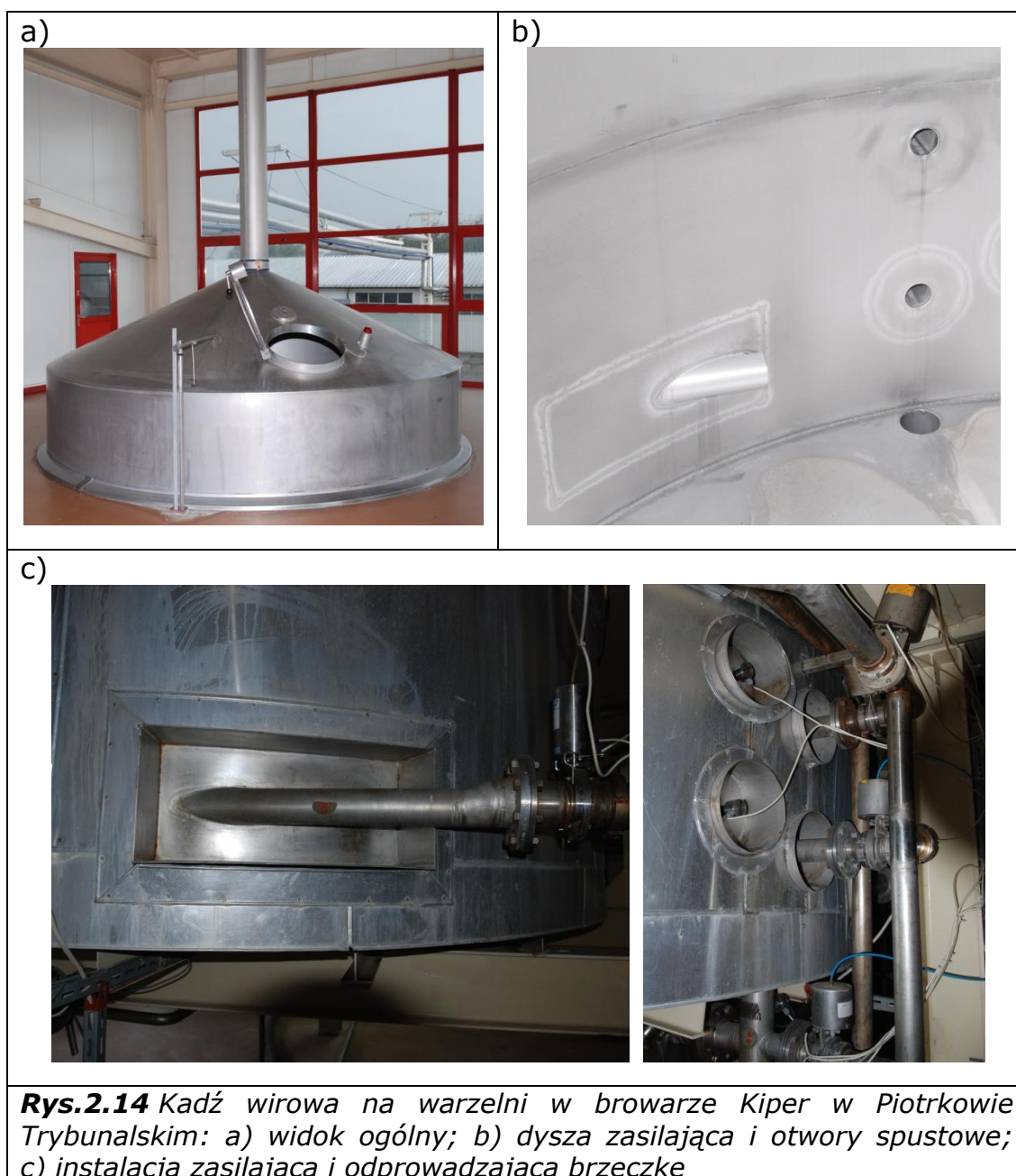
Kolejną z konstrukcji zaprojektowanych i wykonanych w Polsce to whirlpool pracujący w Brackim Browarze Zamkowym w Cieszynie (rys. 2.13). Ta kadź wirowo – osadowa została zaprojektowana i wykonana przez firmę Instal Bielsko – Biała



Jest to whirlpool umiejscowiony poniżej poziomu warzelni o pojemności maksymalnej 250 hl. Jego średnica  $D = 4\ 000$  mm, wysokość nalewu nominalnego  $H_n = 1600$  mm, wysokość zbiornika  $H = 2\ 000$  mm.

Wyposażony jest w dyszę i przewód zasilający o  $d_E = 80$  mm (rys. 2.13b) umiejscowiona 200 mm powyżej płaskiego dna zbiornika oraz umiejscowione przeciwległe do dyszy zasilającej dwa otwory spustowe o  $d_O = 80$  mm (rys. 2.13c).

Przykładem konstrukcji zbiornika kadzi wirowej na warzelni browaru średniej wielkości jest whirlpool zaprojektowany i wykonany przez GEA - Huppmann (rys. 2.14).



Jest to konstrukcja typowa dla tego producenta. Jest to jeden z najmniejszych whirlpooli wykonanych przez tę firmę. Konstrukcja posiada płaskie dno o pochyleniu  $3^\circ$  w kierunku otworu wylotowego umiejscowionego na dnie zbiornika. Zbiornik posiada średnicę  $D = 3\ 600$  mm

i objętość  $V_n = 175$  hl. Dla tej objętości wysokość nalewu  $H_n = 1\ 510$  mm, a smukłość nalewu  $H_n : D = 0,42$ . Maksymalna pojemność deklarowana przez producenta wynosi  $V_m = 220$  hl. Dopływ brzezki realizowany jest dyszą i przewód zasilający (rys. 2.14b i 2.14c) o  $d_E = 80$  mm. Dysza wlotowa umiejscowiona jest 300 mm powyżej dna zbiornika. Opróżnianie whirlpoola odbywa się sekwencyjnie przez trzy otwory spustowe o  $d_O = 65$  mm (rys. 2.14b).

W tabeli 2.02 przedstawiono zestawienie większości instalacji do usuwania osadu gorącego w browarach średnich w Polsce

**Tab.2.02** Zestawienie urządzeń do usuwania osadu gorącego na warzelniach browarów średnich

Nazwa browaru	Produkcja brzezki [hl/rok]	Urządzenie do usuwania osadu gorącego	Projekt i wykonanie
<b>Browar Amber Bielkówko</b>	200 000	whirlpool o poj. 150 hl	Spomasz Pleszew
<b>Browary Górnośląskie - Zabrze</b>	brak danych	whirlpool-kocioł o poj. 390 hl	Steinecker
<b>Browar Braniewski</b>	brak danych	whirlpool o poj. 190 hl	Spomasz Pleszew
<b>Browar Brok - Koszalin</b>	400 000	whirlpool-kocioł o poj. 530 hl	Ziemann
<b>ZP Głubczyce</b>	brak danych	whirlpool o poj. 210 hl	brak danych
<b>Browar Jędrzejów</b>		whirlpool o poj. 150 hl	GEA - Huppmann
<b>Kasztelan Browar Sierpc</b>	brak danych	whirlpool o poj. 230 hl	GEA - Huppmann
<b>Kiper Piotrków Trybunalski</b>	brak danych	whirlpool o poj. 175 hl	GEA - Huppmann
<b>Browar Łomża</b>	brak danych	whirlpool o poj. 210 hl	GEA - Huppmann
<b>Browary Łódzkie</b>	brak danych		
<b>Browar Namysłów</b>	Browar odmówił udzielenia informacji		
<b>Browary Lubelskie</b>	brak danych	whirlpool-kocioł o poj. 320 hl	brak danych
<b>Browar Zwierzyniec</b>	brak danych	whirlpool o poj. 300 hl	brak danych
<b>Browar Van Pur - Raszkawa</b>	brak danych	whirlpool-kocioł o poj. 330 hl	Steinecker
<b>Bracki Browar Zamkowy - Cieszyn</b>	brak danych	whirlpool o poj. 250 hl	Instal Bielsko - Biała

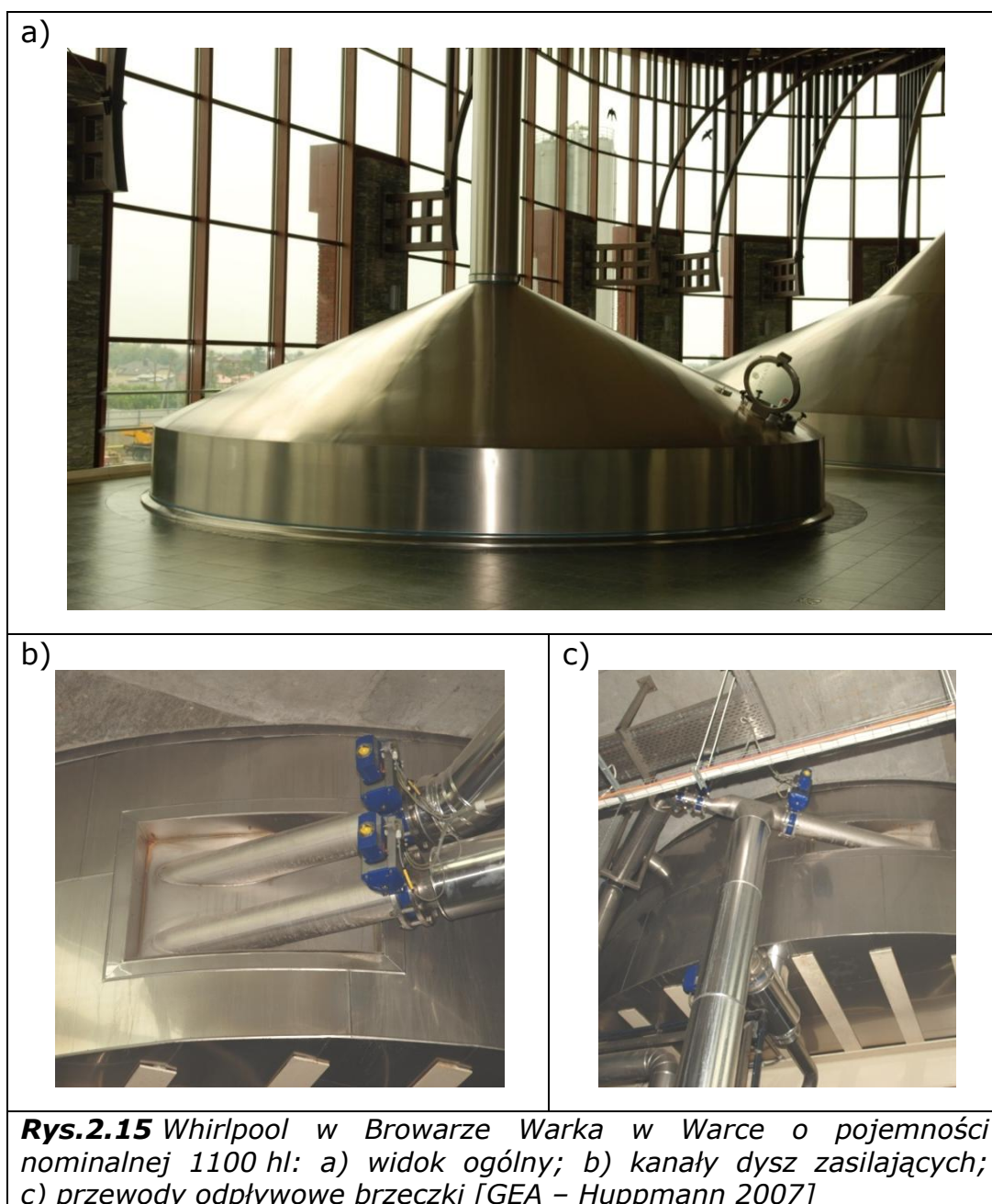
#### 2.4.4 Kadzie wirowe w instalacjach warzelni browarów dużych

Warzelnie browarów dużych są wyposażane wyłącznie w instalacje jednego producenta dostarczającego kompleksowych rozwiązań wyposażenia. Przykładem takiego rozwiązania jest instalacja warzelni browaru Belgia w Kielcach zaprojektowana i wykonana przez Steineckera, w skład której wchodzi między innymi zbiornik whirlpoola o pojemności roboczej  $V_n = 400$  hl i pojemności maksymalnej  $V_m = 560$  hl. Jego średnica  $D = 5\ 100$  mm. Dla objętości nominalnej nalewu wysokość napełnienia  $H_n = 2\ 000$  mm. Stosunek  $H_n:D$  wynosi 0,39. Whirlpool ten jest wyposażony w pojedynczą dyszę zasilającą o  $d_E = 200$  mm oraz dwa otwory spustowe



o  $d_o = 125 \text{ mm}$ . Napełnianie jest realizowane przez 12 minut, czas postoju wynosi od 15 do 30 minut, a opróżnianie trwa do 60 minut. Tak długi czas opróżniania wynika z ograniczenia przepustowości wymiennika chłodzącego brzeczkę do temperatury nastawienia.

Największym whirlpoolem działających w browarach w Polsce jest zbiornik wykorzystywany w Browarze Warka w Warce (rys. 2.15). Jest to konstrukcja zaprojektowana i wykonana przez firmę GEA – Huppmann.



W tej kadzi wirowo – osadowej jednorazowo wiruje się brzeczkę wybitą o objętości nominalnej  $V_n = 1\,100 \text{ hl}$  (objętość maksymalna deklarowana przez producenta wynosi  $V_m = 1\,280 \text{ hl}$ ). Jest to konstrukcja z dnem płaskim o kącie pochylecia  $3^\circ$ . Średnica zbiornika  $D = 7\,600 \text{ mm}$ . Nominalna

wysokość napełnienia wynosi  $H_n = 2\ 600\ \text{mm}$ , a wysokość maksymalna napełnienia zbiornika może wynosić  $H_m = 3\ 000\ \text{mm}$ . Na warzelnii browaru Warka uzyskiwane jest wybicie na poziomie 1 050 hl. Smukłość nalewu dla tej objętości wynosi  $H_n : D = 0,3$ . Konstrukcja posiada dwa otwory wlotowe o  $d_E = 200\ \text{mm}$  umiejscowione równolegle na wysokości 300 i 700 mm od dna zbiornika i dwa otwory wylotowe o  $d_O = 200\ \text{mm}$ , z czego pierwszy na wysokości 850 mm, a drugi umiejscowiony w dnie zbiornika. Identyczną kadź wirowo – osadowa jest zainstalowana w browarze Żywiec w Żywcu. Z dostarczonego przez producenta zestawienia wynika, iż tego typu whirlpool jest największą konstrukcją oferowaną przez GEA – Huppmann.

Podobną konstrukcją, tego samego producenta, jest whirlpool pracujący w Browarze Książęcym w Tychach. Zbiornik ten posiada pojemność roboczą  $V_n = 730\ \text{hl}$  i pojemność maksymalną  $V_m = 877\ \text{hl}$ . Zbiornik średnicę  $D = 6000\ \text{mm}$ . Dla objętości nominalnego napełnienia wysokość  $H_n = 2600\ \text{mm}$ , a więc smukłość nalewu wynosi  $H_n:D = 0,43$ . Whirlpool wyposażony jest w dyszę zasilającą o  $d_E = 200\ \text{mm}$  umiejscowioną 300 mm powyżej poziomu dna zbiornika i trzy otwory spustowe o  $d_O = 125\ \text{mm}$ . Napełnianie zbiornika trwa 12 minut, czas postoju wynosi 20 minut, a opróżnianie trwa do 60 minut.

W Polsce funkcjonuje 10 browarów, które posiadają wydajność warzelnii powyżej 1 000 000 hl brzezki produkowanej rocznie. W tabeli 2.03 przedstawiono zestawienie instalacji do usuwania gorącego osadu na warzelniach największych browarów w Polsce.

**Tab.2.03** Zestawienie urządzeń do usuwania osadu gorącego na warzelniach browarów dużych

Nazwa browaru	Produkcja brzezki [hl/rok]	Urządzenie do usuwania osadu gorącego	Projekt i wykonanie
<b>Browar Kielce</b>	2 000 000	whirlpool o poj. 400 hl	Steinecker Niemcy
<b>Browar Bosman - Szczecin</b>	1 000 000	whirlpool o poj. 405 hl	GEA - Huppmann
<b>Browar Białystok</b>	brak danych	whirlpool-kocioł o poj. 380 hl	Steinecker Niemcy
<b>Browar Elbląg</b>	2 000 000	whirlpool-kocioł o poj. 560 hl	Steinecker Niemcy
<b>Browar Lech - Poznań</b>	brak danych	whirlpool o poj. 580 hl	GEA - Huppmann
<b>ZP w Leżajsku</b>	brak danych	whirlpool o poj. 730 hl	GEA - Huppmann
<b>Browar Okocim</b>	2 500 000	whirlpool o poj. 730 hl	GEA - Huppmann
<b>Tyskie Browary Książęce - Tychy</b>	brak danych	whirlpool o poj. 730 hl.	GEA - Huppmann
<b>Browary Warka</b>	2 500 000	whirlpool o poj. 1 100 hl.	GEA - Huppmann
<b>Browary Żywiec</b>	3 000 000	whirlpool o poj. 1 100 hl.	GEA - Huppmann

## 2.5 Podsumowanie przeglądu konstrukcji

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania należy stwierdzić, iż każdą wirówkę – osadową wyparła inne metody usuwania osadu gorącego. Jej pojemność jest ściśle zależna od wydajności warzelni, przy czym należy zauważyć, iż w przypadku minibrowarów pojemności robocze whirlpoola są często zbliżone do pojemności maksymalnych. Odmienna sytuacja występuje w browarach dużych, których warzelnie są projektowane nadmiarowo, a więc i na whirlpoolach operacja usuwania osadu gorącego jest realizowana często dla objętości poniżej nominalnej deklarowanej przez producenta.

Zestawienie wszystkich konstrukcji pracujących w browarach w Polsce wykazuje dość znaczne zróżnicowanie rozwiązań szczegółów konstrukcyjnych, co jest efektem poszukiwań rozwiązań konstrukcyjnych opartych często wyłącznie o intuicję konstruktora. W niektórych rozwiązaniach, szczególnie występujących w minibrowarach uwydatnia się niedostateczna znajomość podstaw teorii operacji usuwania osadu gorącego. W związku z tym w minibrowarach można zidentyfikować konstrukcje (zarówno adaptacje jak i rozwiązania dedykowane), które nie spełniają wymagań dotyczących skutecznego klarowania brzezki.

Na podstawie aktualnego stanu wiedzy należy stwierdzić, iż funkcjonowanie whirlpoola nie jest prognozowalne. Nie istnieje także skuteczny sposób sterowania tego typu aparatem zwłaszcza w na etapie postoju brzezki. Skuteczność jego działania zależy przede wszystkim od zmiennych technologicznych warunków realizacji operacji oraz uwarunkowań konstrukcyjnych. Czynniki te w zasadniczy sposób determinują poprawność realizacji klarowania w każdym z indywidualnych przypadków. Poprawę skuteczności działania whirlpoola można przypuszczalnie osiągnąć na drodze modyfikacji parametrów konstrukcyjnych i procesowych, które wpływają w sposób zasadniczy na zmianę warunków wirowania separowanej mieszaniny.

### 3 Analiza teoretyczna i badanie ruchu wirowego płynu w whirlpoolu

W rozdziale przedstawiono analizę literatury dotyczącej modeli teoretycznych stanowiących opis zagadnienia ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej. W dalszej części zaprezentowano dotychczasowe badania i analizy teoretyczne dotyczące przepływu w whirlpoolu, oraz badania eksperymentalne z wykorzystaniem prześwietlania przepływu arkuszem światła i badania z wykorzystaniem anemometrii laserowej.

#### 3.1 Modele ruchu obrotowego przestrzeni ograniczającej płyn

Najprostszym modelem zachowania warunków ruchu zawirowanego płynu w zbiorniku whirlpoola jest model wirującego zbiornika całkowicie wypełnionego płynem. Jest to dobrze opisane w literaturze doświadczenie spin-down [White 2002], polegające na gwałtownym zatrzymaniu zbiornika, w wyniku czego płyn znajdujący się w środku traci charakter wirującego ciała sztywnego. Wtórny przepływ rozwija się samoczynnie poprzez siły tarcia występujące na ścianie oraz dnie zbiornika wprowadzając w ruch płyn, w kierunku składowej promieniowej ( $r$ ) i osiowej ( $z$ ).

Model znany z meteorologii, to koncepcja podejścia do ruchu płynu znajdującego się ponad wirującym dyskiem. W tym przypadku przepływ wtórny rozwija się w warstwie granicznej Ekmana, która powstaje w wyniku oddziaływania siły tarcia na powierzchni dysku (w tym przypadku ziemi). Model ten znalazł zastosowanie w analizie zjawiska wiatru geostroficznego, w przypadku którego równoległe linie prądu zmieniają kierunek przy powierzchni ziemi. Jest to rotacja kierunku ruchu płynu będąca konsekwencją oddziaływania sił tarcia na powierzchni ziemi, co ostatecznie prowadzi do powstawania spiralnie ułożonych linii prądu zbierającego.

Bardziej dokładne przybliżenie do zagadnienia ruchu płynu w naczyniu cylindrycznym, to ruch płynu znajdującego się pomiędzy dwoma współosiowo umiejscowionymi dyskami wirującymi w jednym kierunku (np. prawoskrętnie). Analiza takiego podejścia zakłada nieskończony wymiar dysku dla składowej promieniowej, co równoznaczne jest z założeniem braku oddziaływania ściany zbiornika. Punktem początkowym wirowania jest rotacyjny model płyty Karmana [Delgado 2000] posiadający rozwiązanie analityczne w postaci równania różniczkowego, przy założeniu, że składowa osiowa prędkości jest niezależna od składowej promieniowej. Przy tym założeniu można otrzymać komplet równań różniczkowych opisujących wspomniany przypadek w stanie stacjonarnym. Zaletą tego podejścia jest możliwość rozwiązania analitycznego równań modelu takiego ruchu płynu dla przypadku nagłej zmiany kierunku ruchu obrotowego dysków oraz możliwość uzyskania rozwiązania dla trzech składowych prędkości i ciśnienia [Benton 1966]. Wybór płyty Karmana, jako punktu początkowego układu wirowania jest korzystny, ponieważ przestrzeń ruchu płynu jest

trójwymiarowa, a stacjonarne rozwiązanie równań bardzo dokładne. Układ równań ruchu może zostać uproszczony do funkcji tylko jednej zmiennej ( $r$ ). Ograniczeniem warunkującym dokładność rozwiązania jest konieczność założenia braku wpływu temperatury [Schlichting 1982]. W literaturze znajdują się przykłady rozwiązań analityczno - numerycznych tego szczególnego przypadku problemu Karmana. Autorzy rozwiązań wskazują jednoznacznie, iż na stabilność rozwiązania istotny wpływ ma wartość liczby Reynoldsa. Szczególnie interesujące jest, że dla wyższych wartości tej liczby kryterialnej nie istnieje stabilny symetryczny przepływ między dwoma współbieżnie wirującymi dyskami. Niesymetryczny ruch płynu pomiędzy dolnym i górnym dyskiem odbywa się z nieznacznie większą prędkością kątową w stosunku do prędkości dysków. To zjawisko jest odpowiedzialne za tworzenie się tzw. ogniwa Taylora-Proudmana [Mihelcic et al. 1981]. Prowadzi to w konsekwencji do powstawania spiralnych trajektorii ruchu płynu przy powierzchni. Ten efekt jest znacznie silniejszy w przypadku zjawiska cyklonu (wirujący płyn nad nieruchomą płytą) niż podczas zjawiska antycyklonu (nieruchomy płyn ponad wirującą płytą), co należy tłumaczyć tym, że odśrodkowy przepływ masy płynu (część zewnętrzna wiru) posiada większą prędkość niż wynikałoby to z przyspieszenia [Oertel 2004]. Odchylenie kąta linii prądu nad powierzchnią dysku o kąt ok.  $51^\circ$  tworzy opisaną powyżej spiralę Ekmana [Prandtl et al. 1990].

Powyższy model był przedmiotem późniejszych rozważań wielu autorów [Batchelor 1951, Pearson 1956]. Na szczególną uwagę zasługuje zaproponowany wariant rozwiązania polegający na analizie przypadku wirujących dysków ograniczonych w przestrzeni cylindryczną ścianą. Otrzymano w ten sposób wirujący cylinder wypełniony płynem. Wpływ ściany na przepływ, dla tego przypadku, wykazał istnienie szczególnego rodzaju warstwy granicznej przy ścianie. Jest to warstwa w powierzchni cylindrycznej współosiowej do osi obrotu, nazwana od nazwiska jej odkrywcy tzw. warstwą Stewartsona [Stewartson 1953; Stewartson 1957]. W warstwie tej występują lokalne zawirowania (wiry Taylora) przemieszczające się wzdłuż powierzchni ograniczającej przepływ. Zaletą tego wariantu rozwiązania jest fakt, iż w przestrzeni ograniczonej cylindryczną ścianą występuje uporządkowany symetrycznie ruch płynu zarówno w dolnej jak i górnej połowie cylindra. Problem można więc zredukować do analizy połowy przekroju cylindra (górną część jest odbiciem symetrycznym ruchu płynu w dolnym cylindrze). Płaszczyzna rozdziału między tymi dwoma cylindrami może być interpretowana jako dysk pozbawiony tarcia, a co za tym idzie może stanowić ona pierwsze przybliżenie swobodnej powierzchni wirującego płynu w whirlpoolu.

### **3.2 Model ruchu płynu w warstwie Ekmana**

Z punktu widzenia realizowanej operacji w whirlpoolu najbardziej interesujący jest ruch płynu w obszarze występowania przepływu wtórnego

namywającego stożek. Przepływ ten jak już wcześniej wspomniano powstaje przy dnie i jest skierowany do centralnej części dna zbiornika.

Równanie ruchu płynu dla składowej promieniowej w postaci ogólnej można zapisać dla pojedynczej warstwy w układzie płaskim  $r, \varphi$ . Taki zapis zaproponował w swojej pracy Dörholt [Dörholt 1988]:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{u_\varphi^2}{r} - g \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (3.01)$$

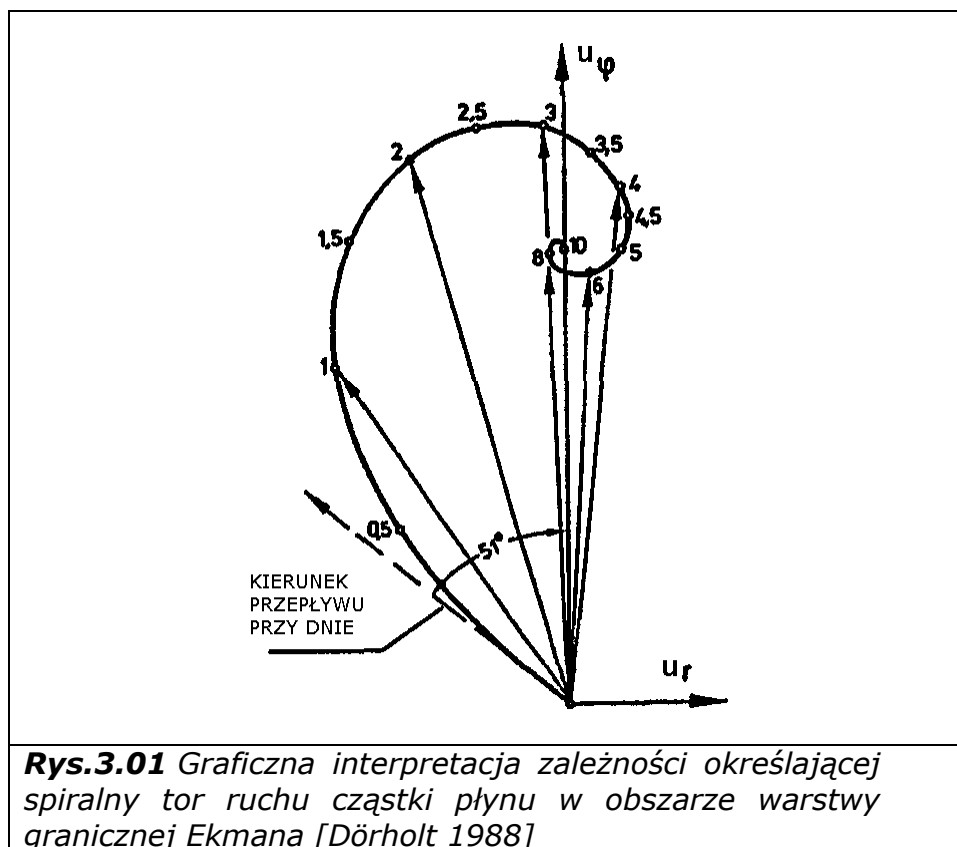
Powyższe równanie dla składowej promieniowej pozwala na wyznaczenie gradientu ciśnienia w warstwie granicznej cieczy znajdującej się przy dnie zbiornika, przy założeniu pseudo stacjonarnego charakteru ruchu:

$\frac{\partial}{\partial t} = 0$ , a więc  $\frac{\partial z}{\partial r} = 0$ . Czyniąc powyższe założenie dla pojedynczej warstwy równanie uprości się do postaci:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{u_\varphi^2}{r}. \quad (3.02)$$

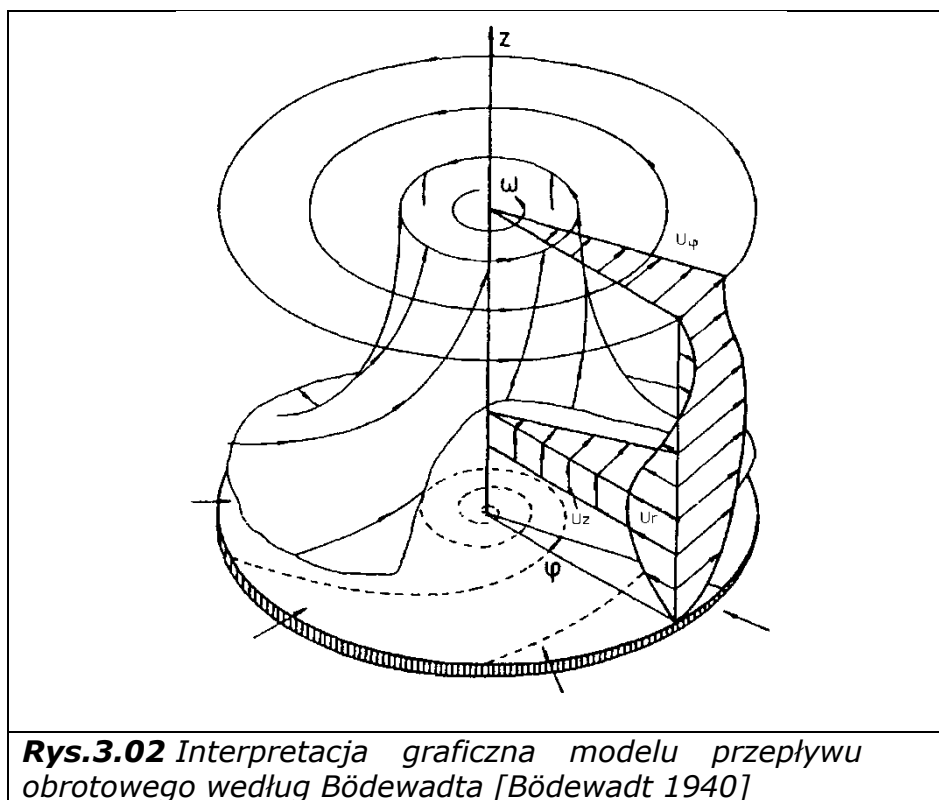
Równie (3.02) interpretowane jest w sposób następujący: w opisanym przypadku ruchu wirowego cieczy istnieje równowaga pomiędzy wielkością wartości ciśnienia i przyspieszeniem odśrodkowym. Analiza symulacyjna modelu komputerowego potwierdza występowanie gradientu ciśnienia w obszarze warstwy granicznej. Równowaga w warstwie przy dnie będzie zaburzona, ponieważ składowa kątowna prędkości w obszarze granicznej warstwy przy dnie zbiornika będzie posiadała bardzo małą wartość ze względu na warunek hamowania. Efektem tego jest powstawanie przepływu drugorzędowego w warstwie płynu przy dnie zbiornika określanej, jako tzw. warstwa Ekmana. Rozkład prędkości tego przepływu dla zmiennej wartości parametru zależnego od odległości od dna zbiornika (składowej wysokości)  $z$ , które są szczególnymi punktami równania (3.02) ilustruje wykres przedstawiony na rysunku 3.01.

Opisany przepływ drugorzędowy jest zgodny ze składową promieniową, a kierunek jego oddziaływania przemieszcza cząstki cieczy (a więc i osadu) do centralnego obszaru dna zbiornika. Przy uwzględnieniu ogólnego wirowania cieczy trajektorie ruchu cząstek przy dnie posiadają kształt spiralny.



### 3.3 Modele ruchu wirowego płynu w ograniczonej przestrzeni

Model ruchu płynu odwzorowującego mechanizm powstawania przepływu wtórnego w obszarze granicznej warstwy przy dnie zbiornika został opracowany w 1940, dla specyficznego meteorologicznego problemu ruchu mas powietrza (znany w meteorologii, jako model Bödewadta). W założeniach tego modelu płyn obraca się w dużym oddaleniu od ścian jak ciało sztywne ze stałą prędkością kątową. Przepływ wtórny wykształca się nad nieskończenie długim (w kierunku promieniowym) dnem. Dla tego zagadnienia, rozpatrywanego, jako laminarne i stacjonarne, zostało opracowane ścisłe rozwiązanie równania Naviera-Stokesa. Do obliczenia rozkładu prędkości kątowej w pobliżu dna przyjęto założenie oparte na rozwinięciu w szereg potęgowej prędkości w obszarze centralnym, a w dużym oddaleniu od dna, jako rozwinięcie asymptotyczne [Bödewadt 1940]. Graficzna ilustracja tego modelu została przedstawiona na rysunku 3.02, na którym uwidoczniiony jest rozkład prędkości tworzący przepływ wtórny, który skierowany jest do strefy centralnej obszaru dna, oraz spiralna trajektoria ruchu płynu.



**Rys.3.02** Interpretacja graficzna modelu przepływu obrotowego według Bödewadta [Bödewadt 1940]

Przedstawiony model jest jednak tylko pewnym przybliżeniem do ruchu cieczy w whirlpoolu, ponieważ analiza nieskończenie rozległego przepływu obrotowego uwzględnia tylko oddziaływanie dna zbiornika, a pomija wpływ ściany. Dodatkowo dla rozwiązania analitycznego przyjęto założenie o laminarności przepływu i nie uwzględniono przyspieszenia ziemskiego.

Jako model ruchu płynu w whirlpoolu można zaproponować także przypadek o charakterze dynamicznym z dwoma obracającymi się współbieżnie dyskami, pomiędzy którymi płyn wiruje ze stałą prędkością kątową (rozkład prędkości właściwy dla ciała sztywnego). Dolny dysk zostaje nagle zatrzymany, co stanowi warunek początkowy analizy. Powyżej zatrzymanego dysku wykształca się przepływ drugorzędowy odpowiedzialny za występowanie efektu whirlpoola. Ten model został wykorzystany do rozważań na temat określenia przedziału czasowego wygasania ruchu płynu nad zatrzymanym dyskiem stanowiącym dno naczynia. Analizy takiej dokonano i wykazano jednoznacznie, iż dla „problemu filiżanki herbaty” zanik wirowania nie wynika wyłącznie z dyssypacji energii ruchu wirowego płynu. Potwierdza to występowanie struktur przepływów drugorzędowych. Przepływ drugorzędowy wymaga pewnego czasu, aby przenieść (przemieścić) elementarną cząstkę płynu w warstwie granicznej przy dnie. Skutkiem tego jest powstawanie rozdziału energii pędu na przepływ drugorzędowy i wirowanie pierwotne. W konsekwencji powoduje to szybszy zanik rotacji niż wynikałoby to wyłącznie z samego zjawiska dyssypacji energii [Greenspan 1963].



### 3.4 Modele eksperymentalne i badania na obiektach rzeczywistych

W literaturze dotyczącej whirlpoola istnieje wiele badań i analiz odnoszących się do modeli półempirycznych i laboratoryjnych. Poniżej zostaną przedstawione wybrane prace o najistotniejszym wpływie na stan wiedzy z zakresu dynamiki ruchu płynu w kadzi wirowo – osadowej.

#### 3.4.1 Badania teoretyczno - doświadczalne

Dokładniejszy opis przepływu w zbiorniku whirlpoola umożliwiła analiza teoretyczna doświadczenia spin - down i spin - up [Stefaniak 1968]. W doświadczeniach na modelu laboratoryjnym o średnicy  $D = 450$  mm i smukłości  $H_n:D = 1,5$ , przy wykorzystaniu cząstek barwiących dowiedziono istnienie opisywanego powyżej spiralnego przepływu w okolicy dna zbiornika.

Analizując ruch płynu Stefaniak podzielił zbiornik na obszar pozbawiony tarcia i obszar w pobliżu warstwy granicznej obciążony tarciem. Dla sześciu różnych stanów ruchu wyprowadził równania prędkości kątowej, jako funkcji promienia zbiornika, rozkładu ciśnienia przy dnie zbiornika oraz kształtu swobodnej powierzchni. Analizowane przypadki to:

- a) stacjonarne wirowanie płynu jako ciała sztywnego (płyn i zbiornik obracają się z stałą prędkością kątową), pominięto oddziaływanie ściany;
- b) stacjonarne wirowanie płynu przy założonym rozkładzie prędkości kątowej odwzorowanym przez funkcję kwadratową, dodatkowo założono istnienie zerowej wartości prędkości w centrum i przy ścianie zbiornika, pominięto oddziaływanie ściany zbiornika;
- c) stacjonarne wirowanie płynu o rozkładzie prędkości kątowej jak dla ciała sztywnego, w centrum potencjał wirowy, pominięto oddziaływanie ściany zbiornika;
- d) doświadczenie spin - up - nagłe przyspieszenie zbiornika do stałej liczby obrotów;
- e) doświadczenie spin-down - nagłe zatrzymanie zbiornika o założeniach jak dla przypadku w podpunkcie a), powstaje przepływ drugorzędowy o składowej promieniowej skierowanej do wewnątrz zbiornika;
- f) doświadczenie spin - up i spin - down - zbiornik nagłe przyspieszany do określonej liczby obrotów, po czym gwałtownie zwalniany do wartości obrotów znacznie poniżej wartości maksymalnej i przyspieszany ponownie do wartości maksymalnej.

Do wizualizacji zjawiska wykorzystano wióry drzewne dodawane do płynu i na podstawie ich zachowania oceniano przyspieszanie bądź hamowanie cząstek. Opracowane przez autora profile prędkości miały charakter rachunkowy i nie były wynikiem doświadczeń. Autor stworzył podstawy pod analizę głównych zasad działania whirlpoola (przykład opisany w podpunkcie f), co stanowiło z kolei podstawę matematycznego opisu ruchu. Nie przedstawił on jednak pełnego modelu ruchu płynu w whirlpoolu.

Innym przykładem prac badawczo - analitycznych były rozważania dotyczące rzędu wielkości promieniowej składowej prędkości w stosunku do pozostałych składowych w przepływie pierwotnym. W przypadku składowej promieniowej prędkości wynosi ona około 0,1, a składowej wysokości maksymalnie 0,003 składowej obwodowej (po realizacji etapu nalewu). Autor formułuje pierwszy model, który obejmuje centralną część przepływu pierwotnego oraz obszar w okolicach brzegu z przepływem skierowanym do dołu w okolicach warstwy granicznej przy ścianie naczynia. W analizie pominięto zjawisko powstawania wirów Taylora (jako wpływu oddziaływania ściany naczynia), oraz geometrycznego odwzorowania swobodnej powierzchni. Autor analizuje proces oddzielania w whirlpoolu jako sedymentację osadu, którego prędkość jest wyższa od prędkości ruchu brzezki ku górze zbiornika. We wnioskach autor wskazuje, iż w przypadku tworzenia się kłaczkujących osadów w brzezce dominująca jest zdolność do sedymentacji, a samo zjawisko zbierające (namywające) może poprawić wyniki klarowania jedynie w skrajnych przypadkach. Autor oszacował maksymalny gradient prędkości w wyniku opadania cząstki na 0,85 1/s, a na podstawie tego wskazał na potrzebę ilościowej analizy tworzenia i rozpadania się kłaczek osadu w brzezce. Badania takie nie zostały dotychczas podjęte. [Tröster 1969]

Na uwagę zasługuje także praca, w której przedstawione są wyniki pomiarów prędkości kątovej uzyskane przy pomocy wirnikowego czujnika pomiarowego [Chapman 1976]. Przedmiotem badań był model whirlpoola o średnicy 930 mm i smukłości  $H_n : D = 1$ . Pomierzone wartości składowej kątovej prędkości zostały zaproksymowane funkcją Bessela pierwszego rodzaju właściwą dla przypadku drugiego omawianego powyżej, a dotyczącego prac Stefaniaka. Pomiarzy w obszarze zbliżonym do dna naczynia pozwoliły na uzyskanie profilu prędkości kątovej zbliżonego do profilu deklarowanego w pracy Bödewadta (profil prędkości w obszarze warstwy granicznej). Składowa promieniowa oraz składowa wysokości przepływu była w badaniach zaniedbywana. Do ustalenia tych składowych prędkości autor wykorzystał algorytm zaimplementowany do programu komputerowego. Jako warunek początkowy autor zadeklarował także w tym przypadku rozkład prędkości kątovej w postaci funkcji Bessela pierwszego rodzaju. Otrzymane rozwiązania wskazały na istnienie w pobliżu dna zbiornika przepływu z silnym oddziaływaniem w kierunku wewnętrznym. Dalsze prace tego autora miały na celu znalezienie charakterystycznego przedziału czasu spadku prędkości dla składowej kątovej w ruchu płynu w whirlpoolu. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dla dwóch modeli zbiorników laboratoryjnych o średnicach 460 mm i 930 mm oraz dla zbiornika wykorzystywanego w browarze do realizacji technicznej procesu klarowania autor uzyskał charakterystyczny interwał czasowy spadku prędkości. Wyniki badań zostały porównane z wyznaczonym teoretycznie analogicznym przedziałem czasu obliczonego na podstawie bilansu dyssypacji energii w przepływie wirowym. Charakterystyka czasowa wartości pomierzonych dla trzech zbiorników jest przybliżona jeżeli chodzi

o typ funkcji z wyznaczoną na podstawie bilansu dyssypacji energii. Autor wyprowadził równanie analityczne spadku prędkości w whirlpoolu do wartości 0,48 pierwotnej prędkości początkowej w punkcie charakterystycznym leżącym w odległości 0,5 R [Chapman 1976; Chapman et al. 1977].

### 3.4.2 Pomiar z wykorzystaniem arkusza światła

Pomiar bezpośredni wartości składowych ruchu wirowego płynu stanowi problem ze względu na powstawanie zaburzeń w przepływie wynikających z wprowadzenia czujników pomiarowych. Jedną z metod pośrednich umożliwiającą, w sposób ograniczony pomiar jest metoda polegająca na prześwietlaniu przepływu arkuszem światła (light - sheet method). Zasada pomiaru w tej metodzie została przedstawiona na rysunku 3.03a. W metodzie tej wprowadza się cząstki znacznikowe w postaci granulek tworzyw polimerowych o ciężarze właściwym zbliżonym do ciężaru właściwego płynu. W badaniach prowadzonych w Katedrze Mechaniki Technicznej Weißenstephan Uniwersytetu Technicznego w Monachium [Dürholt i Denk 1986; Dürholt 1988] wykorzystywano, jako cząstki znacznikowe, obrabiane termicznie granulki polistyrenu. Rejestracja obrazów dla kolejnych czasów ekspozycji umożliwia, poprzez porównanie, określenie trajektorii ruchu cząstek znacznikowych i ich prędkość. Wykres z wynikami pomiaru prędkości kątowej dla najniższej wysokości możliwej do uzyskania (obszar tuż powyżej warstwy granicznej) został przedstawiony na rysunku 3.03b.

Wyniki pomiarów zostały przedstawiane jako wartości bezwymiarowe zgodnie z przyjętymi przeliczeniami:

a) bezwymiarowy promień  $r^+ = \frac{r}{R}$ ;

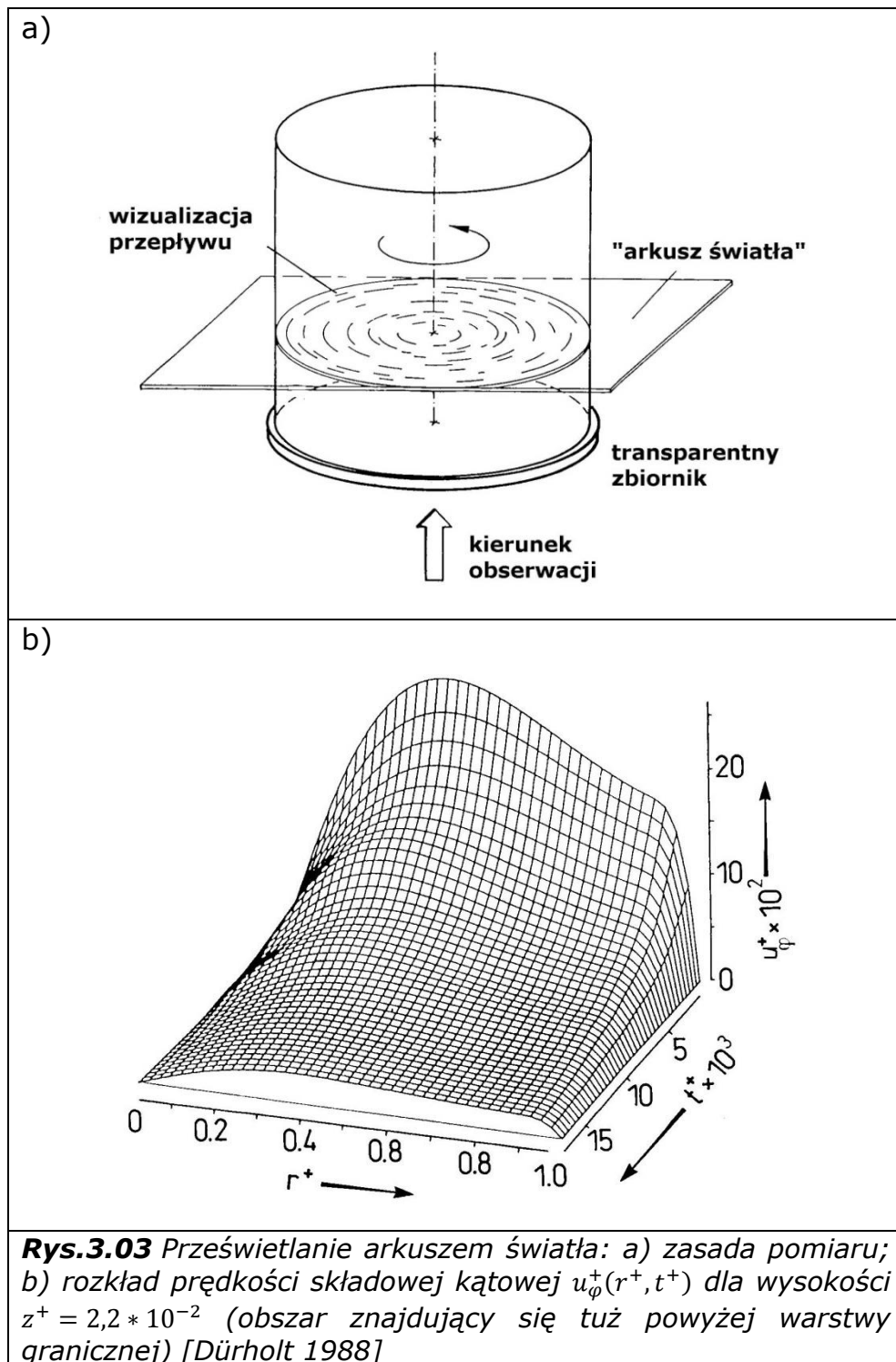
b) bezwymiarowa wysokość  $h^+ = \frac{h}{H}$ ;

c) bezwymiarowa prędkość  $u^+$  z podziałem na składowe  $u_i^+ (i = r, \varphi, z)$

$$u_i^+ = \frac{u_i}{u_E}$$

d) bezwymiarowy czas  $t^+ = \frac{t \cdot v}{R^2}$ .

Te same wielkości bezwymiarowe zostały zastosowane do prezentacji wyników pomiarów z wykorzystaniem Dopplerowskiej Anemometrii Laserowej (LDA) przedstawionej w podrozdziale 3.4.3.



Badania z wykorzystaniem prześwietlania były prowadzone także przez autora niniejszej pracy. Stanowisko badawcze stanowiła laboratoryjna kadź wirowo - osadowa opisana w podrozdziale 5.1. Do oświetlenia wykorzystano źródło światła o jasności 2 500 ANSI lumenów. Uzyskane wyniki w postaci obrazów stanowiły podstawę do przeprowadzenia wstępnej analizy dotyczącej możliwości wykorzystania cyfrowej anemometrii obrazowej DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) do wizualizacji przepływu napędowego w laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej [Jakubowski 2004].



**Rys.3.04** Prześwietlanie arkuszem światła - linie prądu przepływu w obszarze warstwy granicznej [Jakubowski 2004]

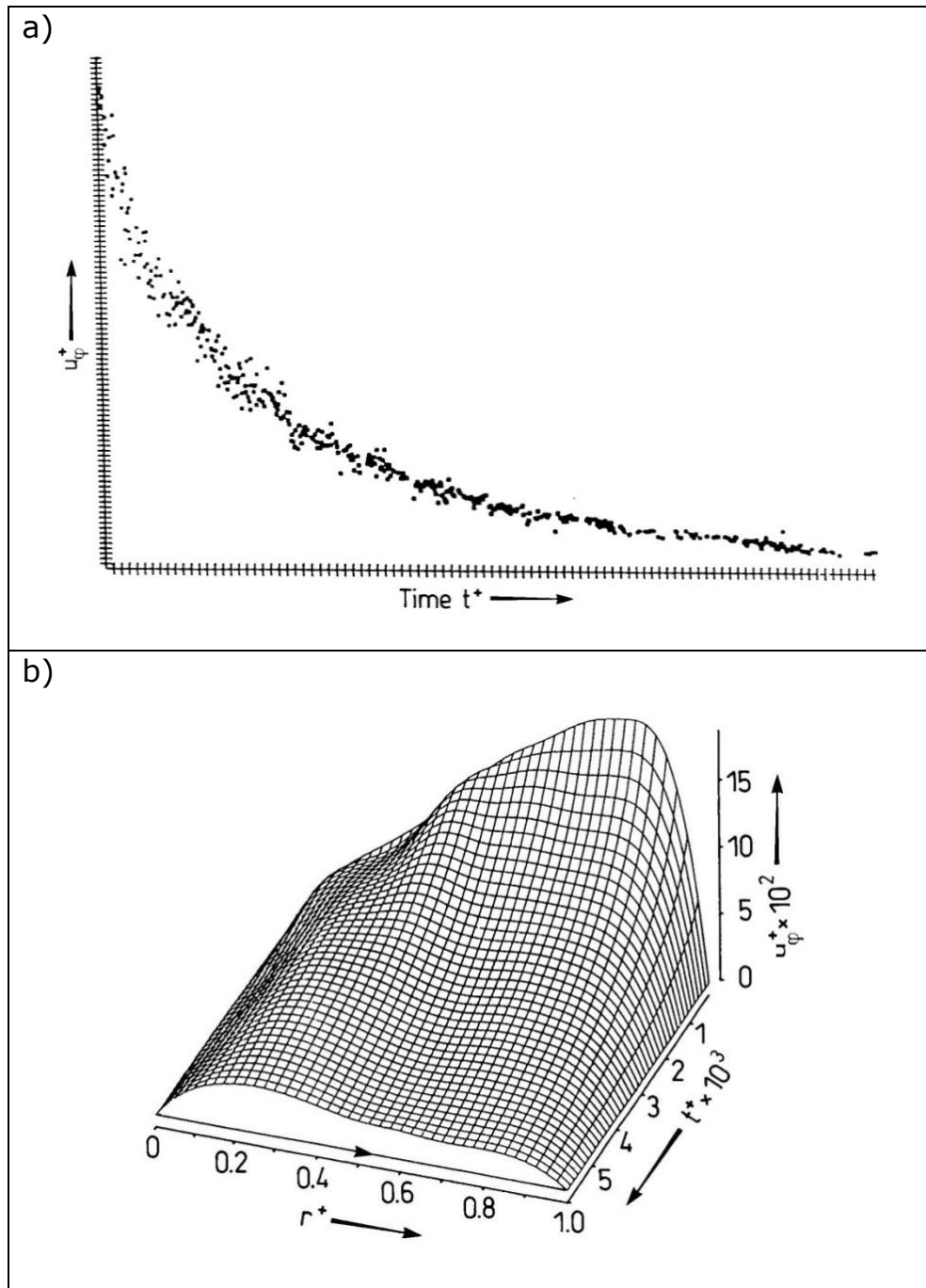
Ograniczeniem tej metody pomiaru, w przypadku wykorzystania jej do badań przepływu w kadzi wirowo - osadowej są powstające zakłócenia, które wynikają z ruchu cząstek znacznika znajdujących się pomiędzy płaszczyzną ekspozycji i rejestratorem. Ograniczenie to powoduje zasadniczo brak możliwości wykorzystania tej metody dla prześwietlanych warstw przepływu innych niż warstwa przy dnie i przy powierzchni wirującego płynu, co znajduje potwierdzenie w pracy pt. "Eksperymentalne badania niestacjonarnego przepływu wirowego w zbiorniku osadczym whirlpool" (tłumaczenie dosłowne tytułu) [Dürholt 1988]

### 3.4.3 Anemometria laserowa LDA

Anemometria laserowa pozwala na bezinwazyjny pomiar prędkości poruszania się cząsteczek (elementów) rozpraszających światło. Pomiar dokonuje się za pomocą światła laserowego podzielona na dwie wiązki. Wiązki te są skupiane na poruszającym się obiekcie. Prędkość poruszającego się obiektu wyznacza się przez pomiar częstości prążków interferencyjnych. Dopplerowska anemometria laserowa (LDA) wykorzystuje do pomiarów tzw. efekt Dopplera polegający na zmianie częstotliwości długości fali w wyniku względnego ruchu źródła i obserwatora.

Badania przepływu w whirlpoolu z wykorzystaniem LDA były prowadzone w Katedrze Mechaniki Technicznej w Monachium. Do badań wykorzystano światło lasera argonowego o długości fali 514,5 nm, obiektem badawczym był zbiornik o średnicy  $D = 300$  mm i smukłości  $H_n : D = 1$ .

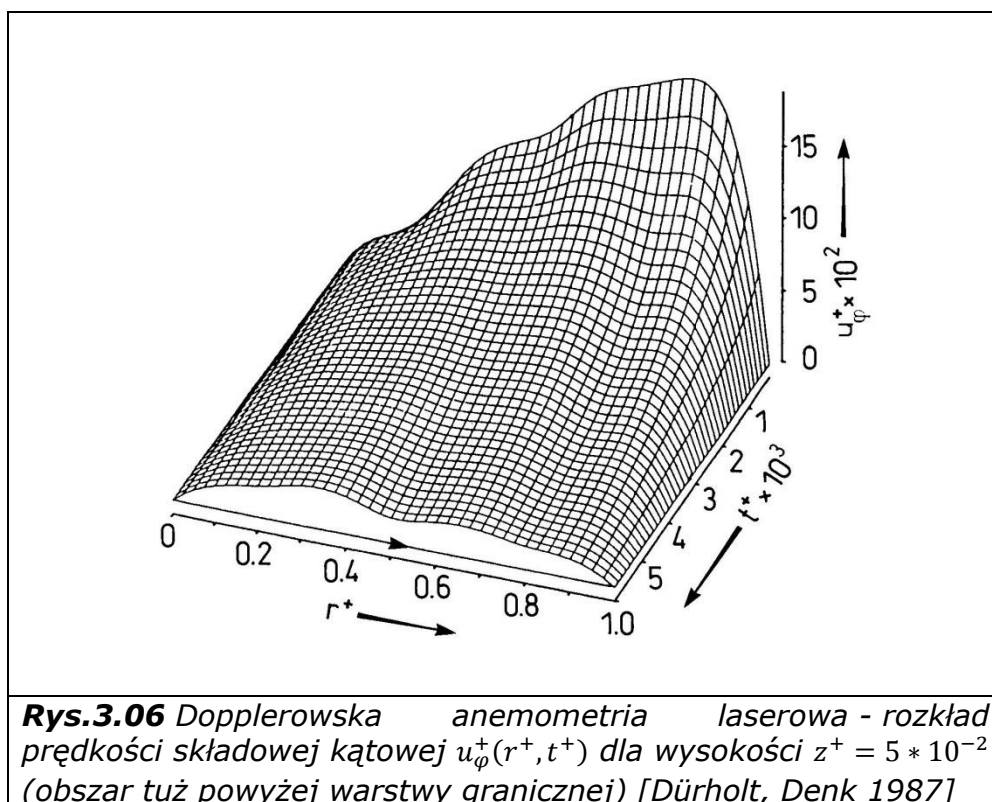
Na rysunku 3.05a przedstawiono przykładowy rekord dla pojedynczego pomiaru w punkcie. Dla pomiaru w każdej analizowanej warstwie wykonano ok. 500 pomiarów jednostkowych. Wyniki dla pomiaru w warstwie granicznej przy dnie przedstawiono na rys. 3.05b.



**Rys.3.05** Dopplerowska anemometria laserowa: a) przykładowy rekord dla punktu pomiarowego; b) rozkład prędkości składowej kątowej  $u_\phi^+(r^+, t^+)$  dla wysokości  $z^+ = 5 * 10^{-3}$  (obszar warstwy granicznej) [Dürholt 1988]

Porównując wyniki uzyskane metodą prześwietlania arkuszem światła i LDA należy podkreślić, iż uzyskane charakterystyki różnią się od siebie.

Na rysunku 3.06 przedstawiono wyniki pomiarów z wysokości zbliżonej do wysokości pomiarowej przedstawionej na rysunku 3.03b. Szczególnie charakterystyczna jest różnica w umiejscowieniu maksymalnej wartości składowej kątovej prędkości, która na początku pomiaru znajduje się w pobliżu ściany zbiornika dla pomiaru LDA. Dla pomiaru metodą arkusza światła maksymalna wartości składowej kątovej prędkości znajduje się w pierwszej ćwiartce promienia zbiornika. Różnice w wartości prędkości wynikają natomiast z faktu, iż zbiorniki wykorzystane do badań miały inne wymiary, a przepływ posiadał inne warunki początkowe.



Poważnym ograniczeniem metody LDA jest jej znikoma przydatność do pomiarów w przepływach zmiennych w czasie oraz sam charakter punktowy pomiaru. Ograniczeniem tej metody pomiaru są także wysokie koszty zakupu i eksploatacji aparatury pomiarowej. Problemem są także ograniczenia odnośnie rodzaju cieczy, której przepływ jest analizowany, z uwagi na fakt, iż zbiornik do pomiarów musi posiadać taki sam współczynnik załamania światła jak płyn, którego prędkość jest przedmiotem pomiaru.

### 3.4.4 Modelowanie przepływu

Prowadzono prace nad modelowaniem przepływu w whirlpoolu. Do obliczeń wykorzystana została, między innymi, metoda „Marker and Cell” (MAC) oparta na analizie różnic skończonych. Metoda ta została opracowana pierwotnie do analiz dynamicznych przepływu ze swobodną powierzchnią, przy czym do analizy ruchu wirowego była adaptowana [Michel 1989]. W analizie zastosowano model ruchu płynu w postaci cylindrycznego zbiornika napełnionego płynem. Płyn wiruje, wraz ze zbiornikiem ze stałą prędkością kątową, a więc ruch samego płynu jest zadeklarowany jako ruch ciała sztywnego. Zbiornik jest nagle zatrzymywany. W wyniku oddziaływania tarcia o ściany i dno zbiornika powstaje wtórny przepływ w obszarze zbliżonym do dna zbiornika. Obliczenia opierają się na założeniu symetryczności przepływu rotacyjnego, a sam przepływ jest traktowany jako laminarny.

Wyniki obliczeń wskazują na znaczne ograniczenia stosowania tej metody, gdyż wyniki symulacji są zadawalające jedynie dla przepływów płaskich (dwuwymiarowych) o liczbie Reynoldsa do  $Re = 5000$ , Powyżej tej wartości model staje się niestabilny. Pomiar i analiza wyników wskazują na istnienie znacznie wyższych wartości liczby Reynoldsa w przepływie w whirlpoolu [Dürholt 1989]. Wyniki symulacji nie wykazują natomiast istnienia drugorzędowych struktur wirowych, takich jak np. wiry Taylora w warstwie Sewardsona.

Prowadzone są także badania dotyczące analizy zjawisk pokrewnych wirowaniu płynu w whirlpoolu. Na uwagę zasługują prace dotyczące analiz numerycznych ruchu wirowego płynu w zbiorniku kulistym [Schmitt, Jault 2004] oraz modelowanie i analiza zmiennego w czasie trójwymiarowego przepływu płynu o własnościach lepkoplastycznych [Xue et al. 1999].

### 3.5 Podsumowanie

Autorzy opracowań naukowych wskazują jednoznacznie na potrzebę badań nad przepływem w whirlpoolu, mechanizmem tworzenia się przepływu odpowiedzialnego za formowanie się stożka osadu w odniesieniu do zmiennych parametrów konstrukcyjnych zbiornika oraz zmiennych parametrów początkowych realizacji procesu usuwania osadu gorącego w kadzi wirowej.

Nie przeprowadzono dotychczas analizy wpływu poszczególnych zmian konstrukcyjnych na przepływ w whirlpoolu w odniesieniu do geometrycznie jednolitej klasy modeli zarówno w postaci obiektów rzeczywistych jak i modeli komputerowych.



## **4. Cele, hipoteza i zakres pracy**

W rozdziale przedstawiono cele pracy, sformułowano hipotezę badawczą oraz określono zakres pracy.

### **4.1 Cele pracy**

Podstawowe cele pracy to:

1. Opracowanie i weryfikacja modelu symulacyjnego ruchu płynu w cylindrycznym zbiorniku kadzi wirowo – osadowej;
2. Identyfikacja i analiza formowania się i kinetyki systemu przepływów wpływających na operację klarowania zawiesin w kadzi wirowo – osadowej;
3. Analiza wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na system przepływów warunkujących formowanie się stożka osadu w whirlpoolu.

### **4.2 Hipoteza badawcza**

Na podstawie analizy źródeł literaturowych, przeprowadzonych wstępnych badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych możliwe jest przyjęcie następującej hipotezy badawczej pracy:

„Należy sadzić, iż analiza wyników eksperymentu numerycznego ruchu płynu w kadzi wirowej dla wybranych parametrów konstrukcyjnych pozwoli określić ich wpływ na charakter systemu przepływów warunkujących tworzenie się stożka osadu w procesie klarowania zawiesin”.

### **4.3 Zakres pracy**

Zakres pracy obejmuje:

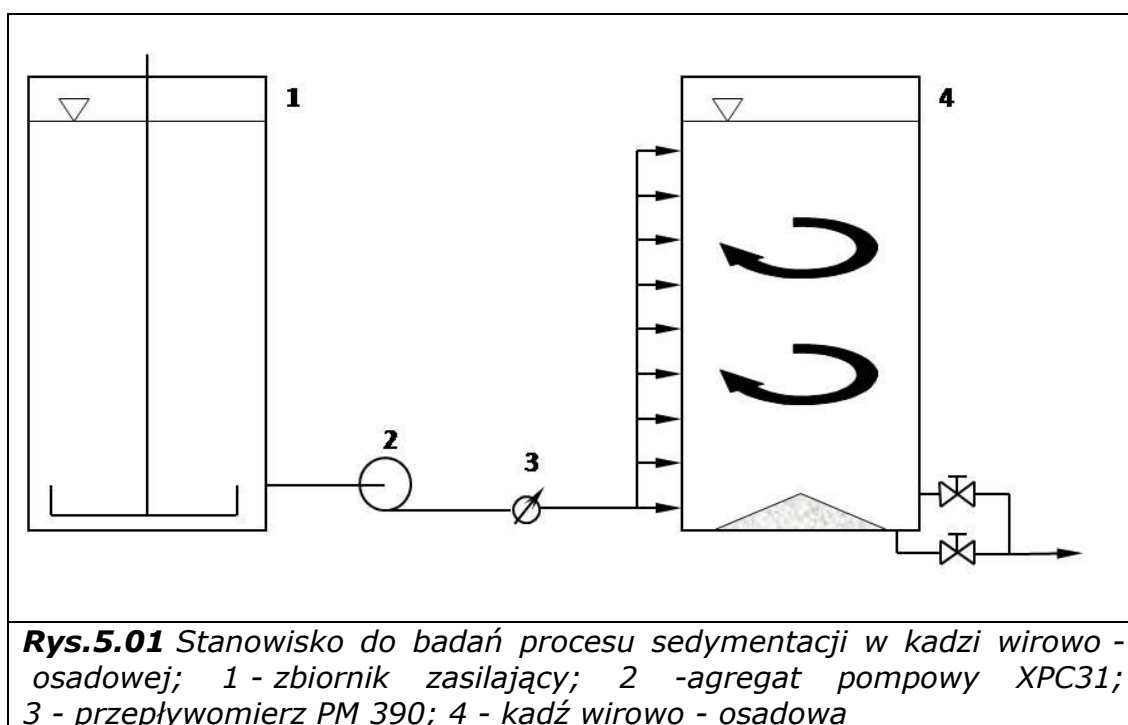
1. Analizę stanu wiedzy z zakresu ruchu płynu w kadzi wirowej;
2. Identyfikację konstrukcji aparatów wykorzystywanych do realizacji operacji usuwania osadu gorącego w warunkach przemysłowych;
3. Opracowanie modelu matematycznego i jego implementacja w środowisku pracy programu Ansys Flotran;
4. Weryfikację wyników modelowania numerycznego wynikami badań eksperymentalnych uzyskanych na obiektach rzeczywistych w skali laboratoryjnej i przemysłowej;
5. Badania symulacyjne konstrukcji whirlpooli o zmiennych parametrach:
  - a) wysokości napełnienia przy stałej średnicy zbiornika, zmiennej średnicy i wysokości napełnienia przy stałej objętości nominalnej,
  - b) kształtu połączenia pobocznic i dna zbiornika,
  - c) geometrii zbiorników występujących sporadycznie w konstrukcjach whirlpoola.

## 5. Stanowisko badawcze i badania eksperymentalne

Pierwszym etapem badań rozpoznawczych były badania z wykorzystaniem stanowiska badawczego wyposażonego w model laboratoryjny kadzi wirowo - osadowej.

### 5.1 Stanowisko badawcze i realizacja pełnego cyklu pracy

W skład stanowiska badawczego (rys. 5.01) poza omówioną w następnym podrozdziale kadzią wirowo - osadową wchodzi wykonany ze stali kwasoodpornej zbiornik zasilający o pojemności  $V_m = 4$  hl, opcjonalnie dołączana pompa wirnikowa i przepływomierz, oraz armatura w postaci węży zasilających i spustowych a także kształtek i złączek.



**Rys.5.01** Stanowisko do badań procesu sedymentacji w kadzi wirowo - osadowej; 1 - zbiornik zasilający; 2 - agregat pompy XPC31; 3 - przepływomierz PM 390; 4 - kadź wirowo - osadowa

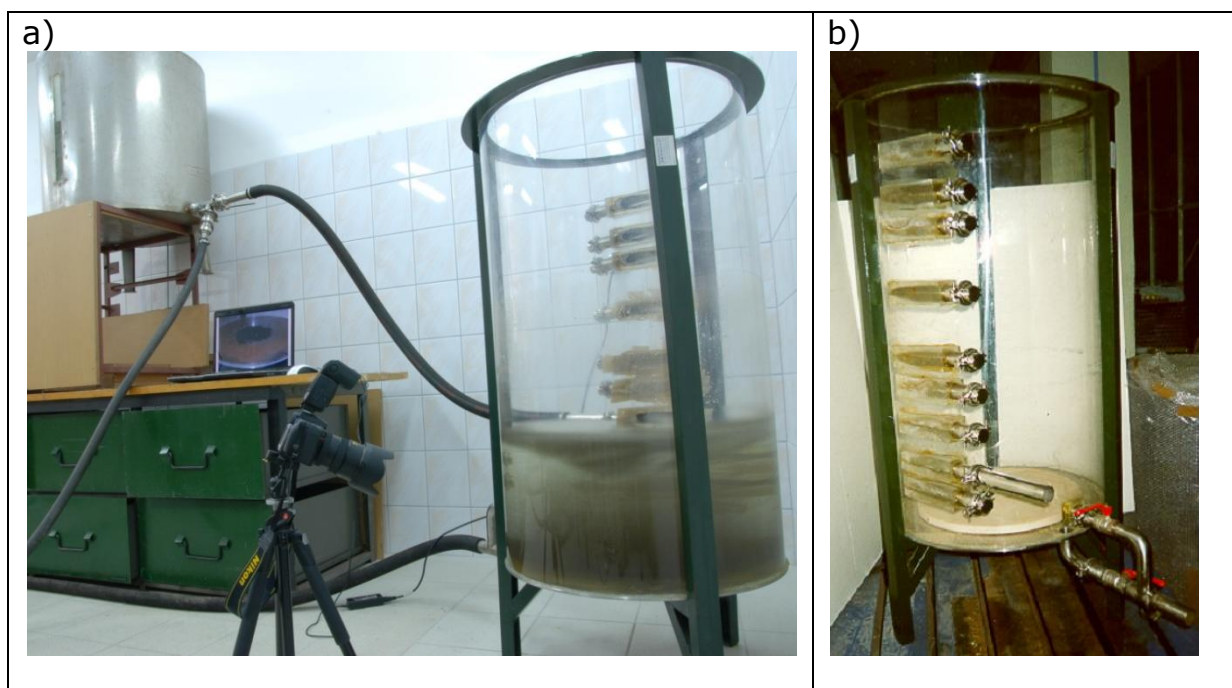
Zbiornik zasilający posiada wbudowany wyskalowany wskaźnik wysokości napełnienia, co pozwala na uzyskanie powtarzalności realizacji napełnienia kadzi. Przewody doprowadzające i odprowadzające wykonane są z wielowarstwowej zbrojonej gumy, a kształtki i elementy łączące wykonane są ze stali kwasoodpornej.

W zależności od potrzeb stanowisko badawcze jest dodatkowo uzbrojone w zestaw do przechwytywania i cyfrowej archiwizacji obrazu. W skład zestawu wchodzi cyfrowy aparat fotograficzny wyposażony w matrycę CCD o rozdzielczości 10 MPx (mega pikseli), kamerę przemysłową o rozdzielczości 656x494 pracującą z prędkością rejestracji od 90 do 166 klatek na sekundę, kamerę cyfrową o rozdzielczości 1 920x1 080 pracującą z prędkością rejestracji 25 klatek na sekundę, zestaw oświetlenia bezcieniowego

oraz oświetlenia do zdjęć makro a także zestaw komputerowy do archiwizacji i analizy obrazu.

### 5.1.1 Laboratoryjna kadź wirowa whirlpool

Obiektem badawczym o charakterze eksperymentalnym jest zbiornik laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej (rys. 5.02) o wymiarach  $D = 640$  mm,  $H_n = 0,640$  m,  $H_m = 0,960$  m i pojemności nominalnej  $V_n = 2,05$  hl. Przy tej pojemności smukłość nalewu  $H_n : D = 1$ . Maksymalna pojemność zbiornika wynosi  $V_m = 3,1$  hl, co odpowiada smukłości  $H_m : D = 1,5$ . Zbiornik stanowi odwzorowanie aparatów wykorzystywanych przemysłowo. Posiada zestaw dziewięciu otworów dolotowych umiejscowionych stycznie na wysokościach: 160 mm ( $0,25 H_n$ ); 240 mm ( $0,375 H_n$ ); 320 mm ( $0,5 H_n$ ); 400 mm ( $0,625 H_n$ ) 480 mm ( $0,75 H_n$ ); 640 mm ( $H_n$ ); 800 mm ( $1,25 H_n$ ); 960 mm ( $1,5 H_n$ ).



**Rys.5.02** Stanowisko do badań procesu sedymentacji w kadzi wirowo - osadowej a) widok ogólny, b) kadź wirowo - osadowa

Zbiornik posiada dwa kanały odpływowe, z których jeden jest umiejscowiony na ścianie zbiornika na wysokości 80 mm. Drugi z nich jest umiejscowiony na dnie zbiornika w odległości 80 mm od ściany zbiornika. Laboratoryjna kadź wirowo - osadowa posiada także zestaw króćców dolotowych o zmiennych przekrojach oraz zestaw profili kształtu dna właściwych dla najczęściej występujących konstrukcji przemysłowych whirlpoola.

Ściana zbiornika wykonana jest z polimetakrylanu metylu (PMMA) zwanego potocznie szkłem organicznym lub plexiglasem. Jego przepuszczalność światła widzialnego na poziomie 0,92 umożliwia obserwację zjawiska

formowania się stożka osadu, a także (przy zastosowaniu barwnika) obserwację zawirowań powstających w poruszającej się cieczy.

## 5.2 Warunki wirowania

Cykl pracy laboratoryjnej kadzi wirowo – osadowej jest zbliżony do cyklu pracy whirlpoola w warunkach przemysłowych. Także w tym przypadku występują cztery etapy pracy, a więc: napełnianie, wirowanie, opróżnianie zbiornika i usuwanie osadu. Z punktu widzenia prowadzonych badań dwa ostatnie, a więc opróżnianie i usuwanie stożka osadu są traktowane jako etapy pomocnicze, ponieważ nie prowadzono badań dotyczących wpływu opróżniania na zachowanie się stożka osadu zastępczego.

Napełnianie prowadzone na stanowisku badawczym realizowane było zarówno poprzez zasilanie grawitacyjne jak i przy zastosowaniu agregatu pompowego XPC31. Prędkości uzyskiwane na wlocie do zbiornika kadzi wynosiły odpowiednio 1,7 m/s przy zasilaniu grawitacyjnym i 2,4 m/s przy zastosowaniu pompy opisanej powyżej. Czas napełniania zbiornika (do wysokości nominalnej  $H_n$ ) wynosił 110 s w przypadku zasilania grawitacyjnego, i 80 s w przypadku zasilania pompą. Konstrukcja laboratoryjnej kadzi wirowej pozwalała na zmianę wysokości wlotu w zakresie od 0,25 do 1,5 wysokości nalewu nominalnego. Zasadniczy cykl badań eksperymentalnych prowadzony był przy wykorzystaniu wlotu umiejscowionego na wysokości połowy nalewu nominalnego.

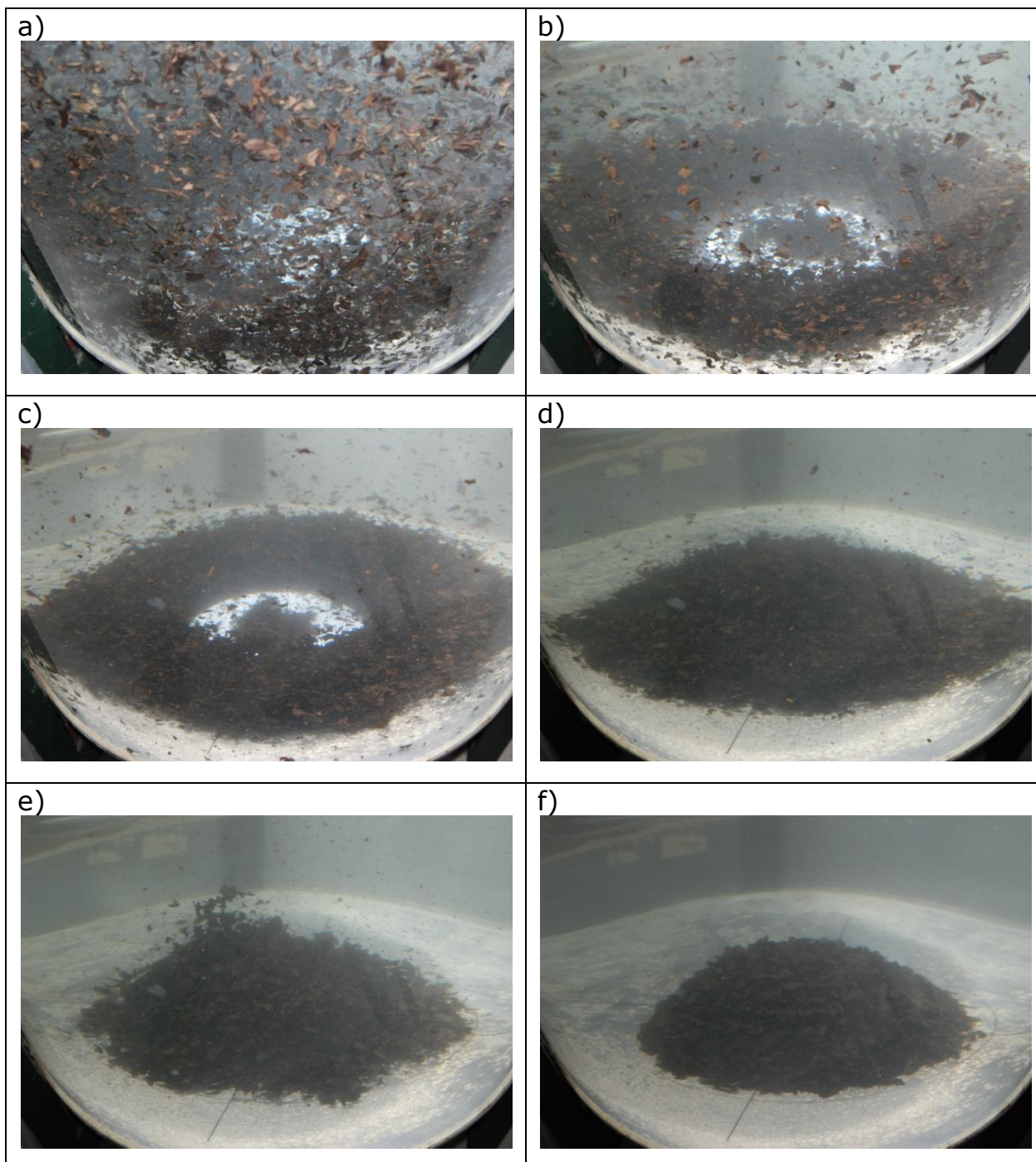
Czas wirowania w laboratoryjnej kadzi wirowo – osadowej jest uzależniony od sposobu zasilania, wysokości na której umiejscowienia jest aktywna dysza zasilająca oraz rodzaju płynu i obecności w nim fazy stałej. W badaniach wykorzystano zasilanie grawitacyjne, a zbiornik zasilano dyszą umiejscowioną na wysokości  $0,5 H_n$ . Czas wirowania dla wody o temperaturze  $10^\circ\text{C}$  pozbawionej osadu, w takiej konfiguracji wynosił w przybliżeniu 16 minut.

## 5.3 Badania dotyczące formowania stożka osadu

Pierwszym elementem badań eksperymentalnych były badania nad zagadnieniem formowania się stożka osadu. Wykonano serię wirowań z wykorzystaniem osadu zastępczego w postaci spreparowanych fusów herbacianych [Denk 1997]. Kolejne etapy formowania stożka osadu przedstawiono na rysunku 5.03.

W fazie początkowej cząstki osadu zastępczego wypełniają całą przestrzeń nalewu w zbiorniku (rys. 5.03a). Po 45 sekundach wirowania można zidentyfikować formowanie się osadu o geometrycznej postaci torusa (rys. 5.03b i 5.03c). Pomiędzy 45 a 100 sekundą wirowania występuje wyraźny podział stożka na formujący się krąg zewnętrzny i część

wewnętrzną formującą się w osi zbiornika. Pomiedzy nimi występuje przestrzeń pozbawiona osadu, która powstaje na skutek oddziaływania silnego przepływu centralnego (zstępującego), który w danym okresie czasu posiada kierunek przeciwny do kierunku pionowej składowej układu odniesienia.



**Rys.5.03** Etapy formowania się stożka osadu zastępczego dla czasu: a) 1 s; b) 45 s; c) 90 s; d) 120 s; e) 160 s; f) 200 s

Oddziaływanie przepływu centralnego na formowanie się stożka osadu zanika w skutek zmiany kierunku przepływu, co z kolei prowadzi do chwilowego rozpraszania szczytowej części stożka (rys. 5.03e). Efekt taki

występuje podczas zjawiska pogodowego tornado, w ramach którego tworzy się unosząca spiralna rurka wirowa. Identyczny mechanizm, na znacznie mniejszą skalę odpowiada za unoszenie szczytowej części stożka w zbiorniku whirlpoola. Po 200 sekundzie przepływu w kadzi wirowo - osadowej obserwuje się uformowany stożek osadu, który nie porusza się wraz z obracającą się wodą (rys. 5.03f).

Na podstawie zmian położenia i kształtu stożka osadu zastępczego ustalono, iż czas jego efektywnego formowania, dla warunków panujących w laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej wynosi około 200 sekund. Po tym czasie stożek nie obraca się wraz z wirującym płynem. Przepływ namywający oddziałuje jednak nadal, co objawia się zgarnianiem przez przepływ namywający cząstek osadu zastępczego, które ze względu na rozmiar sedimentują w późniejszym okresie czasu.

#### **5.4 Badania rozkładu prędkości**

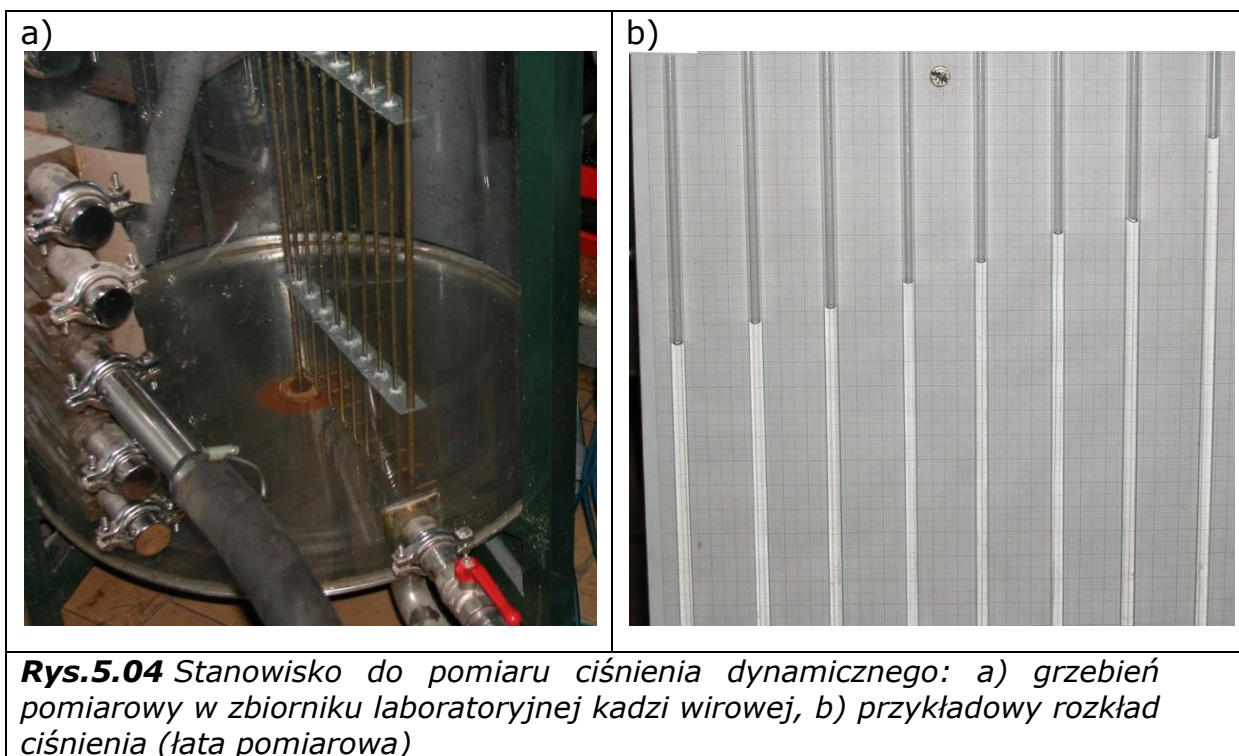
Drugim elementem badań eksperymentalnych było ustalenie rozkładu prędkości początkowej płynu wirującego w kadzi wirowo - osadowej. Badania przeprowadzono w celu uzyskania rozkładu prędkości w zerowym kroku wirowania dla budowanego modelu komputerowego.

Wykonano pomiary rozkładu ciśnienia dynamicznego płynu poruszającego się ruchem wirowym z wykorzystaniem rurek spiętrzających Pitota [Deka et al. 2001]. Zaprojektowano i wykonano specjalną ruchomą ramę z osadzonymi 8 rurkami tworzącymi „grzebień pomiarowy” (rys. 5.04a). Wlot rurek rozmieszczono na promieniu zbiornika, na jednakowej wysokości. Prowadnice, na których umieszczono ramę z grzebieniem pozwalały na regulację wysokości umieszczenia wlotu rurek. Umożliwiało to przeprowadzenie pomiaru na dowolnej wysokości w zbiorniku. Wskazania wysokości spiętrzenia słupa wody odczytywano na wyskalowanym ramieniu u-rurki. Po zamknięciu zaworu na przewodzie zasilającym dokonywano rejestracji fotograficznej, a następnie wyniki odczytywano z dokładnością do 1 mm (rys. 5.04b).

Wobec braku możliwości wykonania pomiarów wartości prędkości w sposób bezpośredni zrealizowano serie pomiarów wartości ciśnienia dynamicznego zakładając, że charakterystyka jego rozkładu jest zbliżona do charakterystyki rozkładu prędkości obwodowej.

Pomiary wartości ciśnienia dynamicznego wykonano dla stałych, powtarzalnych warunków prowadzenia nalewu wody do zbiornika kadzi wirowo - osadowej. Wyniki pomiarów utrwalone zostały w postaci zdjęć wykonanych przy pomocy aparatu cyfrowego. Dla każdej wysokości umiejscowienia wlotu rurek pomiar powtarzano kilkakrotnie (minimalna ilość powtórzeń wynosiła trzy). Wyniki pomiaru dla czasu końca napełniania

są wartościami uśrednionymi. Rozrzut wartości pomierzonych dla jednego punktu nie przekroczył 10%.



**Rys.5.04** Stanowisko do pomiaru ciśnienia dynamicznego: a) grzebień pomiarowy w zbiorniku laboratoryjnej kadzi wirowej, b) przykładowy rozkład ciśnienia (lata pomiarowa)

Pomiar prędkości z wykorzystaniem rurki spiętrzającej możliwy jest do zrealizowania poprzez zamianę energii kinetycznej płynu wpływającego do wnętrza rurki na energię potencjalną ciśnienia, a tym samym spiętrzenie płynu znajdującego się w jej wnętrzu. Uwzględniając zakłócenia oraz straty w poziomym odcinku rurki, wzór określający rzeczywista prędkość lokalną ma postać [Deka et al. 2001]:

$$u = \alpha \sqrt{2gh}. \quad (5.01)$$

Na wykresie (rys. 5.05a) przedstawiono obliczone wartości rozkładu prędkości składowej obwodowej płynu poruszającego się ruchem wirowym w zbiorniku laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej dla czasu zakończenia realizacji etapu nalewu. Ze względu na ograniczenia, wynikających z ukształtowania swobodnej powierzchni, pomiary wykonano na wysokościach poniżej  $0,5 H_n$ .

Funkcja, którą należało zaproksymować wyniki pomiarów, powinna spełniać dwa warunki. Przede wszystkim, w zadawalający sposób wiernie odzwierciedlać charakter (naturę) zjawisk zachodzących w płynie poruszającym się ruchem wirowym w zbiorniku cylindrycznym niezależnie od czasu. Jednocześnie powinna być na tyle prosta, aby była możliwa do implementacji w programie do analizy symulacyjnej. Ponieważ powyższe założenia wykluczają się wzajemnie zaproponowana funkcja jest kompromisem pomiędzy precyzją odwzorowania, a prostotą zapisu.

W ogólnej postaci funkcji aproksymującej rozkład prędkości wirowania płynu w funkcji czasu względem wysokości i promienia (równanie 5.02) uwzględniono trzy człony:

$$u_A = (A + B) * C. \quad (5.02)$$

W założeniu postać funkcji aproksymującej uwzględnia trzy podstawowe podfunkcje:

A - składnik opisujący charakter ruchu wirowego płynu, skutkiem którego jest oddziaływanie siły odśrodkowej, która odpowiedzialna jest za powstawanie charakterystycznego kształtu swobodnej powierzchni zbliżonego do paraboloidy obrotowej. Przyjęto do rozważań funkcję kwadratową (równanie 5.03):

$$A = n_1 r^2, \quad (5.03)$$

gdzie:

$n_1$  - współczynnik funkcji regresji (pochylenie ramion paraboli);

$r$  - zmienna po promieniu zbiornika R ( $0 < r < 0,32$ ).

Kolejny składnik (B) opisuje powstające, podczas prowadzenia nalewu i wirowania cieczy, przepływy drugorzędowe. Przepływy wtórne mają postać lokalnego wzmocnienia wartości prędkości wirowania cieczy. Zaproponowano funkcję sinus (równanie 5.04) jako opis naturalnych zaburzeń o charakterystyce zbliżonej do rozchodzenia się fal na powierzchni i w objętości płynu:

$$B = n_2 * [\sin 2\pi(r - n_3)], \quad (5.04)$$

gdzie:

$n_2$  - współczynnik funkcji regresji (współczynnik amplitudy sinusoidy);

$n_3$  - współczynnik funkcji regresji opisujący położenie środka wiru;

$r$  - zmienna po promieniu zbiornika R, ( $0 < r < 0,32$ ).

Ostatni składnik (C) opisuje wyhamowywanie prędkości wirowania cieczy przy ścianie zbiornika. Wartość prędkości obwodowej płynu w ograniczonym naczyniu cylindrycznym wzrasta na promieniu osiągając maksimum w pobliżu ścianki naczynia i gwałtownie maleje do zera przy jej powierzchni (w warstwie przyściennej prędkość wirowania równa jest 0). Aby opisać oddziaływanie ścianki zbiornika posłużono się funkcją o zapisie różnicy jedności i funkcji wykładniczej (eksponens) z wartości ujemnej argumentu (równanie 5.05):



$$C = 1 - \exp[-n_4(r-R)], \quad (5.05)$$

gdzie:

$n_3$  - współczynniki funkcji regresji opisujący „intensywność” oddziaływania ścianki naczynia;

R - promień zbiornika;

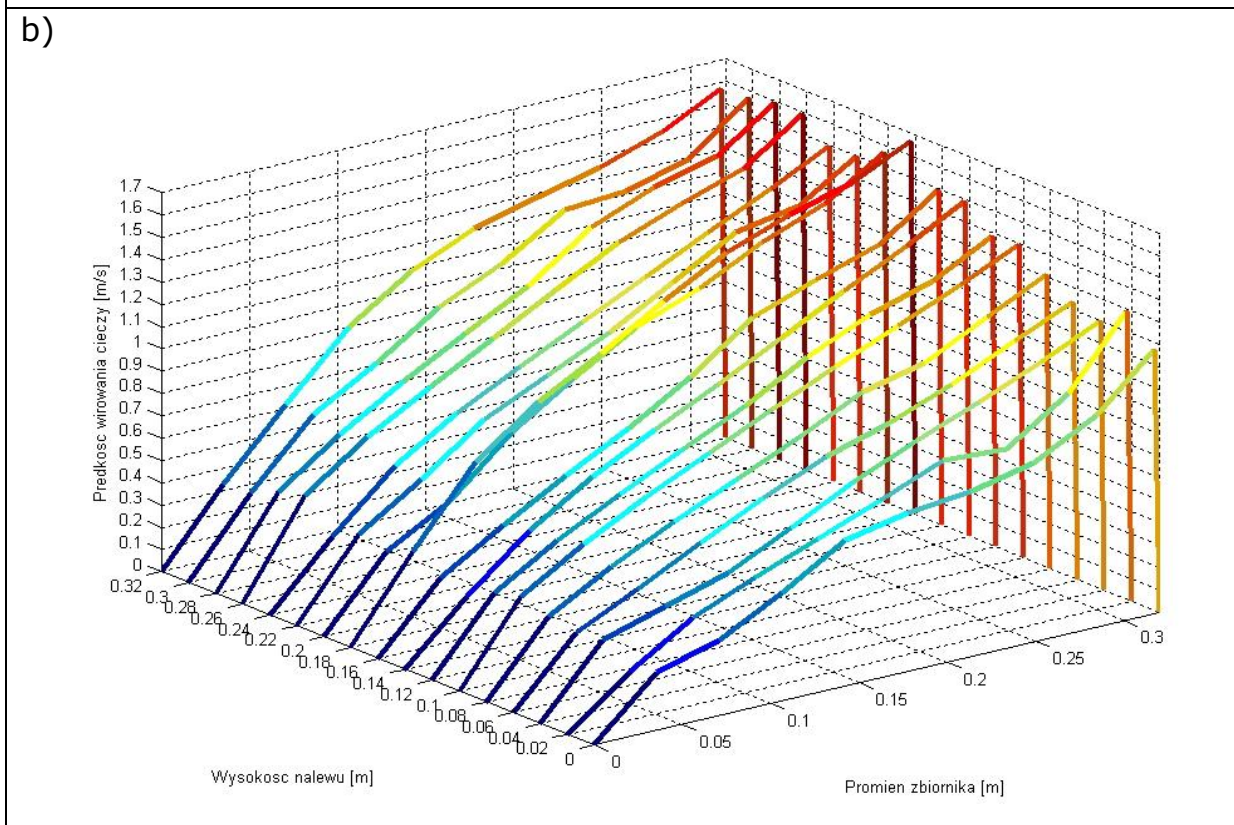
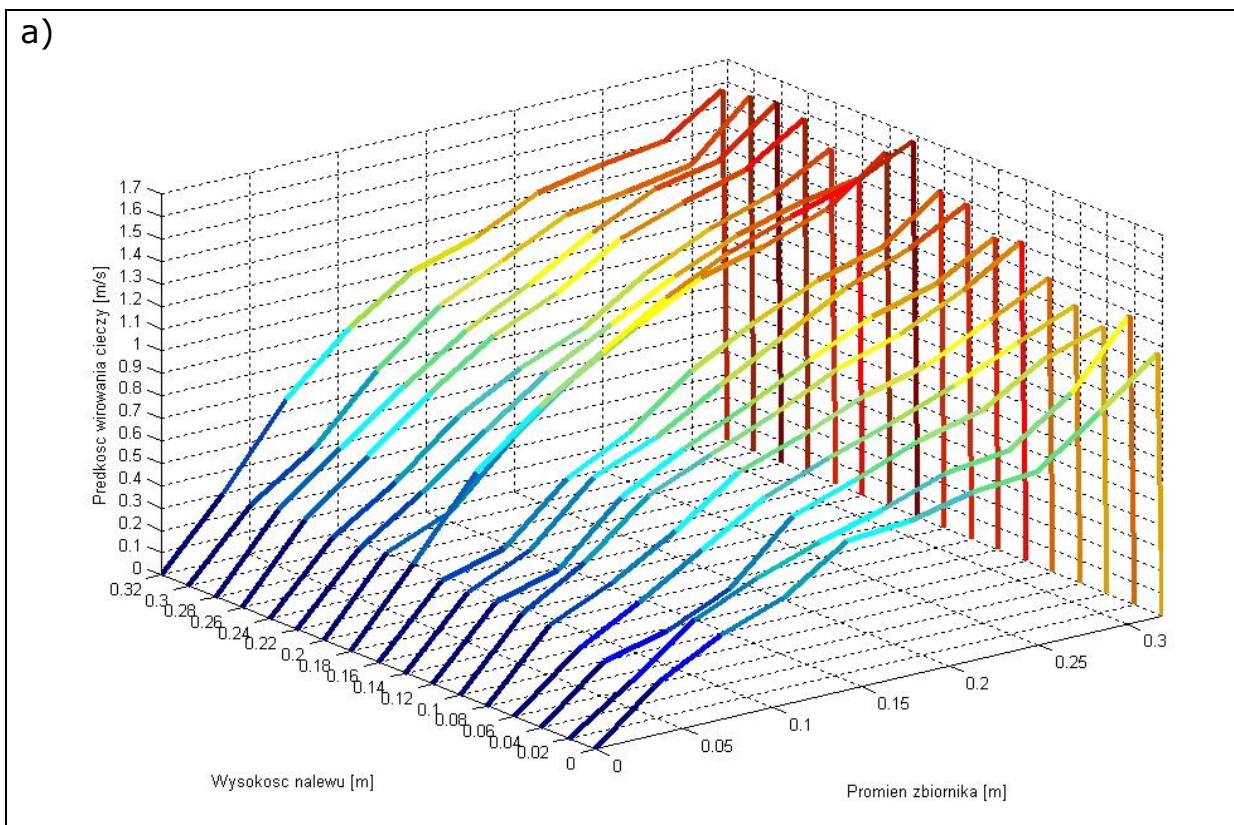
$r$  - zmienna po promieniu zbiornika R, ( $0 < r < 0,32$ ).

Ostatecznie funkcja przyjęła postać:

$$u_A = \{n_1 r^2 + n_2 * [\sin 2\pi(r - n_3)][1 - \exp[-n_4(r-R)]]\}. \quad (5.06)$$

Funkcję (równanie 5.06) w takiej postaci zapisano jako funkcję odwzorowania. Do analizy mającej na celu dopasowanie opracowanej teoretycznej funkcji odwzorowania do wyników badań wykorzystano dodatek Solver arkusza kalkulacyjnego Microsoft Office Excel. Analiza wyników polegała na działaniach optymalizacyjnych poszukiwania wartości minimalnej funkcji celu będącej sumą kwadratów różnicy pomiędzy wartością prędkości wyliczoną z pomierzonego na drodze eksperymentu spiętrzenia wysokości słupa płynu, a wartością funkcji aproksymującej dla wartości w każdym punkcie pomiarowym.

Wyznaczono funkcję odwzorowania dla pomiaru w czasie właściwym dla zakończenia realizacji etapu nalewu (rys. 5.05b.). Dla każdego przekroju wyznaczono współczynniki równania regresji. W zakresie analizowanej wysokości pomiarowej porównanie krzywych odzwierciedlających wyniki pomiaru i krzywych funkcji dopasowania wskazuje na poprawność odwzorowania zaproponowaną funkcją.



**Rys.5.05** Rozkład prędkości składowej obwodowej dla przedziału wysokości napełnienia od 0,01 do 0,5  $H_n$ : a) wyznaczony eksperymentalnie; b) aproksymowany rozkład prędkości będący aproksymacją wyników eksperymentu [Jakubowski et al. 2004]

## 6. Model ruchu płynu w kadzi wirowej

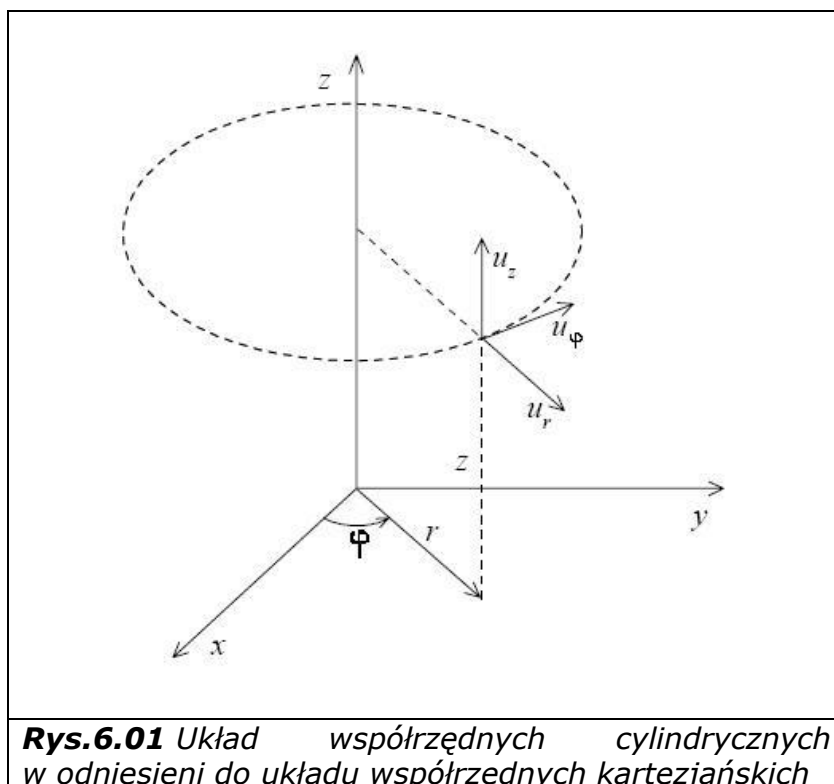
W rozdziale przedstawiono postać modelu ruchu płynu w kadzi wirowo-osadowej, który obejmuje równania matematyczne ciągłości przepływu, bilansu pędu i turbulencji. Następnie dokonano wyboru metody dyskretyzacji modelu oraz przedstawiono narzędzie modelowania. Ostatnim elementem rozdziału jest przedstawienie dyskretyzacji modelu matematycznego.

### 6.1 Model matematyczny

Model matematyczny jest zapisem podstawowych praw przepływu płynu z uwzględnieniem specyficznych warunków dla badanej kadzi wirowo-osadowej, który stanowi podstawę modelu numerycznego.

#### 6.1.1 Układ współrzędnych

Ze względu na charakter ruchu płynu w zbiorniku whirlpoola naturalnym jest opisywanie go w cylindrycznym układzie współrzędnych (rys. 6.01). W odróżnieniu od podstawowego układu współrzędnych zwanego kartezjańskim, w układzie współrzędnych cylindrycznych zamiast składowych  $x, y, z$  występują składowe  $r, \varphi, z$ , czyli zamiast dwóch pierwszych składowych prostokątnych występuje składowa promieniowa  $r$  i składowa kąтова  $\varphi$ .



Poniżej przedstawiono transformacje z układu współrzędnych kartezjańskich na układ cylindryczny:

a) transformacja współrzędnych

$$x = r \cos \varphi, \quad (6.01)$$

$$y = r \sin \varphi, \quad (6.02)$$

$$z = z, \quad (6.03)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (6.04)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right); \quad (6.05)$$

b) transformacja składowych prędkości:

$$u_r = \cos \varphi u_x + \sin \varphi u_y, \quad (6.06)$$

$$u_\varphi = -\sin \varphi u_x + \cos \varphi u_y, \quad (6.07)$$

$$u_z = u_z. \quad (6.08)$$

### 6.1.2 Równania bilansu masy, pędu i energii

W celu opisu zachodzących zjawisk posługujemy się równaniami zachowania masy i pędu:

a) równanie bilansu masy w postaci dywergentnej (zachowawczej):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{u} = 0. \quad (6.09)$$

W przypadku płynu nieściśliwego gęstość  $\rho = \text{const}$ , oraz  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  otrzymujemy:

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0, \quad (6.10)$$

Równanie (10) rozpisane w układzie współrzędnych cylindrycznych przybiera postać:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0; \quad (6.13)$$

b) równanie bilansu pędu w postaci ogólnej dla płynu lepkiego nieściśliwego posiada postać:

$$\vec{f}_m - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vartheta \nabla^2 \vec{u} - \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0, \quad (6.14)$$

Po rozpisaniu na składowe cylindryczne i przekształceniu równanie (14) przedstawia się jako układ równań:

$$\begin{cases} f_r - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{du_r}{dt} - \frac{u_\varphi^2}{r} - \nu \nabla^2 u_r + \frac{\nu}{r} \left( 2 \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} - \frac{u_r}{r} \right) \\ f_\varphi - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{r \partial \varphi} = \frac{du_\varphi}{dt} + \frac{u_r u_\varphi}{r} - \nu \nabla^2 u_\varphi + \frac{\nu}{r} \left( \frac{u_\varphi}{r} - 2 \frac{u_r}{r \partial \varphi} \right) \\ f_z - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{du_z}{dt} - \nu \nabla^2 u_z = 0 \end{cases} \quad (6.15)$$

Rozpisując dwa pierwsze człony prawej strony każdego z równań w układzie równań (15) zgodnie z zależnościami:

$$\begin{aligned} \frac{du_r}{dt} - \frac{u_\varphi^2}{r} &= \frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial(u_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial(u_r u_\varphi)}{r \partial \varphi} + \frac{\partial(u_r u_z)}{\partial z} + \frac{u_r^2}{r} - \frac{u_\varphi^2}{r} - \nu \nabla^2 u_r - \frac{\nu}{r} \left( 2 \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} - \frac{u_r}{r} \right) = \\ &= -\nu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} - 2 \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right], \end{aligned} \quad (6.16a)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_\varphi}{dt} + \frac{u_r u_\varphi}{r} &= \frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r u_\varphi)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\varphi^2)}{r \partial \varphi} + \frac{\partial(u_\varphi u_z)}{\partial z} + \frac{u_r u_\varphi}{r} - \nu \nabla^2 u_\varphi + \frac{\nu}{r} \left( -\frac{u_\varphi}{r} + 2 \frac{u_r}{r \partial \varphi} \right) \\ &= \nu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} + 2 \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2} \right], \end{aligned} \quad (6.16b)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_z}{dt} &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial(u_z u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_\varphi u_z)}{r \partial \varphi} + \frac{\partial(u_z^2)}{\partial z} + \frac{u_r u_z}{r} - \nu \nabla^2 u_z = \\ &= \nu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right], \end{aligned} \quad (6.16c)$$

otrzymujemy postać równań hydrodynamicznych ruchu płynu lepkiego, nieściśliwego, uwzględniającego przepływ osiowo – symetryczny:

$$\begin{cases} \omega^2 r - \frac{\partial u_r}{\partial t} - \frac{\partial(u_r^2)}{\partial r} - \frac{\partial(u_r u_\varphi)}{r \partial \varphi} - \frac{\partial(u_r u_z)}{\partial z} - \frac{u_r^2}{r} - \frac{u_\varphi^2}{r} = \\ \quad -\nu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} - 2 \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \\ \frac{du_\varphi}{dt} - \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r u_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial(u_\varphi^2)}{r \partial \varphi} - \frac{\partial(u_\varphi u_z)}{\partial z} - \frac{u_r u_\varphi}{r} = \\ \quad -\nu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(r u_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} + 2 \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2} \right] \\ -g - \frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{\partial(u_z u_r)}{\partial r} - \frac{\partial(u_\varphi u_z)}{r \partial \varphi} - \frac{\partial(u_z^2)}{\partial z} - \frac{u_r u_z}{r} = \\ \quad \nu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \end{cases} \quad (6.17)$$

W powyższym układzie równań przyjęto założenie, iż układ  $r, \varphi, z$  wiruje w jednorodnym polu sił ciężkości, wokół osi  $z$  z prędkością kątową  $\omega$ , a więc

równania bilansu pędu zostały uzupełnione o składowe siły masowych  $\vec{f}_m$ :  
 $f_{mr} = \omega^2 r$ ;  $f_{m\varphi} = 0$ ;  $f_{mz} = -g$ .

Ze względu na stosunkowo niewielkie rozmiary zbiorników pominięto siły Coriolisa, które są uwzględniane dla zbiorników o dużych rozmiarach, np. akwenów morskich [Puzyrewski 2000];

Ponieważ rozpatrujemy ruch płynu w izolowanym termicznie zbiorniku whirlpoola zagadnienie można traktować jako izotermiczne i adiabatyczne. W równaniach bilansu nie uwzględniono równania bilansu energii. Założono brak występowania wewnętrznych źródeł energii w postaci ciepła tarcia oraz pominięto zmianę temperatury jako konsekwencję dyssypacji energii. Na tym etapie formułowania modelu matematycznego energia kinetyczna układu jest reprezentowana w postaci równań bilansu pędu.

### 6.1.3 Równania opisujące turbulencję

Powyżej przedstawione równania: równanie bilansu (6.13) masy oraz układ trzech równań bilansu pędu (6.17) należy podać w postaci właściwej dla analizowanego przypadku. Autorzy wielu opracowań wskazują jednoznacznie, iż ruch zawirowany płynu ma jednoznacznie charakter przepływu turbulentnego [Briley, Walls 1070; Dörholt 1989; Michel 1989; Kazimierski 2007]

Analiza przepływów turbulentnych oparta jest najczęściej na hipotezie Reynolds'a, według której rzeczywisty ruch płynu należy traktować jako superpozycję ruchu średniego i fluktuacyjnego. Zgodnie z tą zasadą rzeczywista wartość dowolnej charakteryzującej przepływ wielkości fizycznej  $a(i, j, k, t)$  przedstawiona może być w postaci sumy funkcji położenia i czasu wielkości średniej oraz wielkości fluktuacyjnej będącej losową funkcją czasu i przestrzeni:

$$a(r, \varphi, z, t) = \bar{A}(r, \varphi, z, t) + A(r, \varphi, z, t). \quad (6.18)$$

Zgodnie z powyższym wprowadzono oznaczenia dla składowych prędkości i ciśnienia:

$$u_r = \bar{U}_r + U_r; \quad (6.19)$$

$$u_\varphi = \bar{U}_\varphi + U_\varphi; \quad (6.20)$$

$$u_z = \bar{U}_z + U_z; \quad (6.21)$$

$$p = \bar{P} + P. \quad (6.22)$$

W przypadku przepływu osiowosymetrycznego zerują się pochodne cząstkowe wszystkich wielkości średnich wyznaczone względem składowej kątowej  $\varphi$  [Elsner 1987].

Wobec powyższego równanie bilansu masy (6.13) przybiera postać:

$$\frac{\partial \bar{U}_r}{\partial r} + \frac{\bar{U}_r}{r} + \frac{\partial \bar{U}_z}{\partial z} + \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0. \quad (6.23)$$

Warunek ciągłości powinien zostać zachowany:

a) dla przepływu średniego zgodnie z równaniem:

$$\frac{\partial \bar{U}_r}{\partial r} + \frac{\bar{U}_r}{r} + \frac{\partial \bar{U}_z}{\partial z} = 0; \quad (6.24)$$

b) dla przepływu fluktuacyjnego zgodnie z równaniem:

$$\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0. \quad (6.25)$$

W ten sam sposób należy postąpić z układem równań bilansu pędu (6.17). Po przekształceniach i uśrednieniu otrzymujemy ostateczną postać równań dla zagadnienie osiowosymetrycznego, zawirowanego ruchu turbulentnego:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega^2 r + \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial t} + \bar{U}_z \frac{\partial \bar{U}_z}{\partial z} + \bar{U}_r \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial r} - \frac{\bar{U}_\varphi^2}{r} = \\ -\frac{\partial \bar{P}}{\rho \partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{U}_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}_r}{\partial z^2} + \frac{\partial \bar{U}_r}{r \partial r} - \frac{\bar{U}_r}{r^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{U}_z \bar{U}_r) - \frac{\partial}{r \partial r} (r \bar{U}_r^2) + \frac{\bar{U}_\varphi^2}{r} \\ \frac{\partial \bar{U}_\varphi}{\partial t} + \bar{U}_z \frac{\partial \bar{U}_\varphi}{\partial z} + \bar{U}_r \frac{\partial \bar{U}_\varphi}{\partial r} - \frac{\bar{U}_r \bar{U}_\varphi}{r} = \\ -\nu \left( \frac{\partial^2 \bar{U}_\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial \bar{U}_\varphi}{r \partial r} - \frac{\bar{U}_\varphi}{r^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{U}_z \bar{U}_\varphi) - \frac{1}{r} (\bar{U}_r \bar{U}_\varphi) \\ -g + \frac{\partial \bar{U}_z}{\partial t} + \bar{U}_z \frac{\partial \bar{U}_z}{\partial z} + \bar{U}_r \frac{\partial \bar{U}_z}{\partial r} = \\ -\frac{\partial \bar{P}}{\rho \partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{U}_z}{\partial r^2} + \frac{\partial \bar{U}_z}{r \partial r} - \frac{\partial^2 \bar{U}_z}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \bar{U}_z^2}{\partial z} - \frac{\partial}{r \partial r} (r \bar{U}_z \bar{U}_r) \end{array} \right. \quad (6.26)$$

Problemem w analizie przepływu turbulentnego opartego na hipotezie Reynoldsa jest podwojenie niewiadomych w równaniach bilansu. Dlatego też zastosowano, w przypadku analizy numerycznej zjawiska ruchu płynu w naczyniu cylindrycznym, półempiryczny model turbulencji  $k - \varepsilon$ . Model ten zawiera dwa dodatkowe równania, o które należało uzupełnić układ równań składający się z równania bilansu masy (6.13) i bilansu pędu (6.17). Równania te przedstawiają ewolucję parametrów określających turbulencję [Kazimierski 2004; Ansys 2007]:

a) ewolucja energii kinetycznej turbulencji  $k$  w równaniu:

$$\rho \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mathbf{u}_r k) + \rho \frac{\partial}{r \partial \varphi} (\mathbf{u}_\varphi k) + \rho \frac{\partial}{\partial z} (\mathbf{u}_z k) + \rho \frac{\partial k}{\partial t} =$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\mu_e}{\tau_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left[ \frac{\mu_e}{\tau_k} \frac{\partial k}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu_e}{\tau_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G - \rho \varepsilon; \quad (6.27)$$

b) ewolucja dyssypacji turbulencji  $\varepsilon$  w równaniu:

$$\rho \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mathbf{u}_r \varepsilon) + \rho \frac{\partial}{r \partial \varphi} (\mathbf{u}_\varphi \varepsilon) + \rho \frac{\partial}{\partial z} (\mathbf{u}_z \varepsilon) + \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} =$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\mu_e}{\tau_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left[ \frac{\mu_e}{\tau_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu_e}{\tau_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{C_1 \varepsilon G}{k} - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k}. \quad (6.28)$$

W równaniach (6.27) i (6.28) wyłączono gęstość  $\rho$  przed znak różniczki ze względu na założenie dotyczące nieściśliwości płynu wirującego w cylindrycznym zbiorniku whirlpoola.

W równaniach (6.27) i (6.28) występują:

a) produkcja energii kinetycznej turbulencji:

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{u_r}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_\varphi}{r} \right) \right)^2 + \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} \right)^2 \right\}; \quad (6.29)$$

b) lepkość efektywna w postaci sumy lepkości dynamicznej i lepkości turbulentnej:

$$\mu_e = \mu + \mu_t. \quad (6.30)$$

Lepkość turbulentna określona jest równaniem:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (6.31)$$

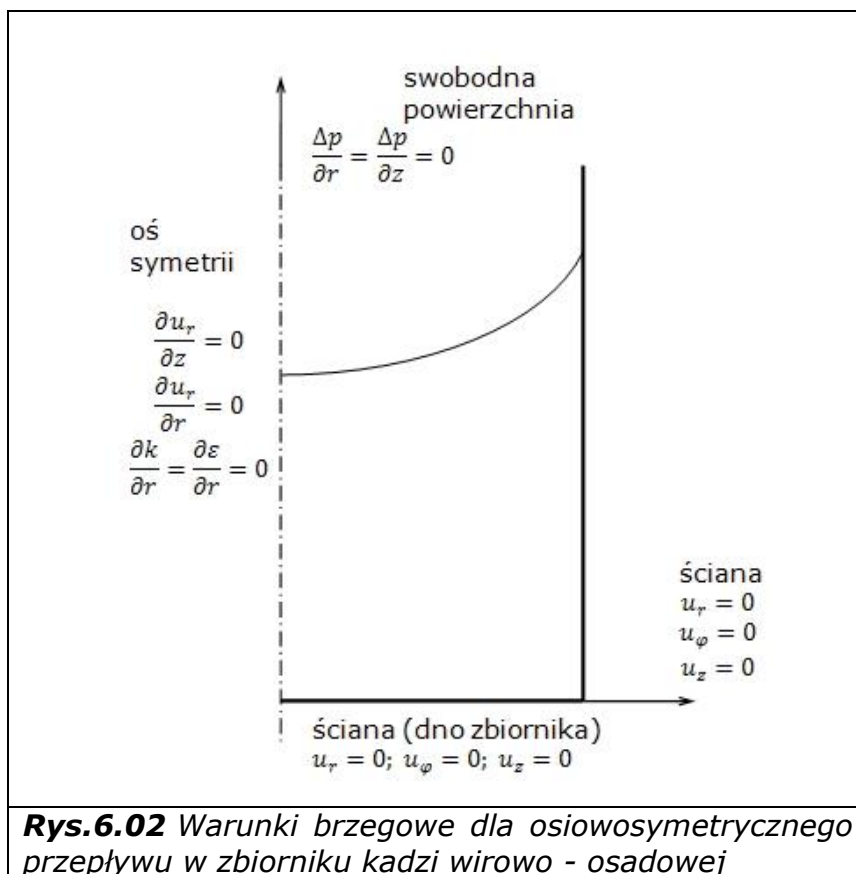
Układ pięciu równań: równanie zachowania masy, trzy równania bilansu pędu oraz dwa równania ewolucji parametrów określających turbulencję stanowi kompletny model matematyczny izotermicznego i adiabaticznego ruchu płynu w zbiorniku kadzi wirowo - osadowej. Równania (6.13), (6.17), (6.27) i (6.28) określają pięć podstawowych niewiadomych modelu, którymi są: składowe prędkości, energia kinetyczna turbulencji i dyssypacja turbulencji.

#### 6.1.4 Warunki brzegowe modelu

Warunki brzegowe modelu ruchu płynu w zbiorniku whirlpoola zostały przedstawione na rysunku 6.02.



Warunki brzegowe wynikają z oddziaływań naczynia na płyn w postaci zerowych wartości prędkości na ścianie i dnie zbiornika, zerowych wartości energii kinetycznej i dyssypacji turbulencji, uproszczenia dotyczącego osiowosymetryczności przepływu oraz występowania w przepływie swobodnej powierzchni.



## 6.2 Wybór metody dyskretyzacji i narzędzia modelowania

Numeryczna mechanika płynów bazuje na dyskretyzacji przestrzeni obliczeniowej i rozwiązaniu układu równań (6.13), (6.17), (6.27) i (6.28). Symulację numeryczną można wykonać przy pomocy programów bazujących na różnych metodach tej dyskretyzacji. Należą do nich: metoda objętości skończonych (MOS), metoda różnic skończonych (MRS), metoda elementów skończonych (MES) oraz metody bezsiatkowe.

Pierwsze trzy metody należą do klasycznych już metod i są wykorzystywane od lat zarówno w kodach akademickich jak i komercyjnych. Ich opis można znaleźć w większości podręczników metod numerycznych. Metody bezsiatkowe należą do nowych metod i nie mają jeszcze dużego praktycznego zastosowania w mechanice płynów. Przewagą tych metod nad pozostałymi jest brak konieczności generowania często skomplikowanej siatki obliczeniowej, co pozwala na „elastyczną” dyskretyzację niemal

dowolnych geometrii. Metody bezsiatkowe pozwalają także na szybsze wyznaczenie współczynników układu równań algebraicznych dla całego obszaru obliczeniowego przy użyciu dowolnie rozłożonego zbioru punktów. Punkty te mogą być generowane wewnątrz przestrzeni obliczeniowej równomiernie lub losowo. Dodatkowo punkty można w łatwy sposób zagęszczać w istotnych dla prowadzonej analizy regionach (np. w obszarze warstwy granicznej) przez dodawanie kolejnych, uzyskując dzięki temu odpowiednik siatek adaptacyjnych (odpowiednik tzw. „remeshingu”). Do najpopularniejszych metod bezsiatkowych należą: Local Boundary Integral Equation (LBIE), oraz Meshless Local Petrov Galerkin (MLPG) i Local Point Interpolation Method (LPIM) [Sikora, Ossowski 2007].

W chwili obecnej trwają także prace nad programami do symulacji przepływów bazującymi na rachunku fraktalnym, który z racji swojej natury byłby najodpowiedniejszy dla analizy zjawisk turbulentnych. Zastosowanie rachunku fraktalnego ma dotychczas charakter wizualizacji przepływu, a nie jego analizy ilościowej i jakościowej.

W pracy wykorzystano metodę elementów skończonych, na której bazuje dostępny program, którym jest Flotran, stanowiący jeden z modułów pakietu do symulacji o nazwie ANSYS. Możliwości tego modułu zostały opisane szczegółowo w następnym podrozdziale pracy. Wybór Flotrana nie jest jedynie konsekwencją jego dostępności. Jego niezaprzeczalnym atutem jest możliwość wykorzystania do generowania modeli plików tekstowych zapisanych w języku programowania Flotran, co z kolei umożliwi dodatkowe „omakrowanie” pliku wsadowego, czyli uzupełnienie go o funkcje niedostępne z poziomu klasycznego interfejsu użytkownika. Jest to jedyna możliwość uzyskania modelu ruchu płynu w kadzi wirowej whirlpool jako zagadnienia osiowosymetrycznego 2D z funkcją swirl.

### **6.2.1 Narzędzie modelowania**

Program Flotran jest modułem CFD programu ANSYS. Jest to zestaw narzędzi i elementów do zaawansowanych analiz przepływu płynu (oraz zjawisk temu towarzyszących) metodą elementów skończonych. Analiza stacjonarna i dynamiczna przepływów płynu jest kluczowym narzędziem w konstrukcji maszyn przepływowych, produktów dla lotnictwa, kosmonautyki, obiektów pływających i innych urządzeń powiązanych z przepływem.

Flotran jest całkowicie samodzielny programem, który dysponuje wszystkimi niezbędnymi narzędziami do wykonania analizy poczynając od wygenerowania lub importu geometrii, poprzez deklaracje siatki, warunków brzegowych i początkowych, rozwiązanie zadania, a na ocenie i prezentacji wyników kończąc. Moduł jest w pełni kompatybilny z innymi licencjami, co umożliwia wykonanie np. analizy interakcji przepływu z brzegiem (tzw. analiza FSI).

Flotran umożliwia wykonanie analizy przepływu płaskiego 2D we współrzędnych kartezjańskich, polarnych osiowosymetrycznych i osiowosymetrycznych z wirowaniem (przepływ swirl) oraz przepływu 3D w układzie kartezjańskim i cylindrycznym. Dostępne rodzaje analizy to analiza quasi-statyczna (stedy-state) lub analiza zmienna w czasie (transient). W zakresie rodzaju przepływu Flotran umożliwia analizę dla płynu ściśliwego lub nieściśliwego, dla poddźwiękowej i naddźwiękowej prędkości przepływu, przepływu laminarnego i turbulentnego, przepływu cieczy newtonowskich i nie-newtonowskich, przepływu ciepła z uwzględnieniem swobodnej lub wymuszonej konwekcji, przepływu ciepła pomiędzy medium a brzegiem, transport różnego rodzaju koncentracji mieszanin oraz przepływu ze swobodną powierzchnią.

Modelowanie swobodnej powierzchni w przepływach opiera się we Flotranie na metodzie VOF (ang. Volume of Fluid), pozwalającej na uwzględnienie w modelu numerycznym sił napięcia powierzchniowego. Metoda VOF wyznacza powierzchnię rozdziału pomiędzy fazami (na ogół cieczą i gazem) na podstawie rozwiązania równania ciągłości dla objętościowej frakcji jednego ze składników.

W bibliotece programu dostępne są elementy typu Fluid o kształcie trójkątnym, czworokątnym, heksaedryczne, tetraedryczne, pryzmowe i o kształcie klina (z ang. wedge) oraz elementy mieszane. Dostępny jest specjalny mechanizm tworzenia siatki dla warstwy przyściennej oraz procedury zagęszczania siatek 2D i 3D, procedura wydłużania elementów siatek w bryłach oraz tzw. morph mesh elementów na podstawie obliczonych przemieszczeń. Algorytmy dyskretyzacji umożliwiają obliczenia dla siatek całkowicie niestrukturalnych, dodatkowo program posiada cztery algorytmy bazujące na klasycznych algorytmach ciśnieniowych i algorytm dyskretyzacji typu "implicit" w czasie oraz algorytm uproszczony SIMPLEF lub zaawansowany SIMPLEF.

Modele turbulencji dostępne w programie:

- a) standardowy  $k-\varepsilon$  z funkcją ściany;
- b) Re-Normalized Group (RNG);
- c)  $k-\varepsilon$  Model Due to Shih (NKE);
- d) Nonlinear of Girimaji (GIR);
- e) Shih, Zhu, Lumley (SZL);
- f) Zero Equation;
- g)  $k-\omega$ ;
- h) Shear Stress Transport (SST).

Standardowy model  $k-\varepsilon$ , model Zero Equation oraz model  $k-\omega$  są najprostszymi modelami. Pozostałe modele stanowią rozwinięcie modeli  $k-\varepsilon$  i  $k-\omega$  dla szczególnych przypadków przepływu. Model SST jest połączeniem modelu  $k-\varepsilon$  i  $k-\omega$ . Model  $k-\varepsilon$  jest w programie modelem domyślnym.

Warunki brzegowe możliwe do zadeklarowania w programie:

- a) prędkość wlotowa (w układzie kartezjańskim lub cylindrycznym);
- b) wlotowe lub wylotowe ciśnienie odniesienia;
- c) temperatura wlotowa statyczna lub całkowita (absolutna lub odniesienia);
- d) koncentracje wlotowe udziału mieszanin,
- e) wlotowa energia kinetyczna i współczynnik rozproszenia (z opcjonalną intensywnością turbulencji oraz współczynnikiem skali);
- f) styczna i normalna prędkość dla przeszkody;
- g) symetria i cykliczność warunków brzegowych;
- h) termiczne warunki brzegowe (temperatura, strumień ciepła, konwekcja zewnętrzna, radiacja zewnętrzna i wewnętrzne źródła ciepła);
- i) globalne i lokalne wymuszenia masowe;
- j) powiązanie parametrów np. konwekcji ciepła z wielkościami charakteryzującymi przepływ.

Własności materiałowe możliwe do zadeklarowania to stałe lub zmienne własności płynu włączając zależności od temperatury, możliwość deklaracji własnych tabelarycznych danych materiałowych, modyfikacja własności materiałowych bazując na funkcjach lub tabelach wartości, modele cieczy nie newtonowskiej (zawierające opis energetyczny) Bingham, Carreaux, lub funkcji użytkownika.

Flotran posiada 6 algorytmów rozwiązujących możliwych do zastosowania niezależnie dla każdego ze stopni swobody elementu. W programie istnieje możliwość wyboru metody całkowania według Bacwarda lub Newmarka

W zakresie grafiki i analizy wyników program posiada automatyczny wykres zbieżności procesu obliczeniowego, animację map wielkości obliczonych, prezentację wektorowych wartości nodalnych i elementarnych, akwizycję powierzchni stałych wartości, przekrojów i przepływu cząsteczki płynu, system testowania i raportowania wartości wyników we wskazanych punktach w przestrzeni, możliwość generacji wyników 3D z obliczeń modelu 2-D oraz obsługę typowych formatów graficznych [Ansys 2007].

### **6.2.2 Założenia i uproszczenia modelu**

Celem modelowania jest określenie wpływu elementów geometrii zbiornika kadzi wirowo - osadowej na ruch płynu, a w szczególności wpływ na przepływy wtórne występujące w analizowanym przypadku ruchu.

Założenia modelu:

- a) płyn posiada wartość gęstości i lepkości niezmiennie w czasie;
- b) rozkład wartości prędkości przepływu pierwotnego w zerowym kroku symulacji ma charakter rozkładu właściwego dla ciała sztywnego;
- c) kształt swobodnej powierzchni płynu w modelu jest kształtem przybliżonym do rzeczywistego.

Uproszczenia modelu:

- a) przepływ w zbiorniku jest rozpatrywany jako osiowosymetryczny;
- b) warunki przepływu są izotermiczne.

### 6.3 Model numeryczny - układ równań bilansu CFD

Układ równań bilansu i ewolucji zapisany w formie przedstawionej w podrozdziale 6.1 wymaga przekształcenia do formy zaimplementowanej w komercyjnym kodzie CFD (Computational Fluid Dynamics) programu Flotran. Ponieważ modelowane zagadnienie jest turbulентne, a geometria zbiornika jest regularna właściwym jest wykorzystanie do modelu dyskretyzacyjnej siatki strukturalnej. Wobec powyższego należy posłużyć się sformułowaniem równań bilansu w tzw. zapisie bezindeksowym, w którym wektor zapisujemy ze strzałką (np.  $\vec{u}$ ), zaś tensor z dwoma strzałkami (np.  $\vec{I}$ ). Występujący w równaniach iloczyn diadyczny wektorów prędkości oznacza się za Gibbsem jako  $\vec{u} \otimes \vec{u}$  [Zienkiewicz et al. 2005].

Aby maksymalnie wykorzystać w obliczeniach numerycznych rachunek macierzowy należy, jako punkt wyjściowy obliczeń CFD omawianego przypadku ruchu, sformułować uniwersalny układ równań bilansu masy i pędu dla płynu, uzupełnionego równaniami ewolucji turbulencji  $k - \varepsilon$ .

Forma zachowawcza takiego równania na postać:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} U + \text{div } F^c = \text{div } F^v + S. \quad (6.32)$$

Uzupełniając o rozpisane człony:

- a) wektora zmiennych zachowawczych:

$$U = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \rho k \\ \rho \varepsilon \end{Bmatrix}; \quad (6.33)$$

- b) strumienia konwekcyjnego:

$$F^c = \begin{Bmatrix} \rho \vec{u} \\ (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + p \vec{I} \\ \rho \vec{u} k \\ \rho \vec{u} \varepsilon \end{Bmatrix}; \quad (6.34)$$

c) strumienia dyfuzyjnego:

$$F^v = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vec{\tau}^c \\ \vec{J}_k \\ \vec{J}_\varepsilon \end{Bmatrix}; \quad (6.35)$$

d) wektora źródeł:

$$S = \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho \vec{f}_m \\ \rho S_k \\ \rho S_\varepsilon \end{Bmatrix}. \quad (6.36)$$

Otrzymano ostateczną postać uniwersalnego układu równań:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \rho k \\ \rho \varepsilon \end{Bmatrix} + \nabla \cdot \begin{Bmatrix} \rho \vec{u} \\ (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + p \vec{I} \\ \rho \vec{u} k \\ \rho \vec{u} \varepsilon \end{Bmatrix} = \nabla \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \vec{\tau}^c \\ \vec{J}_k \\ \vec{J}_\varepsilon \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \rho \vec{f}_m \\ \rho S_k \\ \rho S_\varepsilon \end{Bmatrix}. \quad (6.37)$$

Ten układ równań jest rozwiązywany w każdej komórce siatki obliczeniowej. W analizie CFD rozważanego przypadku ruchu płynu w zbiorniku whirlpoola rozwiązywanych jest więc łącznie 6 równań (równanie bilansu masy, trzy równania bilansu pędu oraz transportu  $k$  i  $\varepsilon$ ).

W powyższym układzie równań bilansu oznaczono:

a) konwekcyjny strumień pędu, który ma postać:

$$\rho \vec{u} \otimes \vec{u}; \quad (6.38)$$

b) tensor jednostkowy, tzw. idemfaktora Gibbsa ( $i, j = r, \varphi, z$ ):

$$\vec{I} = \delta_{ij} \vec{e}_i \otimes \vec{e}_j = \vec{e}_r \otimes \vec{e}_r + \vec{e}_\varphi \otimes \vec{e}_\varphi + \vec{e}_z \otimes \vec{e}_z; \quad (6.39)$$

c) całkowity nieodwracalny strumień pędu:

$$\vec{\tau}^c = \vec{\tau} + \vec{R}, \quad (6.40)$$

a tensor naprężeń  $\vec{\tau}$  zwany molekularnym strumieniem pędu ma postać macierzy:

$$\vec{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{rr} & \tau_{r\varphi} & \tau_{rz} \\ \tau_{\varphi r} & \tau_{\varphi\varphi} & \tau_{\varphi z} \\ \tau_{rz} & \tau_{r\varphi} & \tau_{zz} \end{bmatrix}, \quad (6.41)$$

gdzie odpowiednio składowe naprężeń normalnych mają postać:

$$\tau_{rr} = \mu \left( 2 \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{u} \right), \quad (6.42a)$$

$$\tau_{\varphi\varphi} = \mu \left( 2 \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{u} + \frac{2u_r}{r} \right), \quad (6.42b)$$

$$\tau_{zz} = \mu \left( 2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{u} \right), \quad (6.42c)$$

a składowe naprężeń stycznych mają postać:

$$\tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = \mu \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_\varphi}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right], \quad (6.42d)$$

$$\tau_{\varphi z} = \tau_{z\varphi} = \mu \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{r \partial \varphi} \right), \quad (6.42e)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{zr} = \mu \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right). \quad (6.42f)$$

We wzorach (6.42a-f) występuje tylko jedna stała materiałowa - lepkość  $\mu$ .

Tensor naprężeń Reynoldsa  $\vec{R}$  zwany turbulentnym strumieniem pędu ma postać macierzy, w której składnikami prędkości są wartości uśrednione zmiany pędu określone przy pomocy składowej fluktuacyjnej zgodnie z równaniem (6.19):

$$\vec{R} = - \begin{bmatrix} \overline{\rho(U_r)^2} & \overline{\rho U_r U_\varphi} & \overline{\rho U_r U_z} \\ \overline{\rho U_\varphi U_r} & \overline{\rho(U_\varphi)^2} & \overline{\rho U_\varphi U_z} \\ \overline{\rho U_z U_r} & \overline{\rho U_z U_\varphi} & \overline{\rho(U_z)^2} \end{bmatrix}. \quad (6.43)$$

W postaci ogólnej można go zapisać jako:

$$\overline{R_{i,j}} = \mu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_T \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \quad (6.44)$$

gdzie  $\mu_T$  (6.31) i  $k$  pełnią rolę lepkości turbulentnej (ściania i objętościowej) w której  $C_\mu$  jest stałą dobieraną do danego typu geometrii i jest ona niezależna od rodzaju płynu;

d) strumień dyfuzyjny energii kinetycznej turbulencji  $\vec{J}_k$ , który w zapisie ogólnym ma postać:

$$\vec{J}_{ki} = \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} k, \quad (6.46)$$

gdzie  $\sigma_k$  jest stałą wymagającą kalibracji;

e) strumień ewolucji dyssypacji turbulencji  $\vec{J}_\varepsilon$ , który w zapisie ogólnym ma postać:

$$\vec{J}_{\varepsilon i} = \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \varepsilon, \quad (6.47)$$

gdzie  $\sigma_\varepsilon$  jest stałą wymagającą kalibracji;

f) siły masowe  $\vec{f}_m$ ;

g) źródła  $k, \varepsilon$  ( $\rho S_k, \rho S_\varepsilon$ ), które są opisane równaniami:

$$\rho S_k = G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (6.48)$$

oraz

$$\rho S_\varepsilon = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b (1 - C_{3\varepsilon})) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6.49)$$

gdzie  $G_k$  jest źródłem  $k$  związanym z naprężeniami turbulentnymi, a  $G_b$  jest źródłem  $k$  związanym z unoszeniem wypornościowym.

We wzorach (6.27 i 6.28 oraz 6.46 i 6.49) występują stałe wyznaczone eksperymentalnie. Są to:  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu, \tau_k, \tau_\varepsilon$ . Stałe te stanowią uzupełnienie dla równań ewolucji  $k$  i  $\varepsilon$ . Wymagały one korekty w stosunku do wartości domyślnych dla modelu zaimplementowanego w programie Flotran. Korekta miała na celu uzyskanie lepszej zbieżności wyników obliczeń numerycznych z wynikami uzyskanymi w drodze eksperymentów na modelach rzeczywistych.



## 7 Badania symulacyjne wstępne

Pierwszym etapem rozpoznawczych badań symulacyjnych był wybór rodzaju siatki, dobór jej zagęszczenia oraz określenie warunków początkowych właściwych dla realizacji procesu wirowania płynu. Jako model do przeprowadzenia badań symulacyjnych wykorzystano odwzorowanie geometryczne laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej, w której zerowym krokiem procesu był stan zamknięcia zaworu na przewodzie zasilającym, co stanowi zakończenie etapu napełniania whirlpoola. Właściwy dobór warunków początkowych decyduje o zgodności wyników ze stanem rzeczywistym, dlatego też na tym etapie określenie warunków początkowych powinno jak najdokładniej odwzorować warunki panujące w zbiorniku dla czasu określonego jako początek wirowania płynu.

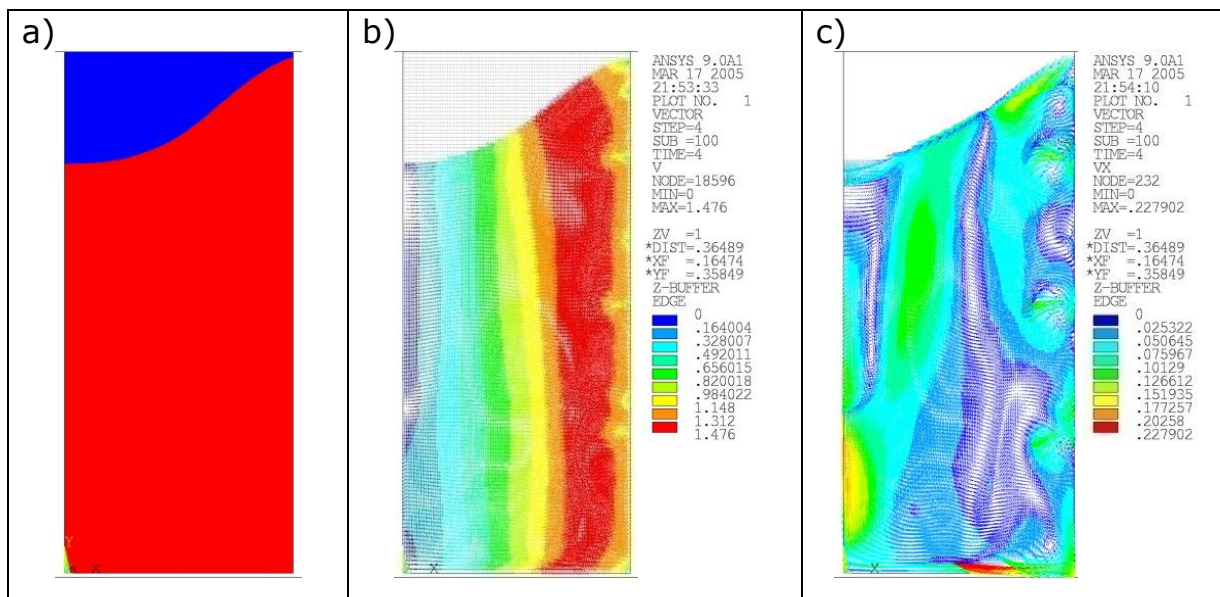
### 7.1 Wybór rodzaju siatki i jej podział

Jednym z początkowych etapów budowy modelu komputerowego jest właściwy dobór rodzaju siatki dyskretyzującej jego geometrię. Dobór rodzaju siatki i jej wielkość podziału zdecydowanie wpływa na jakość otrzymanych wyników.

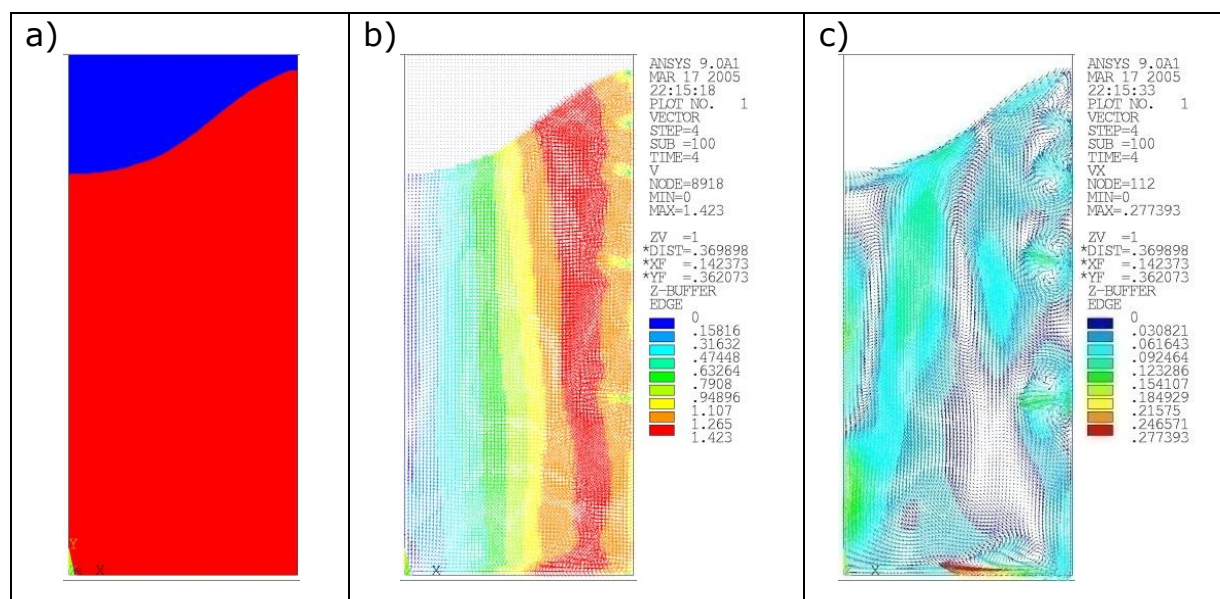
W przypadku analizy zjawiska ruchu płynu w kadzi wirowej należy kierować się dwoma kryteriami: dynamicznym charakterem ruchu oraz jego turbulentną naturą. Wobec powyższego jedynym racjonalnym rozwiązaniem jest zastosowanie siatki strukturalnej. W porównaniu do siatki niestukturalnej jest ona znacznie bardziej wymagająca pod względem geometrycznym podziału modelu oraz pod względem wykorzystania zasobów komputerowej stacji roboczej. Kolejnym zagadnieniem jest dobór typu elementu siatki. W przypadku programu Flotran wybór ten nie stanowi trudności, ponieważ w bibliotece elementów znajduje się tylko jeden typ elementu przewidziany do budowy siatki dla zagadnienia 2D z opcją swirl. Jest to element Fluid 141 [Ansys 2007].

Kolejną kwestią jest dobór wielkości elementu. W tym przypadku należy zbudować kilka modeli zagadnienia będącego przedmiotem analizy, wykonać obliczenia dla kilku pierwszych kroków czasowych, a następnie porównać wyniki obliczeń, dla np. wybranego kroku czasowego.

Aby dobrać wielkość elementu siatki zbudowano trzy modele ruchu płynu w zbiorniku whirlpoola. Modele posiadały te same warunki początkowe, różniły się natomiast wielkością elementu. Za bazową wielkość przyjęto wymiar 0,01 m, a następnie zbudowano dwie siatki zmniejszając w każdej z nich wymiar dwukrotnie w stosunku do poprzedniego wymiaru. Wyniki w postaci ukształtowania swobodnej powierzchni oraz wektorowych map prędkości przepływu pierwotnego i przepływów wtórnych, dla czwartego kroku czasowego (krok czasowy wynosił 1 sekundę) zostały przedstawione na rysunkach 7.01, 7.02 i 7.03



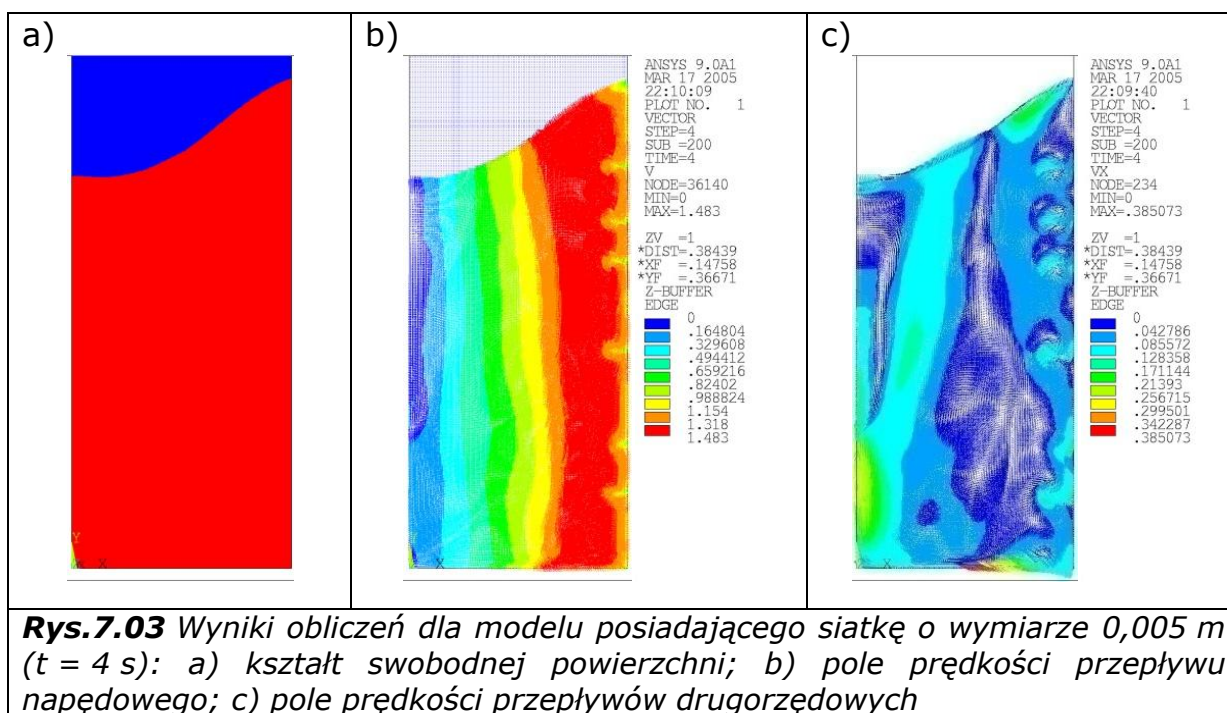
**Rys.7.01** Wyniki obliczeń dla modelu posiadającego siatkę o wymiarze 0,02 m ( $t = 4$  s): a) kształt swobodnej powierzchni; b) pole prędkości przepływu napędowego; c) pole prędkości przepływów drugorzędowych



**Rys.7.02** Wyniki obliczeń dla modelu posiadającego siatkę o wymiarze 0,01 m ( $t = 4$  s): a) kształt swobodnej powierzchni; b) pole prędkości przepływu napędowego; c) pole prędkości przepływów drugorzędowych

W przypadku wyników dotyczących swobodnej powierzchni przedstawionych na rysunkach 7.01a, 7.02a i 7.03a wykazano brak wpływu zagęszczenia siatki na ukształtowanie tej powierzchni. Porównanie wyników rozkładu prędkości pierwotnej (rys. 7.01b, 7.02b i 7.03b) i wtórnej (7.01c, 7.02c i 7.03c) wykazało, iż w przypadku siatek o wymiarze 0,02 i 0,01 m wyniki nie różnią się zasadniczo od siebie. W przypadku siatki o wymiarze 0,005 m uzyskano nieznaczna poprawę wyników dla systemu przepływów wtórnych, jednakże czas konieczny do wykonania obliczeń zwiększył się prawie

piętnastokrotnie w stosunku do modelu z siatką o wymiarze 0,01 m. Mając na względzie dość liczną klasę modeli do przeanalizowania, a także uwzględniając konieczność przeliczenia wszystkich dla przedziału czasowego od zerowego kroku do kroku, w którym przepływ pierwotny i przepływy wtórne zanikają, podjęto decyzję o ustaleniu wymiaru elementu równobocznego siatki na 0,01 m. Aby jednak zwiększyć dokładność wyników zwiększono liczbę iteracji dla pojedynczego kroku elementarnej symulacji (tzw. sub-step) z 500 do 1 000.



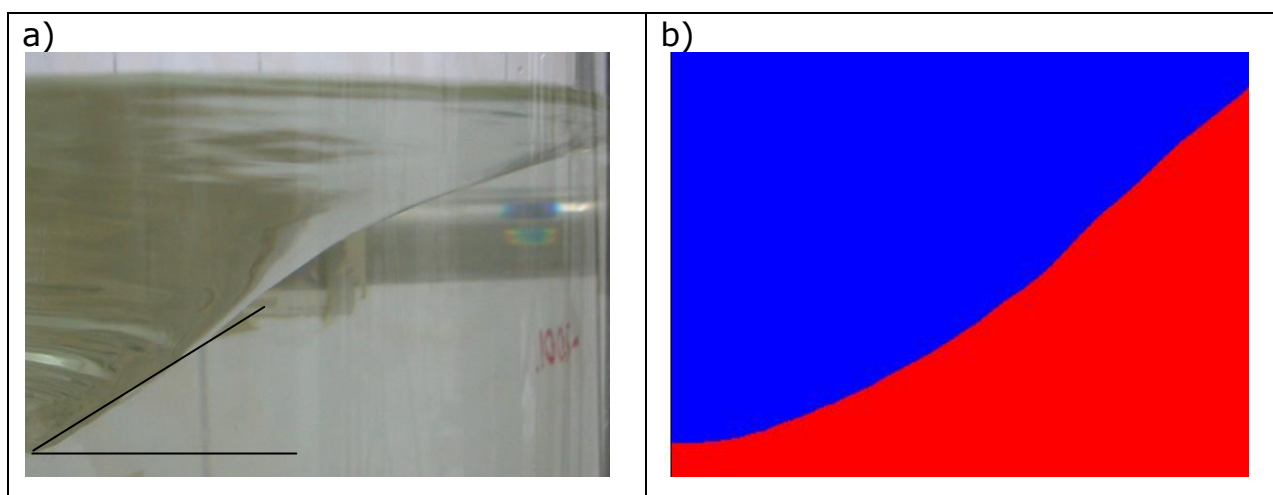
## 7.2 Warunki początkowe

Warunki początkowe modelu mają kardynalne znaczenie dla całego przebiegu symulacyjnego. Model dla zerowego kroku czasowego powinien stanowić odwzorowanie stanu wirowania płynu w whirlpoolu po zakończeniu napełniania. Należy więc określić, wpływ wprowadzenia pewnych zakładanych uproszczeń na wyniki w odniesieniu do wprowadzonych parametrów stanu rzeczywistego. Rozpatrywano dwa zasadnicze elementy układu odniesienia wynikające z założonych uproszczeń, które z kolei wynikają z liczebności klasy modeli. Są to: kształt swobodnej powierzchni i rozkład prędkości przepływu pierwotnego.

### 7.2.1 Kształt swobodnej powierzchni

Kształt swobodnej powierzchni płynu w zbiorniku poruszającym się ruchem obrotowym jest paraboloidą obrotową. Ze względu na hamujące oddziaływanie ścian zbiornika wirujący płyn w nieruchomym naczyniu posiada kształt (rys.7.04a) możliwy do opisanie bardziej złożoną funkcją.

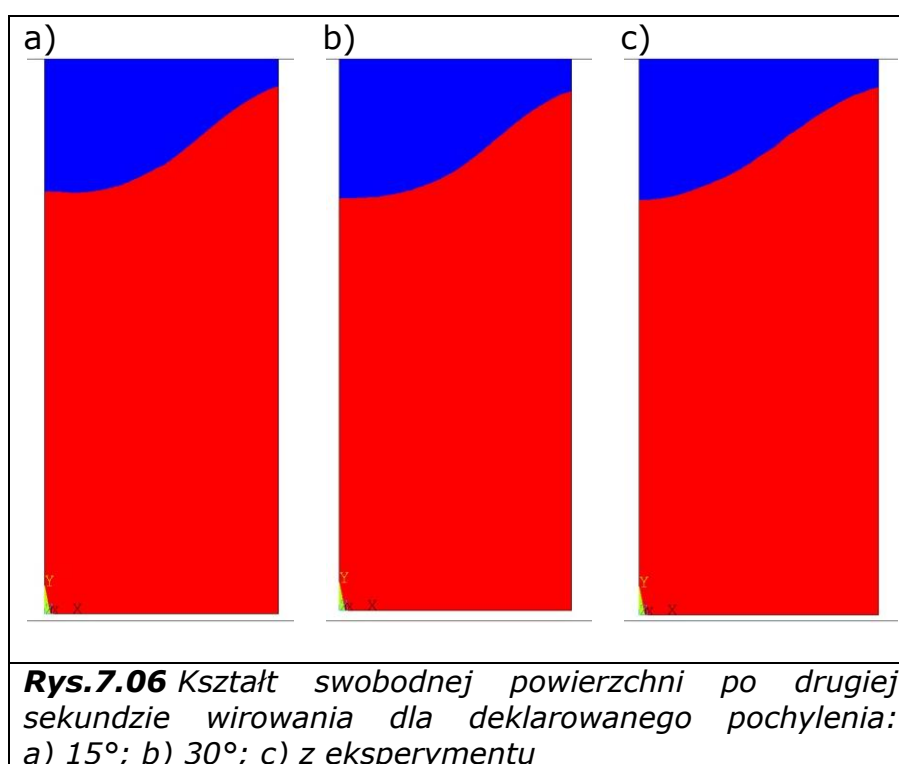
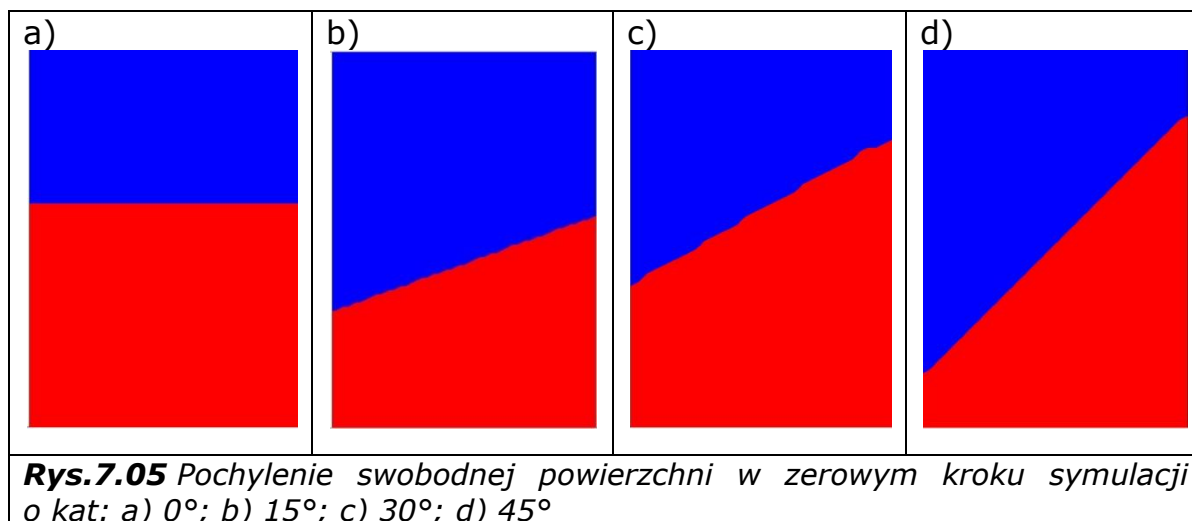
Z uwagi na dużą liczbę i szerokie spektrum analizowanych przypadków odwzorowano go poprzez zastosowanie uproszczenia w postaci linii prostej będącej aproksymacją kształtu naturalnego (rys. 7.05). Celem wprowadzenia niniejszego uproszczenia było ułatwienie rozdzielania w modelu obszaru płynu i powietrza dla zerowego kroku symulacji. Deklaracja rozdziału faz będąca odwzorowaniem kształtu naturalnego (rys.7.04b) znacznie utrudniała każdorazowo budowę modelu o zmiennych parametrach konstrukcyjnych.



**Rys.7.04** Kształt swobodnej powierzchni: a) w zbiorniku laboratoryjnej kadzi wirowej dla czasu końca realizacji etapu nalewu; b) geometryczne odwzorowanie w zerowym kroku symulacji dla modelu o zbliżonym do naturalnego.

Przeprowadzono serię wstępnych analiz symulacyjnych w celu ustalenia wpływu kształtu swobodnej powierzchni w zerowym kroku symulacji na rozbieżność otrzymanych wyników w odniesieniu do modelu o zadeklarowanym naturalnym kształcie swobodnej powierzchni (rys. 7.04b). Do analiz porównawczych wykorzystano modele o odwzorowaniu swobodnej powierzchni w postaci linii prostej o kącie pochylenia  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $45^\circ$  (rys. 7.05). Pomierzony kąt pochylenia swobodnej powierzchni dla czasu zakończenia etapu realizacji nalewu do kadzi wirowej wynosił  $34^\circ$  (rys. 7.04a).

Przeprowadzono analizę modeli o zróżnicowanym deklarowanym kącie pochylenia swobodnej powierzchni. Za wzorzec przyjęto odwzorowanie swobodnej powierzchni w modelu o naturalnym początkowym kształcie. Wykonano obliczenia dla pierwszych 10 kroków czasowych (10 sekund wirowania). Analiza wyników w postaci kształtu swobodnej powierzchni wykazała, iż już po drugiej sekundzie wirowania kształt swobodnej powierzchni wirującego płynu jest zbliżony do modelu naturalnego (rys. 7.06a) w przypadku modeli o kącie pochylenia  $15^\circ$  (rys. 7.06b) i  $30^\circ$  (rys. 7.06c). Pozostałe modele odbiegały od przyjętego wzorca.

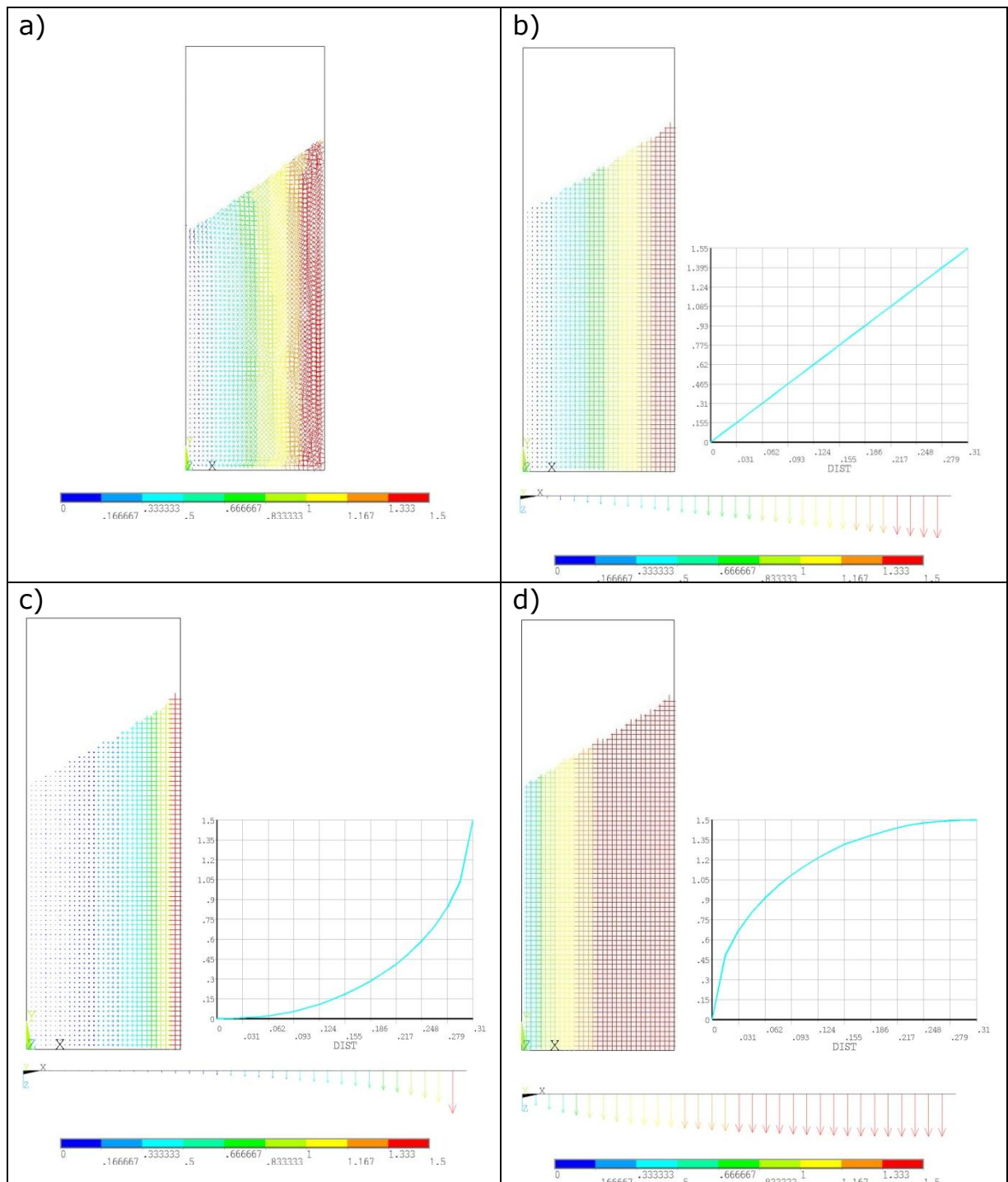


W wyniku przeprowadzonych analiz przyjęto odwzorowanie naturalnego kształtu swobodnej powierzchni wirującego płynu (dla modelu zbiornika laboratoryjnej kadzi wirowo – osadowej) w postaci linii prostej o kącie pochylenia 30°.

### 7.2.2 Rozkład prędkości kroku zerowego

W przypadku deklaracji rozkładu prędkości początkowej dla zerowego kroku symulacji zaistniała potrzeba zastosowania takiego rozkładu, który byłby zbliżony do rzeczywistego a jednocześnie prosty do implementacji w modelu. Takie założenie wynikało z licznej grupy modeli stanowiących przedmiot symulacyjnych badań właściwych. Wobec powyższego wykonano analizy

symulacyjne mające na celu zadeklarowanie początkowego rozkładu prędkości w postaci funkcji, która pozwoli na uzyskanie jak najdokładniejszego przybliżenia do wyników uzyskanych dla modelu o zadeklarowanym aproksymowanym rozkładzie rzeczywistym prędkości. Przeprowadzono porównawczą analizę modeli z zadeklarowanymi wartościami początkowymi rozkładu prędkości obwodowej właściwymi dla aproksymowanych wyznaczoną funkcją odwzorowania oraz hipotetycznych rozkładów: liniowego, kwadratowego i wykładniczego (rys. 7.07).



**Rys.7.07** Deklarowany rozkład prędkości dla zerowego kroku symulacji: a) właściwy dla funkcji dopasowania; b) liniowy; c) kwadratowy; d) wykładniczy

Analizie poddano rozkład prędkości obwodowej w pierwszych krokach symulacji w zależności od zadeklarowanego rozkładu prędkości w ich zerowych krokach. Podstawę analizy stanowiło porównanie wyników z rozkładów hipotetycznych z wynikami dla rozkładu zbliżonego do rozkładu rzeczywistego stanowiącego rozkład pomierzony oraz interpolacje wyników dla obszaru spoza zakresu możliwości pomiarowych (od  $0,5 H_n$  do  $H_n$ ). Za bazę do interpolacji przyjęto jednak charakterystyki rozkładu pomierzone w przedziale wysokości od 0 do  $0,5 H_n$ . Przyjęto założenie, iż charakterystyka rozkładu prędkości dla wysokości powyżej  $0,5 H_n$  jest zbliżona do charakterystyki rozkładu prędkości właściwej dla przedziału pomiarowego.

Z przeprowadzonych analiz wynika, iż rozkład liniowy jako najprostsz jest zadawalający z punktu widzenia otrzymywanych wyników symulacji. Deklaracja rozkładu początkowego w postaci funkcji wykładniczej powodowała dodatkowo fluktuacje swobodnej powierzchni, co z punktu widzenia uzyskiwanych wyników symulacji było nie do przyjęcia. W przypadku wymuszenia w postaci funkcji kwadratowej fluktuacji nie zaobserwowano, przy czym stopień komplikacji rozkładu prędkości początkowej w takiej postaci nie wpłynęła na poprawę jakości wyników w odniesieniu do aproksymowanego rozkładu rzeczywistego i liniowego. Rozkład liniowy był przedmiotem analiz teoretycznych, przy czym jego zastosowanie wymagało przeprowadzenia powyższych badań symulacyjnych. Wynika to także z rozważań końcowych autora analiz teoretycznych na temat możliwości takiego opisu rozkładu początkowego prędkości obwodowej. Rozkład ten jest właściwy dla hipotezy traktującej ruch wirowy płynu

w naczyniu cylindrycznym w czasie zakończenia realizacji etapu nalewu jako ruch obrotowy ciała sztywnego. Takie podejście stanowi także bazę analiz teoretycznych przedstawionych w podrozdziale 3.4.1.

### **7.3 Weryfikacja modelu**

Każdy model wymaga weryfikacji polegającej na porównaniu wyników uzyskanych na nim z wynikami pomiarów pewnych charakterystycznych wielkości fizycznych. W przypadku modeli dotyczących ruchu płynu wielkościami tymi są prędkość i ciśnienie. Charakter ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej uniemożliwia wykonanie bezpośrednich pomiarów prędkości z uwagi na dość znaczne zaburzenia przepływu, które powstają po wprowadzeniu elementu pomiarowego. Z tych samych przyczyn pomiar ciśnienia jest również dość poważnie utrudniony zwłaszcza, że ruch płynu ma charakter niestacjonarny. O ile możliwy jest pomiar ciśnienia (właściwie pomiar składowej dynamicznej ciśnienia) na początku wirowania, o tyle w miarę upływu czasu wartość ciśnienia zostaje obciążona dość dużym błędem wynikającym z zaburzeń przepływu. Dlatego też, w przypadku tak specyficznego ruchu płynu w badaniach weryfikacyjnych wykonano

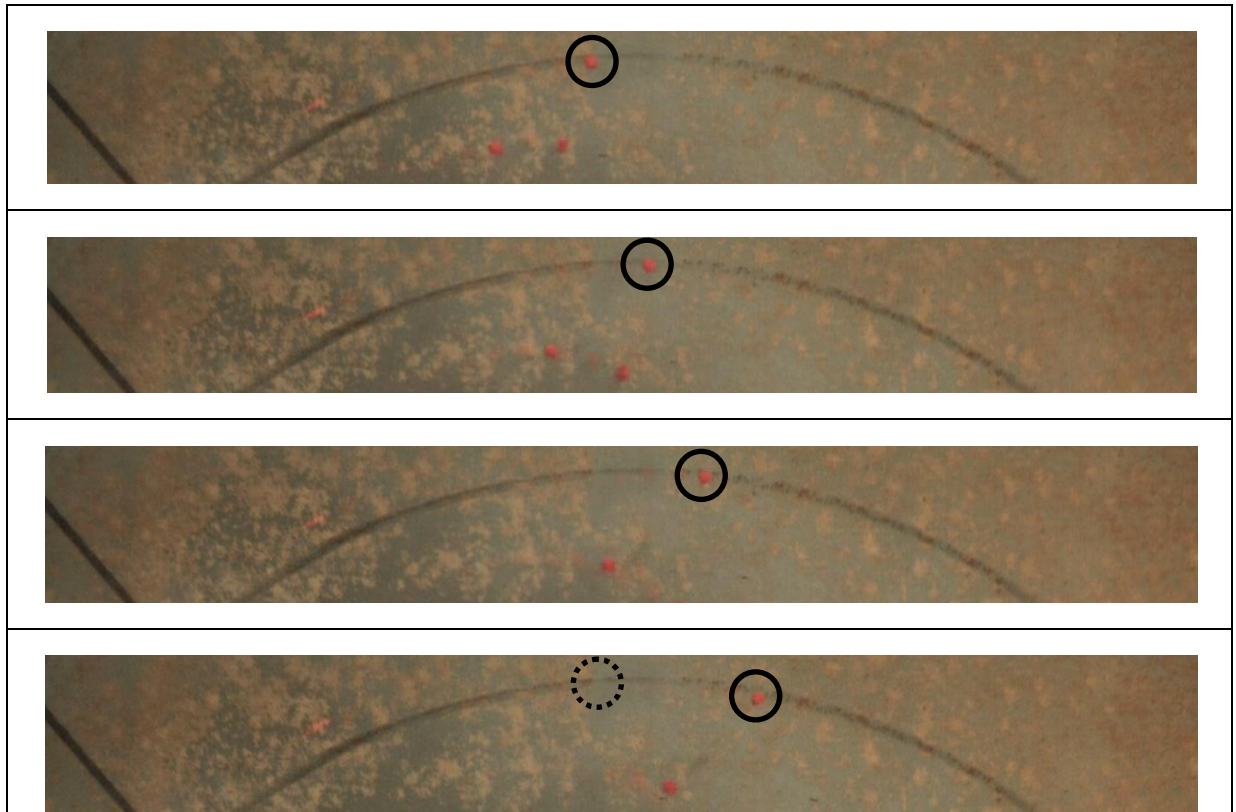
pomiar pośredni prędkości polegający na analizie przemieszczenia cząstek wskaźnikowych wirujących przy dnie w charakterystycznych odległościach od osi zbiornika. Dodatkowo poprawność zbudowanego modelu zweryfikowano na podstawie porównania całkowitych czasów wirowania płynu w wybranych obiektach rzeczywistych i modeli im odpowiadających, które posiadały skalę i warunki początkowe właściwe dla tych obiektów.

Pierwszym elementem weryfikacji był pomiar długości toru ruchu cząstek wskaźnikowych poruszających się w odległości 0,01 m od dna zbiornika. Do badań wykorzystano granulaty tworzywa polimerowego o  $\rho = 1060 \text{ kg/m}^3$ . Gęstość ośrodka wynosiła  $999,7 \text{ kg/m}^3$  (woda o temperaturze  $10^\circ\text{C}$ ). Wykonano dwie serie wirowań, w laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej, po 12 powtórzeń w każdej serii. Do rejestracji pojedynczego wirowania wykorzystano kamerę wysokiej rozdzielczości, która rejestrowała obraz z prędkością 25 klatek na sekundę. Pole ekspozycji stanowił wydzielony fragment ćwiartki dna zbiornika, na którym oznaczono odcinek łuku w odległości  $0,25 R$  i  $0,5 R$  od osi zbiornika. Z uwagi na występujące zniekształcenia obrazu przez swobodną powierzchnię (rejestracji dokonywano z góry) zapis materiału rozpoczynał się po pierwszych 60 sekundach od zamknięcia zaworu na dopływie zbiornika. W przypadku pomiarów dla odległości  $0,25 R$  zapis rozpoczynał się po  $t = 120 \text{ s}$ , co wynikało z czasu koniecznego do osiągnięcia odpowiedniego stopnia koncentracji cząstek znacznikowych w obszarze ekspozycji. Na rysunkach 7.08 i 7.09 przedstawiono przykładowe klatki materiału filmowego dla odległości  $0,25 R$  i  $0,5 R$ , na podstawie których wyznaczono prędkość cząstki znacznikowej poruszającej się po torze wyznaczonego odcinka pomiarowego. Prędkość cząstki była wyznaczana na podstawie jej przemieszczenia w określonym czasie. Przyjęto założenie, iż prędkość można wyznaczyć na podstawie co najmniej trzech kolejnych klatek, na których zarejestrowano cząstkę poruszającą się po wyznaczonym odcinku, co odpowiada przedziałowi czasowemu 0,08 sekundy. Pomiaru odległości dokonano przy pomocy programu do analizy obrazu. Wyznaczono środek geometryczny cząstki znacznikowej i wyznaczono tor jej ruchu z dokładnością do dwóch pikseli (klatka posiadała rozdzielczość 1920 na 1080 pikseli). W celu zminimalizowania efektu rozmycia obrazu zastosowano czasy ekspozycji na poziomie od 0,008 do 0,001 sekundy. Płaszczyzna pomiaru była podświetlona „arkuszem światła” z wykorzystaniem źródła o strumieniu świetlnym 2 500 ANSI lumenów.

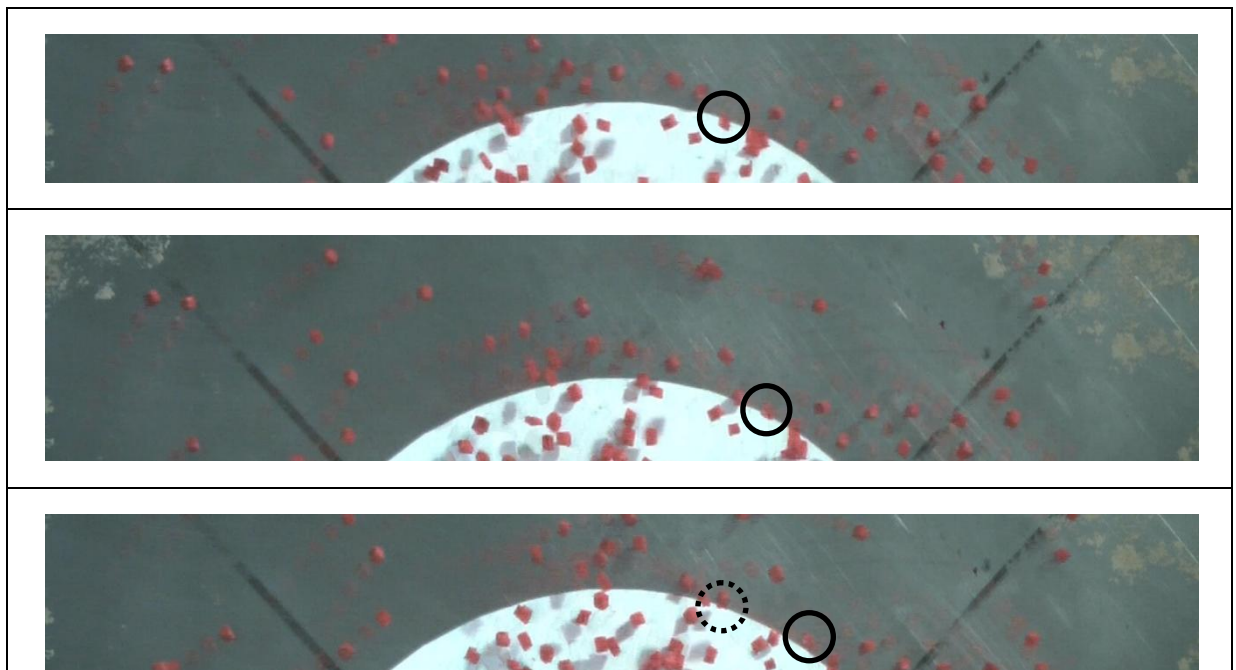
Kolejnym krokiem było wyznaczenie wartości prędkości wybranych cząstek osadu zastępczego. Wykorzystano do tego celu program DPIV. Wyniki wartości prędkości uzyskanych z pomiarów oraz wartości prędkości uzyskane na drodze symulacji zostały zestawione w tabeli 7.01 i 7.02.

Uzyskane wartości porównano i przedstawiono na rysunkach 7.10a i 7.10b. Założono względny przedział zgodności wyników na poziomie 20% poniżej i powyżej wartości zgodności całkowitej.





**Rys.7.08** Kolejne klatki filmowe obrazujące przemieszczenie cząstki osadu zastępczego poruszającej się wzdłuż obwodu koła o promieniu  $0,5 R$



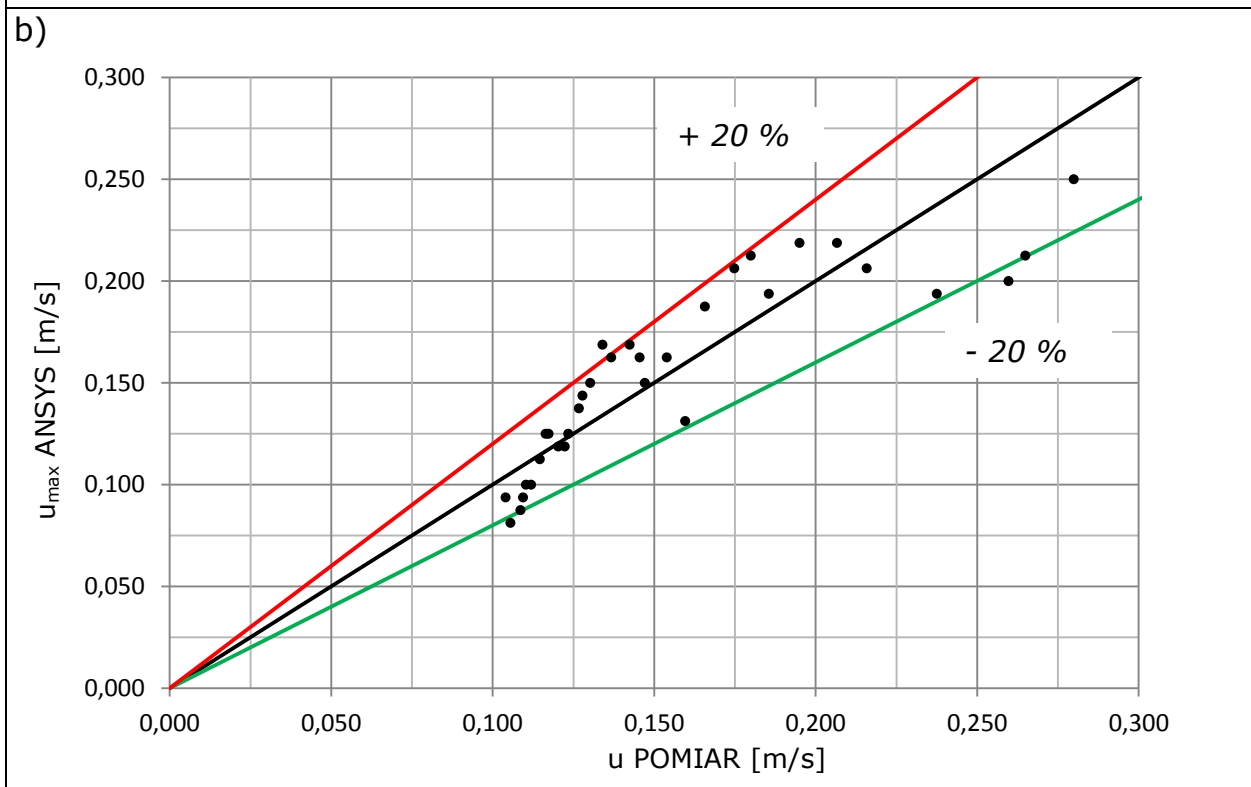
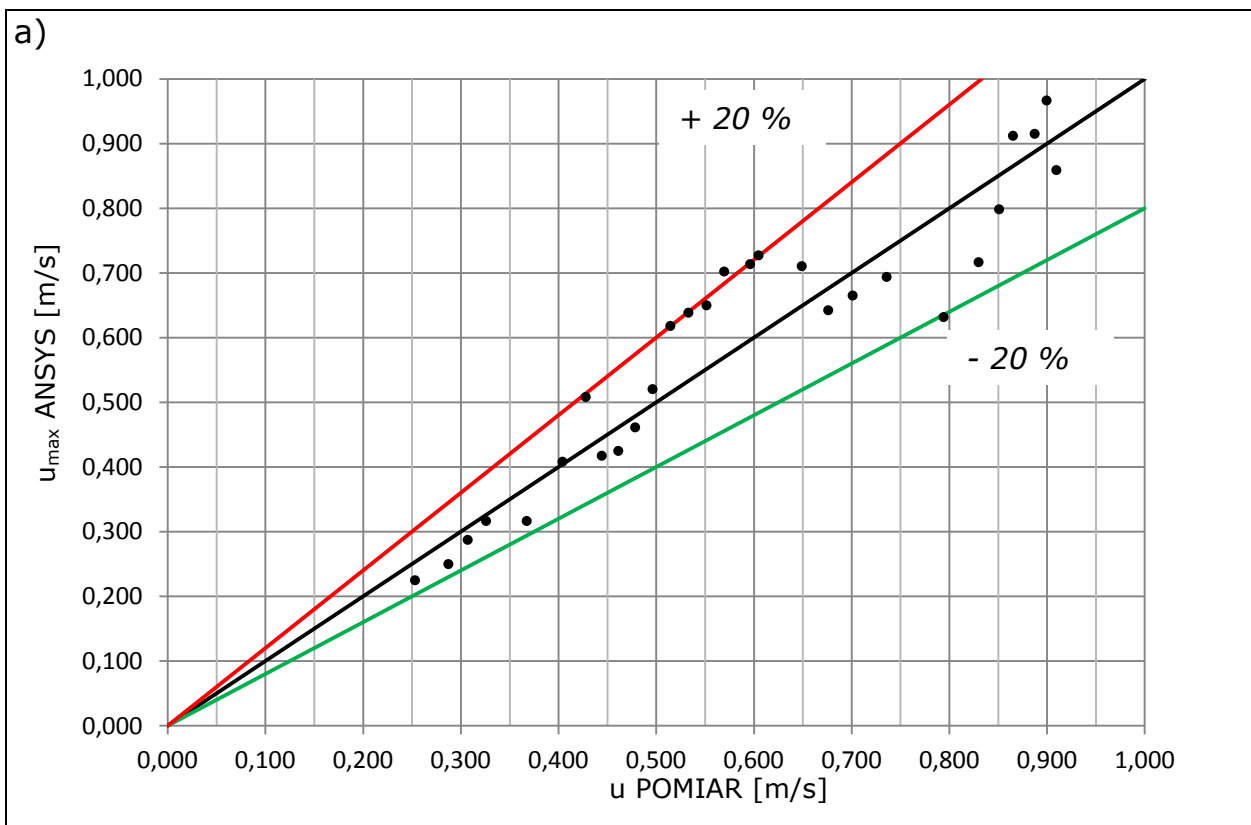
**Rys.7.09** Kolejne klatki filmowe obrazujące przemieszczenie cząstki osadu zastępczego poruszającej się wzdłuż obwodu koła o promieniu  $0,25 R$

**Tab.7.01** Zestawienie wyników pomiaru z wartościami pobranymi z programu symulacyjnego dla odległości 0,5 R

t[s]	u <sub>max</sub> ANSYS	u POMIAR	t[s]	u <sub>max</sub> ANSYS	u POMIAR
61	0,910	0,859	110	0,552	0,650
63	0,900	0,967	112	0,533	0,639
65	0,887	0,915	114	0,515	0,618
68	0,865	0,912	116	0,496	0,520
70	0,851	0,798	118	0,479	0,461
74	0,830	0,717	120	0,461	0,425
79	0,794	0,632	122	0,444	0,418
87	0,736	0,694	124	0,428	0,508
93	0,701	0,665	127	0,404	0,408
96	0,676	0,642	132	0,368	0,317
99	0,649	0,711	139	0,326	0,317
104	0,605	0,727	143	0,307	0,288
105	0,596	0,714	148	0,287	0,250
108	0,570	0,702	159	0,253	0,225

**Tab.7.02** Zestawienie wyników pomiaru z wartościami pobranymi z programu symulacyjnego dla odległości 0,25 R

t[s]	u <sub>max</sub> ANSYS	u POMIAR	t[s]	u <sub>max</sub> ANSYS	u POMIAR
121	0,280	0,250	168	0,134	0,169
124	0,265	0,213	171	0,130	0,150
125	0,260	0,200	173	0,128	0,144
129	0,238	0,194	174	0,127	0,138
133	0,216	0,206	177	0,123	0,125
135	0,207	0,219	178	0,122	0,119
138	0,195	0,219	180	0,120	0,119
141	0,186	0,194	183	0,117	0,125
143	0,180	0,213	184	0,116	0,125
145	0,175	0,206	186	0,115	0,113
149	0,166	0,188	189	0,112	0,100
152	0,160	0,131	191	0,110	0,100
155	0,154	0,163	192	0,109	0,094
159	0,147	0,150	193	0,109	0,088
160	0,146	0,163	197	0,106	0,081
162	0,142	0,169	199	0,104	0,094
166	0,137	0,163			



**Rys.7.11** Porównanie wyników pomiaru wartości prędkości z wartościami prędkości uzyskanymi na podstawie obliczeń w programie Ansys dla promienia: a) 0,5 R; b) 0,25 R

Przeprowadzona weryfikacja wykazuje zgodność wyników uzyskanych na drodze eksperymentalnej z wynikami uzyskanymi na drodze analizy modelu w programie Ansys.

Drugim elementem analizy było porównanie całkowitego czasu wirowania płynu w naczyniach o różnej objętości i jednakowej smukłości napełnienia  $H_n:D = 1$ . Do porównania wybrano dwa modele laboratoryjne i dwa obiekty techniczne. Porównano czasy wirowania płynu (wody) w cylindrycznym naczyniu laboratoryjnym o  $V_n = 0,1$  hl, oraz modelu laboratoryjnej kadzi wirowej o  $V_n = 2$  hl z czasem wirowania płynu w modelu komputerowym. Czas wirowania był liczony od zakończenia realizacji napełniania (odpowiednik zerowego kroku symulacji) do czasu spadku prędkości przepływu napędowego przy dnie do wartości poniżej 0,005 m/s. Pomiaru spadku prędkości dokonano na podstawie obserwacji przemieszczenia drobinek zanieczyszczeń poruszających się przy wyskalowanym dnie naczynia laboratoryjnego i laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej. Porównano także czasy wirowania płynu (brzezki piwnej) w obiektach technicznych w postaci whirlpoola o  $V_n = 40$  hl i whirlpool-kotła o  $V_n = 530$  hl z czasem wirowania modeli o zadeklarowanych parametrach płynu właściwych dla brzezki piwnej o zawartości ekstraktu 12°Blg. Warunki początkowe wirowania w modelach komputerowych określono na podstawie prędkości napełniania zbiorników, przyjmując wartość maksymalną w modelu na poziomie 0,9 wartości maksymalnej prędkości napełniania [Michel 1988]. Czas wirowania mierzony był od zakończenia realizacji etapu napełniania do czasu spadku prędkości przepływu napędowego przy dnie do wartości poniżej 0,005 m/s. Prędkość końcową w modelach technicznych określono na podstawie przemieszczenia cząstek osadu przy dnie zbiornika z wykorzystaniem przeszklonych otworów rewizyjnych. Wyniki zestawiono w tabeli 7.03.

**Tab.7.03** Zestawienie wyników pomiaru całkowitego czasu wirowania z wartościami pobranymi z programu symulacyjnego dla kryterium  $u_{max} < 0,005$  m/s

objętość płynu [hl]	całkowity czas wirowania ( $u_{max} < 0,005$ m/s dla pp)	
	t [s] dla $u_{max}$ w modelu	t [s] dla $u_{max}$ w obiekcie
0,1	463	445
2	1049	1007
40	2068	1980
530	2738	2660

Wartości całkowitego czasu wirowania dla modeli komputerowych są wyższe niż w obiektach rzeczywistych. Porównując czasy pomierzone i czasy uzyskane na drodze obliczeń, stwierdzono, iż rozbieżności pomiędzy wynikami nie przekraczają 5%, co świadczy o dobrym dopasowaniu warunków początkowych w modelu obliczeniowym do warunków realizacji

wirowania w obiektach rzeczywistych, a także o poprawnej deklaracji warunków brzegowych.

## 7.4 Modele o zmiennej lepkości i gęstości

Kolejnym elementem symulacyjnych badań rozpoznawczych było określenie wpływu gęstości i lepkości wirowanego płynu na powstawanie przepływów drugorzędowych i całkowity czas wirowania. Badania eksperymentalne prowadzone na modelu laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej realizowane są z wykorzystaniem bieżącej wody o temperaturze 10°C. Warunki produkcyjne realizacji operacji w kadzi wirowo - osadowej odnoszą się do wirowania brzezki o temperaturze 90°C. Właściwym było określenie wpływu parametru gęstości i lepkości dynamicznej na zjawiska powstawania zawirowań wtórnych.

Przeprowadzono symulacje dla czterech modeli płynu o zadeklarowanych wartościach gęstości i lepkości jak w tabeli 7.04.

**Tab.7.04** Gęstość i lepkość dynamiczna płynów będących przedmiotem analizy

Lp.	analizowany płyn	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [mPa*s]
1	woda [293 K]	999,7	1,307
2	brzezka [363 K]	1013,66	1,76
3	płyn modelowy I	1013,66	1,307
4	płyn modelowy II	999,7	1,76

Wyniki obliczeń nie wykazały zmiany obszaru występowania i kształtu formujących się przepływów o charakterze drugorzędowym. Uzyskano natomiast zmianę wartości maksymalnej prędkości przepływu namywającego stożek oraz zmianę całkowitego czasu wirowania dla poszczególnych modeli. Czasy wirowania i wartości  $u_{max}$  przepływu namywającego dla analizowanych modeli zestawiono w tabeli 7.05

**Tab.7.05** Zestawienie wartości czasu wirowania dla modeli o zmiennych parametrach lepkości i gęstości ( $u_{max} < 0,005$  m/s dla pp i  $u_{max} < 0,001$  m/s dla pw)

Lp.	analizowany płyn	całkowity czas wirowania		$u_{max}$ pw [m/s]
		t [s] dla $u_{max}$ pp	t [s] dla $u_{max}$ pw	
1	woda	1048	1056	0,1454
2	brzezka	843	966	0,1686
3	płyn modelowy I	1082	1039	0,1290
4	płyn modelowy II	799	853	0,1355

Całkowity czas wirowania dla brzezki (dla obu kryteriów prędkości) posiada niższą wartość w porównaniu do czasu wirowania wody. Ma to oczywiście

związek ze wzrostem lepkości dynamicznej, która odpowiedzialna jest za wyhamowywanie ruchu płynu.

Na przykładzie płynów modelowych (I i II) można wykazać niezależne oddziaływanie zmiany gęstości i lepkości na czas wirowania płynu. Zmiana gęstości (płyn modelowy I) powoduje zwiększenie całkowitego czasu wirowania dla przepływu pierwotnego oraz nieznaczne skrócenie czasu wirowania dla przepływu namywającego. W przypadku płynu modelowego II nastąpił znaczny spadek czasu wirowania dla obu kryteriów prędkości.

Zwiększenie gęstości płynu powoduje zwiększenie czasu trwania przepływu pierwotnego, ale zmniejsza intensywność przepływu namywającego. Zwiększenie lepkości płynu skutkuje zmniejszeniem czasu wirowania płynu w kadzi wirowo - osadowej, a jednocześnie następuje wzrost wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego. Przepływ namywający dla brzeczki w porównaniu do wody trwa względnie krócej, przy czym jego wartość prędkości jest wyższa. W związku z tym warunki formowania się przepływów analizowanych dla wody są mniej korzystne, niż warunki występujące w kadzi wirowo - osadowej, w której realizowana jest operacja w warunkach technologicznych.

## **8. Analiza numeryczna wpływu parametrów konstrukcyjnych**

Interpretacja analizy numerycznej wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na rozkład i charakter zawirowań wtórnych stanowi główną część badawczą pracy.

Parametry konstrukcyjne wyróżniające poszczególne modele zostały dobrane na podstawie analizy literatury, identyfikacji kształtu zawirowań i rozpoznania specyfiki konstrukcji zbiorników projektowanych i pracujących na warzelniach browarów w Polsce.

Badania na modelach rzeczywistych wymagają budowy zbiorników uwzględniających całą gamę zmian konstrukcyjnych. Takie badania są bardzo kosztowne, a jednocześnie ograniczone ze względu na skończoną ilość wariantów i parametrów konstrukcji zbiornika. Rozwój metod numerycznych CFD pozwala prowadzić analizę w bardzo szerokim zakresie zmian parametrów konstrukcyjnych. Wyniki modelowania CFD są tylko pewnym przybliżeniem odzwierciedlenia warunków panujących w obiekcie rzeczywistym. Niemniej jednak na podstawie wyników takich analiz można z powodzeniem wnioskować odnośnie charakteru symulowanego procesu.

Dobór zróżnicowanej geometrii obiektów symulacji wynikał z planu badań zakładającego analizę konstrukcji o zmodyfikowanych parametrach w odniesieniu do najczęściej stosowanych w przemyśle zbiorników o geometrii posiadającej dno płaskie. Zbiornik będący cylindrem pozbawionym wszelkich modyfikacji geometrycznych o smukłości napełnienia  $H_n : D = 1$  stanowi w niniejszej pracy model podstawowy. Analiza systemu przepływów powstających w tym zbiorniku stanowi podstawę rozważań na temat wpływu zmiany geometrii na rozkład i charakter zawirowań powstających podczas klarowania mieszaniny w kadzi wirowo - osadowej. Punktem odniesienia rozpatrywanych rozkładów uzyskanych numerycznie dla konstrukcji będących przedmiotem badań jest zawsze model podstawowy.

Tak jak w przypadku badań rozpoznawczych wyniki symulacji przedstawiają czysto hydrodynamiczny aspekt wirowania cieczy, a więc nie uwzględniają oddziaływań między cząstkami osadu separowanego w stożku, jak również, zmian lepkości i gęstości wynikających ze zmiany stopnia koncentracji osadu w pobliżu dna naczynia. Ocenie podlegał wpływ rozkładu prędkości i stanu chwilowego przepływów drugorzędowych na proces separacji osadu.

### **8.1 Model podstawowy**

Obliczeniowym modelem podstawowym jest model, który odwzorowuje stan dynamiczny przepływu cieczy właściwy dla obiektu rzeczywistego laboratoryjnej kadzi wirowej o wymiarach:  $D = 640$  mm,  $H_m = 1\ 200$  mm. Nominalna wysokość napełnienia zbiornika jest równa wymiarowi jego

średnicy ( $H_n : D = 1$ ). Objętość nominalna płynu wirującego w zbiorniku modelu podstawowego wynosi  $V_n = 0,205 \text{ m}^3$ .

Warunki początkowe dla modelu podstawowego zostały określone w podrozdziale 7.2.

Akwizycja wyników w postaci pól wektorowych map rozkładu prędkości umożliwia analizę, dla każdego kroku czasowego, rozkładu prędkości przepływu pierwotnego oraz rozkładu prędkości przepływów wtórnych.

### **8.1.1 Analiza układu zawirowań**

Analiza map rozkładu prędkości pozwoliła wyróżnić zasadnicze elementy wchodzące w skład struktury przepływów w zawirowanym ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej. Są to:

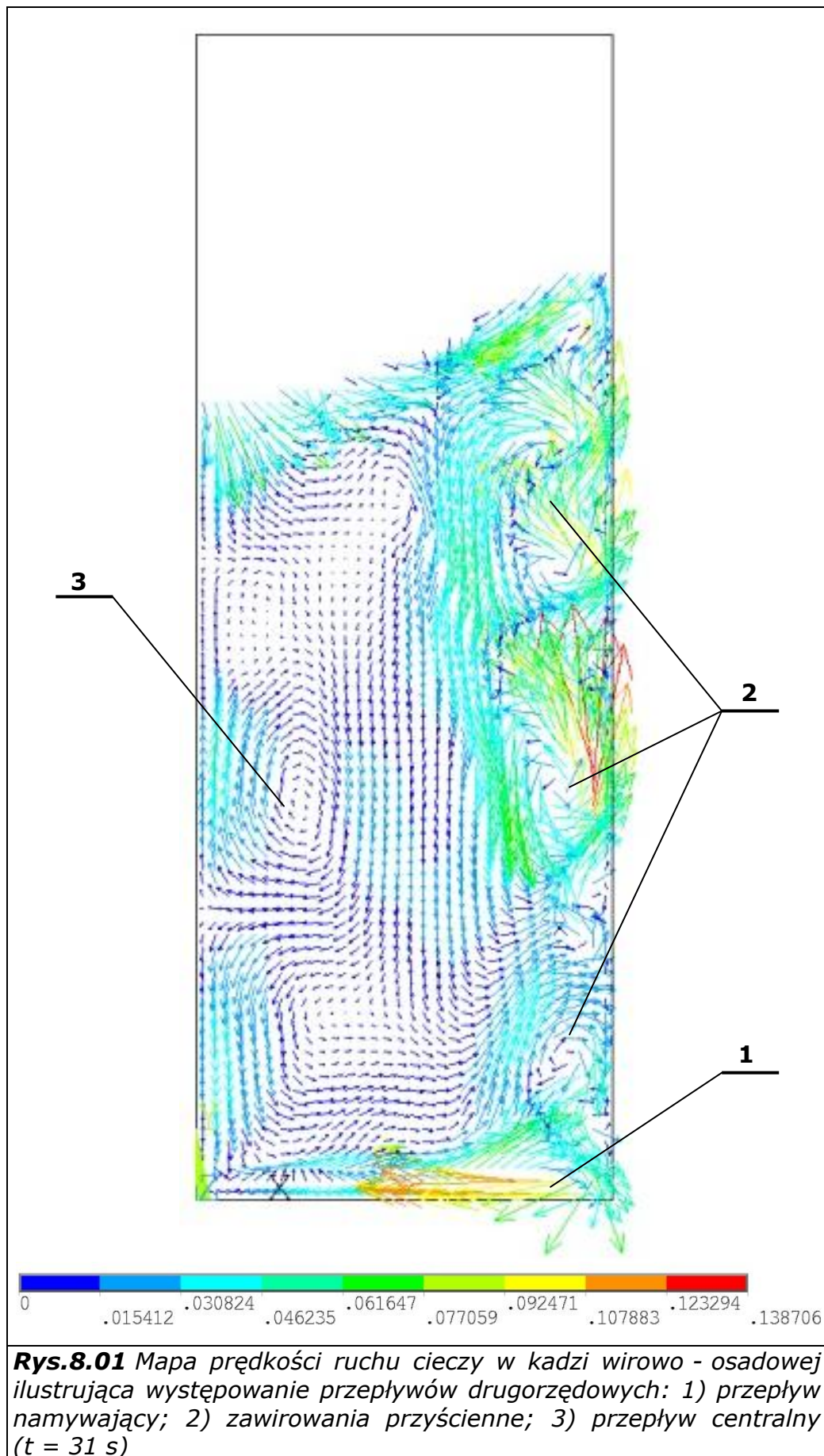
- a) przepływ pierwotny;
- b) przepływ wtórny namywający stożek;
- c) zawirowania wtórne przyścienne;
- d) centralny przepływ wtórny;
- e) inne przepływy o charakterze lokalnym.

Zawirowanie pierwotne jest przepływem napędowym powstającym w wyniku deklarowanego rozkładu prędkości. Pozostałe przepływy są konsekwencją ruchu płynu w ograniczonej cylindrycznie przestrzeni zbiornika kadzi wirowo - osadowej.

Charakterystyka przepływu pierwotnego została przedstawiona w dalszej części niniejszego podrozdziału.

Na rysunku 8.01 przedstawiono przykładową mapę pola prędkości obrazującą rozkład prędkości przepływów wtórnych. Przepływy wtórne mają charakter drugorzędowy ze względu na wartości prędkości o rząd mniejsze w odniesieniu do wartości prędkości przepływu pierwotnego. Mapa pola prędkości przepływów wtórnych umożliwia wydzielenie poszczególnych przepływów, określenie ich czasu powstawania, maksymalnej wartości prędkości, obszaru występowania oraz czasu w którym znikają. Na rysunku 8.01 widoczny jest uformowany przepływ namywający, zawirowania przyścienne (wiry Taylora) oraz przepływ centralny umiejscowiony, dla tego kroku czasowego, w połowie wysokości napełnienia. Występują także inne przepływy, które stanowią uzupełnienie struktury zawirowań. W pobliżu swobodnej powierzchni wirującego płynu widoczne są także chwilowo występujące fluktuacje. Należy podkreślić, iż występująca w ruchu wirowym struktura przepływów wtórnych ma charakter układu dynamicznego. Poza przepływem namywającym wszystkie inne przepływy, w miarę upływu czasu, zmieniają kierunek i obszar występowania. Stan równowagi pomiędzy przepływem namywającym i przepływem centralnym ustala się po wygaśnięciu zawirowań przyściennych i innych przepływów lokalnych.

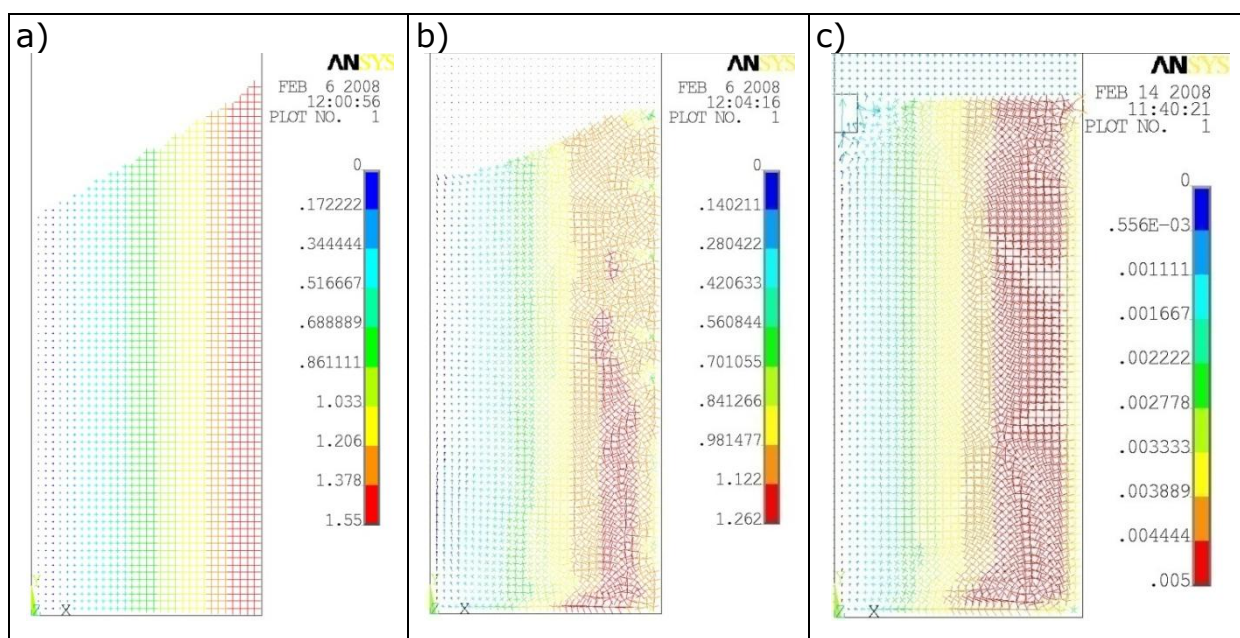




W związku ze znacznie ograniczonym obszarem występowania i chwilowym charakterem, w dalszej części analizy systemu przepływów pominięto w rozważaniach przepływy wtórne występujące lokalnie.

Pierwszym elementem systemu przepływów w whirlpoolu jest przepływ pierwotny, określany jako wir główny lub napędowy. Na rysunku 8.02 przedstawiono jego wektorowe mapy pola prędkości dla wybranych kroków czasowych.

We wszystkich analizowanych modelach maksymalna wartość prędkości przepływu pierwotnego wynosi 1,55 m/s. Jest to wartość zadeklarowana jako warunek początkowy symulacji w jej zerowym kroku (rys. 8.02a), a jej wartość wynika z przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Przepływ pierwotny jest zawirowaniem o pionowej osi obrotu obejmującym cały analizowany przekrój zbiornika. Jest przepływem dominującym pod względem rozmiaru, obszaru oddziaływania i wartości prędkości.



**Rys.8.02** Mapy pola prędkości ruchu płynu w whirlpoolu ilustrujące przepływ pierwotny: a) w stanie początkowym ( $t = 0$  s); b) dla maksymalnej wartości prędkości  $p_w$  ( $t = 28$  s); c) koniec wirowania dla  $u_{max\ pp} = 0,005$  m/s ( $t = 1049$  s)

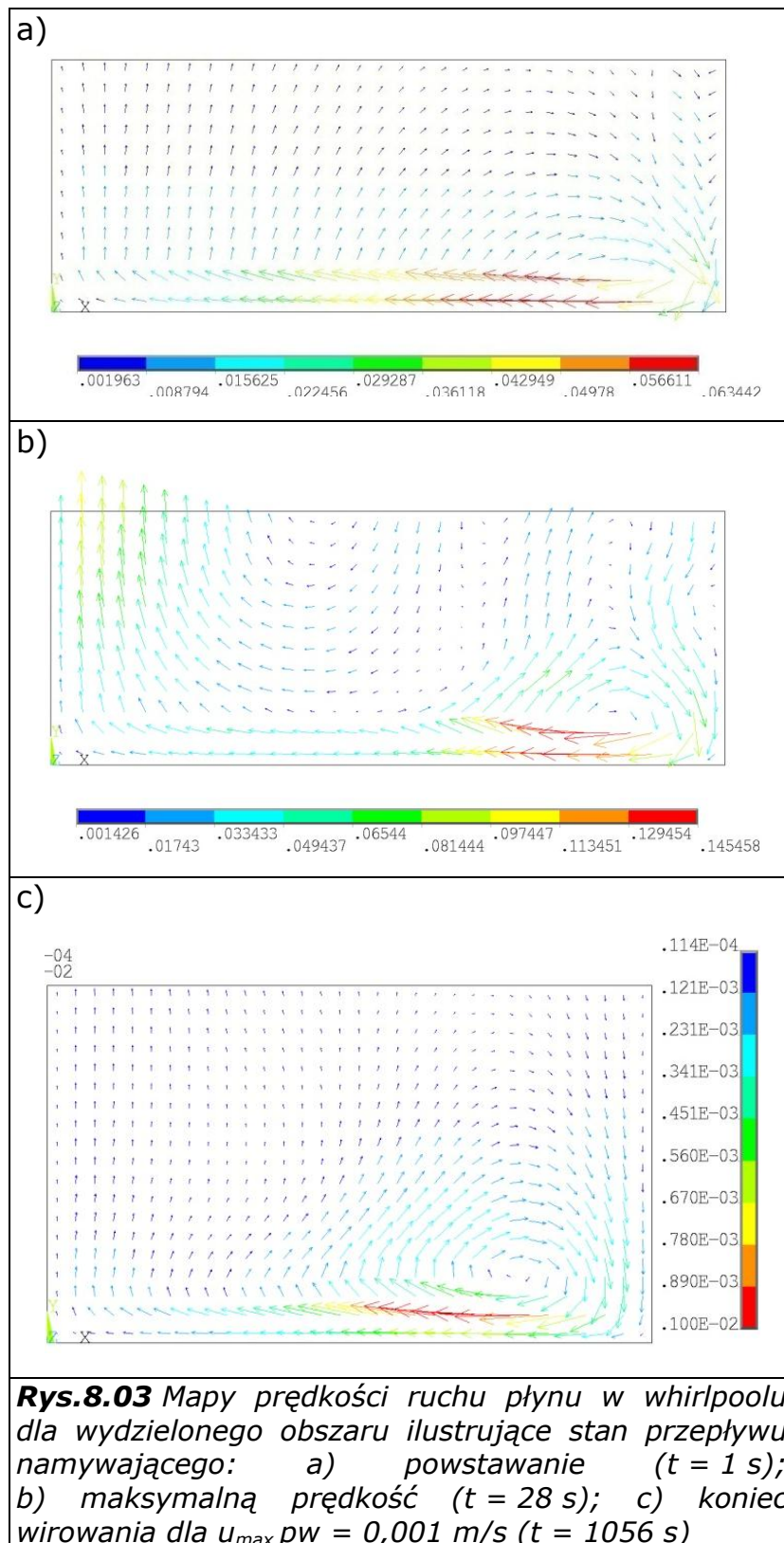
Analiza pola rozkładu prędkości tego zawirowania pozwala określić także występowanie przepływów wtórnych. Na rys. 8.02b przedstawiono rozkład zawirowania pierwotnego dla kroku czasowego, w którym występuje maksymalna wartość prędkości przepływu namywającego stożek. Analiza pola prędkości dla tego kroku czasowego pozwala określić miejsce występowania zawirowań przyściennych (lokalnie występujące obszary w pobliżu ściany zbiornika o niskich wartościach prędkości) oraz występowanie przepływu namywającego (charakterystyczne wydłużenie pojawiające się w pobliżu dna zbiornika).

Na rysunku 8.02c przedstawiono rozkład prędkości przepływu pierwotnego dla kroku czasowego, w którym przepływ ten osiąga wartość prędkości równą 0,005 m/s. Jest to krok czasowy określony jako koniec wirowania.

Przepływ namywający powstaje przy dnie zbiornika w warstwie Ekmana. Jest on skierowany od połączenia pobocznic i dna zbiornika do jego centralnej strefy. Strumień tego przepływu zbiera osad opadający na dno zbiornika i przenosi go do centralnej strefy namywając w postaci stożka. Prędkość maksymalna tego przepływu, na początku wirowania, stanowi od 0,01 do 0,2 wartości  $u_{\max}$  przepływu pierwotnego. Kształt zawirowania namywającego jest płaski, podłużny i nieregularny. Pierwsze symptomy występowania tego zawirowania pojawiają się już w pierwszym kroku czasowym ( $t = 1$  s), przy czym jego uformowanie następuje po drugim kroku czasowym obliczeń. Mechanizm powstawania tego przepływu został przedstawiony wstępnie w podrozdziale dotyczącym budowy i zasady działania whirlpoola (podrozdział 2.1), oraz w rozwinięciu, w podrozdziale dotyczącym analizy teoretycznej ruchu płynu w warstwie Ekmana (podrozdział 4.4).

Dla analizowanego modelu wartość maksymalna (zwana dalej wartością kulminacyjną)  $u_{\max}$  tego przepływu zostaje osiągnięta w 28 kroku czasowym, dla tego samego kroku zostało zidentyfikowane pełne uformowanie się zawirowania. Koniec wirowania zgodnie z przyjętym kryterium (wartość  $u_{\max} \text{ pw} < 0,001$  m/s) ustalił się po czasie  $t = 1056$  s. Dla tego kroku czasowego zawirowanie jest pełniejsze i bardziej regularne (w porównaniu do stanu początkowego), co związane jest z powiększaniem się obszaru warstwy granicznej Ekmana w miarę zanikania przepływu pierwotnego. Dla 1056 kroku czasowego wartość  $u_{\max}$  przepływu pierwotnego wynosi 0,00491 m/s. Tak więc w czasie zanikania przepływu wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego stożek stanowi około 0,2 wartości  $u_{\max}$  przepływu napędowego.

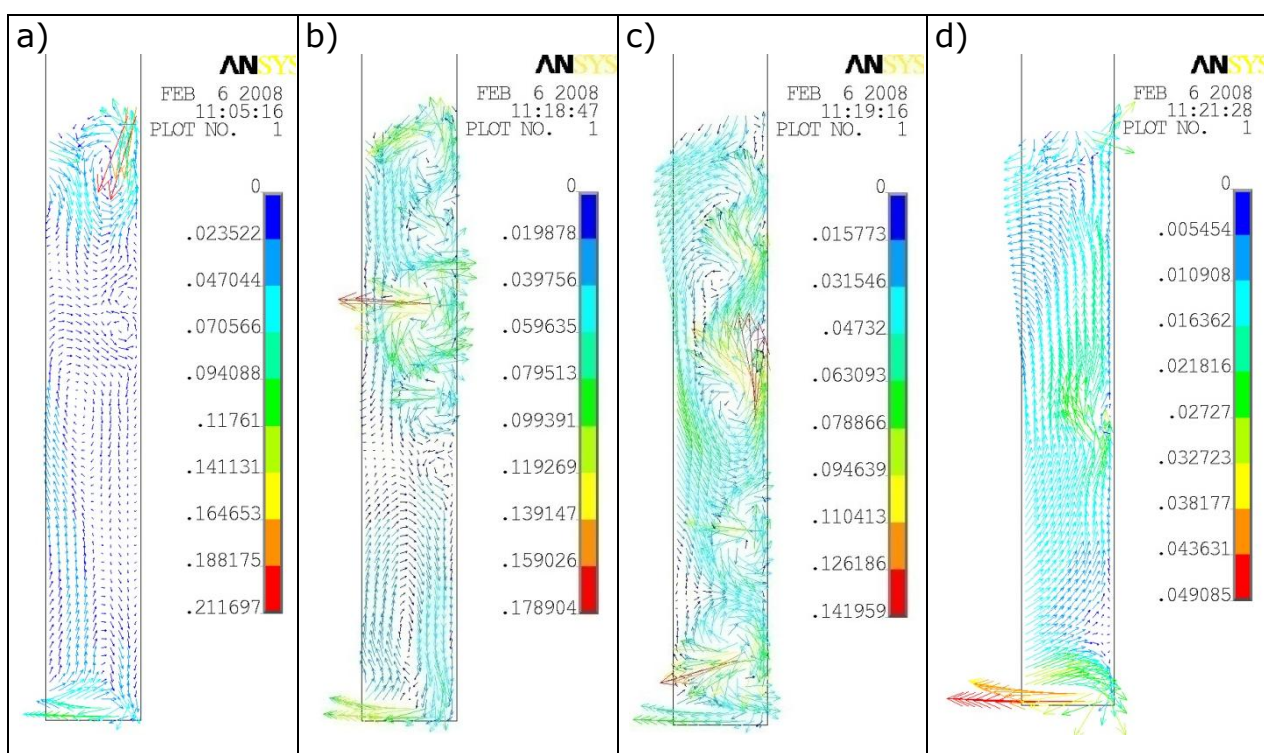
Kolejnym elementem systemu przepływów wtórnych whirlpoola są zawirowania powstające w obszarze zbliżonym do ściany zbiornika, w tzw. warstwie Stewardsona. Zawirowania przyścienne występują w trakcie początkowego okresu wirowania. Mają charakter zawirowań przemieszczający się w pionie od powierzchni do dna zbiornika. Posiadają regularny kształt o przekroju kołowym. Występują parami. Pierwsza para (rys. 8.04a) tych zawirowań formuje się w czasie wirowania  $t = 13$  s. W tym kroku czasowym ich wartość  $u_{\max}$  nie przekracza 0,02 m/s, co stanowi 0,01 wartości  $u_{\max}$  przepływu pierwotnego i 0,1 wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego.



Formujące się zawirowania przyścienne osiągają w czasie wirowania  $t = 21$  s wartość kulminacyjną  $u_{max}$  wynoszącą  $0,178$  m/s (rys. 8.04b). Dla tego kroku czasowego stanowi to  $0,13$  wartości  $u_{max}$  przepływu pierwotnego i  $1,6$  wartości  $u_{max}$  przepływu namywającego.

Po czasie wirowania  $t = 38$  s liczba par zawirowań wzrasta do  $q = 5$ . W każdej parze zawirowanie znajdujące się u góry posiada kierunek prawoskrętny, a zawirowanie znajdujące się poniżej jest współbieżne do niego. Dla tego kroku czasowego wartość  $u_{\max}$  dla zawirowania w którym ona występuje wynosi  $0,142$  m/s, co stanowi  $0,12$  wartości  $u_{\max}$  przepływu pierwotnego i  $1,8$  wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego.

Zawirowania przyścienne zanikają po czasie wirowania  $t = 98$  s (rys 8.04d). W przypadku analizowanego modelu, po tym korku czasowym obliczeń, ostatnia z par zawirowań przyściennych zanika na wysokości  $0,5 H_n$ . Wartość  $u_{\max}$  dla tej pary zawirowań wynosi  $0,02$  m/s, co w tym czasie stanowi  $0,03$  wartości  $u_{\max}$  przepływu pierwotnego i  $0,35$  wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego.

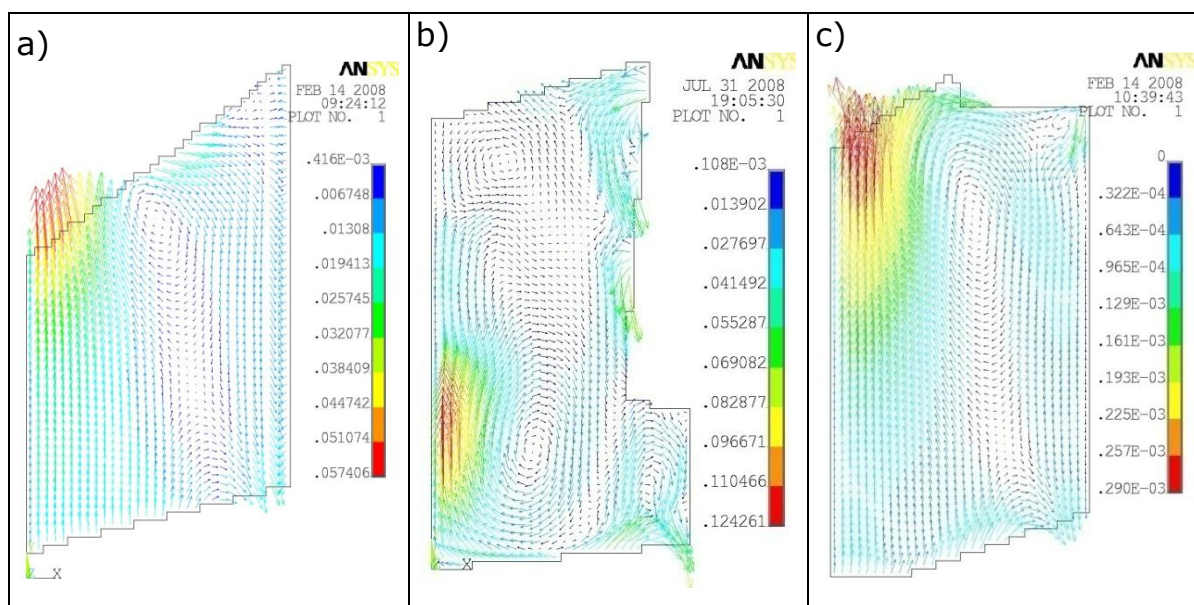


**Rys.8.04** Mapy prędkości ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej ilustrujące obszar występowania zawirowań przyściennych: a) powstawanie ( $t = 13$  s); b) maksymalna wartość prędkości ( $t = 21$  s); c) maksymalna ilość par zawirowań ( $t = 38$  s); d) zanikanie zawirowań ( $t = 98$  s)

Ostatnim analizowanym przepływem wtórnym składającym się na system zawirowań powstających w whirlpoolu jest przepływ nazwany centralnym. Jest to zawirowanie obejmujące ponad połowę pola przekroju pionowego zbiornika. Kształt tego zwirowania w początkowej fazie tworzenia się jest nieregularny. Przepływ ten powstaje po czasie wirowania  $t = 3$  s, a wartość  $u_{\max}$  dla tego kroku czasowego wynosi  $0,058$  m/s, co stanowi  $0,04$  wartości  $u_{\max}$  przepływu pierwotnego i  $0,52$  wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego. Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  tego przepływu, dla całego rozpatrywanego czasu wirowania zostaje osiągnięta w czasie  $t = 27$  s i wynosi  $0,124$  m/s, co stanowi  $0,1$  wartości  $u_{\max}$  przepływu napędowego oraz  $0,88$  wartości  $u_{\max}$

przepływu namywającego. W kolejnych krokach czasowych przepływ centralny wielokrotnie zmienia kierunek, co jest związane z zanikaniem zawirowań przyściennych i wypełnianiem się zawirowania namywającego stożek osadu. Wraz z przepływem centralnym występują także okresowo inne lokalne zawirowania. Przepływ centralny występuje zasadniczo podczas całego rozpatrywanego czasu wirowania. Po całkowitym wygaśnięciu zawirowań przyściennych przepływ ten formuje się wypełniając całkowicie znaczną część rozpatrywanego przekroju zbiornika. Ustala się też ostatecznie jego kierunek na przeciwny do kierunku sedimentacji cząstek osadu, przy czym jego oddziaływanie jest na tym etapie wirowania neutralne, co związane jest ze skrajnie małymi wartościami prędkości w obszarze zbliżonym do uformowanego stożka osadu.

Dla kroku czasowego stanowiącego kryterium końca symulacji, przepływ centralny posiada wartość  $u_{max}$  wynoszącą 0,0003 m/s, co stanowi 0,05 wartości  $u_{max}$  przepływu napędowego i 0,3 wartości  $u_{max}$  przepływu namywającego.

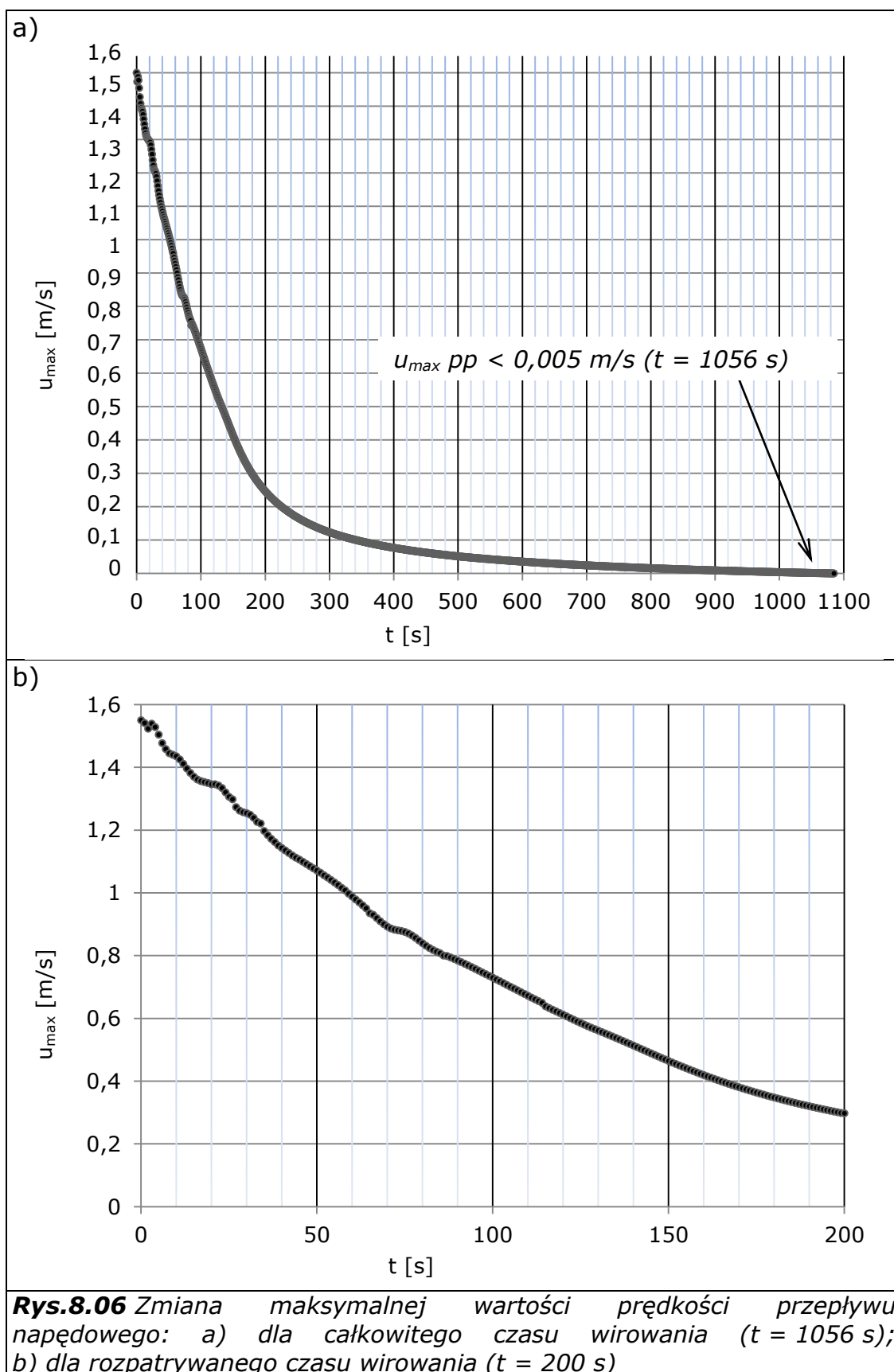


**Rys.8.05** Mapy prędkości ruchu cieczy w kadzi wirowo - osadowej ilustrujące obszar występowania przepływu centralnego: a) powstawanie ( $t = 3$  s); b) maksymalna wartość prędkości ( $t = 27$  s); c) koniec wirowania dla  $u_{max} pw = 0,001$  m/s ( $t = 1056$  s)

### 8.1.2 Analiza zmiany wartości prędkości przepływów

W dalszej części rozważań dotyczących modelu podstawowego poddano szczegółowej analizie kinetykę zmian prędkości poszczególnych przepływów w czasie określonym eksperymentalnie jako czas aktywnego formowania się stożka osadu w laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej. Czas ten wynosi 200 sekund.

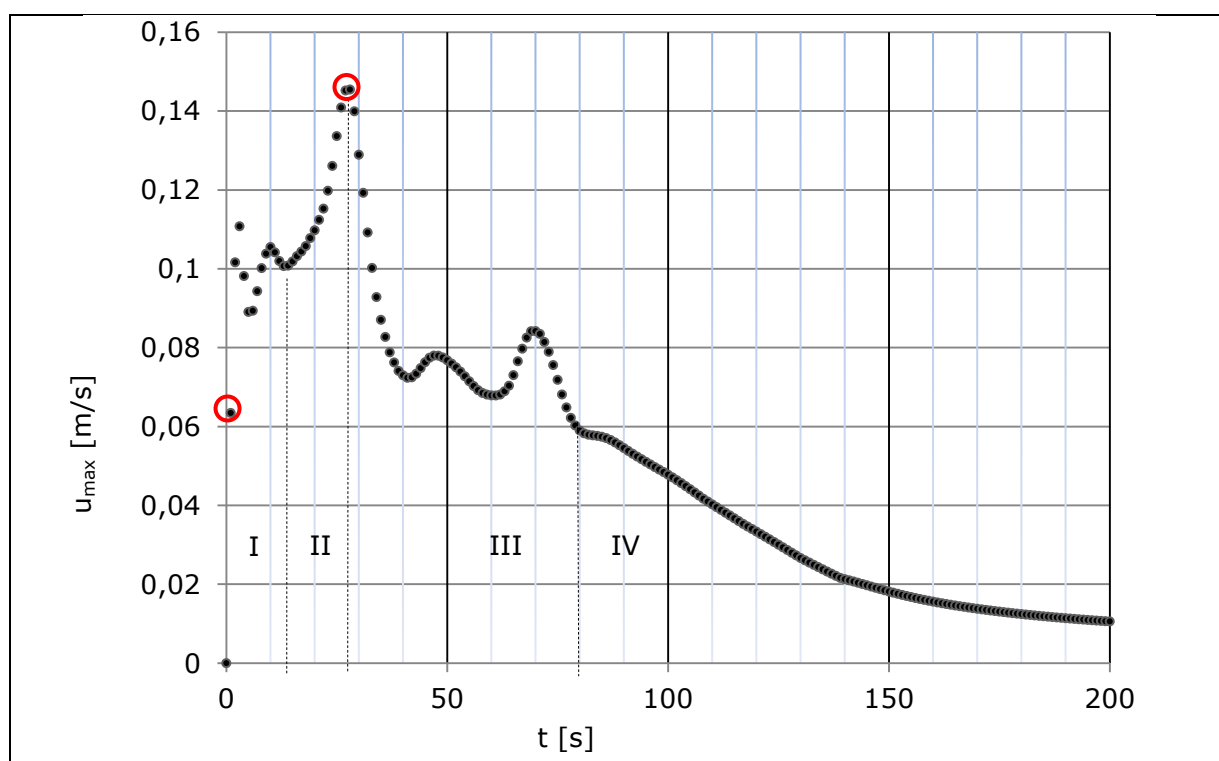
Kinetyka zmiany prędkości zawirowania napędowego została przedstawiona na rysunku 8.06.



Jest to charakterystyka o rozkładzie zbliżonym do wykładniczego (rys.8.06a). Obrazuje ona stopień dyssypacji energii kinetycznej w czasie wyhamowywania przepływu pierwotnego. Rozkład dla początkowych 90 sekund wirowania ujawnia występowanie zaburzeń związanych z występowaniem innych przepływów o charakterze wtórnym (rys.8.06b).

Rozkład wartości  $u_{\max}$  przepływu napędowego w przedziale czasowym od 200 do 1056 sekundy wirowania nie wykazuje występowania zaburzeń i ma charakter wykładniczy.

Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu namywającego została przedstawiona na rysunku 8.07.



**Rys.8.07** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu namywającego stożek osadu w czasie pierwszych 200 sekund wirowania (na czerwono wyróżniono czasy charakterystyczne opisane w podrozdziale 8.1.1)

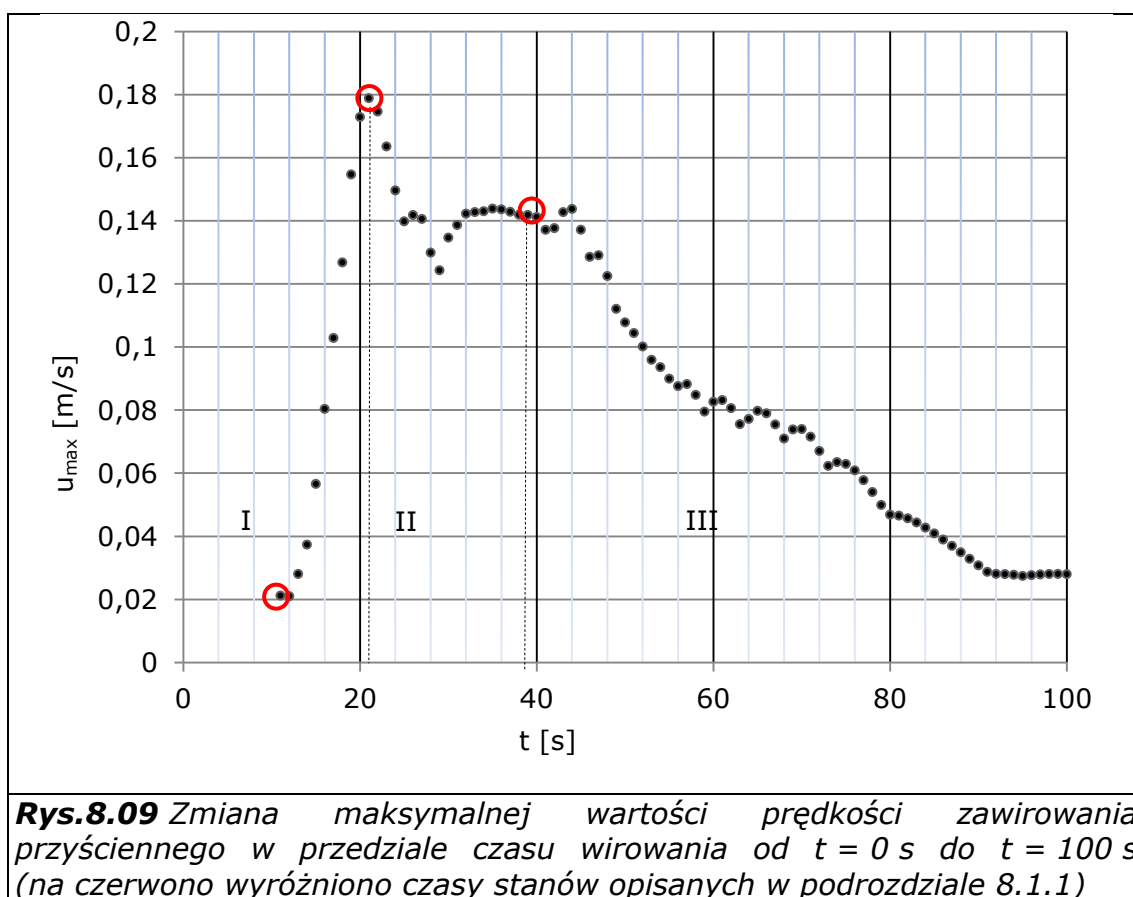
Charakterystykę zmiany wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego można podzielić na cztery przedziały czasowe. Pierwszy to formowanie się zawirowania. W tym przedziale (I) wartość prędkości zmienia się skokowo, co świadczy o braku stabilności przepływu w obszarze warstwy Ekmana. Przedział drugi (II) to formujący się przepływ o rosnącej wartości prędkości, aż do wartości maksymalnej występującej w czasie  $t = 28$  s. W przedziale trzecim (III) występuje formowanie się stożka osadu. W tym przedziale wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego spada i okresowo wzrasta tworząc rozkład fluktuacyjny, co jest związane z występowaniem zawirowań przyściennych, które przemieszczając się wzdłuż ściany zbiornika włączają się do przepływu namywającego. Fluktuacyjny rozkład świadczy



o formowania się osadu w kształt torusa, który zmniejszając średnicę zewnętrzną zostaje zebrany w obszarze centralnej części dna zbiornika. Ostatni przedział czasowy (IV) jest konsekwencją charakteru zmian prędkości. W tym czasie występuje namywanie osadu opadającego na dno w kierunku formującego się stożka. W tym przedziale przepływ namywający jest w pełni stabilny, a jego charakterystyka jest zbliżona do charakterystyki zmiany prędkości zawirowania napędowego i nie wykazuje występowania zaburzeń do końca całkowitego czasu wirowania.

Kolejną grupą zawirowań wtórnych są zawirowania przyścienne. Ponieważ występują one okresowo analiza ich maksymalnej wartości prędkości będzie obejmowała czas ich występowania, a więc przedział czasu wirowania pomiędzy  $t = 10$  s a  $t = 110$  s. Maksymalna wartość prędkości dotyczy zawsze jednego i tego samego zawirowania, które w czasie występowania przemieszcza się w swojej parze od powierzchni w kierunku dna zbiornika.

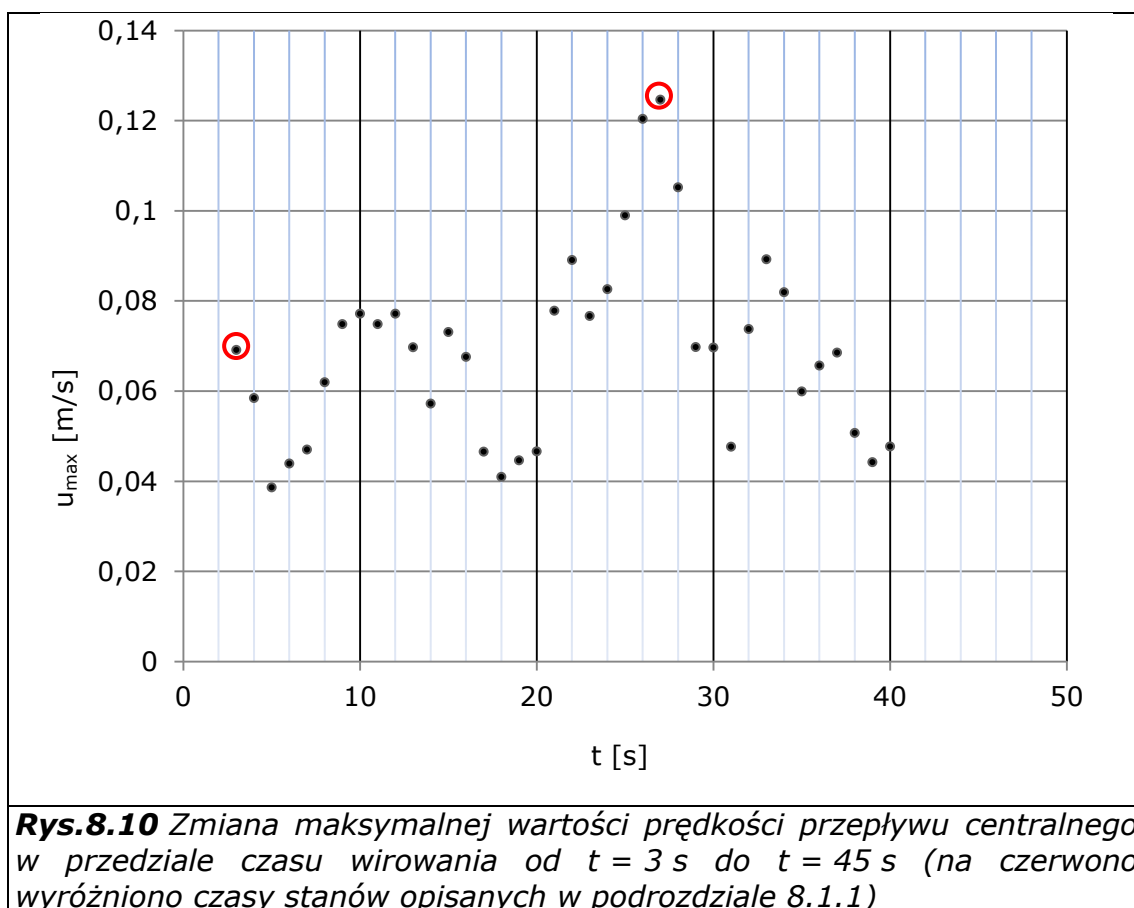
Kinetyka zmian wartości  $u_{\max}$  pary zawirowań przyściennych o dominującej wartości prędkości została przedstawiona na rysunku 8.09.



Tak jak w przypadku zawirowania namywającego można wydzielić charakterystyczne przedziały czasowe. Pierwszy przedział (I) to powstawanie i formowanie się zawirowań. Pod koniec tego przedziału ustala się maksymalna wartość prędkości zawirowań, które przemieszczają się od powierzchni w kierunku dna zbiornika. Kolejny przedział (II) to wzrost

ilości par zawirowań przyściennych. W przedziale tym spadek wartości  $u_{\max}$  przypada na czas, w którym notuje się wartość kulminacyjną  $u_{\max}$  zawirowania namywającego. Ostatni przedział (III) to powolne zanikanie kolejnych par zawirowań. Po czasie wirowania  $t = 75$  s następuje stabilizacja położenia ostatniej pary zawirowań. Po czasie  $t = 110$  s zawirowania te zanikają całkowicie.

Kinetyka zmiany tej prędkości została przedstawiona na rysunku 8.10.



**Rys.8.10** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu centralnego w przedziale czasu wirowania od  $t = 3$  s do  $t = 45$  s (na czerwono wyróżniono czasy stanów opisanych w podrozdziale 8.1.1)

Zmiany wartości  $u_{\max}$  prędkości przepływu centralnego wskazują na jego nieuporządkowany charakter. Przepływ ten zmienia wartości prędkości i kierunek w zależności od występowania i intensywności oddziaływania pozostałych przepływów wtórnych.

## 8.2 Modele o zmiennych proporcjach wymiarowych

Celem tej części badań była analiza wpływu stosunku proporcji wysokości napełnienia do średnicy zbiornika, ze względu na tworzenie się zawirowań wtórnych, a w szczególności wiru namywającego osad. Przeanalizowano także wpływ zawirowań wtórnych na warunki tworzenia się stożka osadu w centralnej strefie dna kadzi wirowo - osadowej na podstawie oceny sparametryzowanych zjawisk występowania całego systemu przepływów drugorzędowych.

Wymiary geometryczne modeli symulacyjnych o stałej średnicy i zmiennej objętości wirującego płynu przyjęto tak, aby były porównywalne z opisanym powyżej modelem podstawowym. W przypadku modeli o zmiennych proporcjach wymiarowych za stałą odniesienia, przyjęto objętość właściwą dla modelu podstawowego.

### 8.2.1 Modele o stałej średnicy zbiornika

Seria analizowanych modeli zakładała zmienną wysokość napełnienia zbiornika o stałej średnicy  $D = 640$  mm. Przeanalizowano ruch płynu w zbiorniku o wysokości napełnienia:

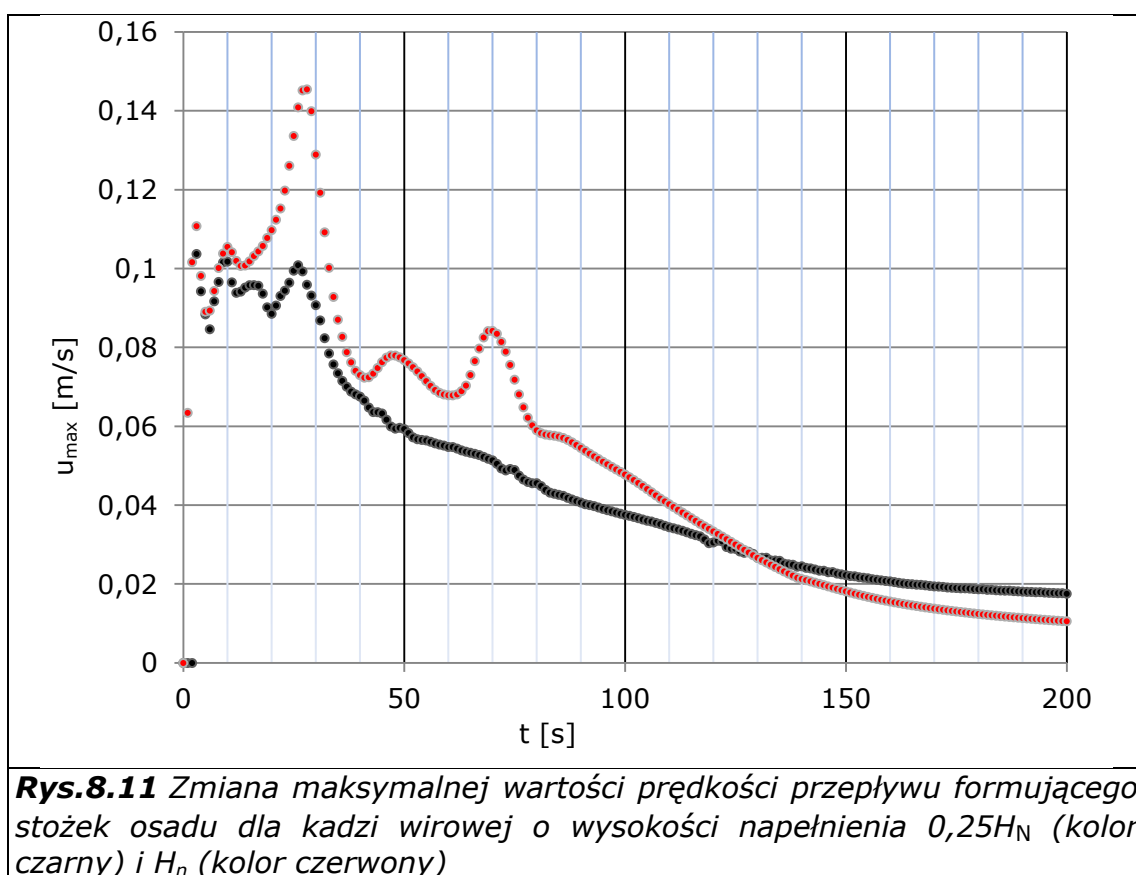
- a) 160 mm ( $H_n:D = 0,25$ );
- b) 320 mm ( $H_n:D = 0,5$ );
- c) 480 mm ( $H_n:D = 0,75$ );
- d) 640 mm ( $H_n:D = 1$ );
- e) 800 mm ( $H_n:D = 1,25$ );
- f) 960 mm ( $H_n:D = 1,5$ ).

Seria została zrealizowana w celu określenia wpływu objętości i wysokości słupa wirującego płynu na rozkład zawirowań, ich kształt i prędkości.

Pierwszym elementem analizy była ocena wpływu wysokości napełnienia zbiornika na formowanie się i rozkład prędkości przepływu namywającego stożek osadowy. Wykonano obliczenia dla całkowitego czasu wirowania płynu w zbiorniku cylindrycznym o smukłości napełnienia zgodnej z proporcjami przedstawionymi powyżej. Wyniki dla pierwszych 200 sekund wirowania zostały przedstawione na wykresach (rysunki od 8.11 do 8.15), na których porównano rozkład prędkości przepływu namywającego dla badanego napełnienia z rozkładem prędkości przepływu namywającego w modelu podstawowym.

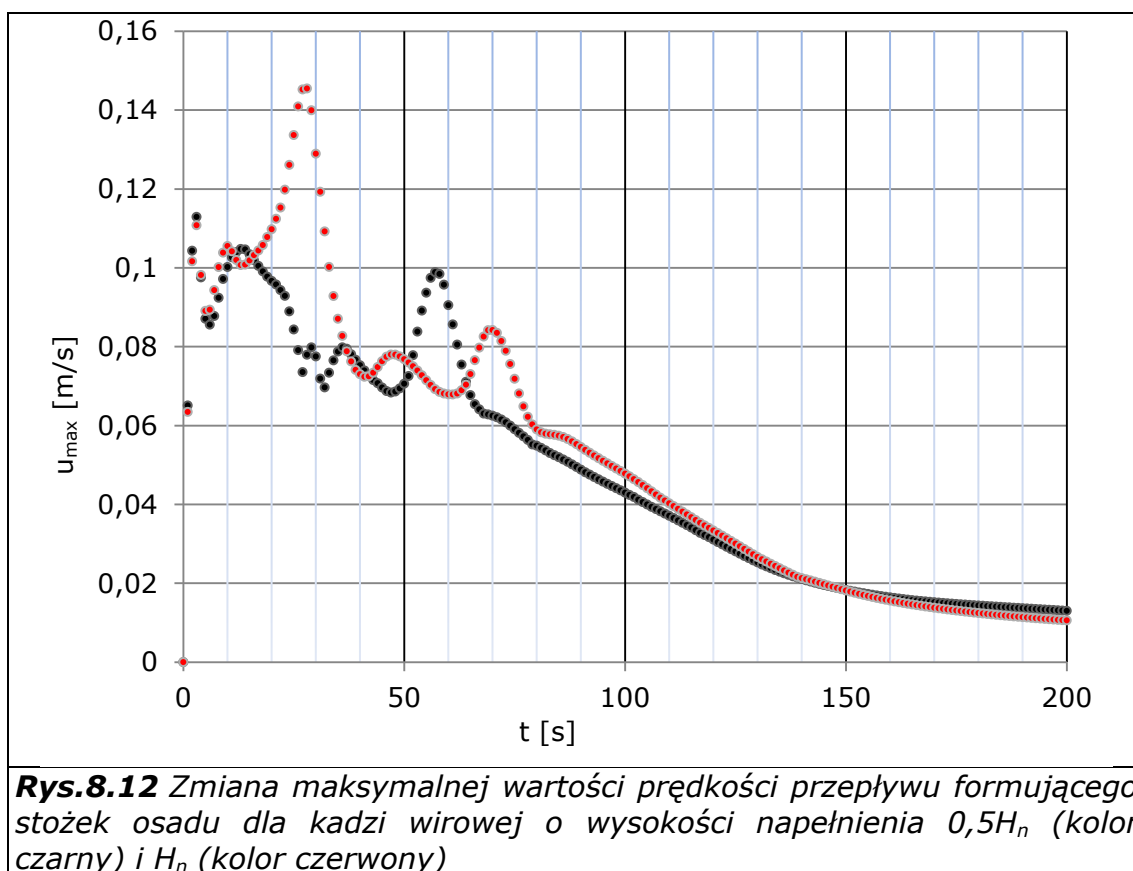
Rozkład prędkości na rysunku 8.11 dotyczy napełnienia o wysokości  $0,25 H_n$ . W odniesieniu do rozkładu w modelu podstawowym charakteryzuje się on dłuższym czasem formowania się przepływu. Przepływ dla tego napełnienia posiada niższą prędkość maksymalną stanowiącą  $0,6$  wartości  $u_{max}$  w modelu podstawowym. Czas występowania maksymalnej wartości prędkości jest zbliżony do czasu właściwego dla modelu podstawowego.

Charakterystycznym zjawiskiem dla rozkładu  $u_{\max}$  w modelu o wysokości napełnienia  $0,25 H_N$  jest brak występowania wzrostu prędkości pomiędzy 50 a 100 sekundą wirowania. Jest to związane z brakiem występowania zawirowań przyściennych, co może być konsekwencją znacznego ograniczenia aktywnej powierzchni hamowania na ścianach zbiornika dla tej wysokości napełnienia. Brak tych zawirowań wpływa ujemnie na formowanie stożka, ponieważ nie występuje efekt przemieszczania osadu z obszaru zbliżonego do ścianki w kierunku dna zbiornika, oraz nie występuje korzystne włączenie się zawirowań przyściennych do przepływu namywającego. Koniec rozpatrywanego przedziału czasu charakteryzuje się natomiast wyższą wartością prędkości maksymalnej przepływu namywającego, która stanowi 1,8 prędkości właściwej dla modelu podstawowego.



Rozkład wartości  $u_{\max}$  zawirowania namywającego dla wysokości napełnienia  $0,5 H_n$  został przedstawiony na rysunku 8.12. Wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego występuje wcześniej niż w przypadku modelu podstawowego. Wartość  $u_{\max}$  tego przepływu jest niższa i wynosi  $0,75$  wartości  $u_{\max}$  przepływu w modelu podstawowym, przy czym występowanie maksymalnej wartości prędkości przypada na przedział czasu właściwy dla formowania się przepływu namywającego. Także wcześniej występuje wzrost prędkości spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych oraz jego wyższa wartość  $u_{\max}$ , która stanowi  $1,2$  w odniesieniu do analogicznego zjawiska występującego w rozkładzie prędkości zawirowania namywającego dla

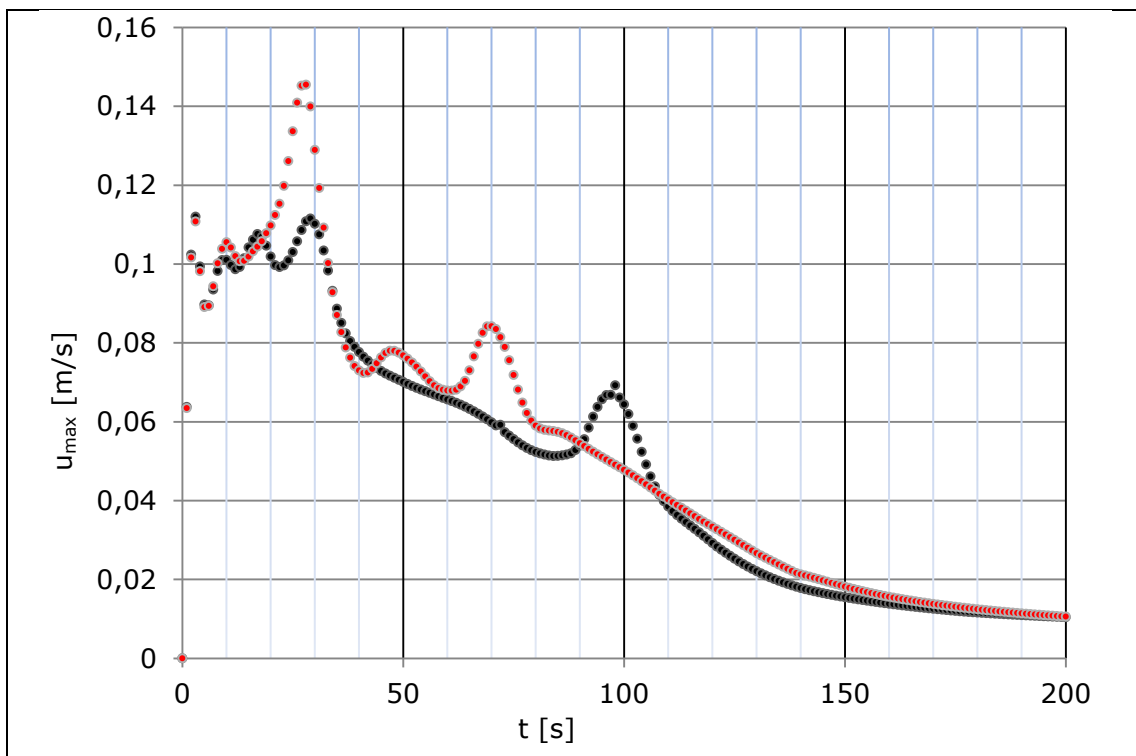
modelu podstawowego. Wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego dla czasu wirowania  $t = 200$  s są w obu przypadkach do siebie zbliżone.



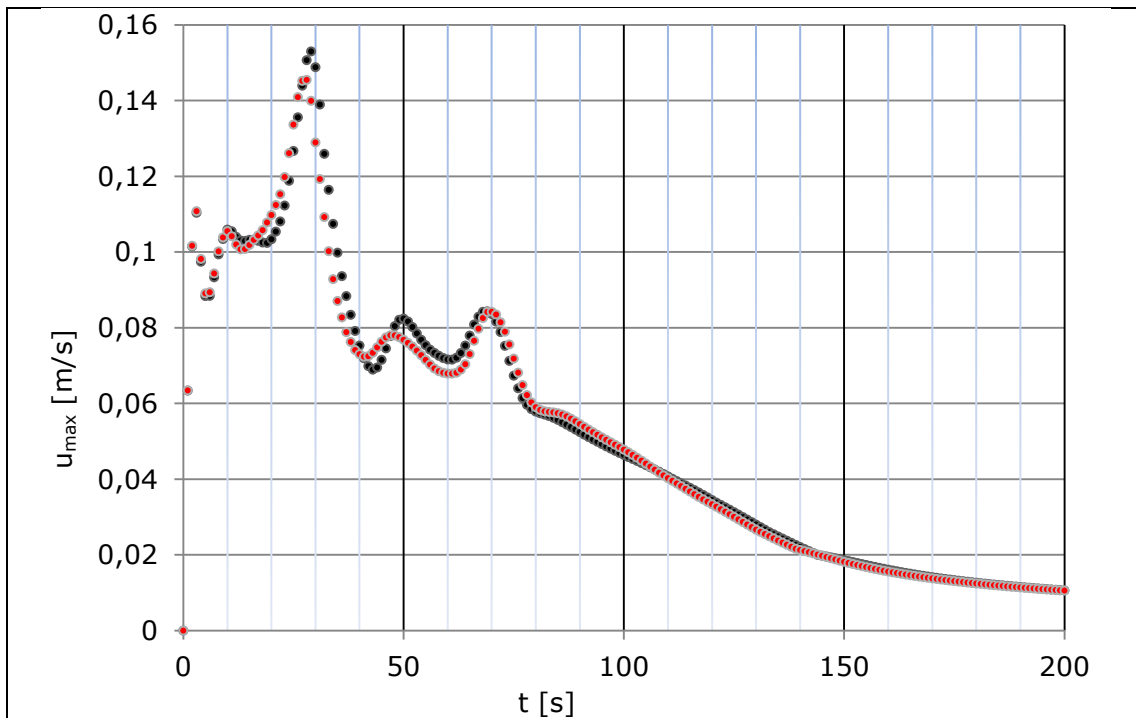
**Rys.8.12** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o wysokości napełnienia  $0,5H_n$  (kolor czarny) i  $H_n$  (kolor czerwony)

Dla wysokości napełnienia  $0,75 H_n$  rozkład  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek osadu (rys. 8.13) charakteryzuje się także niższą wartością kulminacyjną, która stanowi  $0,7$  wartości maksymalnej dla przepływu w modelu podstawowym. Czas występowania wartości maksymalnej jest zbliżony w obu przypadkach. Wzrost prędkości spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych występuje natomiast później (po czasie wirowania  $t = 85$  s), niż w przepływie dla modelu podstawowego, przy czym jego wartość  $u_{\max}$  jest niższa i stanowi około  $0,79$  analogicznej wartości  $u_{\max}$  dla modelu podstawowego. Dla czasu wirowania  $t = 200$  s oba rozkłady ustalają się na jednakowym poziomie wartości  $u_{\max}$ .

Charakterystyka rozkładu prędkości dla wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  (rys. 8.14) jest zbliżona zasadniczo do charakterystyki rozkładu uzyskanego dla modelu podstawowego. Dla wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  występuje wyższa wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  dla czasu zbliżonego do czasu występowania analogicznego zjawiska w rozkładzie dla modelu podstawowego. Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  stanowi  $1,05$  analogicznej wartości  $u_{\max}$  uzyskanej dla modelu podstawowego. Występują także nieznacznie wyższe wartości  $u_{\max}$  pomiędzy  $45$  a  $70$  sekundą wirowania. Powyżej czasu wirowania  $t = 140$  s oba rozkłady pokrywają się.

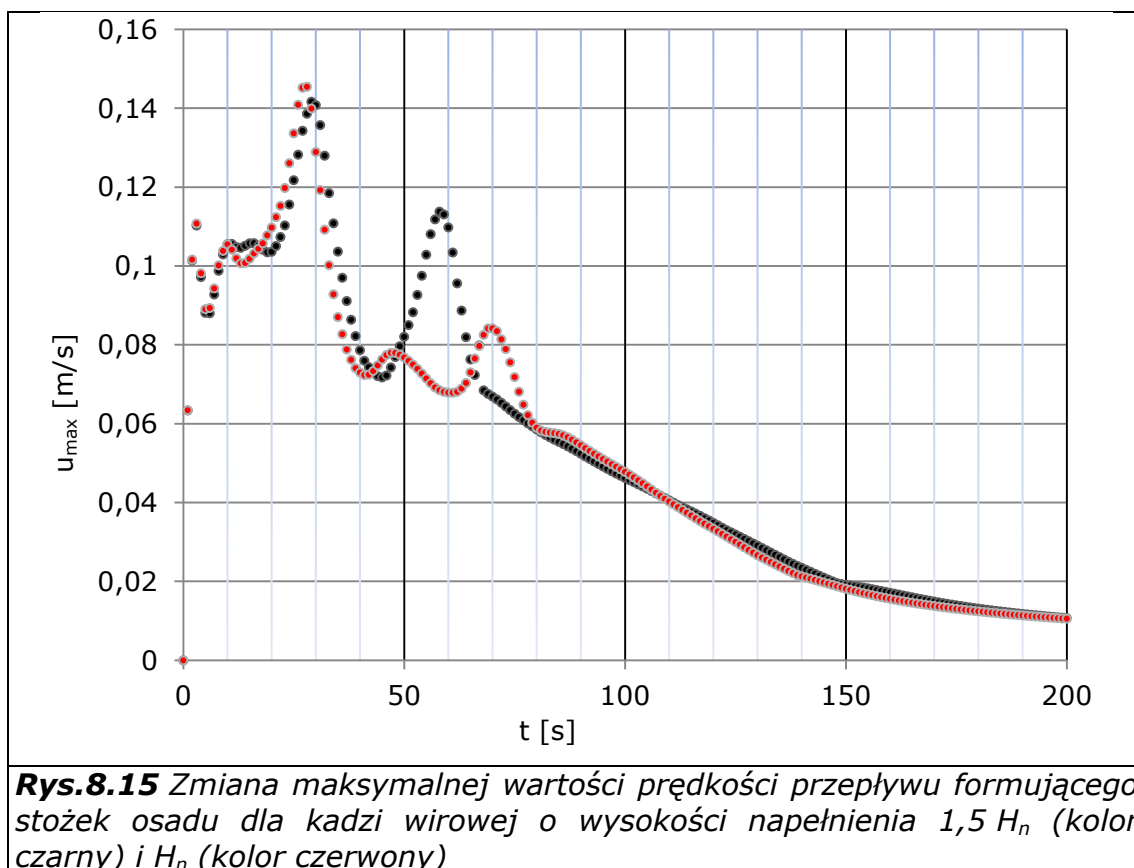


**Rys.8.13** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o wysokości napełnienia  $0,75 H_n$  (kolor czarny) i  $H_n$  (kolor czerwony)



**Rys.8.14** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  (kolor czarny) i  $H_n$  (kolor czerwony)

Ostatnim analizowanym rozkładem jest rozkład prędkości przepływu namywającego stożek osadowy dla wysokości napełnienia  $1,5 H_n$  (rys. 8.15). Dla tej wysokości napełnienia wartość  $u_{max}$  jest zbliżona do wartości właściwej dla modelu podstawowego i występuje w czasie  $t = 29$  s. Wzrost prędkości spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych występuje wcześniej (pomiędzy 40 a 65 sekundą wirowania) i posiada znacznie większą wartość  $u_{max}$ , która stanowi 1,40 analogicznej wartości  $u_{max}$  w modelu podstawowym. Powyżej czasu wirowania  $t = 80$  s oba rozkłady wartości  $u_{max}$  są do siebie zbliżone.



W dalszej części przeanalizowane zostały zjawiska charakterystyczne dla pozostałych przepływów w modelach o zmiennej wysokości napełnienia. Dla porównania zestawiono je z danymi dotyczącymi przepływu formującego stożek osadowy. Charakterystyczne parametry stanu zawirowań dla modeli o zmiennej objętości i zmiennej wysokości napełnienia zestawiono w tabeli 8.01. Analiza stanu zawirowań została przeprowadzona na podstawie map pól prędkości przepływów w pełni uformowanych.

Zawirowania przyścienne formują się pomiędzy 10 a 30 sekundą wirowania. Zanikają pomiędzy 80 a 110 sekundą. Występujące najdłużej zostały zidentyfikowane dla napełnienia o wysokości  $1,5 H_n$ . Ilość par zawirowań ( $q$ ) wzrasta wraz z wzrostem wysokości napełnienia. Dla wysokości  $1,5 H_n$  stwierdzono występowanie sześciu uformowanych par. Zawirowania te nie zostały zidentyfikowane w przypadku mapy pola prędkości dla modelu

o wysokości napełnienia  $0,25 H_n$ . Zawirowania przyścienne osiągają najwyższą wartość prędkości w najkrótszym czasie dla wysokości napełnienia  $1 H_n$ . Najwyższą wartość prędkości osiągają one dla wysokości napełnienia  $0,75 H_n$ . Oddziaływanie zawirowań przyściennych powoduje przeniesienie sedymentujących cząstek osadu od obszaru zbliżonego do ściany zbiornika w kierunku jego centralnej części. Wobec powyższego najkorzystniejszym jest ich najliczniejsze występowanie o jak najwyższej prędkości. Takie warunki zostają spełnione dla wysokości napełnienia od  $0,75$  do  $1,5 H_n$ .

**Tab.8.01** Charakterystyka systemu przepływów drugorzędowych dla modeli o zmiennej wysokości i objętości napełnienia

zjawisko	parametr	Smukłość $H_n:D$ i objętość $V_N$ [ $m^3$ ]					
		0,25 (0,051)	0,5 (0,102)	0,75 (0,153)	<b>1</b> <b>(0,205)</b>	1,25 (0,256)	1,5 (0,307)
przepływ namywający	$u_{max}$ [m/s]	0,10087	0,10342	0,11152	<b>0,1454</b>	1,5297	1,4167
	$t_{w,max}$ [s]	26	15	29	<b>28</b>	29	29
zawirowania przyścienne	$u_{max}$ [m/s]	-	0,15429	0,16392	<b>0,1789</b>	0,1538	0,1478
	$t_{w,max}$ [s]	-	25	26	<b>21</b>	30	33
	q	-	2	3	<b>4</b>	4	6
przepływ centralny	$u_{max}$ [m/s]	0,10154	0,10365	0,0887	<b>0,1243</b>	0,1023	0,08378
	$t_{ap.}$ [s]	15	17	23	<b>27</b>	31	34

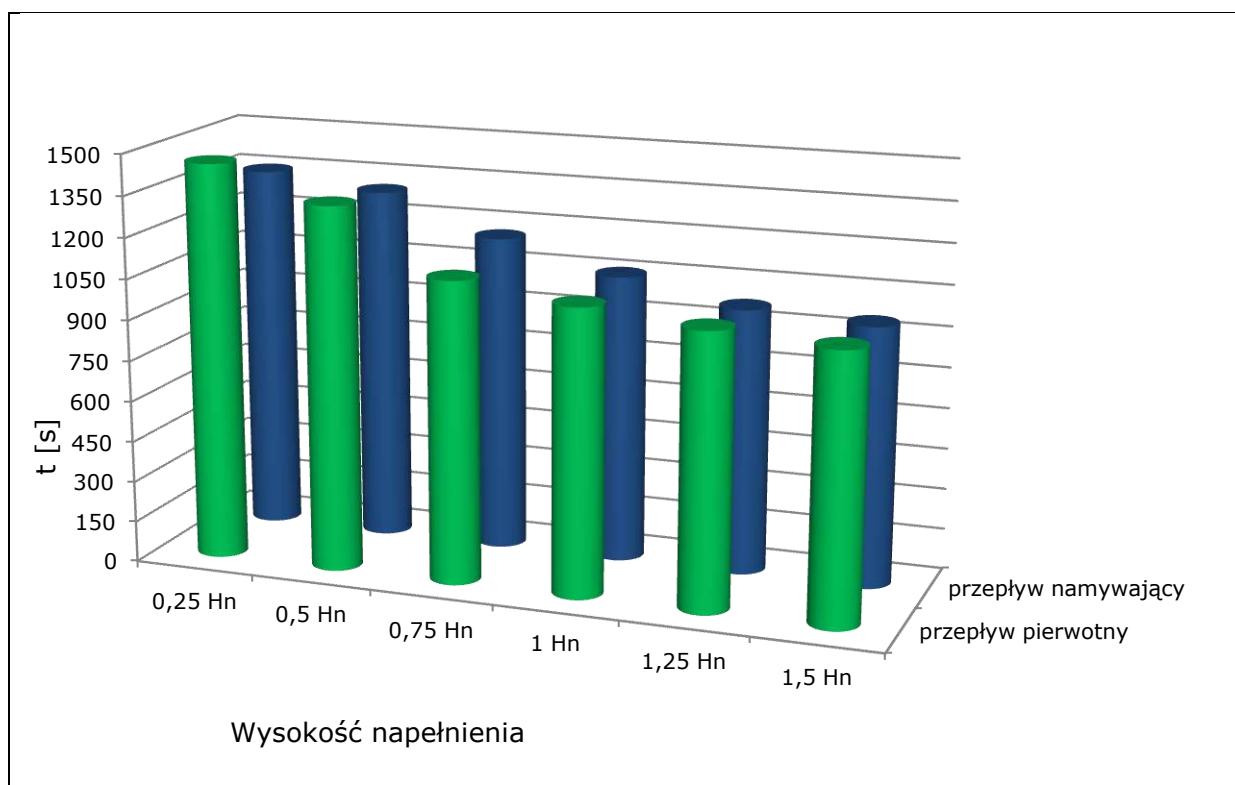
Przepływ centralny formuje się, w analizowanych modelach, pomiędzy 10 i 30 sekundą wirowania. Stopień wysokości napełnienia decyduje o jego wcześniejszym uformowaniu się, co ma miejsce w modelach o wysokości napełnienia poniżej  $1 H_n$ . Po uformowaniu się, przepływ ten występuje do końca trwania całkowitego czasu wirowania. Najwyższą prędkość osiąga dla nalewu właściwego dla modelu podstawowego. Ponieważ kierunek jego oddziaływania jest dla tego okresu czasu przeciwny do kierunku sedymentacji cząstek osadu, jest on uznawany za niekorzystnie oddziaływujący na zjawisko formowania się stożka osadowego. Wobec powyższego najkorzystniejsze (najmniejsze) wartości prędkości tego przepływu występują dla wysokości napełnienia  $0,75$  i  $1,5 H_n$ .



Ostatnim elementem analizy było porównanie całkowitego czasu wirowania. Tak jak w przypadku analizy weryfikacji czasu wirowania dla poszczególnych wysokości napełnienia przyjęto kryteria końca wirowania w oparciu o spadek wartości  $u_{\max}$  dla przepływu pierwotnego poniżej 0,005 m/s oraz wartości  $u_{\max}$  dla przepływu formującego stożek poniżej 0,001 m/s. Porównanie czasu końca wirowania dla omawianej grupy modeli zostało zestawione w tabeli 8.02 i przedstawione na rysunku 8.16.

**Tab.8.02** Zestawienie czasu końca wirowania dla modeli o zmiennej wysokości napełnienia  $H_n$  i stałej średnicy  $D$

wysokość napełnienia	czas zakończenia wirowania	
	t [s] dla $u_{\max}$ pp	t [s] dla $u_{\max}$ pw
0,25 $H_n$	1457	1349
0,5 $H_n$	1337	1301
0,75 $H_n$	1106	1162
1 $H_n$	1049	1056
1,25 $H_n$	1006	974
1,5 $H_n$	980	952



**Rys.8.16** Porównanie czasu zakończenia wirowania według kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego (kolor zielony) i przepływu namywającego stożek osadowy (kolor niebieski) w modelach o zmiennej wysokości napełnienia

W przypadku przepływu pierwotnego i namywającego, czas końca wirowania zmniejsza swoją wartość wraz ze wzrostem wartości wysokości napełnienia.

Wysokości napełnienia 0,25 i 0,5  $H_n$  charakteryzują się wyższym czasem końca wirowania dla przepływu pierwotnego w odniesieniu do czasu końca wirowania dla przepływu wtórnego namywającego stożek. Wysokości napełnienia 0,75 i 1  $H_n$  posiadają czasy o większej wartości dla przepływu namywającego w stosunku do czasu końca wirowania dla przepływu pierwotnego. Wysokości napełnienia powyżej  $H_n$  posiadają porównywalne wartości czasów końca wirowania dla obu analizowanych przepływów.

### 8.2.2 Modele o stałej objętości nalewu

Druga seria zrealizowana została dla modeli o stałej objętości wirującego płynu  $V \approx 0,205 \text{ m}^3$ , zmiennej średnicy  $D$  i zmiennych wysokościach  $H_N$ . Zbudowano modele zgodne z proporcjami wymiarowymi  $H_N:D$ :

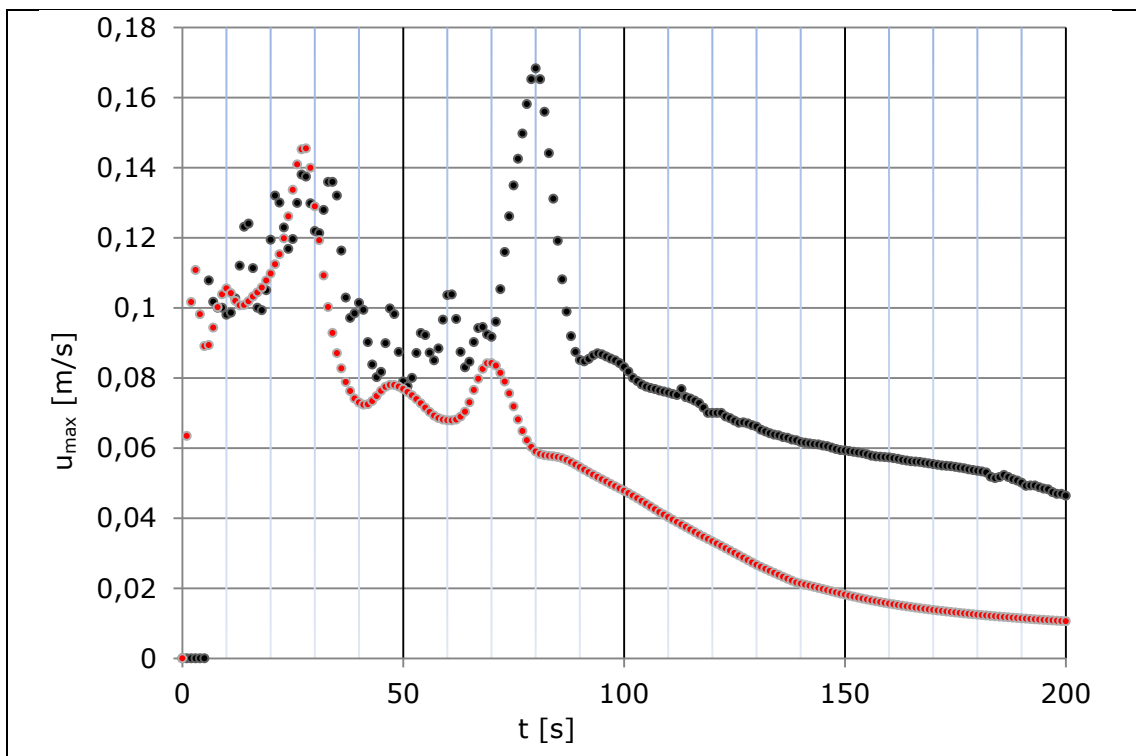
- a) 0,25;
- b) 0,5;
- c) 0,75;
- d) 1;
- e) 1,25;
- f) 1,5.

Płyn wirujący posiadał następujące wymiary  $H_N$  i  $D$ :

- a)  $H_N = 250 \text{ mm}$ ,  $D = 1\ 000 \text{ mm}$ ;
- b)  $H_N = 400 \text{ mm}$ ,  $D = 800 \text{ mm}$ ;
- c)  $H_N = 530 \text{ mm}$ ,  $D = 700 \text{ mm}$ ;
- d)  $H_N = 640 \text{ mm}$ ,  $D = 640 \text{ mm}$ ;
- e)  $H_N = 750 \text{ mm}$ ,  $D = 590 \text{ mm}$ ;
- f)  $H_N = 840 \text{ mm}$ ,  $D = 560 \text{ mm}$ .

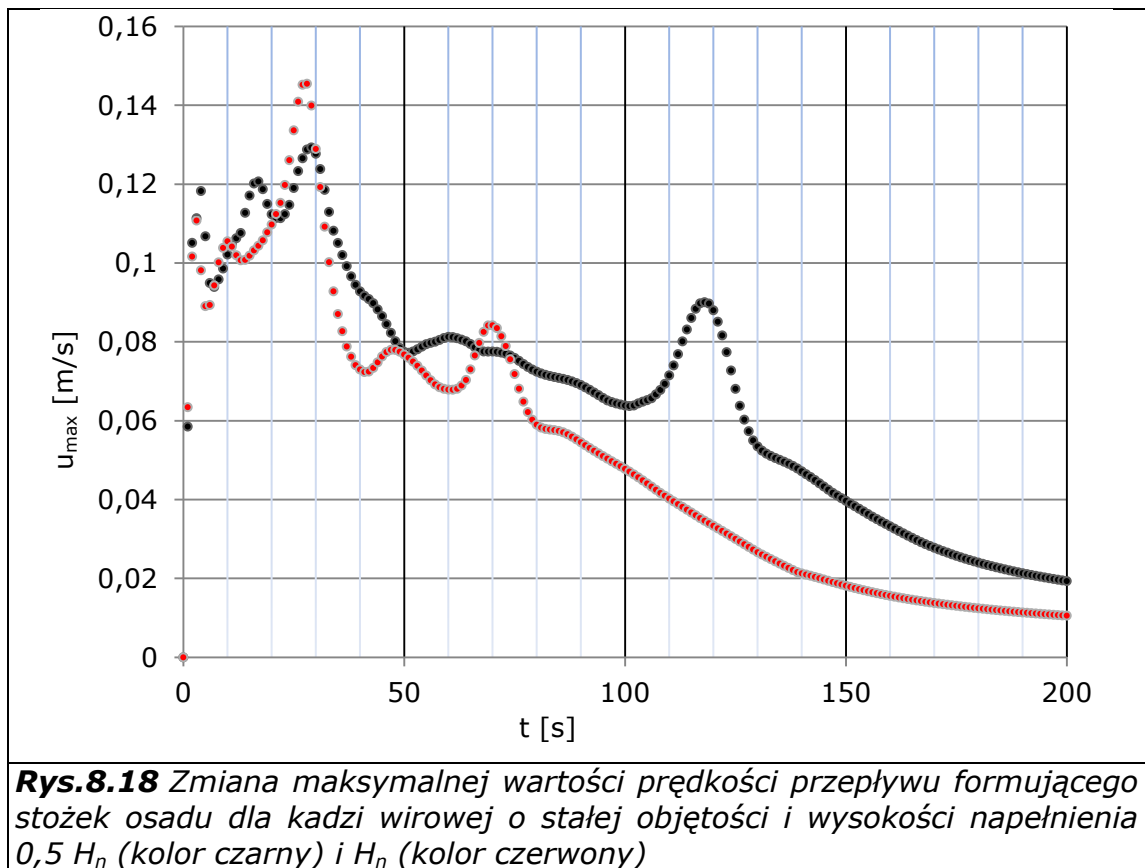
Tak jak w poprzedniej serii modeli pierwszym analizowanym parametrem wirowania była analiza zmian rozkładu wartości  $u_{\max}$  dla przepływu formującego stożek osadowy. Rozkłady prędkości dla tego przepływu zostały przedstawione na rysunkach od 8.17 do 8.21.

Rozkład prędkości przepływu formującego stożek osadowy przedstawiony na rysunku 8.17 dotyczy modelu o wysokości napełnienia 0,25  $H_n$ . Porównując go z rozkładem w modelu podstawowym charakteryzuje się on dłuższym czasem koniecznym do uformowania się przepływu. Dopiero po czasie wirowania  $t = 70 \text{ s}$  przepływ stabilizuje się osiągając wartość maksymalną w czasie wirowania  $t = 80 \text{ s}$ , a więc znacznie później niż w przypadku rozkładu prędkości dla modelu podstawowego. Skok wartości prędkości w analizowanym rozkładzie stanowi odpowiednik analogicznego zjawiska występującego pomiędzy przedziałem czasowym wirowania ( $t = 50 \text{ s}$  do  $t = 100 \text{ s}$ ) w modelu podstawowym, przy czym można zidentyfikować znacznie wyższą jego wartość  $u_{\max}$  niż w przypadku modelu podstawowego. Przepływ dla tego napełnienia posiada wyższą prędkość maksymalną w pozostałym rozpatrywanym przedziale czasowym. Dla czasu wirowania  $t = 200 \text{ s}$  wartość  $u_{\max}$  analizowanego przepływu stanowi ponad czterokrotność wartości  $u_{\max}$  dla modelu podstawowego.

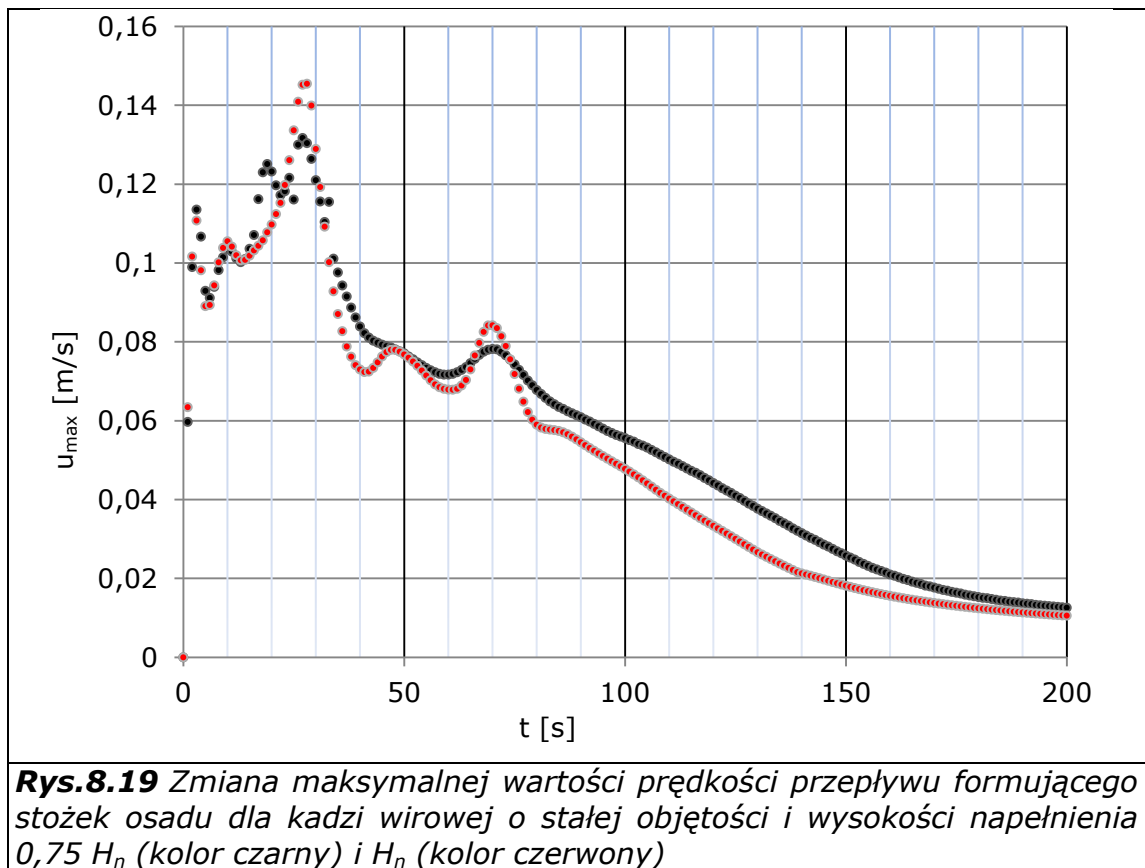


**Rys.8.17** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o stałej objętości i wysokości napełnienia  $0,25 H_n$  (kolor czarny) i  $H_n$  (kolor czerwony)

Na rysunku 8.18 został przedstawiony rozkład prędkości maksymalnej przepływu namywającego stożek dla wysokości napełnienia  $0,5H_n$ . Dla tej wysokości prędkość maksymalna zawirowającego występuje na samym początku wirowania, przy czym rozpatrywana wartość  $u_{max}$  występuje po ustabilizowaniu się przepływu, a więc w czasie zbliżonym do czasu występowania wartości  $u_{max}$  dla przepływu w modelu podstawowym. Wartość  $u_{max}$  jest jednak mniejsza, niż w przypadku wartości  $u_{max}$  w modelu podstawowym. Po czasie wirowania  $t = 30$  s można zidentyfikować wyższe wartości  $u_{max}$  dla analizowanego rozkładu, niż występujące w przypadku rozkładu  $u_{max}$  dla modelu podstawowego. Charakterystycznym zjawiskiem dla tego rozkładu jest występowanie wzrostu wartości  $u_{max}$  pomiędzy 100 a 130 sekundą wirowania, czyli znacznie później niż w przypadku analogicznego zjawiska występującego w rozkładzie wartości  $u_{max}$  właściwym dla modelu podstawowego. Dla końcowej wartości rozpatrywanego przedziału czasowego wartość  $u_{max}$  rozkładu prędkości dla analizowanej wysokości napełnienia posiada około dwukrotnie większą wartość  $u_{max}$ , niż dla przepływu w modelu podstawowym.

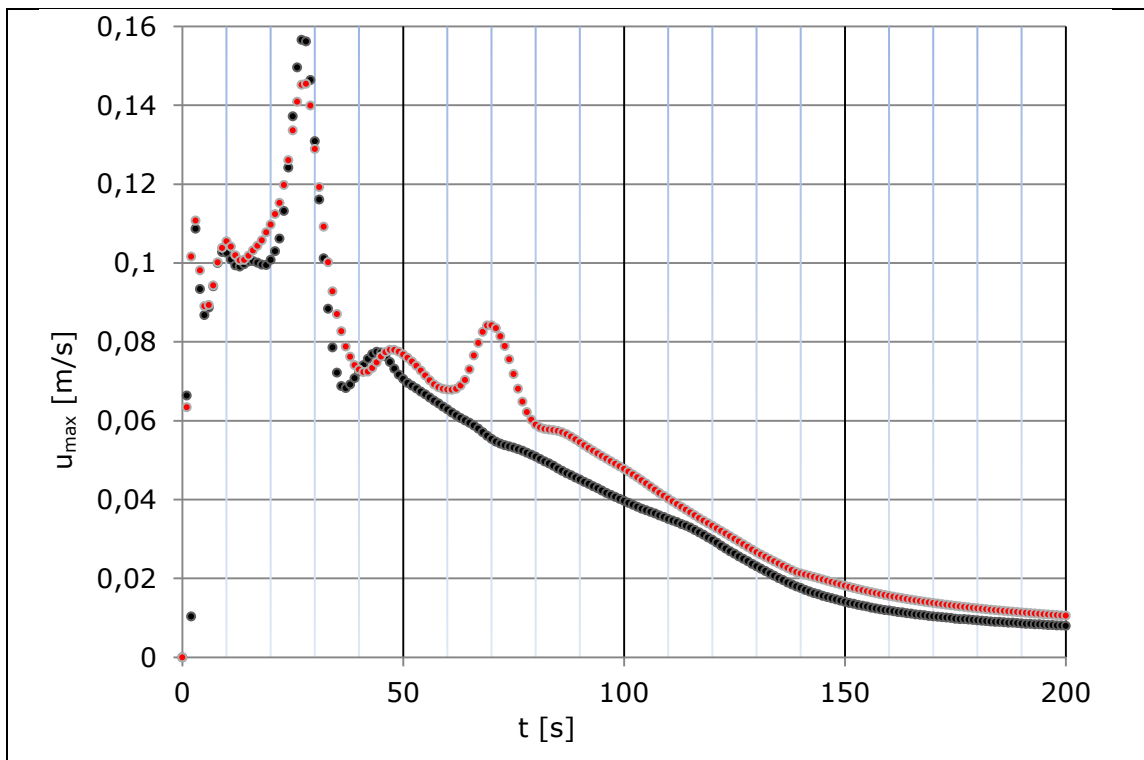


Dla wysokości napełnienia  $0,75 H_n$  rozkład  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek osadu (rys. 8.19) jest zbliżony do rozkładu  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek w modelu podstawowym. Występują jedynie niewielkie różnice wynikające z dłuższego okresu czasu koniecznego do pełnego uformowania się przepływu. Posiada on nieznacznie niższą wartość  $u_{\max}$  w stosunku do wartości  $u_{\max}$  w modelu podstawowym. Pomiedzy 30 i 65 sekundą oraz 75 i 200 wartość prędkości posiada nieznacznie większą wartość niż wartość  $u_{\max}$  dla modelu podstawowego w analogicznych przedziałach czasowych. Dla czasu występowania wzrostu prędkości wynikającej z oddziaływania zawirowań przyściennych, wartość  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek osadu w modelu o wysokości napełnienia  $0,75 H_n$ , jest niższa o około  $0,15$  wartości  $u_{\max}$  przepływu w modelu podstawowym.

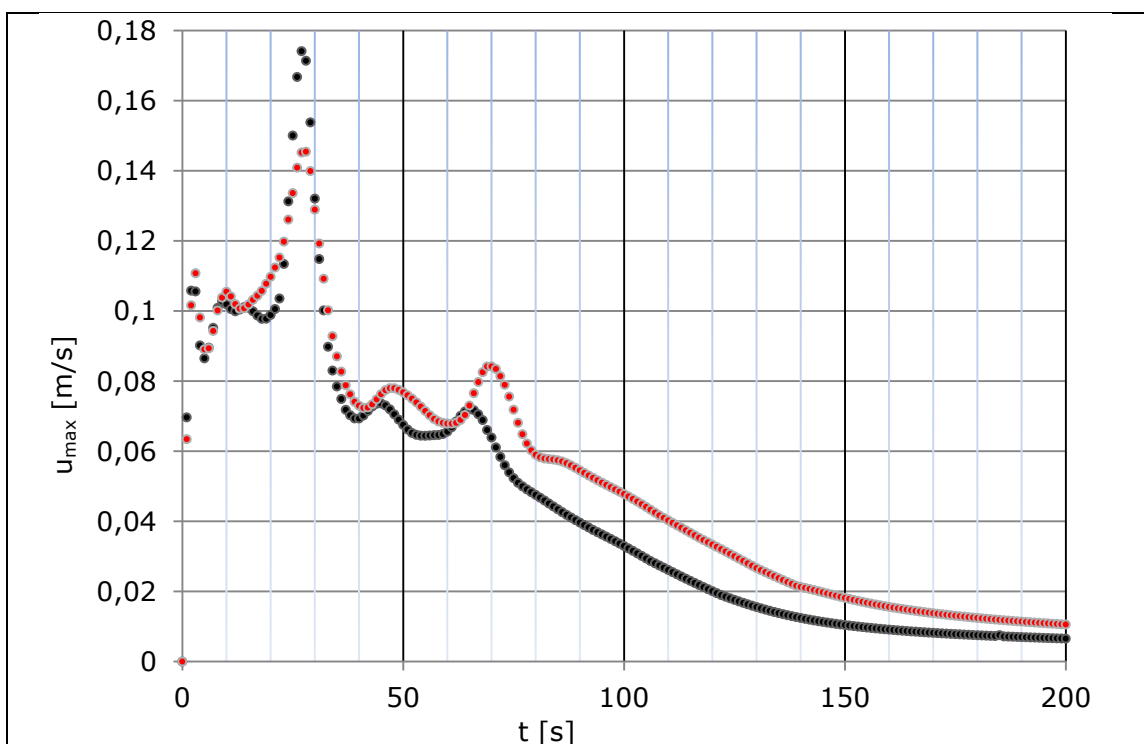


Rozkład wartości  $u_{\max}$  dla modelu o wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  (rys. 8.20) jest zbliżony do rozkładu dla wysokości  $1 H_n$  w przedziale czasowym właściwym dla formowania się przepływu namywającego stożek osadowy. Przepływ namywający osiąga wyższą wartość kulminacyjną prędkości w porównaniu do rozkładu właściwego dla modelu podstawowym. Charakterystyczny jest natomiast brak występowania wzrostu prędkości pomiędzy 60 a 80 sekundą wirowania. Od 45 sekundy wartość  $u_{\max}$  dla przepływu formującego stożek osadowy jest niższa niż wartość  $u_{\max}$  dla przepływu w modelu podstawowym.

Ostatni analizowanym rozkład, to rozkład prędkości przepływu namywającego stożek osadowy dla modelu o wysokości napełnienia  $1,5 H_n$  (rys. 8.21). Dla tej wysokości napełnienia charakterystyka rozkładu wartości  $u_{\max}$  jest zbliżona do wartości właściwej dla modelu podstawowego. Przepływ namywający w tym modelu osiąga wyższą wartość kulminacyjną  $u_{\max}$ , niż w modelu podstawowym. Od 65 sekundy, w której występuje wzrost wartości  $u_{\max}$  spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych, można zaobserwować niższe wartości prędkości przepływu formującego stożek osadowy, w odniesieniu do tego samego przepływu w modelu podstawowym.



**Rys.8.20** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o stałej objętości i wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  (kolor czarny) oraz  $H_n$  (kolor czerwony)



**Rys.8.21** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o stałej objętości i wysokości napełnienia  $1,5 H_n$  (kolor czarny) oraz  $H_n$  (kolor czerwony)

Kolejnym etapem analizy było opracowanie i zestawienie wartości maksymalnych parametrów charakterystycznych dla pozostałych przepływów w modelach o stałej objętości i zmiennych wysokościach napełnienia oraz zmiennych średnicach zbiornika. Dane te zestawiono z danymi dotyczącymi przepływu formującego stożek osadowy. Charakterystyczne parametry stanu przepływów wtórnych dla tej grupy modeli zestawiono w tabeli 8.04. Analiza stanu została przeprowadzona na podstawie wektorowych map pola prędkości przepływów w pełni uformowanych.

**Tab.8.04** Charakterystyka systemu przepływów drugorzędowych dla modeli o stałej objętości, zmiennej wysokości napełnienia i zmiennej średnicy

Zjawisko	parametr	Smukłość H:D ( $V_N$ )					
		0,25 (0,205)	0,5 (0,205)	0,75 (0,205)	<b>1</b> <b>(0,205)</b>	1,25 (0,205)	1,5 (0,205)
Przepływ namywający	$u_{\max}$ [m/s]	0,1683	0,1289	0,1336	<b>0,1454</b>	0,1566	0,1741
	$t_{w.\max}$ [s]	80	30	25	<b>28</b>	28	27
Zawirowania przyścienne	$u_{\max}$ [m/s]	-	0,1182	0,1212	<b>0,1789</b>	0,1692	0,1568
	$t_{w.\max}$ [s]	-	30	28	<b>21</b>	23	25
	q	-	2	4	<b>4</b>	4	6
Przepływ centralny	$u_{\max}$ [m/s]	0,0708	0,0655	0,0973	<b>0,1243</b>	0,1326	0,1219
	$t_{ap.}$ [s]	22	27	29	<b>27</b>	33	41

Zawirowania przyścienne w tej grupie modeli formują się w przedziale czasowym wirowania od  $t = 10$  s do  $t = 50$  s, a zanikają pomiędzy 80 a 110 sekundą wirowania. Najdłużej trwające zostały zidentyfikowane dla napełnienia o wysokości  $1,25 H_n$ . Ilość par zawirowań wzrasta wraz ze wzrostem wysokości napełnienia dla kolejnych modeli. Dla wysokości napełnienia  $1,5 H_n$  ich liczba jest największa. Zawirowania te nie zostały zidentyfikowane w przypadku mapy pola prędkości dla modelu o wysokości napełnienia  $0,25 H_n$ . Zawirowania przyścienne osiągają najwyższą wartość prędkości w najkrótszym czasie dla wysokości napełnienia zadeklarowanego w modelu podstawowym. Po pełnym uformowaniu się osiągają najwyższą wartość prędkości dla modeli o wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  i  $1,5 H_n$ . Dla modelu podstawowego oraz modelu o wysokości napełnienia  $1,25 H_n$  wartości kulminacyjne  $u_{\max}$  zawirowań przyściennych są wyższe

od kulminacyjnej wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego stożek osadowy. Najkorzystniejsze występowanie zjawiska zawirowań przyściennych zostało zidentyfikowane dla modeli o  $H_n > 1$ .

Przepływ centralny, w analizowanej grupie modeli, formuje się pomiędzy  $t = 10$  s a  $t = 25$  s czasu wirowania. Także w tym przypadku stopień wysokości napełnienia decyduje o jego wcześniejszym uformowaniu się dla  $H_n > 1$ . Przepływ centralny osiąga niższe wartości kulminacyjne  $u_{\max}$  dla wysokości napełnienia poniżej  $1 H_n$ . Ze względu na jego charakter utrudniający gromadzenie osadu w centralnej części dna naczynia, najmniej korzystny przepływ centralny występuje dla wysokości napełnienia powyżej  $1 H_n$ . Najkorzystniejsza (najmniejsza) wartość prędkości tego przepływu występuje dla wysokości  $0,5 H_n$  i stanowi w przybliżeniu  $0,5$  wartości kulminacyjnej  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek.

Ostatnim elementem analizy tej grupy modeli było porównanie całkowitego czasu wirowania w oparciu o kryteria spadku wartości  $u_{\max}$  dla przepływu pierwotnego poniżej wartości  $0,005$  m/s oraz  $u_{\max}$  dla przepływu formującego stożek poniżej wartości  $0,001$  m/s. Porównanie czasu końca wirowania dla mawianych modeli zostało zestawione w tabeli 8.04 i przedstawione na rysunku 8.22.

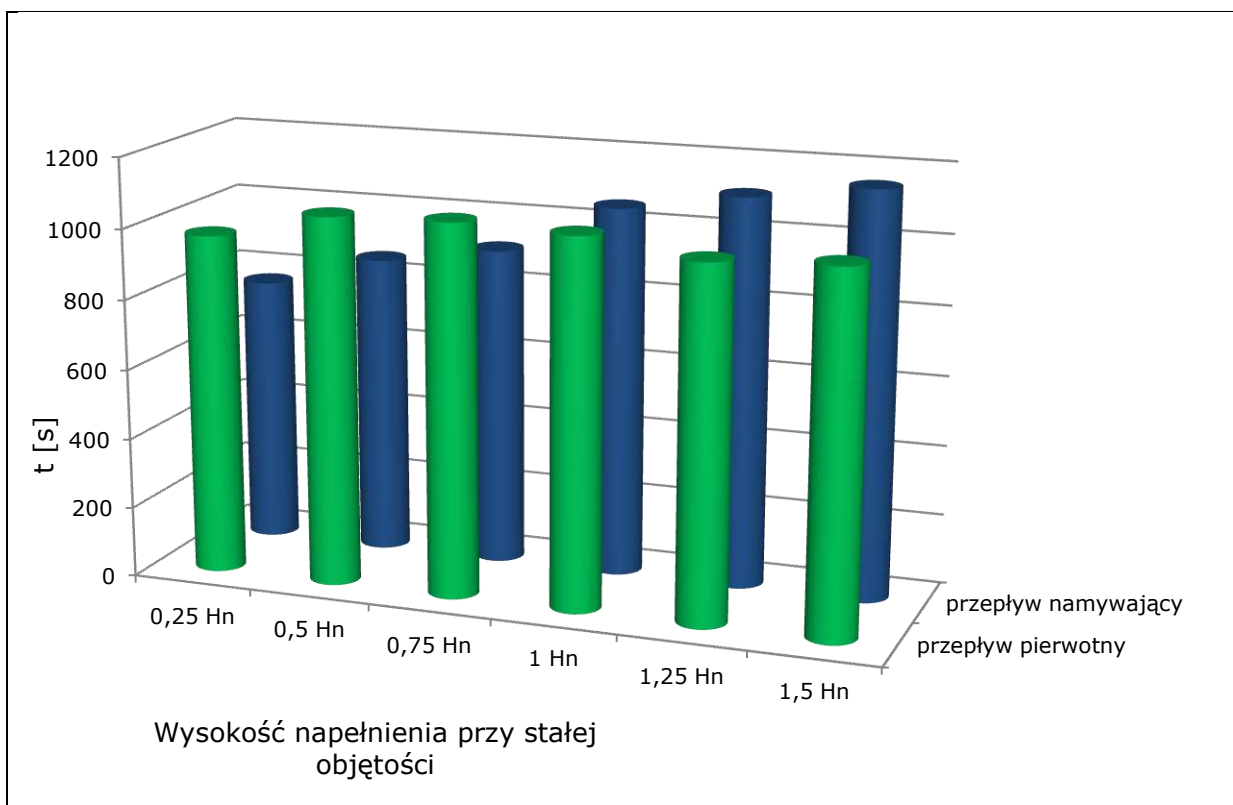
**Tab.8.04** Zestawienie kroków czasowych końca wirowania dla modeli o stałej objętości, zmiennej wysokości napełnienia i zmiennym  $D$  zbiornika.

wysokość napełnienia	czas zakończenia wirowania	
	t [s] dla $u_{\max}$ pp	t [s] dla $u_{\max}$ pw
0,25 $H_n$	973	764
0,5 $H_n$	1051	857
0,75 $H_n$	1060	911
1 $H_n$	1049	1056
1,25 $H_n$	1005	1111
1,5 $H_n$	1021	1156

Czas końca wirowania dla kryterium  $u_{\max}$  pp  $< 0,005$  m/s w analizowanej grupie modeli utrzymuje się zasadniczo na stałym poziomie. Dla modeli o wysokości napełnienia  $0,25 H_n$  i  $1,25 H_n$  przepływ pierwotny osiąga kryterium końca wirowania najwcześniej. W pozostałych przypadkach czas końca wirowania jest utrzymany w granicach od 950 do 1080 sekund. Najdłuższy czas wirowania dla kryterium przepływu pierwotnego osiąga model o wysokości napełnienia  $0,75 H_n$ .

Czas końca wirowania ze względu na kryterium  $u_{\max}$  pw  $< 0,001$  m/s, wzrasta wraz z wysokością napełnienia. Najkrótszy czas został osiągnięty dla wysokości napełnienia  $0,25 H_n$ , a najdłuższy dla modelu o wysokości napełnienia  $1,5 H_n$ .





**Rys.8.22** Porównanie czasu zakończenia wirowania według kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego (kolor zielony) i przepływu namywającego stożek osadowy (kolor niebieski) w modelach o zmiennej wysokości napełnienia i stałej objętości

Ze względu na przyjęte kryteria końca wirowania najkorzystniejsze, dla analizowanej grupy modeli są więc wysokości napełnienia  $H_n > 1$ , dla których przepływ pierwotny wygasa najszybciej, a przepływ namywający utrzymuje się najdłużej.

### 8.3 Modele o zmodyfikowanej geometrii dna zbiornika

Kolejną grupą analizowanych modeli są modele płynu wirującego o stałej objętości, wysokości napełnienia, odpowiadającej wysokości napełnienia nominalnego  $H_n$  oraz średnicy  $D$  odpowiadającej średnicy w modelu podstawowym. Podczas analizy badano przepływ płynu w zbiornikach o zmodyfikowanym połączeniu pobocznic i dna zbiornika. W ramach modyfikacji połączenia pobocznic i dna zbiornika przeanalizowano dwie grupy modeli: modele o zaokrąglonym połączeniu oraz modele o stożkowym kształcie połączenia pobocznic i dna określone jako tzw. połączenie sfazowane. Celem tej części analizy symulacyjnej było określenie wpływu rozwiązania konstrukcyjnego połączenia pobocznic i dna zbiornika oraz kształtu samego dna na warunki formowania się przepływu namywającego stożek osadu oraz warunki formowania się pozostałych przepływów wchodzących w skład systemu zawirowań wtórnych, występujących w przepływie płynu w zbiorniku whirlpoola.

### 8.3.1 Zaokrąglone połączenie poboczniczy i dna zbiornika

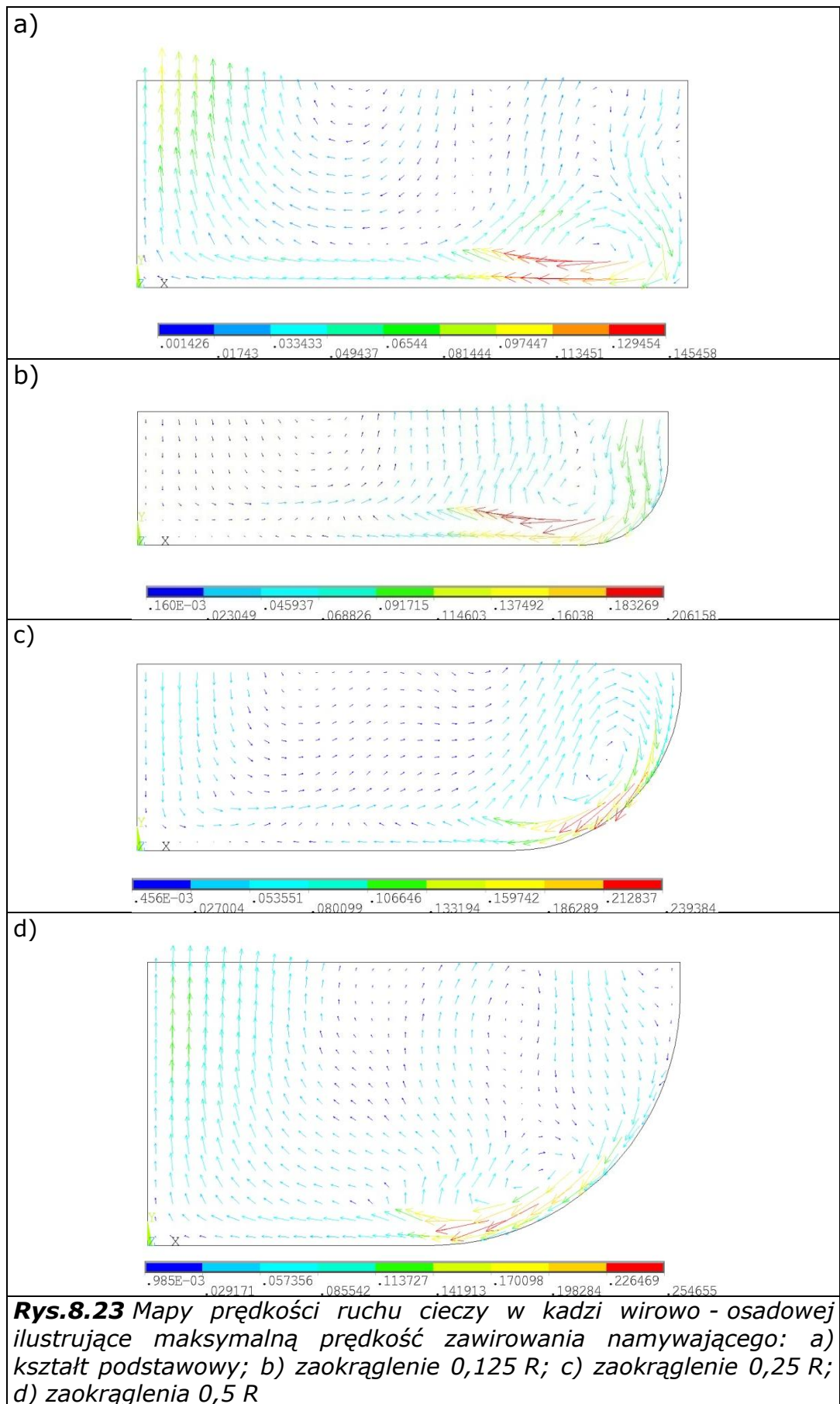
Przedmiotem tej części badań była symulacja ruchu płynu w modelach o zaokrąglonym połączeniu dna i poboczniczy zbiornika. Poszczególne modele posiadały zaokrąglenia o promieniu:  $0,125 R$ ;  $0,25 R$ ;  $0,5 R$ . Kształty połączenia zostały przedstawione na rysunku 8.23.

Przeanalizowano wyniki symulacji określając wpływ występowania zaokrąglenia na obszar formowania się przepływu namywającego, prędkość maksymalną przepływu namywającego, prędkość maksymalną występujących innych przepływów wtórnych oraz całkowity czas wirowania płynu. Wyniki obliczeń porównano z wynikami uzyskanymi dla modelu podstawowego, który nie posiada zaokrąglonego połączenia poboczniczy i dna zbiornika.

Pierwszym elementem analizy było zidentyfikowanie obszaru występowania przepływu formującego w zależności od promienia zaokrąglenia. Umiejscowienie tego obszaru porównano z wynikami dla modelu podstawowego. Na rysunku 8.23 przedstawiono uformowany przepływ namywający dla kroku czasowego, w którym występowała wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  dla każdego analizowanego przypadku.

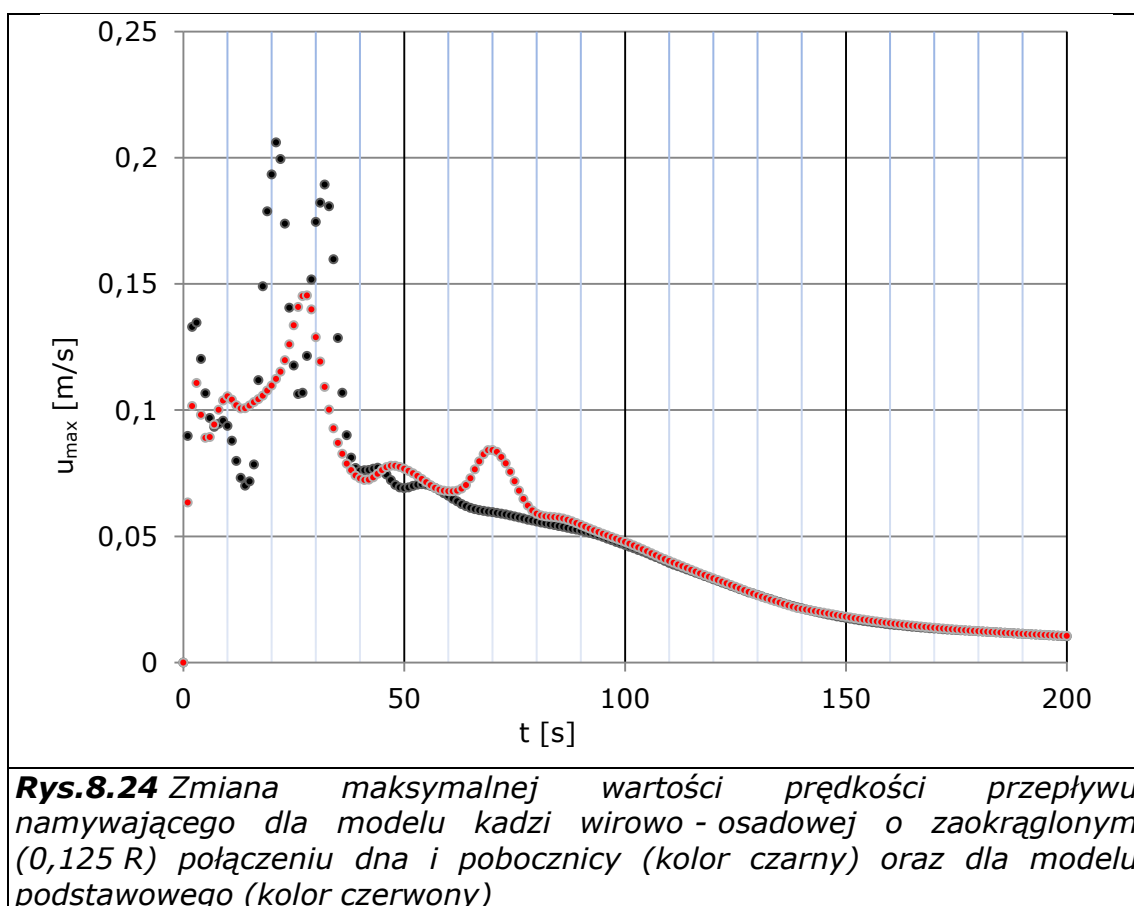
W modelu podstawowym, oraz w modelu o zaokrąglonym połączeniu, o promieniu zaokrąglenia  $0,125 R$ , przepływ namywający (rys. 8.23a i 8.23b) formuje się przy dnie w odległości od  $0,5 R$  do  $0,9 R$  od osi zbiornika. W czasie wirowania nie zmienia swojego położenia, jedynie wypełnia się przyjmując kształt w przekroju kołowy.

W modelu o zaokrąglonym połączeniu poboczniczy i dna, o promieniu zaokrąglenia  $0,25 R$  i  $0,5 R$  (rys. 8.23c i 8.23d) przepływ namywający stożek osadu formuje się na zaokrągleniu w połowie jego cięciwy. Przepływ ten zajmuje połowę zaokrąglenia. W trakcie wirowania nie zmienia swojego położenia i tak jak w przypadku przepływów formujących stożek właściwych dla pozostałych modeli wypełnia się w miarę upływu czasu, przy czym dla wyżej wymienionych zaokrągleń następuje to znacznie szybciej.



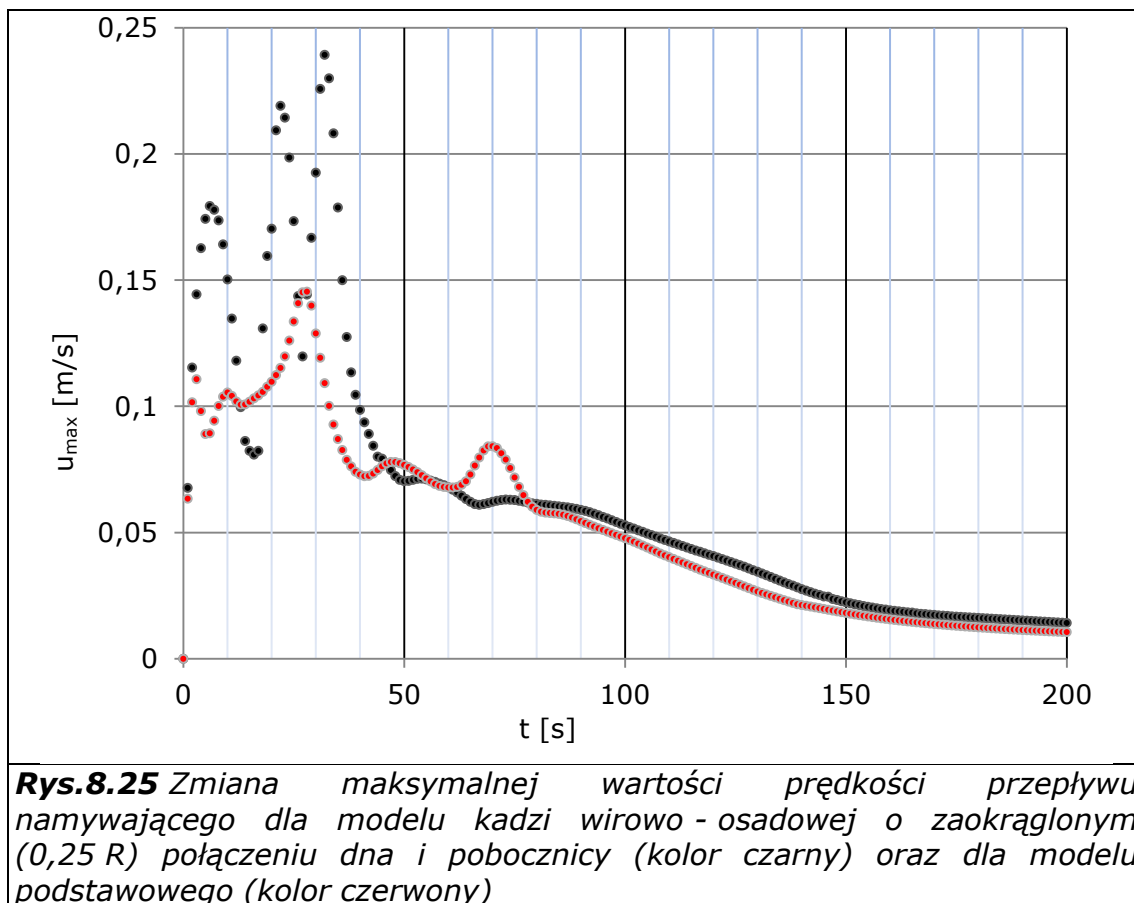
Kolejnym elementem analizy było porównanie rozkładu prędkości przepływu formującego stożek osadowy. Tak jak w przypadku wcześniej omawianych modeli porównano rozkład wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelach o zaokrąglonym połączeniu pobocznic i dna zbiornika do wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu podstawowym.

W przypadku modelu o promieniu zaokrąglenia  $0,125 R$  przepływ formujący stożek (rys. 8.24) stabilizuje się dłużej niż przepływ w modelu podstawowym. Rozkład ujawnia spadek prędkości w początkowym przedziale czasowym wirowania pomiędzy 5 a 15 sekundą, po czym następują skokowe zmiany wartości  $u_{\max}$ . Dla czasu wirowania  $t = 21$  s zostaje w tym modelu osiągnięta kulminacyjna wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego, która stanowi ponad 1,4 wartości  $u_{\max}$  dla przepływu w modelu podstawowym. Od 60 sekundy rozkład wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego nie wykazuje występowania fluktuacji. W rozkładzie  $u_{\max}$  dla tego modelu nie występuje chwilowy wzrost wartości prędkości, jak ma to miejsce w przypadku rozkładu  $u_{\max}$  dla przepływu w modelu podstawowym. Powyżej 90 sekundy wirowania wartości  $u_{\max}$  dla porównywanych modeli są zbliżone do siebie.

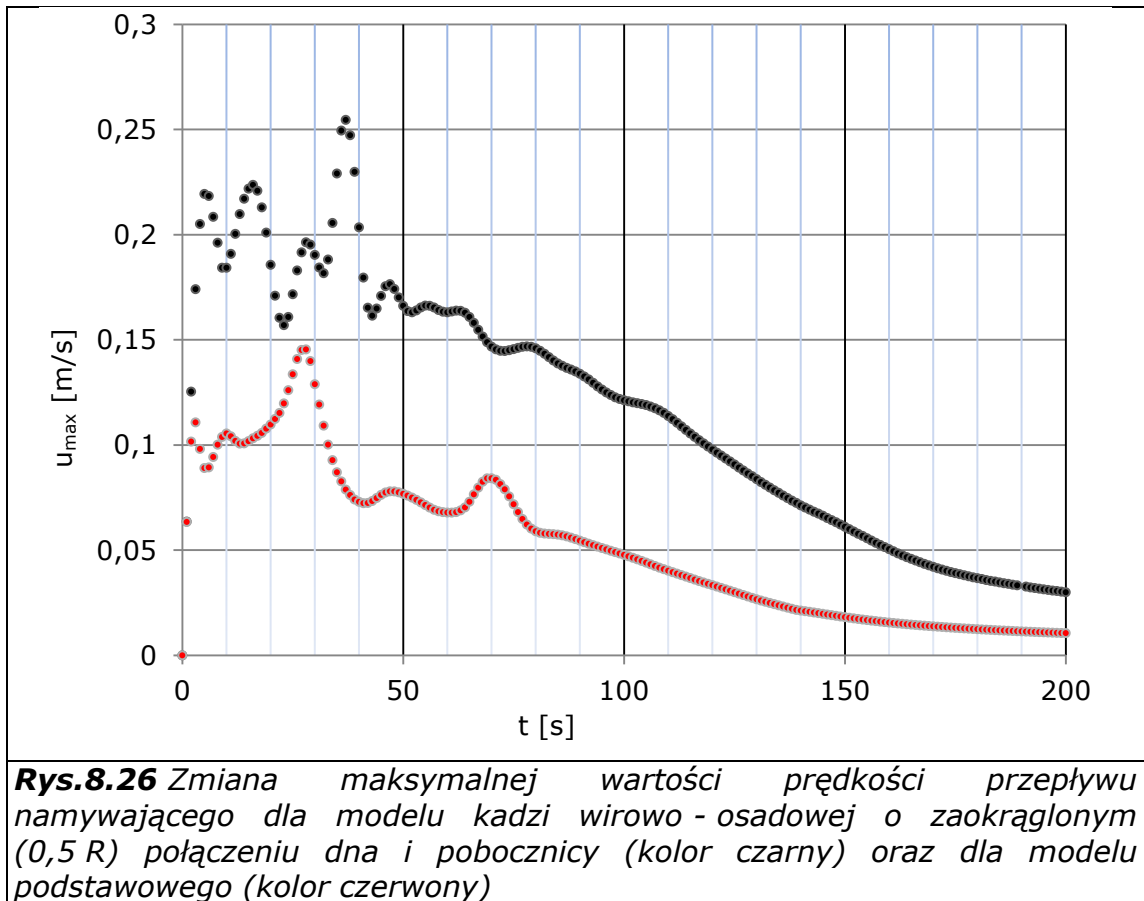


Dla modelu o promieniu zaokrąglenia  $0,25 R$  przepływ formujący stożek osadowy (rys. 8.25) również formuje się dłużej niż przepływ w modelu podstawowym. Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  osiągnięta dla przepływu w tym modelu, dla czasu wirowania  $t = 32$  s i stanowi ona 1,6 wartości  $u_{\max}$

przepływu w modelu podstawowym. Po osiągnięciu wartości maksymalnej prędkości przepływ stabilizuje się. W analizowanym rozkładzie wartości  $u_{\max}$  nie występują wyraźny wzrost wartości prędkości związany z oddziaływaniem zawirowań przyściennych. Od 80 sekundy wartości  $u_{\max}$  dla porównywanych modeli są do siebie zbliżone.



W modelu o promieniu zaokrąglenia 0,5 R przepływ namywający stożek osadu (rys. 8.26) formuje się w czasie porównywalnym dla przepływu w modelu podstawowym. Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  dla przepływu namywającego stanowi 1,57 wartości kulminacyjnej  $u_{\max}$  zidentyfikowanej dla przepływu namywającego w modelu podstawowym. Po uformowaniu się przepływu rozkład  $u_{\max}$  posiada wyższe wartości w całym rozpatrywanym przedziale czasu wirowania. Średnia wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu o zaokrągleniu 0,5 R stanowi ponad 2,7 wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu podstawowym. Znaczny wzrost wartości  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek jest związany z uformowaniem się przepływu na zaokrągleniu, co prowadzi do wyeliminowania oddziaływania obszaru o niskich wartościach prędkości znajdującego się (w geometrii modelu podstawowego) w pobliżu połączenia pobocznic i dna zbiornika.



Kolejnym etapem analizy było określenie wpływu zaokrąglenia połączenia pobocznic i dna zbiornika na występowanie pozostałych przepływów wtórnych. Zestawienie wartości maksymalnych parametrów określających stan przepływów wtórnych zestawiono w tabeli 8.05.

Zawierania przyścienne w grupie modeli o zaokrąglonym połączeniu pobocznic i dna, formują się wcześniej niż ma to miejsce w modelu podstawowym. Znikają pomiędzy 50 a 80 sekundą wirowania. Najdłużej występujące zawierania przyścienne zostały zidentyfikowane dla modelu o zaokrągleniu 0,5 R. Ilość par zawierania przyściennych jest stała we wszystkich modelach ( $q = 4$ ). Dla najaktywniejszej pary zawierania przyściennych występujących w modelu o zaokrągleniu 0,5 R, zidentyfikowano najwyższą wartość  $u_{max}$ , która wynosi 0,1805 m/s, co stanowi około 0,7 wartości  $u_{max}$  dla przepływu namywającego stożek (dla porównania, w modelu podstawowym wartość  $u_{max}$  dla zawierania przyściennych stanowi ponad 1,2 wartości  $u_{max}$  przepływu namywającego). Zawierania przyścienne, po pełnym uformowaniu się, osiągają najwcześniej najwyższą wartość  $u_{max}$  dla modelu o zaokrągleniu 0,125 R. Najkorzystniejsze występowanie zawierania przyściennych (ze względu na wartość  $u_{max}$ ) zostało zidentyfikowane dla modelu o zaokrągleniu 0,5 R. Ze względu na czas występowania zawierania przyściennych, najkorzystniejsze wartości zostały zidentyfikowane w modelu o zaokrągleniu 0,125 R.

**Tab.8.05** Charakterystyka systemu przepływów drugorzędowych dla modeli o połączeniu dna i poboczniczy w kształcie zaokrąglenia oraz modelu pozbawionego zaokrąglonego połączenia

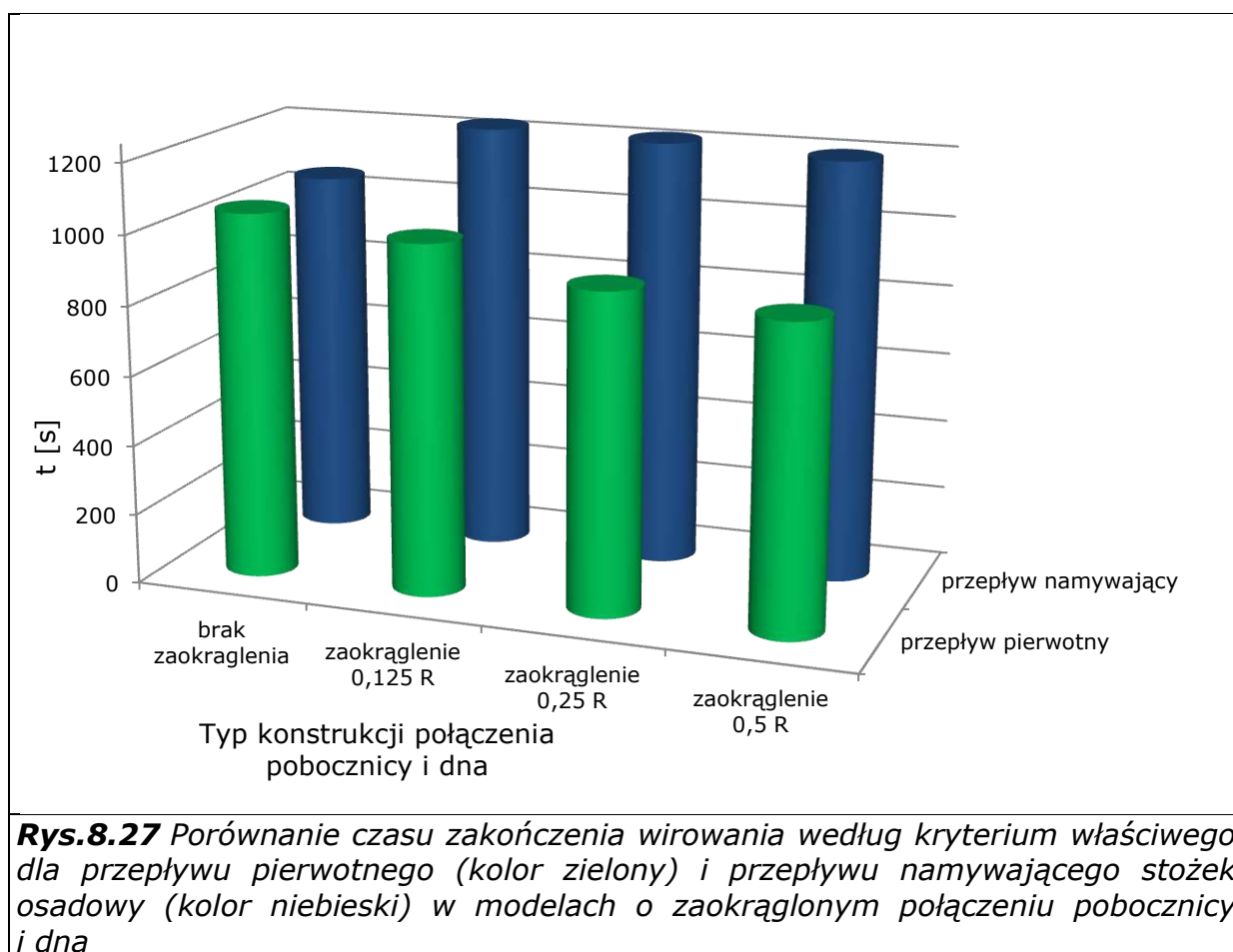
Zjawisko	parametr	Typ kształtu połączenia dna z pobocznicą zbiornika			
		zaokr. 0,125 R	zaokr. 0,25 R	zaokr. 0,5 R	<b>Kształt podstawowy (zaokr. 1 R)</b>
przepływ namywający	$u_{max}$ [m/s]	0,2061	0,2393	0,2546	<b>0,1454</b>
	$t_{w,max}$ [s]	21	32	27	<b>28</b>
zawirowania przyścienne	$u_{max}$ [m/s]	0,1688	0,1775	0,1805	<b>0,1789</b>
	$t_{w,max}$ [s]	21	22	29	<b>21</b>
	q	4	4	4	<b>4</b>
przepływ centralny	$u_{max}$ [m/s]	0,1159	0,1097	0,1137	<b>0,1243</b>
	$t_{ap}$ [s]	26	28	26	<b>27</b>

Przepływ centralny, w analizowanej grupie modeli, formuje się również wcześniej (pomiędzy 5 a 20 sekundą wirowania). Wynika to z tego, iż poziom wysokości napełnienia decyduje o jego wcześniejszym uformowaniu się. Czas występowania maksymalnej wartości  $u_{max}$  we wszystkich modelach jest do siebie zbliżony. Najniższą wartość  $u_{max}$  (najkorzystniejszą) osiągnął dla tego przepływu model o zaokrągleniu 0,25 R, dla którego wartość kulminacyjna  $u_{max}$  przepływu centralnego stanowi 0,46 wartości kulminacyjnej  $u_{max}$  przepływu formującego stożek. Należy jednak stwierdzić, iż wszystkie analizowane modele posiadające zaokrąglone połączenie poboczniczy i dna posiadają porównywalną wartość kulminacyjną  $u_{max}$  tego przepływu. Najmniej korzystna (najwyższa) wartość  $u_{max}$  została osiągnięta dla tego przepływu w modelu nieposiadającym zaokrąglenia.

Ostatnim etapem analizy tej grupy modeli było porównanie całkowitego czasu wirowania. Obowiązywały te same kryteria spadku wartości  $u_{max}$  dla przepływu pierwotnego i wtórnego namywającego stożek. Porównanie czasu końca wirowania dla modeli o zaokrąglonym połączeniu poboczniczy dna zestawiono w tabeli 8.06 i przedstawiono na rysunku 8.27.

**Tab.8.06** Zestawienie kroków czasowych końca wirowania dla modeli o zaokrąglonym połączeniu poboczniczy i dna zbiornika

typ połączenia	czas zakończenia wirowania	
	t [s] dla $u_{\max}$ pp	t [s] dla $u_{\max}$ pw
brak zaokrąglenia	1049	1056
zaokr. 0,125 R	1002	1231
zaokr. 0,25 R	912	1221
zaokr. 0,5 R	873	1202



**Rys.8.27** Porównanie czasu zakończenia wirowania według kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego (kolor zielony) i przepływu namywającego stożek osadowy (kolor niebieski) w modelach o zaokrąglonym połączeniu poboczniczy i dna

Czas wirowania według kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego w analizowanej grupie modeli maleje wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia połączenia poboczniczy i dna zbiornika. Najkrótszy czas wirowania został osiągnięty dla modelu o zaokrągleniu 0,5 R i wyniósł  $t = 873$  s, najdłuższy zaś w model podstawowym ( $t = 1049$  s).

Czas wirowania według kryterium właściwego dla przepływu wtórnego namywającego stożek jest zbliżony we wszystkich modelach posiadających zaokrąglenie. Najkrótszy czas wirowania ( $t = 1056$  s) został osiągnięty dla modelu nieposiadającego zaokrąglonego połączenia, najdłuższy czas



wirowania zidentyfikowano w konstrukcji posiadającej zaokrąglenie o promieniu  $0,125 R$ , który wyniósł  $t = 1231$  s.

Ze względu na przyjęte kryteria końca wirowania najkorzystniejsze, dla analizowanej grupy modeli jest zaokrąglone połączenie pobocznic i dna zbiornika o promieniu zaokrąglenia  $0,125 R$ , dla którego przepływ pierwotny jak i wtórny namywający stożek utrzymuje się najdłużej. Rozpatrując jednak wyłącznie czas zanikania przepływu namywającego równorzędne są wszystkie analizowane warianty połączenia zaokrągleniem.

Na podstawie przeanalizowanych wariantów konstrukcyjnych możliwe jest stwierdzenie, iż wprowadzenie modyfikacji połączenia pobocznic i dna zbiornika w postaci zaokrąglenia, powoduje wzrost wartości prędkości przepływu namywającego stożek osadowy (wartości maksymalnych występujących chwilowo w modelach o zaokrągleniu  $0,125 R$  i  $0,25 R$ , a także wzrost wartości  $u_{\max}$  dla całego rozpatrywanego okresu czasu wirowania jak w modelu o zaokrągleniu  $0,5 R$ ) oraz wzrost wartości czasu efektywnego oddziaływania tego przepływu. Ma to związek z wyeliminowaniem w tego typu połączeniach obszaru o małych prędkościach lokalnych znajdującego się w pobliżu klasycznego połączenia ściany i dna zbiornika (połączenia pod kątem  $90^\circ$  - jak w modelu podstawowym)

### **8.3.2 Stożkowe połączenie pobocznic i dna zbiornika**

Wyniki uzyskane dla poprzedniej grupy modeli dają podstawę do celowości poszukiwań innych rozwiązań konstrukcyjnych połączenia pobocznic i dna zbiornika. Połączenie zaokrągleniem, wydaje się intuicyjnie właściwym, ze względu na kształt przepływu namywającego stożek. Problematiczne jest jednak jego właściwe wykonanie, zwłaszcza dla konstrukcji o dużych pojemnościach roboczych. Dlatego też przedmiotem kolejnej części badań była symulacja ruchu płynu w modelach o dennicy w kształcie odwróconego ściętego stożka. Połączenie dna i pobocznic zbiornika tego rodzaju zostało określone jako tzw. połączenie sfazowane, a jego wymiar został dobrany w oparciu o podział promienia zbiornika (jak dla modeli o zaokrąglonym połączeniu).

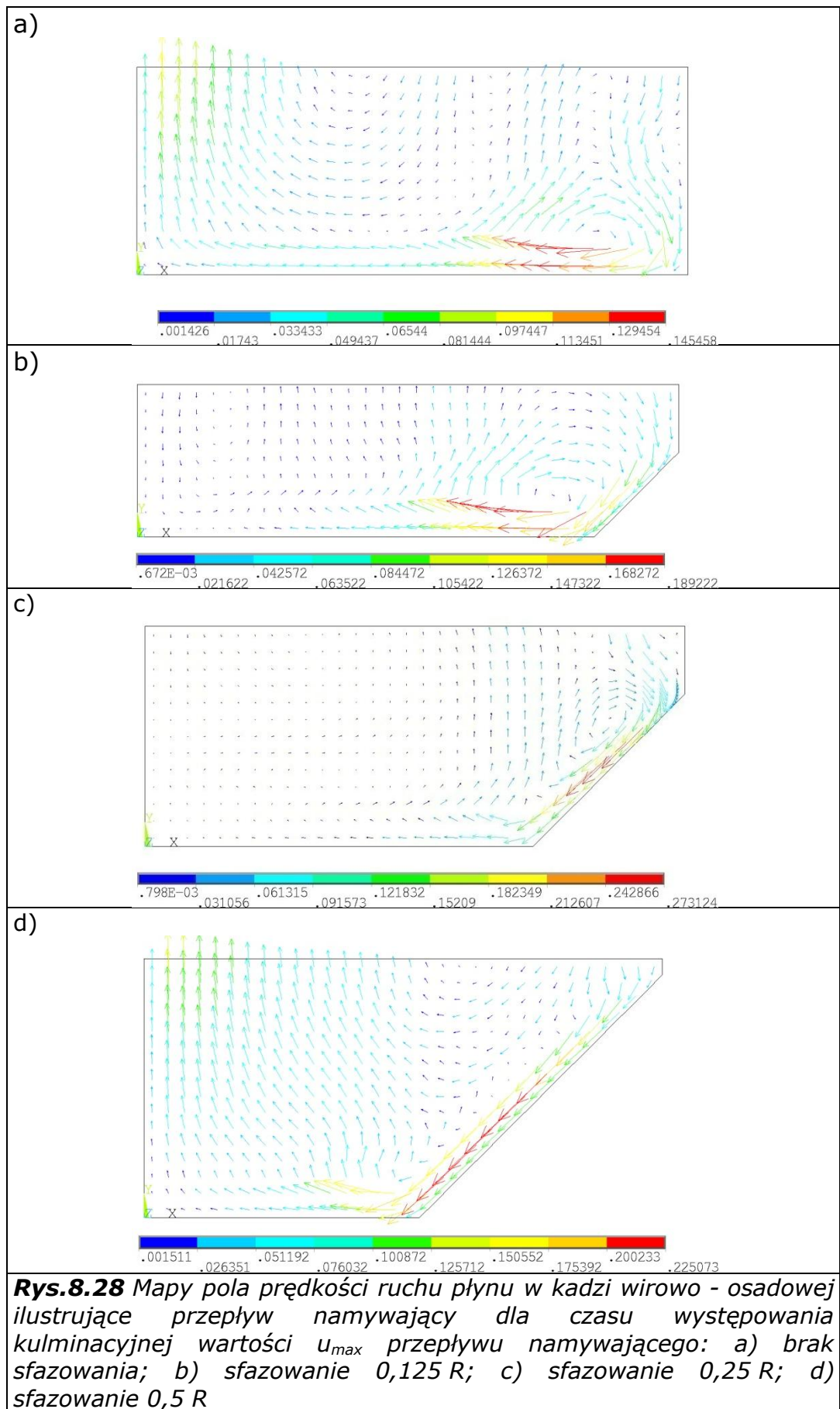
Sporządzono geometrię trzech modeli o sfazowanym (pod kątem  $45^\circ$ ) połączeniu pobocznic i dna zbiornika. Wymiar sfazowania wynosił  $0,125 R$ ,  $0,25 R$  i  $0,5 R$ . Kształty połączenia zostały przedstawione na rysunku 8.28. Wykonano obliczenia symulacyjne, przeanalizowano ich wyniki określając wpływ występowania takiego kształtu połączenia pobocznic i dna zbiornika na obszar formowania się przepływu namywającego, rozkład jego prędkości maksymalnej, charakterystyczne stany występowania pozostałych przepływów wtórnych oraz całkowity czas wirowania płynu. Tak jak w przypadku poprzednich serii, wyniki obliczeń porównano z wynikami uzyskanymi dla modelu podstawowego, który w tym przypadku został

potraktowany jako model pozbawiony sfazowanego połączenia poboczniczy i dna zbiornika.

Na podstawie analizy map pól prędkości zidentyfikowano zróżnicowany obszar występowania przepływu namywającego stożek. Umieszczenie tego obszaru porównano, jak poprzednio, z wynikami dla modelu podstawowego. Na rysunku 8.28 przedstawiono uformowany przepływ namywający dla kroku czasowego, w którym posiadał on kulminacyjną wartość  $u_{\max}$ .

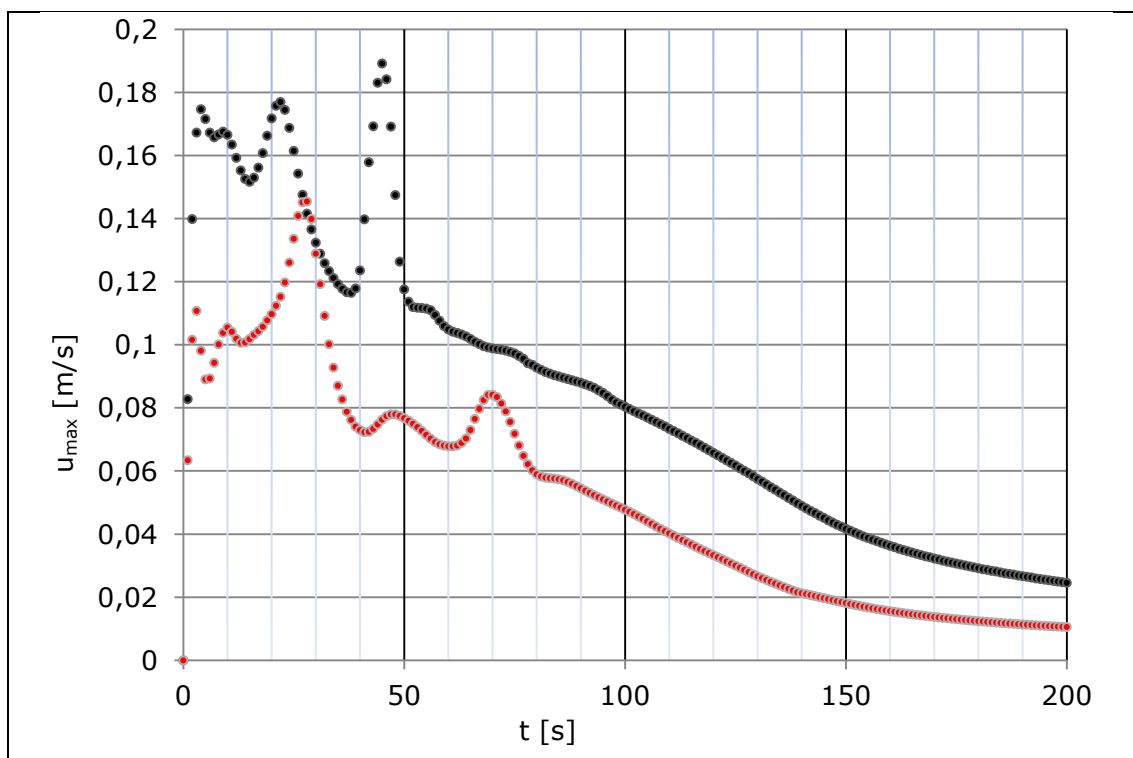
Obszar występowania przepływu namywającego w modelu podstawowym (rys. 8.28a) został opisany w podrozdziale 8.3.1. W przypadku modelu o wymiarze sfazowania 0,125 R przepływ namywający (rys. 8.28b) formuje się przy dnie w odległości od 0,5 R do 1 R od osi zbiornika. W odróżnieniu od przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym sfazowanie determinuje jego częściowe formowanie się także wzdłuż połączenia. Dzięki temu przepływ namywający jest dodatkowo orientowany skośną płaszczyzną, co wpływa korzystnie na jego wcześniejsze wypełnienie. W czasie wirowania przepływ namywający nie zmienia swojego położenia.

W modelach o połączeniu poboczniczy i dna sfazowaniem, o wymiarze 0,25 R i 0,5 R (rys. 8.28c i 8.28d) przepływ namywający stożek osadu formuje się już bezpośrednio na płaszczyźnie sfazowania. W obu przypadkach przepływ namywający zajmuje całą długość płaszczyzny połączenia. Analogicznie do poprzednio omawianych wariantów modeli przepływ namywający stożek osadu w trakcie wirowania nie zmienia swojego położenia.



Kolejnym elementem analizy było porównanie rozkładów prędkości przepływu formującego stożek osadowy. Tak jak w przypadku wcześniej omawianych modeli porównano przepływy formujące stożek osadu w modelach o sfazowanym połączeniu pobocznic i dna zbiornika do przepływu w modelu podstawowym.

W przypadku modelu o połączeniu sfazowanym o wymiarze 0,125 R, przepływ namywający (rys. 8.29) formuje się w czasie zbliżonym do czasu występowania analogicznego zjawiska w modelu podstawowym.

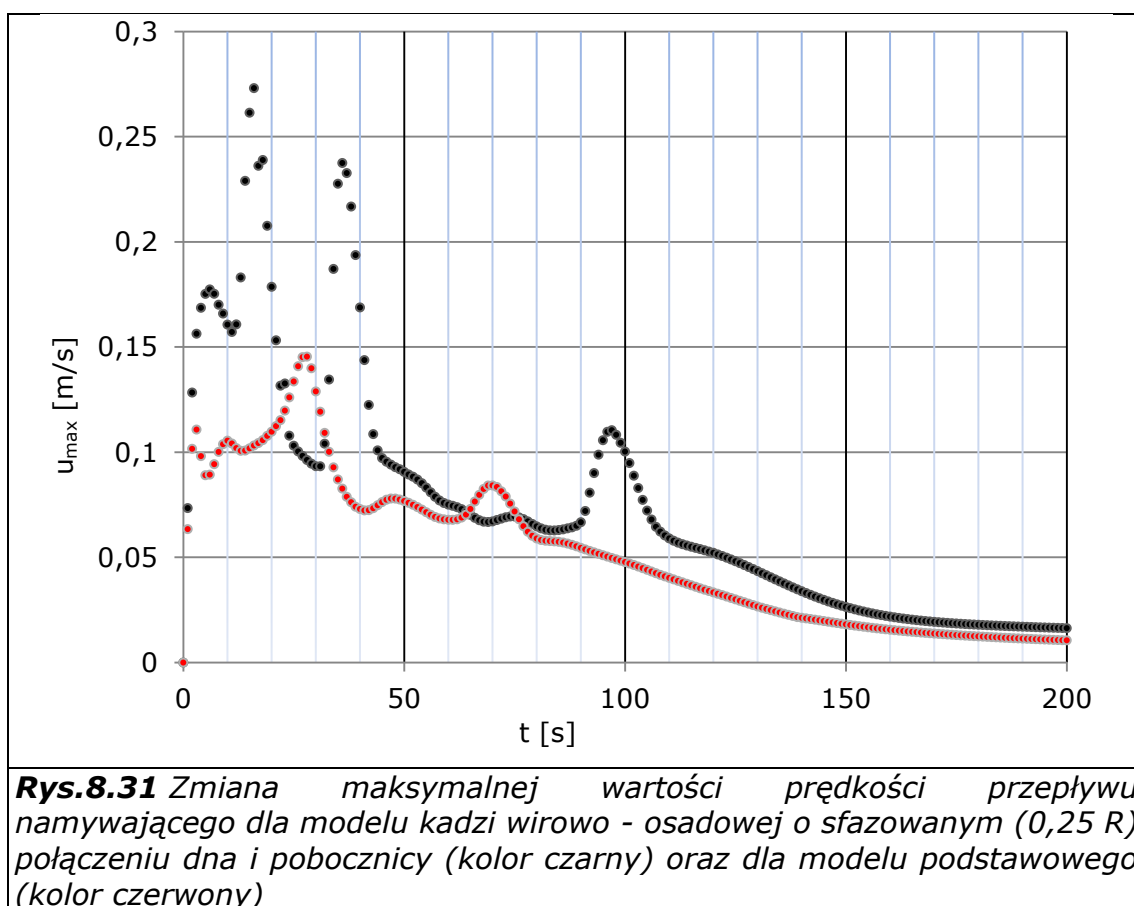


**Rys.8.29** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu namywającego dla modelu kadzi wirowo - osadowej o sfazowanym (0,125 R) połączeniu dna i pobocznic (kolor czarny) oraz dla modelu podstawowego (kolor czerwony)

Po uformowaniu się przepływu, wartość  $u_{\max}$  początkowo maleje (pomiędzy 4 a 15 krokiem czasowym), a następnie wzrasta osiągając w czasie wirowania  $t = 21$  s wartość zbliżoną do 0,18 m/s. Po tym kroku czasowym wartość  $u_{\max}$  przepływu dla tego modelu gwałtownie maleje. Pomiędzy 27 a 30 sekundą osiąga wartości zbliżone do wartości  $u_{\max}$  przepływu w modelu podstawowym. Po czasie wirowania  $t = 40$  s wartość  $u_{\max}$  wzrasta osiągając w 45 sekundzie wartość kulminacyjną, która wynosi ponad 0,189 m/s. Od 50 sekundy wirowania przepływ stabilizuje się. W rozkładzie  $u_{\max}$  dla tego modelu nie występuje chwilowy wzrost wartości prędkości, jak ma to miejsce w przypadku rozkładu  $u_{\max}$  dla przepływu w modelu podstawowym pomiędzy 60 a 80 sekundą wirowania. Dla omawianego modelu posiadającego sfazowane połączenie, przepływ namywający stożek posiada wartości  $u_{\max}$  wyższe (lub równe dla kilku kroków czasowych) w całym rozpatrywanym

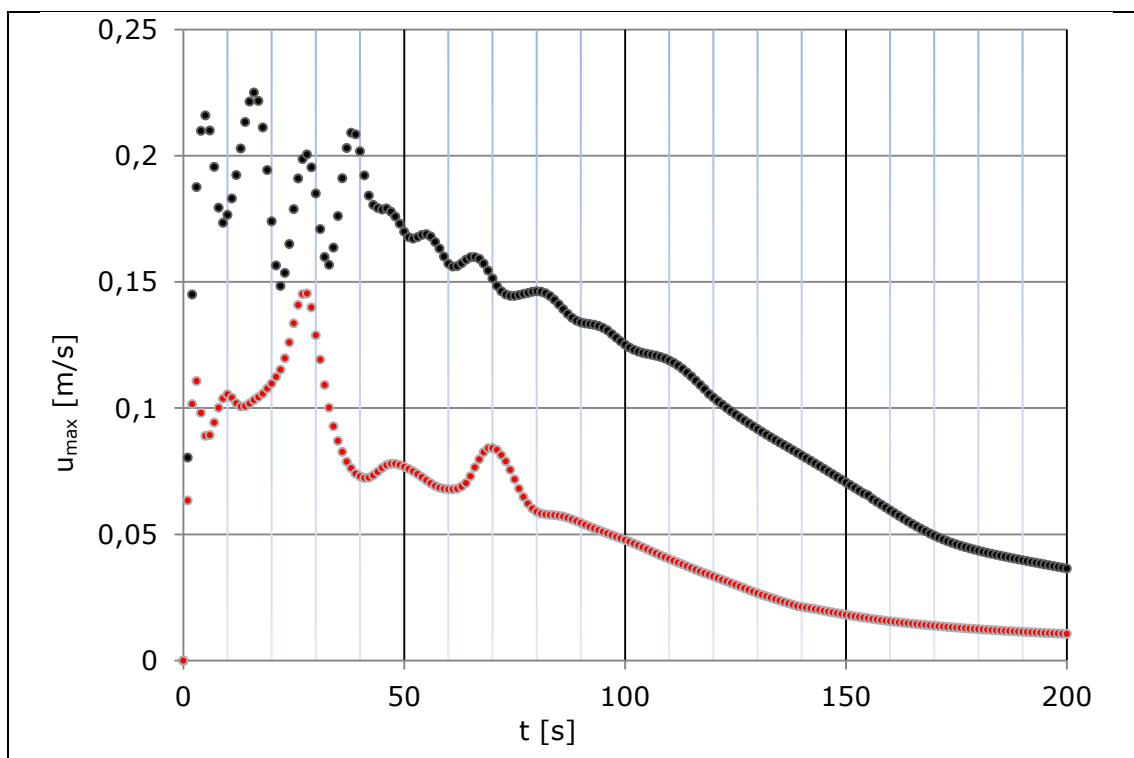
przedziale czasowym, w porównaniu do  $u_{\max}$  dla modelu podstawowego. Dla rozpatrywanego przedziału czasu wirowania, średnia wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu posiadającym omawiane sfazowanie stanowi ponad 1,85 wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu podstawowym.

Dla modelu o wymiarze sfazowania 0,25 R, przepływ namywający stożek osadowy (rys. 8.31) formuje się po czasie wirowania  $t = 4$  s. Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  dla całego rozpatrywanego czasu wirowania zostaje osiągnięta w tym modelu dla czasu  $t = 16$  s i wynosi ona 0,273 m/s, co stanowi 1,85 wartości kulminacyjnej  $u_{\max}$  przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym. Po osiągnięciu wartości maksymalnej wartość  $u_{\max}$  przepływu w tym modelu maleje do 32 sekundy wirowania. Po tym czasie wzrasta ponownie, aż do 35 sekundy, dla której  $u_{\max}$  osiąga wartość 0,237 m/s. Pomiędzy 90 a 100 sekundą wirowania zidentyfikowano kolejny wzrost wartości  $u_{\max}$  związany z oddziaływaniem zawirowań przyściennych. Od 150 sekundy wartości  $u_{\max}$  dla porównywanych modeli są do siebie zbliżone.



Ostatnim analizowanym modelem jest wariant połączenia pobocznicy i dna zbiornika połączeniem sfazowanym o wymiarze sfazowania 0,5 R. W modelu tym przepływ namywający stożek osadu (rys. 8.32) formuje się w czasie porównywalnym dla przepływu w modelu podstawowym. Wartość

kulminacyjna  $u_{\max}$  dla przepływu namywającego występuje w 16 sekundzie wirowania i wynosi 0,225 m/s, co stanowi 1,57 wartości maksymalnej prędkości dla przepływu namywającego w modelu podstawowym. Od początku wirowania do 40 sekundy wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego (w tym modelu) zmieniają swoją wartość w sposób okresowy. Po 40 sekundzie wirowania fluktuacje prędkości stopniowo zanikają.



**Rys.8.32** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu namywającego dla modelu kadzi wirowo - osadowej o sfazowanym (0,5 R) połączeniu dna i pobocznic (kolor czarny) oraz dla modelu podstawowego (kolor czerwony)

Po uformowaniu się przepływu rozkład wartości  $u_{\max}$  dla tego modelu posiada wyższe wartości prędkości w całym rozpatrywanym przedziale czasowym. Średnia wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu posiadającym omawiane sfazowanie stanowi ponad 1,85 wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu podstawowym.

Następnym etapem analizy było określenie wpływu sfazowanego połączenia pobocznic i dna zbiornika na pozostałe przepływy wtórne. Zestawienie wartości maksymalnych parametrów systemu przepływów wtórnych przedstawiono w tabeli 8.07.

**Tab.8.07** Charakterystyka systemu przepływów wtórnych występujących w modelach o połączeniu sfazowanym

Zjawisko	parametr	Wymiar sfazowania połączenia dna z poboczną zbiornika			
		45° 0,125 R	45° 0,25 R	45° 0,5 R	<b>brak sfazowania</b>
Przepływ namywający	$u_{max}$ [m/s]	0,1892	0,2731	0,2251	<b>0,1454</b>
	$t_{w,max}$ [s]	45	16	16	<b>28</b>
Zawirowania przyścienne	$u_{max}$ [m/s]	0,1735	0,1647	0,1518	<b>0,1527</b>
	$t_{w,max}$ [s]	23	21	26	<b>14</b>
	q	4	4	4	<b>4</b>
Przepływ centralny	$u_{max}$ [m/s]	0,1438	0,1373	0,1411	<b>0,1243</b>
	$t_{ap}$ [s]	23	23	25	<b>27</b>

Zawirowania przyścienne w grupie modeli o sfazowanym połączeniu pobocznic i dna formują się pomiędzy czasem wirowania  $t = 12$  s, a  $t = 20$  s. Zanikają pomiędzy 45 a 110 sekundą wirowania. Najdłużej występujące zostały zidentyfikowane dla modelu posiadającym sfazowanie o wymiarze 0,25 R. Dla modelu posiadającego sfazowanie o wymiarze 0,125 R zidentyfikowano najwyższą wartość kulminacyjną  $u_{max}$  pary zawirowań wynoszącą 0,1735 m/s, co stanowi 0,9 wartości kulminacyjnej  $u_{max}$  przepływu namywającego stożek, która to wartość zostaje osiągnięta po czasie wirowania prawie dwukrotnie dłuższym. Najniższą wartość kulminacyjną  $u_{max}$  dla zawirowań przyściennych uzyskano dla modelu posiadającego sfazowanie o wymiarze 0,5 R. Wartość ta jest również niższa od wartości kulminacyjnej  $u_{max}$  dla zawirowań przyściennych występujących w modelu podstawowym. Ilość par zawirowań jest stała we wszystkich modelach ( $q = 4$ ). Najkorzystniejsze występowanie zawirowań przyściennych (ze względu na wartość kulminacyjną  $u_{max}$ ) zostało zidentyfikowane dla modelu o wymiarze sfazowania 0,125 R. Ze względu na czas występowania, najkorzystniejsze są warunki przepływu w modelu o wymiarze sfazowania 0,25 R, przy czym czas występowania wartości maksymalnych prędkości tych zawirowań we wszystkich modelach o sfazowanym połączeniu jest zbliżony.

Przepływ centralny, w analizowanej grupie modeli, formuje się pomiędzy krokiem czasowym wirowania  $t = 10$  s a  $t = 15$  s. Czas występowania kulminacyjnej wartości  $u_{\max}$  przepływu centralnego we wszystkich modelach jest do siebie zbliżony. W analizowanej grupie modeli najniższą wartość kulminacyjną  $u_{\max}$  dla tego przepływu posiada model pozbawiony sfazowania. Najniższa wartość  $u_{\max}$  w modelach posiadających sfazowane połączenie została osiągnięta dla modelu posiadającego sfazowanie o wymiarze  $0,25 R$ , dla którego wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  przepływu centralnego stanowi  $0,5$  wartości kulminacyjnej  $u_{\max}$  przepływu namywającego. W modelach posiadających sfazowania o wymiarze  $0,125 R$  i  $0,5 R$  występują porównywalne wartości kulminacyjne  $u_{\max}$  dla tego przepływu w zbliżonym czasie występowania. Najmniej korzystna wartość  $u_{\max}$  (najwyższa) została osiągnięta dla tego przepływu w modelu posiadającym sfazowanie o wymiarze  $0,125 R$

Ostatnim etapem analizy tej grupy modeli było porównanie całkowitego czasu wirowania. Obowiązywały te same kryteria spadku wartości  $u_{\max}$  dla przepływu pierwotnego i wtórnego namywającego stożek. Porównanie czasu końca wirowania dla modeli o sfazowanym połączeniu poboczniczy dna zestawiono w tabeli 8.08 i przedstawiono na rysunku 8.32.

W modelach posiadających sfazowanie czas wirowania według kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego w analizowanej grupie modeli maleje wraz ze wzrostem wymiaru sfazowania. Najkrótszy czas wirowania został osiągnięty dla modelu posiadającego sfazowanie o wymiarze  $0,5 R$  i wyniósł 902 sekundy, najdłuższy zaś dla modelu pozbawionego sfazowania (1049 sekund).

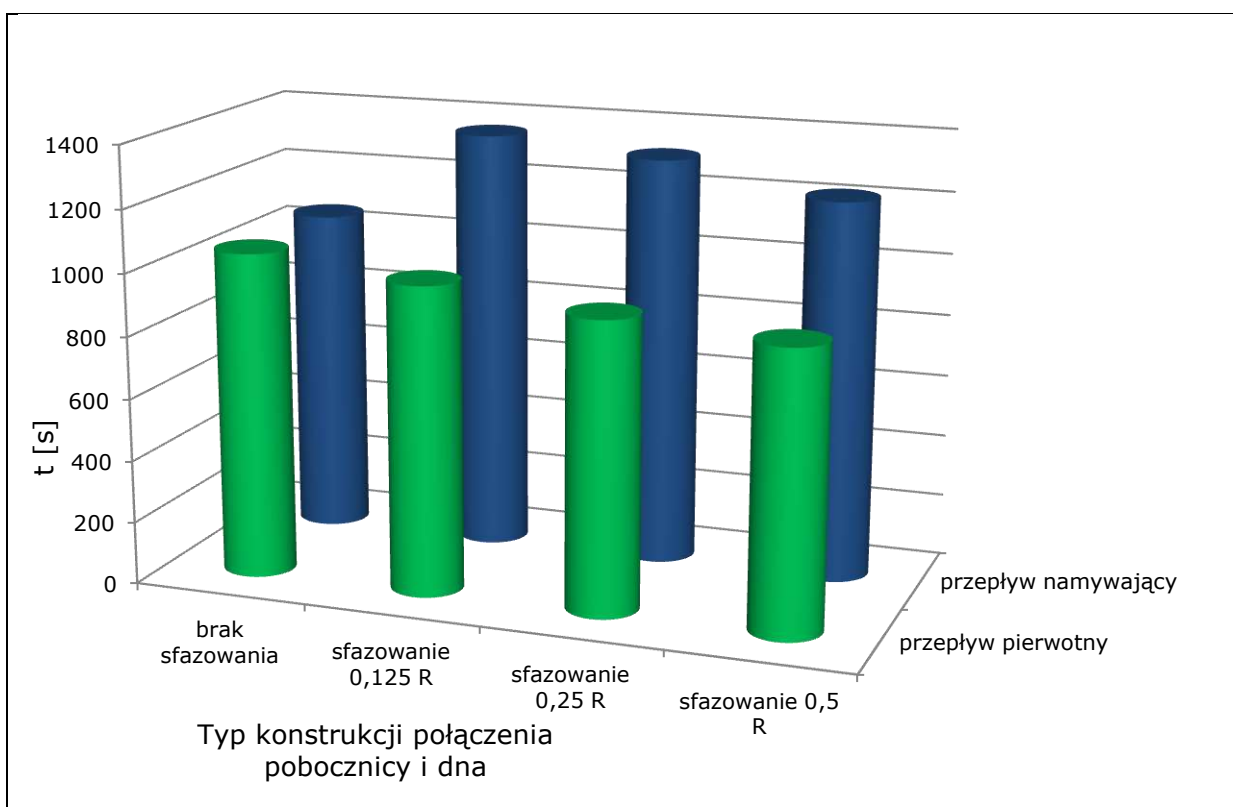
Czas wirowania według kryterium właściwego dla przepływu wtórnego namywającego jest wyższy, w porównaniu do czasu osiągniętego w modelu podstawowym, we wszystkich modelach posiadających sfazowanie. Tak więc najkrótszy czas wirowania ( $t = 1056$  s) został osiągnięty dla modelu pozbawionego sfazowania, najdłuższy czas wirowania zidentyfikowano w konstrukcji posiadającej sfazowanie o wymiarze  $0,125 R$ .

Rozpatrując wszystkie analizowane konstrukcje, w których występuje modyfikacja w postaci sfazowanego połączenia poboczniczy i dna należy stwierdzić iż taki typ połączenia powoduje znaczące wydłużenie czasu występowania przepływu wtórnego odpowiedzialnego za namywanie stożka osadowego. Ze względu na przyjęte kryteria końca wirowania najkorzystniejsze, dla analizowanej grupy modeli jest sfazowane połączenie poboczniczy i dna zbiornika o wymiarze sfazowania  $0,125 R$ , dla którego przepływ pierwotny i wtórny namywający stożek utrzymuje się najdłużej.



**Tab.8.08** Zestawienie kroków czasowych końca wirowania dla modeli o sfazowanym połączeniu pobocznic i dna zbiornika

typ połączenia	czas zakończenia wirowania	
	t [s] dla $u_{\max}$ pp	t [s] dla $u_{\max}$ pw
Brak sfazowania	1049	1056
sfaz. 0,125 R	993	1358
sfaz. 0,25 R	936	1315
sfaz. 0,5 R	902	1221



**Rys.8.32** Porównanie czasu zakończenia wirowania według kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego (kolor zielony) i przepływu namywającego (kolor niebieski) w modelach o sfazowanym połączeniu pobocznic i dna

## 8.4 Modele o kształtach charakterystycznych występujących w konstrukcjach przemysłowych

Ostatnią grupą analizowanych modeli były modele o stałej objętości, wysokości napełnienia odpowiadającej wysokości napełnienia nominalnego  $H_n$  oraz średnicy  $D$  odpowiadającej średnicy modelu podstawowego. W ramach tej części badań symulacyjnych przeanalizowano przepływ płynu w zbiornikach, których kształty występują sporadycznie w konstrukcjach przemysłowych whirlpoola (kształty te zostały określone jako tzw. kształty przemysłowe lub kształty specjalne). Celem analizy było określenie wpływu elementów rozwiązań konstrukcyjnych kształtu takich zbiorników na warunki formowania i ewolucję przepływów wchodzących w skład systemu zawirowań występujących w przepływie płynu w zbiorniku whirlpoola.

W ramach tej grupy modeli wykonano obliczenia dla konstrukcji zbiornika whirlpoola:

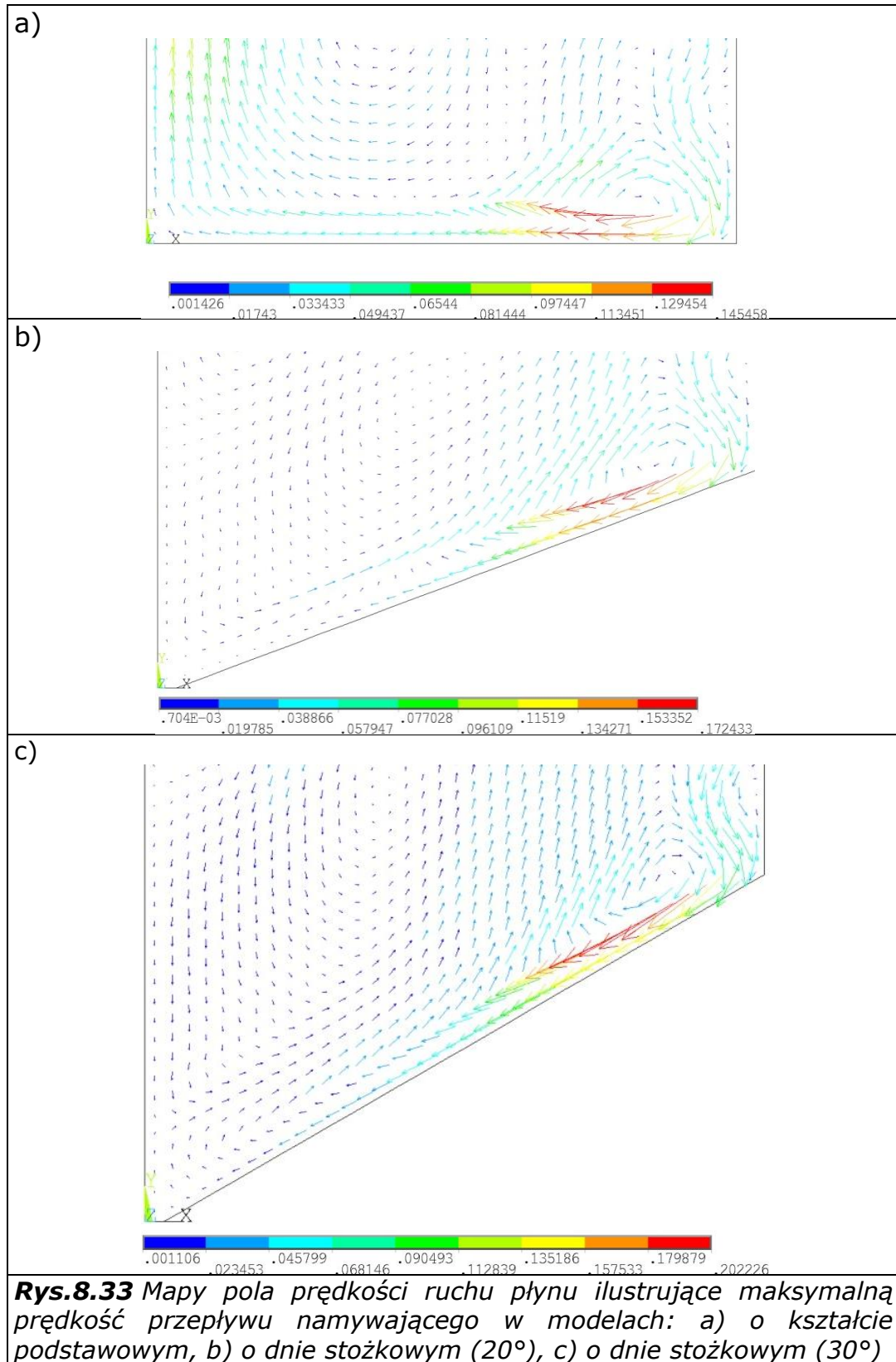
- a) o stożkowym dnie (o kącie pochylenia  $20^\circ$  i  $30^\circ$ );
- b) posiadającego tzw. półkę osadową i kanał spustu brzeczek;
- c) wyposażonego w przewód zasilający parasol dyfuzyjny brzeczek.

Kształty stożkowe dna występują w rozwiązaniach konstrukcyjnych projektowanych przez Spomasz Pleszew i Kates Olsztyn. Konstrukcja posiadająca półkę osadową i kanał spustu brzeczek (zbliżona kształtem do kształtu przedstawionego na rysunku 2.04f w podrozdziale 2.3) jest charakterystyczna dla konstrukcji zaprojektowanej przez Katedrę Inżynierii Spożywczej Politechniki Koszalińskiej dla browaru Brok w Słupsku. Występuje ona także w niektórych rozwiązaniach projektowanych przez firmę Steinecker. Ostatnia konstrukcja wyposażona w parasol dyfuzyjny brzeczek jest charakterystyczna dla whirlpool-kotłów. Takie rozwiązanie występuje między innymi w konstrukcji Ziemanna zainstalowanej w browarze Royal Unibrew Koszalin. Modele obliczeniowe posiadają wymiary odpowiadające zbiornikowi laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej.

Przeprowadzono obliczenia symulacyjne dla grupy modeli przedstawionych powyżej. Zidentyfikowano obszar występowania przepływu namywającego, rozkład jego prędkości maksymalnej, charakterystyczne stany występowania pozostałych przepływów wtórnych oraz całkowity czas wirowania płynu. Uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi dla modelu podstawowego, którego kształt zbiornika jest kształtem występującym najczęściej w konstrukcjach przemysłowych. Na rysunku 8.33 i 8.34 przedstawiono uformowany przepływ namywający dla kroku czasowego, w którym posiadał on najwyższą wartość prędkości.

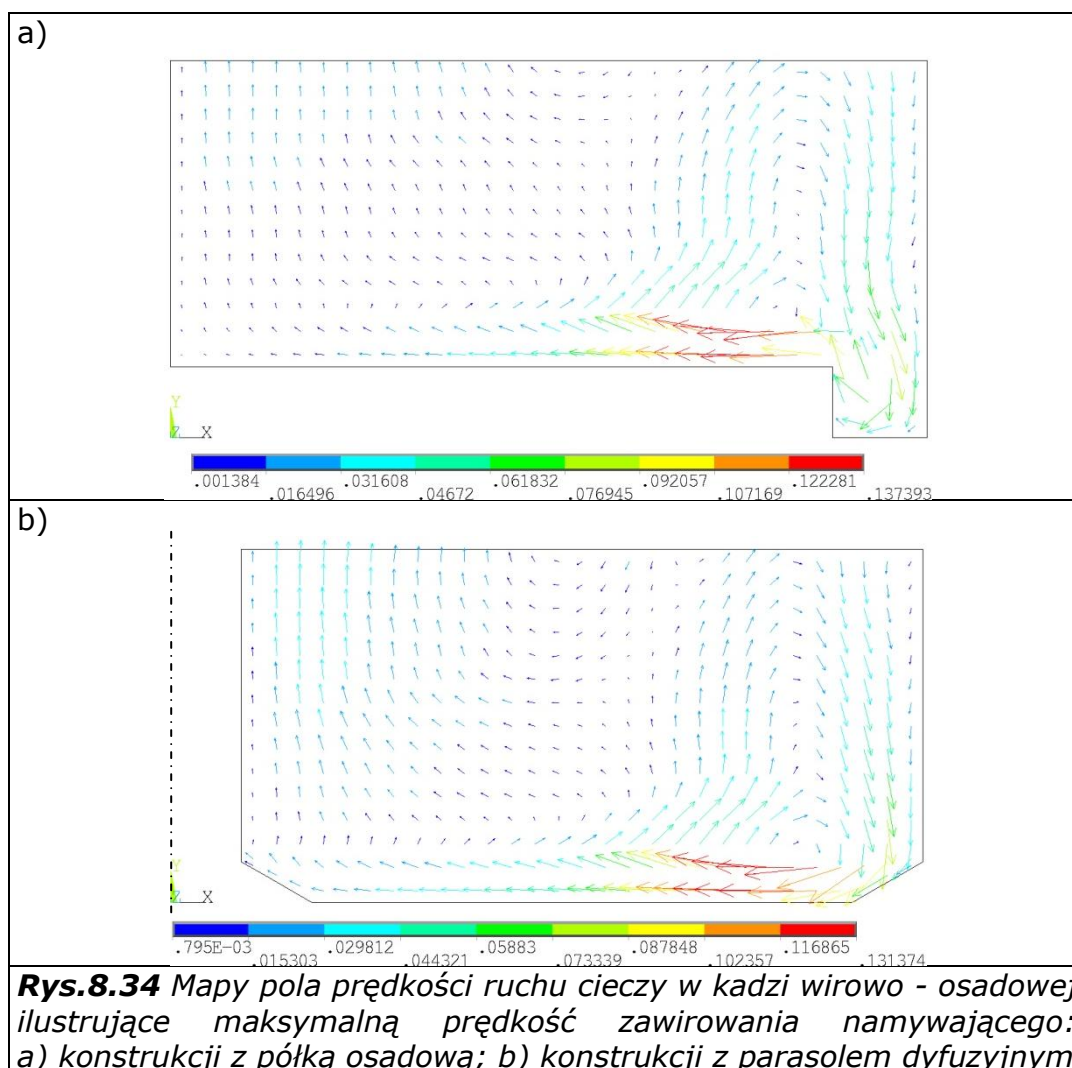
W modelach o stożkowym dnie przepływ namywający (8.33b i 8.33c) formuje się przy dnie w obszarze zbliżonym do obszaru formowania w modelu podstawowym. W odróżnieniu od modelu porównawczego występuje charakterystyczne wydłużenie obszaru oddziaływania przepływu namywającego, który jest orientowany skośną płaszczyzną dna zbiornika.

Przepływ ten nie zmienia swojego położenia wypełniając się w miarę upływu czasu wirowania



Przepływ namywający w modelu posiadającym półkę osadową i kanał spustowy (rys. 8.34a) formuje się za kanałem. Widoczne jest jego przesunięcie w kierunku osi zbiornika. W samym kanale występuje przepływ posiadający niskie wartości prędkości, które mogą być niewystarczające dla skutecznego wypłukiwania gromadzącego się w nim osadu. Kanał spustowy powoduje także powstawanie dodatkowych zaburzeń przepływu w obszarze zbliżonym do strefy występowania przepływu namywającego.

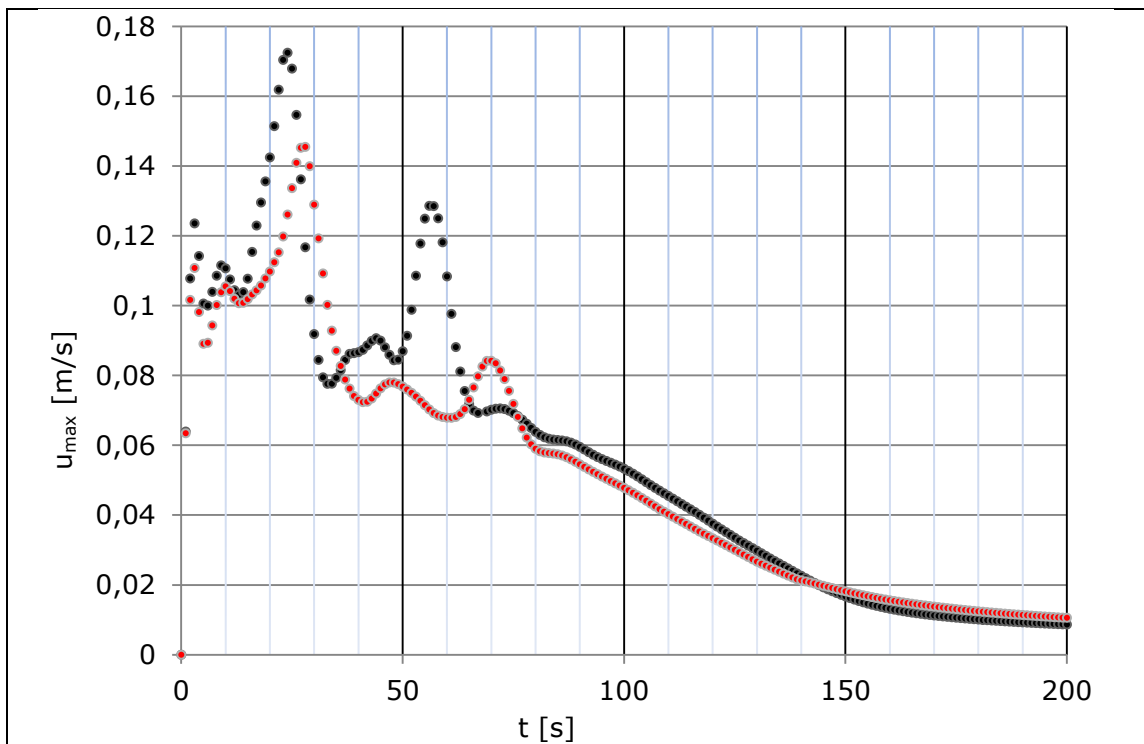
W modelu wyposażonym w parasol dyfuzyjny (rys. 8.34b) przepływ namywający formuje się bliżej osi zbiornika niż w modelu podstawowym, co jest spowodowane oddziaływaniem występującego w tym typie konstrukcji sfazowanego połączenia pobocznic i dna zbiornika. W czasie wirowania nie zmienia on swojego położenia. W miarę upływu czasu i zanikania innych lokalnie występujących zawirowań wypełnia się przyjmując kształt o przekroju kołowym. Nie stwierdzono wpływu występowania przewodu zasilającego parasola dyfuzyjnego na umiejscowienie i kształt przepływu namywającego.



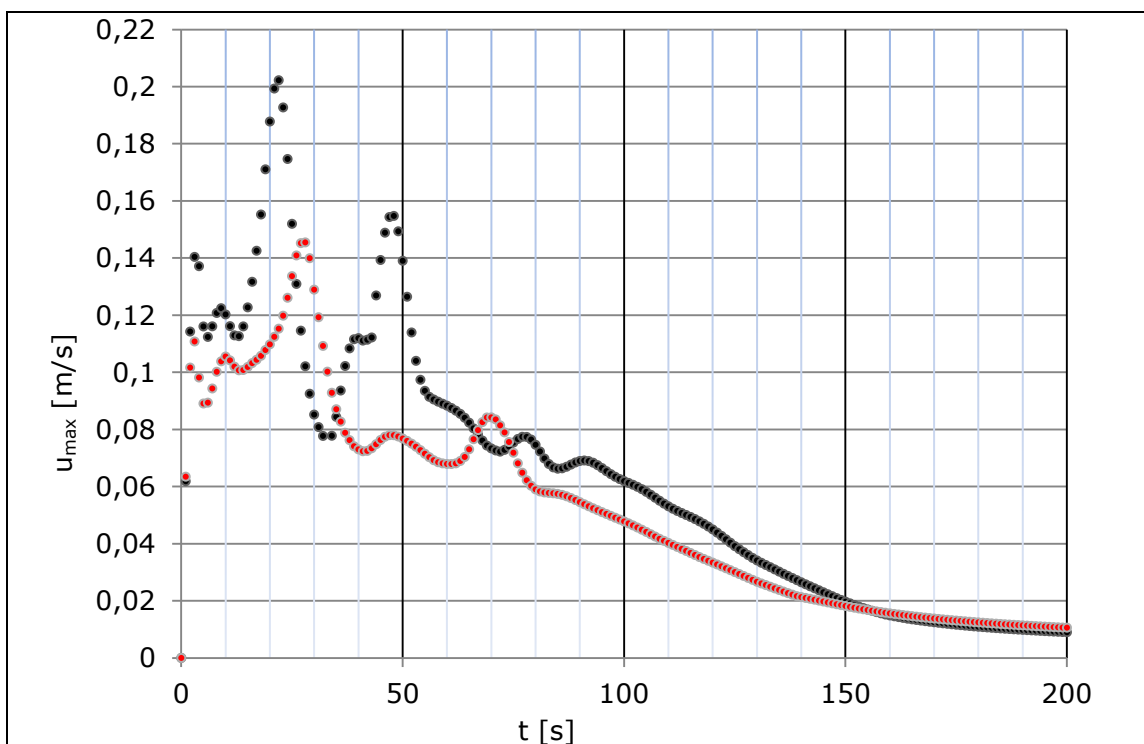
Kolejnym elementem analizy tej grupy modeli było porównanie rozkładu wartości  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek osadowy. Tak jak w przypadku wcześniej omawianych modeli porównano wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego występującego w modelach o kształtach specjalnych do wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym.

Rozkład  $u_{\max}$  dla modelu posiadającego stożkowe dno o kącie pochylenia  $20^\circ$  przedstawiono na rysunku 8.35. W przypadku tego modelu przepływ namywający formuje się w czasie zbliżonym do czasu formowania się przepływu w modelu podstawowym. Po pełnym uformowaniu się przepływu wartość  $u_{\max}$  wzrasta osiągając wartość kulminacyjną w czasie zbliżonym do analogicznego czasu występowania wartości kulminacyjnej prędkości przepływu namywającego w modelu podstawowym. Dla modelu ze stożkowym dnem wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  przepływu namywającego wynosi  $0,172$  m/s, co stanowi  $1,18$  wartości kulminacyjnej  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu podstawowym. Po czasie wirowania  $t = 24$  s wartość  $u_{\max}$  maleje do  $32$  sekundy. W przedziale czasu wirowania od  $t = 32$  s do  $t = 80$  s występuje łącznie się zawirowań przyściennych do przepływu namywającego. Dla czasu wirowania  $t = 55$  s wartość  $u_{\max}$  ponownie wzrasta osiągając  $0,128$  m/s, co stanowi  $1,5$  wartości  $u_{\max}$  dla analogicznego zjawiska występującego w przepływie namywającym zidentyfikowanym dla modelu podstawowego. Powyżej czasu wirowania  $t = 80$  s oba rozkłady wartości  $u_{\max}$  są do siebie zbliżone. Porównując oba rozkłady prędkości należy zwrócić uwagę na wyższą wartość kulminacyjną  $u_{\max}$  oraz wyższą wartość  $u_{\max}$  w przedziale czasowym, w którym następuje włączanie się w przepływ namywający zawirowań przyściennych.

Rozkład  $u_{\max}$  dla modelu posiadającego stożkowe dno o kącie pochylenia  $30^\circ$  został przedstawiony na rysunku 8.36. Dla tego modelu charakterystyka rozkładu  $u_{\max}$  jest zasadniczo zbliżona do charakterystyki  $u_{\max}$  modelu posiadającego stożkowe dno o kącie pochylenia  $20^\circ$ . Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  przepływu namywającego zostaje osiągnięta w czasie wirowania  $t = 22$  s i wynosi  $0,202$  m/s, co stanowi  $1,38$  wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym. Po osiągnięciu wartości kulminacyjnej wartość  $u_{\max}$  przepływu w tym modelu maleje do  $33$  sekundy. Po tym czasie wzrasta ponownie i dla czasu wirowania  $t = 48$  s osiąga wartość  $0,154$  m/s. Po czasie wirowania  $t = 90$  s oba rozkłady wartości  $u_{\max}$  są do siebie zbliżone, przy czym do  $140$  sekundy wartość  $u_{\max}$  przepływu namywającego występującego w modelu o stożkowym dnie posiada nieznacznie większe wartości  $u_{\max}$ . Na koniec rozpatrywanego okresu wirowania  $u_{\max}$  analizowanego rozkładu posiada nieznacznie mniejszą wartość prędkości, niż wartość  $u_{\max}$  dla modelu podstawowego.

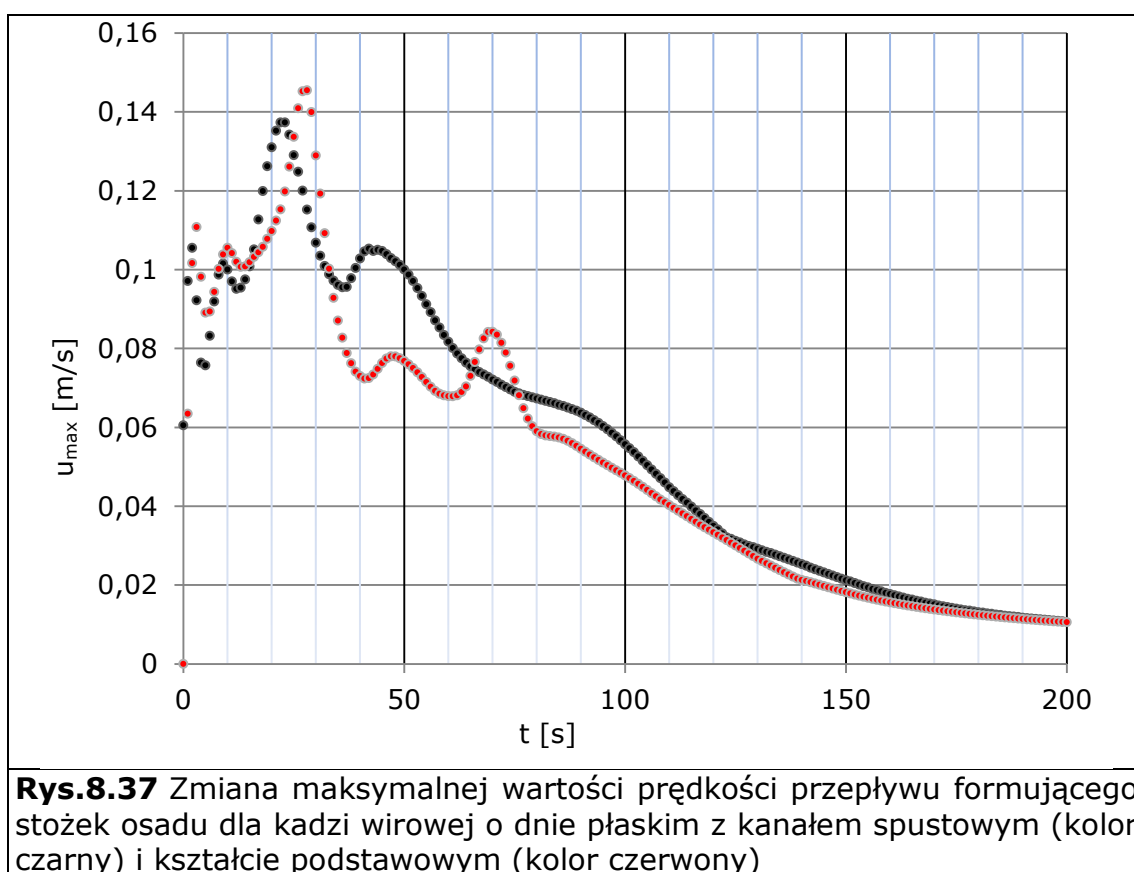


**Rys.8.35** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o dnie stożkowym ( $20^\circ$ ) (kolor czarny) i kształcie podstawowym (kolor czerwony)



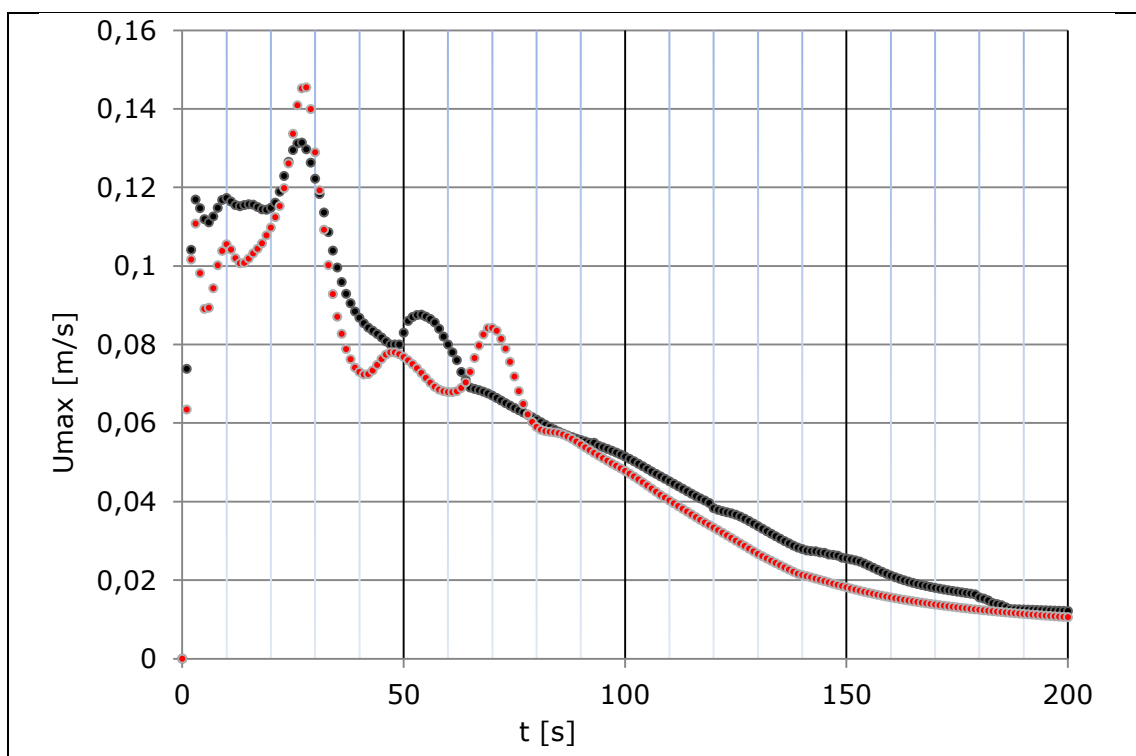
**Rys.8.36** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o dnie stożkowym ( $30^\circ$ ) (kolor czarny) i kształcie podstawowym (kolor czerwony)

Rozkład wartości  $u_{\max}$  dla modelu posiadającego półkę osadową został przedstawiony na rysunku 8.37. Przepływ namywający w tym modelu formuje się w czasie zbliżonym do porównywanego. Wartość kulminacyjna  $u_{\max}$  przepływu namywającego występuje dla czasu wirowania  $t = 22$  s i wynosi  $0,137$  m/s, co stanowi  $0,88$  wartości  $u_{\max}$  przepływu formującego stożek osadu w modelu podstawowym. Pomiędzy 22 i 36 sekundą wartość  $u_{\max}$  maleje. Po tym okresie czasu wzrasta ponownie osiągając dla czasu wirowania  $t = 43$  s wartość  $0,105$  m/s, co stanowi  $1,24$  wartości analogicznego zjawiska występującego w modelu podstawowym. Jest to wzrost wynikający z oddziaływania zawirowań przyściennych, które występuje znacznie wcześniej niż ma to miejsce w modelu o geometrii podstawowej. W analizowanej konstrukcji rozkład  $u_{\max}$  przepływu namywającego posiada wyższe wartości prędkości w przedziale od 33 do 66 sekundy oraz od 76 do 120 sekundy wirowania. Powyżej 120 sekundy oba rozkłady prędkości są do siebie zbliżone wartościami.



Rozkład wartości  $u_{\max}$  dla ostatniego modelu w analizowanej grupie został przedstawiony na rysunku 8.38. Tak jak w przypadku poprzednio analizowanych modeli czas formowania się przepływu namywającego jest zbliżony do czasu formowania się przepływu w modelu podstawowym. Kulminacyjna wartość  $u_{\max}$  dla przepływu namywającego występuje dla czasu wirowania  $t = 27$  s i wnosi  $0,131$  m/s, co stanowi  $0,85$  wartości kulminacyjnej  $u_{\max}$  przepływu namywającego w modelu podstawowym. Pomiędzy 27 a 48 sekundą wirowania  $u_{\max}$  maleje. Po tym czasie występuje

wzrost wartości  $u_{\max}$  związany z włączaniem się do przepływu namywającego zawirowań przyściennych. Dla czasu wirowania  $t = 55$  s występuje wzrost wartości  $u_{\max}$  do wartości zbliżonej do zidentyfikowanej dla rozkładu w modelu podstawowym. Wzrost wartości  $u_{\max}$  związany z włączaniem się do przepływu namywającego zawirowań przyściennych występuje wcześniej niż ma to miejsce w modelu podstawowym. Po czasie wirowania  $t = 90$  s oba rozkłady wartości  $u_{\max}$  są do siebie zbliżone, przy czym do 190 sekundy wirowania rozkład  $u_{\max}$  dla modelu wyposażonym w parasol dyfuzyjny posiada wartości nieznacznie wyższe od wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym.



**Rys.8.38** Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej o geometrii uwzględniającej występowanie parasola dyfuzyjnego (kolor czarny) i kształcie podstawowym (kolor czerwony)

Kolejnym elementem analizy było określenie wpływu zróżnicowana geometrycznego modeli o kształtach występujących w konstrukcjach przemysłowych na pozostałe zawirowania wtórne. Zestawienie wartości stanów charakterystycznych przepływów wtórnych przedstawiono w tabeli 8.09.



**Tab.8.09** Charakterystyka systemu przepływów drugorzędowych dla modeli o kształtach charakterystycznych występujących w konstrukcjach przemysłowych.

Zjawisko	parametr	Typ kształtu zbiornika				podstawowy
		stożkowy 20° 1 R	stożkowy 30° 1 R	z półką osadową	z parasolem dyfuzyjnym	
Przepływ namywający	$U_{max}$ [m/s]	0,1724	0,2022	0,1374	0,1314	<b>0,1454</b>
	$t_{w,max}$ [s]	24	22	24	27	<b>28</b>
Zawirowania przyścienne	$U_{max}$ [m/s]	0,1735	0,1757	0,1449	0,1734	<b>0,1789</b>
	$t_{w,max}$ [s]	22	21	26	24	<b>21</b>
	q	4	4	4	4	<b>4</b>
Przepływ centralny	$U_{max}$ [m/s]	0,0598	0,0535	0,0899	0,0755	<b>0,1243</b>
	$t_{ap}$ [s]	36	31	41	48	<b>27</b>

Zawirowania przyścienne w analizowanej grupie modeli formują się pomiędzy 10 a 20 sekundą wirowania. Zanikają pomiędzy 50 a 85 sekundą. Najdłużej występujące zostały zidentyfikowane dla modelu o dnie stożkowym, o kącie pochylenia wynoszącym 20°. Kulminacyjne wartości  $U_{max}$  tych zawirowań są do siebie zbliżone. Wyjątek stanowi model posiadający półkę osadową dla którego zidentyfikowano kulminacyjną wartość  $U_{max}$  o niższej wartości wynoszącej 0,145 m/s. Ilość par zawirowań jest stała we wszystkich modelach ( $q = 4$ ). Najkorzystniejsze występowanie zawirowań przyściennych (ze względu na wartość  $U_{max}$ ) zostało zidentyfikowane dla modelu o stożkowym dnie (20°) oraz modelu z parasolem dyfuzyjnym. Ze względu na czas występowania najkorzystniejsze są warunki przepływu w modelu o stożkowym dnie i kącie pochylenia dna wynoszącym 20°. Czas występowania wartości maksymalnych prędkości tych zawirowań w wyszczególnionych powyżej modelach jest zbliżony.

Przepływ centralny, w analizowanej grupie modeli, formuje się pomiędzy 10 i 20 sekundą wirowania. Czas występowania maksymalnej wartości  $U_{max}$  przepływu centralnego we wszystkich modelach jest zróżnicowany. Najwcześniej przepływ centralny formuje się w modelu z parasolem dyfuzyjnym, co może mieć związek z oporami tarcia występującymi w obszarze zbliżonym do przewodu zasilającego parasol. Najpóźniej formuje

się on w modelu o stożkowym dnie ( $20^\circ$ ). W analizowanej grupie modeli najniższe porównywalne wartości  $u_{\max}$  dla tego przepływu posiadają modele o stożkowym dnie. Najwyższa wartość  $u_{\max}$  została zidentyfikowana w modelu porównawczym, a w odniesieniu do modeli porównywanych najwyższa wartość  $u_{\max}$  dla tego przepływu została osiągnięta dla modelu wyposażonego w półkę osadową i kanał spustowy. Ze względu na kryterium występowania przepływu centralnego najkorzystniejszą geometrią jest geometria modelu o stożkowym dnie i kącie pochylenia  $30^\circ$ .

Ostatnim elementem analizy tej grupy modeli było porównanie całkowitego czasu wirowania. Wartości czasu końca wirowania dla modeli o kształtach występujących w konstrukcjach przemysłowych zestawiono w tabeli 8.10 i przedstawiono na rysunku 8.39.

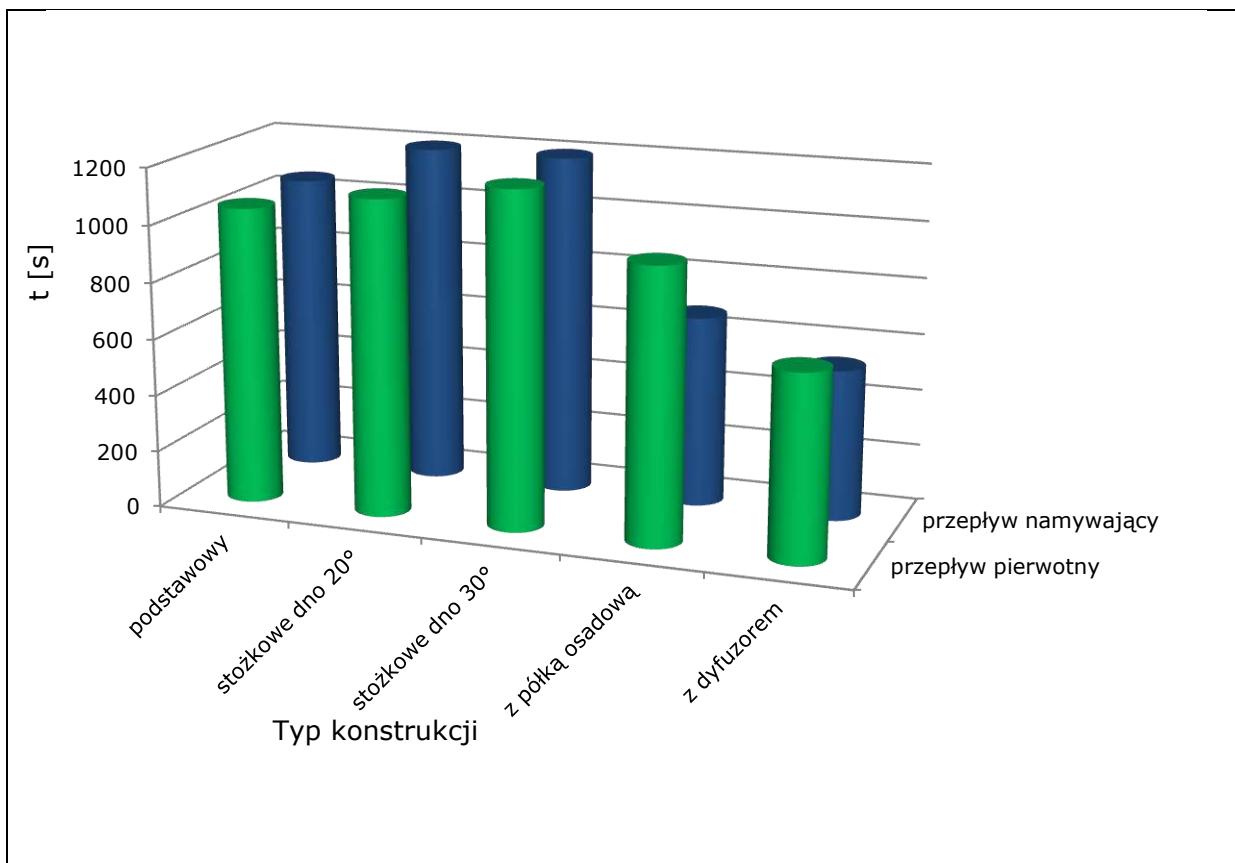
**Tab.8.10** Zestawienie kroków czasowych końca wirowania dla modeli o kształtach charakterystycznych występujących w konstrukcjach przemysłowych

typ kształtu	całkowity czas wirowania	
	t [s] dla $u_{\max}$ pp	t [s] dla $u_{\max}$ pw
podstawowy	1049	1056
stożkowe dno ( $20^\circ$ )	1269	1116
stożkowe dno ( $30^\circ$ )	1265	1183
z półką osadową	674	965
z dyfuzorem	533	654

W przypadku przepływu pierwotnego, w analizowanych modelach posiadających geometrię zbiorników specyficznych konstrukcji przemysłowych, najkrótszy czas wirowania został osiągnięty dla modelu z przewodem zasilającym parasol dyfuzyjny ( $t = 873$  s), najdłuższy zaś dla modelach o stożkowym dnie ( $t = 1269$  s dla  $20^\circ$  i  $t = 1265$  s dla  $30^\circ$ ).

Czas wirowania według kryterium właściwego dla przepływu wtórnego namywającego jest wyższy, w porównaniu do czasu osiągniętego w modelu podstawowym i w modelach posiadających dno stożkowe. Najdłuższy czas całkowity wirowania został osiągnięty dla konstrukcjach o stożkowym dnie ( $t = 1183$  s dla  $30^\circ$  i  $t = 1116$  s dla  $20^\circ$ ). Najkrótszy czas wirowania został osiągnięty dla modelu z dyfuzorem i wyniósł on  $t = 654$  s.

Ze względu na przyjęte kryteria końca wirowania najkorzystniejsze, dla analizowanej grupy modeli są modele posiadające stożkowe dno. Dla tych modeli zidentyfikowano wydłużenie czasu występowania przepływu pierwotnego i co bardziej znaczące wydłużenie czasu występowania przepływu drugorzędowego namywającego stożek osadowy. Najmniej korzystna, z punktu widzenia czasu ewolucji przepływu pierwotnego i wtórnego namywającego, jest geometria uwzględniająca występowanie przewodu zasilającego parasol dyfuzyjny.



**Rys.8.39** Porównanie całkowitego czasu wirowania dla kryterium właściwego dla przepływu pierwotnego (kolor zielony) i przepływu namywającego (kolor niebieski) w modelach o kształtach specjalnych

## **9 Podsumowanie (wnioski naukowe, utylitarne i perspektywy dalszych badań)**

### **Wnioski o charakterze naukowym**

Stan wiedzy w zakresie procesu i zjawisk zachodzących w kadzi wirowo - osadowej ma charakter szcątkowy, co uniemożliwia jej wykorzystanie do rozwiązywania zagadnień o charakterze inżynierskim, zarówno w zakresie konstrukcyjnym jak i procesowym.

Autorzy opracowań naukowych wskazują jednoznacznie na potrzebę badań nad przepływem w whirlpoolu, mechanizmem tworzenia się przepływu odpowiedzialnego za tworzenie się stożka osadu w odniesieniu do zmiennych parametrów konstrukcyjnych zbiornika oraz zmiennych parametrów realizacji procesu usuwania osadu gorącego w kadzi wirowo - osadowej.

Posiadana laboratoryjna kadź wirowo - osadowa umożliwia realizacją szerokiej gamy badań eksperymentalnych dla zmiennych warunków formowania się stożka osadu i zjawisk temu towarzyszących. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem kadzi laboratoryjnej umożliwiły wizualizację zjawisk zachodzących podczas klarowania w kadzi wirowo - osadowej i określenie warunków początkowych dla modelu podstawowego.

Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu na podstawie porównania wartości prędkości obwodowej. Wykonano pomiary przemieszczenia cząstek osadu zastępczego dla wybranych odległości wzdłuż średnicy zbiornika i na tej podstawie obliczono ich prędkość. Uzyskane w ten sposób wartości prędkości porównano z wynikami uzyskanymi na drodze symulacji. Dodatkowym elementem weryfikacji było porównanie całkowitego czasu wirowania dla wybranych modeli o zróżnicowanej objętości z wartościami czasu pomierzonego dla obiektów rzeczywistych. Weryfikacja eksperymentalna potwierdziła adekwatność zbudowanego modelu obliczeniowego.

Na podstawie map pola prędkości zidentyfikowano występowanie przepływów wtórnych w postaci przepływu namywającego stożek osadu, zawirowań przyściennych, przepływu centralnego oraz przepływów posiadających charakter lokalny występujących chwilowo.

Opracowany model obliczeniowy pozwala analizować szeroki zakres zmian konstrukcyjnych zbiorników whirlpoola bez konieczności budowy modeli laboratoryjnych uwzględniających każdorazowo zmianę danego parametru konstrukcyjnego. Może więc on stanowić element wspomagania projektowania kadzi wirowo - osadowych.

W ramach układu zawirowań określono przepływy sprzyjające formowaniu się stożka osadu. Korzystne są duże prędkości i długi czas utrzymywania się przepływu namywającego. Korzystne są zawirowania przyścienne, które oczyszczają ściankę zbiornika. Niekorzystne jest natomiast zawirowanie centralne ograniczające możliwość formowania się stożka w początkowej fazie wirowania, a w późniejszej, chwilowe unoszenie cząstek osadu nagromadzanego na powierzchni stożka.

Stwierdzono występowanie zjawiska przemieszczania się zawirowań przyściennych (wirów Taylora) w kierunku dna zbiornika oraz włączanie się ich do przepływu namywającego stożek, co powoduje powstawanie charakterystycznych fluktuacji rozkładu wartości  $u_{\max}$  przepływu namywającego.

Stwierdzono brak występowania zawirowań przyściennych dla smukłości poniżej 0,25. Ilość par zawirowań przyściennych zależy jest od wysokości napełnienia kadzi wirowo - osadowej.

Opracowany model obliczeniowy umożliwia analizę zmian w strukturze przepływów drugorzędowych. Stwierdzono stały charakter występowania przepływu namywającego oraz przepływu centralnego. Pozostałe przepływy zanikają w miarę upływu czasu wirowania.

## **Wnioski o charakterze użytkowym**

W porównaniu do innych metod, klarowanie brzezki w kadzi wirowo - osadowej jest metodą wymagającą najmniejszych nakładów energetycznych. W odniesieniu do wielkości zaniku brzezki oraz czasu realizacji operacji, ustępuje ona jedynie usuwaniu osadu gorącego z wykorzystaniem wirówki klarującej. Jest metodą powszechnie stosowaną. Operacja klarowania brzezki w whirlpoolu jest realizowana cyklicznie, co koresponduje z procesem technologicznym.

W przypadku modeli o zmiennej wysokości napełnienia:

- korzystnie najwyższe wartości prędkości przepływu namywającego występują dla smukłości  $H_n:D = 1,5$ , dla tej samej smukłości występuje także korzystny wzrost wartości prędkości pomiędzy 45 i 60 sekundą wirowania;
- niekorzystnie najwyższe wartości prędkości przepływu centralnego stwierdzono dla smukłości  $H_n:D = 1$ ;
- korzystnie najdłużej utrzymywali się przepływy namywający dla smukłości  $H_n:D = 0,25$ .

W przypadku modeli o stałej objętości i zmiennym  $D$  oraz  $H_n$ :

- korzystnie najwyższe wartości prędkości przepływu namywającego uzyskano dla modelu o wysokości napełnienia  $0,5 H_n$ , dla przedziału czasowego od 75 do 200 sekundy wirowania;

- korzystnie najwyższą chwilową wartość prędkości przepływu namywającego uzyskano dla smukłości  $H_n:D = 1,5$ ;
- najmniej korzystną (najwyższą) wartość prędkości przepływu centralnego uzyskano dla modelu o smukłości  $H_n:D = 1,25$ .

Porównując czas wirowania w zbiornikach o stałej średnicy i zmiennej wysokości napełnienia (zmiennej objętości) stwierdzono, iż całkowity czas występowania przepływu namywającego jest najdłuższy dla najmniejszej z analizowanych wysokości napełnienia (najmniejszej objętości).

Porównując czas wirowania w zbiornikach o stałej objętości i zmiennej średnicy i wysokości napełnienia określono, iż całkowity czas wirowania jest najdłuższy dla największej z analizowanych wysokości napełnienia.

Analizując kompleksowo prędkości przepływów wtórnych, wykazano, iż ich zmienność w czasie i całkowity czas utrzymywania się występują najkorzystniej w konstrukcjach, w których można realizować wirowanie przy wysokości napełnienia  $0,5$  i  $0,75 H_n$ .

W przypadku konstrukcji o zmodyfikowanym połączeniu pobocznic i dna zbiornika występuje przesunięcie obszaru, w którym formuje się przepływ namywający. Przesunięcie ma miejsce w przypadku połączeń o małym promieniu zaokrąglenia i małym wymiarze sfazowania.

W porównaniu do przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym, przepływ namywający zidentyfikowany dla modeli o zmodyfikowanym połączeniu pobocznic i dna zbiornika posiada wyższe wartości prędkości, przy jednoczesnym występowaniu dość znacznych fluktuacji wartości prędkości w początkowym okresie wirowania.

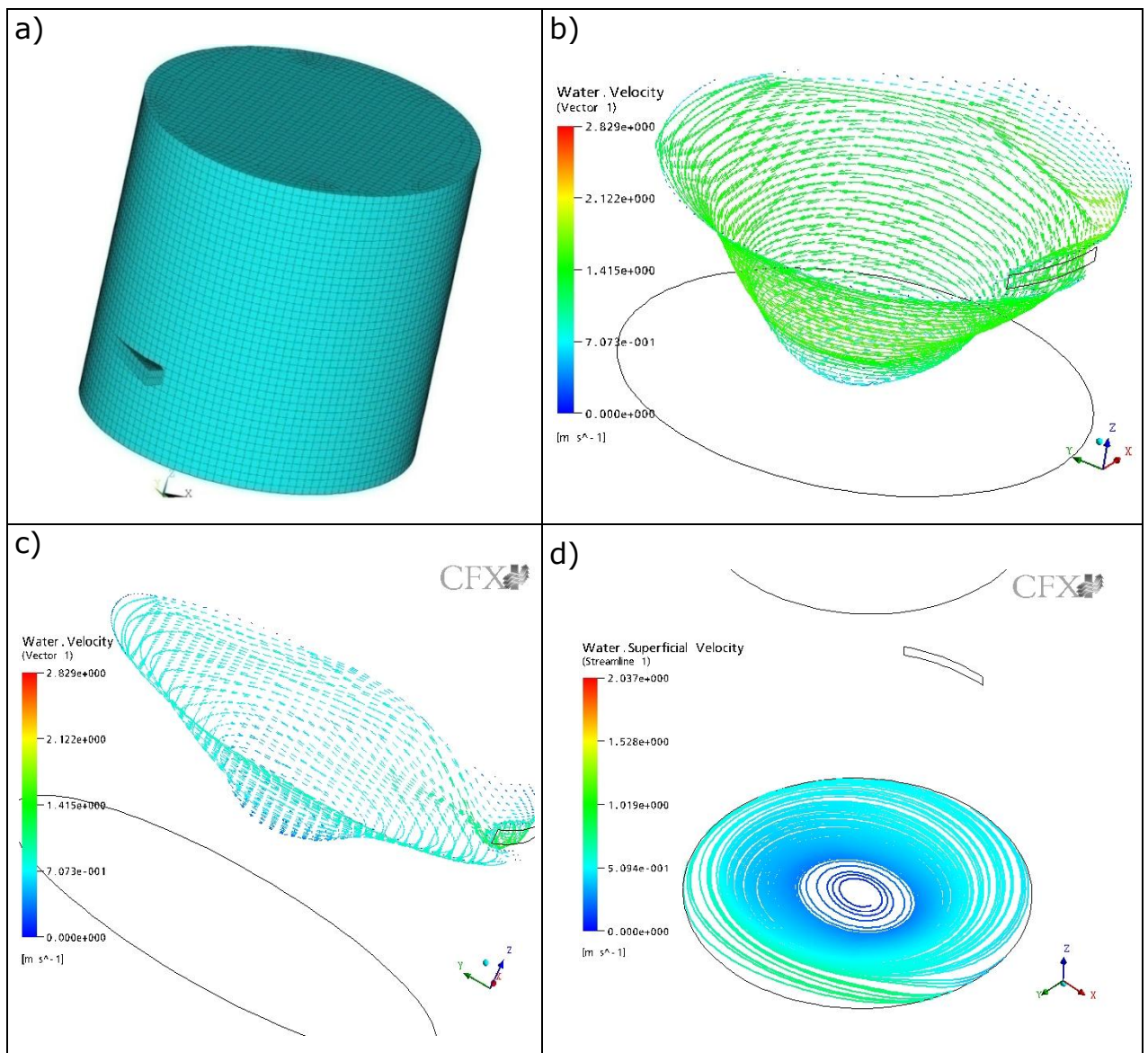
W przypadku kształtów charakterystycznych zbiorników występujących w konstrukcjach przemysłowych najkorzystniejsze, pod względem wartości prędkości i czasu występowania przepływu namywającego, są modele o stożkowym dnie zbiornika.

Kształty zbiorników przemysłowych kadzi wirowo - osadowej wyposażonych w półkę osadową lub dyfuzor brzezki mogą być stosowane wyłącznie w przypadku niskich wysokości napełnienia. Jest to związane z występującym dla tych konstrukcji, relatywnie krótkim czasem wirowania.

### **Pespektywy dalszych badań**

Opracowany i zweryfikowany model symulacyjny może zostać wykorzystany do analizy funkcjonalnej dowolnej klasy odmian konstrukcji zbiornika kadzi wirowo - osadowej.

W zakresie modelowania i symulacji ruchu płynu w kadzi wirowo - osadowej niezbędnym jest zbudowanie i analiza pełnego modelu trójwymiarowego. Pozwoli to na określenie wpływu warunków realizacji etapu napełnienia na formowanie się i ewoluowanie przepływów drugorzędowych. Model taki został już zbudowany. Na rysunku 9.01 przedstawiono wstępne wyniki obliczeń dotyczących początkowej fazy etapu napełnienia w zakresie kształtowania się i rozkładu prędkości swobodnej powierzchni powstającej podczas napełnienia zbiornika oraz toru ruchu cząstek płynu w obszarze warstwy granicznej Ekmana dla początkowego czasu wirowania. Na obecnym etapie prac model ten jest w fazie testowania.



**Rys.9.01** Model trójwymiarowy kadzi wirowo - osadowej: a) geometria modelu z siatką dyskretyzacyjną; b) kształt i mapa prędkości swobodnej powierzchni dla czasu napełnienia  $t = 50$  s; c) kształt i mapa prędkości swobodnej powierzchni dla czasu napełnienia  $t = 100$  s; d) tor ruchu cząstek płynu w obszarze warstw granicznej dla czasu wirowania  $t = 50$  s [Jakubowski 2008]

Kolejnym krokiem będzie także próba zbudowania trójwymiarowego modelu uwzględniającego sedymentację cząstek osadu.

W zakresie badań eksperymentalnych, w oparciu o istniejące stanowisko badawcze, istnieje możliwość przeprowadzenia badań dotyczących wpływu umiejscowienia wysokości zasilania na efekt tworzenia się stożka osadu (badania z wykorzystaniem osadu zastępczego).

Po przebudowie istniejącego zbiornika laboratoryjnej kadzi wirowo - osadowej, lub budowie nowego według pomysłu autora, będzie możliwym do przebadania wpływ zwielokrotnienia (zwiększenia) ilości dysz zasilających, pracujących w sposób jednoczesny lub sekwencyjny na redukcję niesymetryczności przepływu w zbiorniku whirlpoola, a przez to na możliwość polepszenia warunków formowania się stożka osadu.



## Wykaz literatury

1. Alfa-Laval, 2007, Strona internetowa firmy Alfa-Laval, <http://www.alfalaval.com> [dostęp listopad 2007]
2. Andrews J., M., H., 2006, The Brewhouse, Brewing - New Technologies, praca zbiorowa pod redakcją C., W. Bamforth, CRC Press
3. Ansys, 2007, Release 11.0 Documentation for ANSYS, SAS IP, Inc
4. Batchelor G., K., 1951, Note on a class of solutions of the Navier-Stokes equations representing steady rotationally-symmetric flow, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Oxford University Press, nr 4(1), str. 29-41
5. Benton E., R., 1966, On the Flow Due to a Rotating Disk, Journal Fluid Mechanics 24, część 4, str. 781-800
6. Bödewadt U., T., 1940, Drehströmung über festem Grunde, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 20, nr. 5, str. 241-253
7. Briggs, D., E.; Boulton C., A.; Brookes P., A.; Stevens R., 2004, Brewing - Science and practice, CRC Press
8. Briley W., R.; Walls H., A., 1970, A Numerical Study of Time-dependent Rotating Flow in a Cylindrical Container at Low and Moderate Reynolds Numbers, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Num. Methods in Fluid Dynamics, Lect. Notes in Physics, vol. 8, Springer-Verlag, New York, str. 377-384
9. Chapman J.; Woods J., L.; O'Callaghan J., 1977(a), Whirlpool Separation, Part I: The Brewer 63, nr 750, str. 130-133
10. Chapman J.; Woods J., L.; O'Callaghan J., 1977(b), Whirlpool Separation, Part II: The Brewer 63, nr 751, str. 164-169
11. Chapman J., 1976, Disposal of a Brewery Waste with Special Reference to the Whirlpool Separator, University of Newcastle-upon-Tyne
12. Deka A., 2001, Pomiary masy, objętości, gęstości i strumienia przepływającej substancji, Pomiary cieplne, część I, Podstawowe pomiary cieplne, praca zbiorowa pod redakcją T., R. Fordemskiego, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa
13. Delgado A., 2000, On the rotationally symmetric laminar flow of Newtonian fluids induced by rotating disks, Physics of Rotating Fluids, Selected Topics of the 11th International Couette-Taylor Workshop Held at Bremen, Germany, 20-23 July 1999, praca zbiorowa pod redakcją C. Egbersa i G. Pfistera, Lecture Notes in Physics, Springer
14. Denk V., 1998, The Whirlpool State-of-the-art 1997, Brauwelt International, nr 1, str. 31-43

15. Diakun J., 2000, Możliwość zastosowania kadzi wirowo – osadowej do klarowania cieczy w przemyśle spożywczym, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika nr 256, zeszyt nr 61, str. 79 – 84
16. Diakun J., Kowalczyk W., 2001, Ograniczenia w zastosowaniu kadzi wirowej do klarowania cieczy, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 2001/2, str. 24 - 27
17. Diakun J., Jakubowski M., 2003, Modyfikacja linii technologicznej klarowania soku surowego, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 3/2003, str. 27 - 28
18. Dürholt A., 1988, Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absatzbehälter "Whirlpool". Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14, nr 38. VDI-Verlag, Düsseldorf
19. Dürholt A.; Denk V., 1986 Experimentelle Untersuchungen zur Strömung im Whirlpool, Monatsschr. für Brauwissenschaft 39, nr 9, str. 320-328
20. Dürholt A.; Denk V., 1987, Der Einfluß der Bodengeometrie auf die Whirlpoolströmung und die Übertragbarkeit der Ergebnisse, Monatss. für Brauwissenschaft 40, nr 10, str. 400-409
21. Einstein A., 1926, Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baer'schen Gesetzes, Naturwissenschaft 14, nr 2, str. 223-224
22. Elsner J., W., 1987, Turbulencja przepływów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa
23. Geiger H., 1984, Prospekt firmy Geiger-Sandfang. Fabrik, Karlsruhe
24. Geiger H., 2007, Strona internetowa firmy Geiger, <http://www.passavant-geiger.de> [dostęp wrzesień 2007]
25. Greenspan H., P., 1963, The Theory of Rotating Fluids, Cambridge University Press
26. Handley M., F.; Hough J., S., 1969, Investigation into the Design and Performance of Model Whirlpool Separators, Brewer's Journal London 105, nr 1245, str. 49-55
27. Hardwick W., A., 1994, Handbook of Brewing, CRC Press
28. Harlow F., H.; Welch J., 1965, Numerical Calculation of Time-dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, Physics of Fluids 8 nr 12, str. 2182-2198
29. Hlaváček F.; Lhotský A., 1969, Piwowarstwo, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa
30. Huber W., 1965, Praktische Erfahrungen mit dem Ausschlagbottichsystem "Whirlpool". Brauwelt 105, nr. 52, str. 969-970

31. Hudston H., R., 1960, Whirlpool Filling of Wort Tanks, MBAA - Proceedings of the 73rd Anniversary Convention, str. 30-31
32. Hudston H., R., 1969, The Story of the Whirlpool, MBAA Technical Quarterly 6, nr 3, str. 164-167
33. Huppmann, 2007, Strona internetowa firmy GEA – Huppmann, [www.gea-brewery.com](http://www.gea-brewery.com) [dostęp czerwiec 2007]
34. Jakubowski M., 2004, Possibilities of use of DPIV for visualization of liquid rotational movement in rotational ladle, Modern Techniques and Technologies, Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, nr 33, Koszalin, str. 105 - 108
35. Jakubowski M., 2008, Symulacja ruchu cieczy w kadzi wirowej whirlpool – przepływ formujący stożek osadu, XIII Szkoła Technologii Fermentacji, Materiały pomocnicze w technologii browarniczej, Kraków, str. 250 - 259
36. Jakubowski M.; Bil T.; Tesmer R., 2005, Analiza wyników pomiaru ciśnienia dynamicznego cieczy rotującej w kadzi wirowo - osadowej, Inżynieria Rolnicza nr 9 (69), Wydawnictwo Komitetu Techniki Rolniczej PAN, Kraków
37. Kazimierski Z., 2004, Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź
38. Kazimierski Z., 2007, Ruch wirowy płynów w przyrodzie oraz w maszynach i urządzeniach, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź
39. Kowalczyk W., Diakun J., 2000, Wpływ koncentracji zawiesiny na proces rozdzielania w kadzi wirowo – osadowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika nr 256, zeszyt nr 61, str. 181 – 188
40. Kunze W., 1999, Technologia piwa i słodu, Wydawnictwo Piwochmiel, Warszawa
41. Michel R., 1989, Grundlegende Mechanismen der Heißtrubabscheidung im Whirlpool, Doktor Dissertation, Technische Universität München
42. Mihelcic M.; Schröck-Pauli C.; Wingerath K.; Wenzl H.; Uelhoff W.; van der Hart A., 1981, Numerical Simulation of Convective Flow of the Melt in the Classical Crochralski Method in ACRT and CACRT, Journal of Crystal Growth 53 nr 2, str. 337-354
43. Münch H., 1967, Der Bodeneffekt, Steinecker Nachrichten, nr 16, str. 20-22
44. Münch H., 1969, Practical Aspects of the Whirlpool, Brewer's Guardian 98, nr 11, str. 46-48
45. Narziß L., 1980, Abriß der Bierbrauerei, Enke Verlag, Stuttgart
46. Nielsen H.; Jorgensen A.; True H., 1968, Theorie und Konstruktion des Whirlpools, Brauwissenschaft 21, nr 9, str. 342-346

47. Oertel H., 2004, Prandtl's Essentials of Fluid Mechanics, Second Edition, Springer
48. Pearson C., E., 1965(a), A Computational Method for Viscous Flow Problems, Journal of Fluid Mechanics (Digital Archive) 21, str. 611-622
49. Pearson, C, E., 1965(b), Numerical Solutions for the Time-dependent Viscous Flow Between Two Rotation Coaxial Disks, Journal of Fluid Mechanics (Digital Archive) 21, str. 623-633
50. Petersen H., 1987, Brauereianlagen, Verlag Hans Carl, Nürnberg
51. Prandtl L., Oswatitch K., Weighardt K., 1990, Führer durch die Strömungslehre, wydanie 9, Veiveg, Brunszwik
52. Priest F., G.; Stewart G., G., 2006, Handbook of Brewing, CRC Press
53. Puzyrewski R.; Sawicki J., 2000, Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
54. Schlichting H., 1982, Grenzschichttheorie. 8. Auflage, Verlag G Braun, Karlsruhe
55. Schmitt D.; Jault D., 2004, Numerical study of a rotating fluid in a spheroidal container, Journal of Computational Physics 197, Elsevier, str. 671-685
56. Sikora Z.; Ossowski R., 2007, Metody bezsiatkowe - czy jest dla nich miejsce w geoinżynierii?, Geoinżynieria, nr 3/2007 (14), str. 42-46
57. Stefaniak H., S, 1968, Zur Wirkungsweise des Whirlpools, część 1, Brauwissenschaft 21, nr 9, str. 337-342
58. Stefaniak H., S, 1968, Zur Wirkungsweise des Whirlpools, część 2. Brauwissenschaft 21, nr 10, str. 390-396
59. Steinecker, 2008, Strona internetowa firmy Steinecker, <http://www.steinecker.com> [dostęp styczeń 2008]
60. Stewartson K., 1957, On Almost Rigid Rotations. Journal of Fluid Mechanics, nr 3, str. 17-26
61. Stewartson, K., 1953, On the Flow Between Two Rotating Disks, Proc. Cambridge Phil. Soc. 49, str. 333
62. Tonn H., 1967, Whirlpoolprinzip in der Würzetechnik der Brauerei, Tageszeitung für Brauerei 64, nr 72/73, str. 418-421
63. Troskolański A., T., 1969, Hydromechanika, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa

64. Tröster R., 1969, Strömungsmechanische Überlegungen zum Sedimentationssystem "Whirlpool", Brauwissenschaft 22, nr 4, str. 141-152
65. White F., M. 2002, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York
66. Xue S., C.; Phan-Thien N.; Tanner R., I., 1999, Fully three-dimensional, time-dependent numerical simulations of Newtonian and viscoelastic swirling flows in a confined cylinder Part I. Method and steady flow, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 87, str. 337-367
67. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Nithiarasu P., 2005, The Finite Element Method for Fluid Dynamics Sixth edition, Elsevier