

Bioutylizacja modelowego ścieku przemysłu mleczarskiego w fermentorach laboratoryjnych różnej konstrukcji

Henryk Michalski

Teresa Jamroz

Barbara Sencio

Katedra Inżynierii Bioprocessowej

Wydział Inżynierii Procesowej

i Ochrony Środowiska

Politechnika Łódzka

Wstęp

W przetwórstwie mleczarskim, a głównie przy produkcji serów dojrzewających, twarogów i kazeiny otrzymuje się jako produkt uboczny serwatkę w ilości 60 – 80 % przerabianego mleka. Zawiera ona w swoim składzie laktozę (od 3,4 do 4,9%), rozpuszczalne białka (~1,0%) i sole mineralne (~0,9%) przez co jest cennym surowcem do wykorzystania w wielu gałęziach przemysłu. W przemyśle spożywczym serwatkę stosuje się do produkcji odżywek dziecięcych i dietetycznych, w produkcji lodów, deserów, majonezów, past serwatkowych, napojów, w piekarnictwie i cukiernictwie, w produkcji kiełbas, w przemyśle paszowym i przemyśle farmaceutycznym (6,8,9). Serwatka w naturalnej postaci płynnej ulega degradacji mikrobiologicznej i traci swoje pierwotne właściwości. Wylewana do ścieków stwarza poważne zagrożenie ekologiczne dla wód powierzchniowych oraz oznacza stratę wielu związków organicznych.

Kierunki i możliwości wykorzystania serwatki w Polsce przedstawił Imbs (1), a o światowych tendencjach jej wykorzystania informował Popko (7).

Na szczególną uwagę zasługuje produkcja preparatów białkowo-witaminowych otrzymywanych z udziałem różnych drobnoustrojów, które w postaci biomasy mogą być oddzielone lub suszone wraz z białkami serwatki. Mogą tu znaleźć zastosowanie nie tylko drożdże, lecz również grzyby nitkowate i bakterie.

Proces namnażania biomasy w podłożu serwatkowym prowadzi do otrzymania wysokobiałkowego produktu, a jednocześnie uzyskuje się oczyszczenie wód przemysłowych odprowadzanych do ścieków.

W pracy tej przedstawiono wyniki badań bioutylizacji modelowego ścieku przemysłu mleczarskiego w fermentorach laboratoryjnych różnej konstrukcji.

TABELA 1
DROBNOUSTROJE WYKORZYSTYWANE DO OTRZYMYWANIA BIOMASY BIAŁKOWEJ Z SERWATKI (2).

drożdże	<i>K. fragilis</i> , <i>K. lactis</i> , <i>T. cremoris</i> , <i>T. utilis</i> , <i>C. pseudotropicalis</i>
pleśnie	<i>G. candidum</i> , <i>P. roqueforti</i> , <i>P. candidum</i> , <i>M. micheli</i> , <i>R. oligosporus</i>
bakterie	<i>L. casei</i> , <i>P. shermanii</i> , <i>P. freudenreichi</i>

Część doświadczalna

Aparatura badawcza

Cykl badań obejmował eksperymenty prowadzone w fermentorze laboratoryjnym FL - 10 . W skład laboratoryjnego zestawu fermentacyjnego wchodzi podstawa będąca jednocześnie zespołem napędowo-zasilającym oraz szklano-metalowy fermentor o pojemności 10 dm³. W podstawie umieszczone zostały wszystkie niezbędne układy do prowadzenia procesu fermentacji:

- układ sterylizacji,
- układ termostatowania,
- układ chłodzenia gazów odlotowych,
- układ wlotu powietrza jałowego,
- silnik prądu stałego umożliwiający płynną regulację obrotów mieszadła.

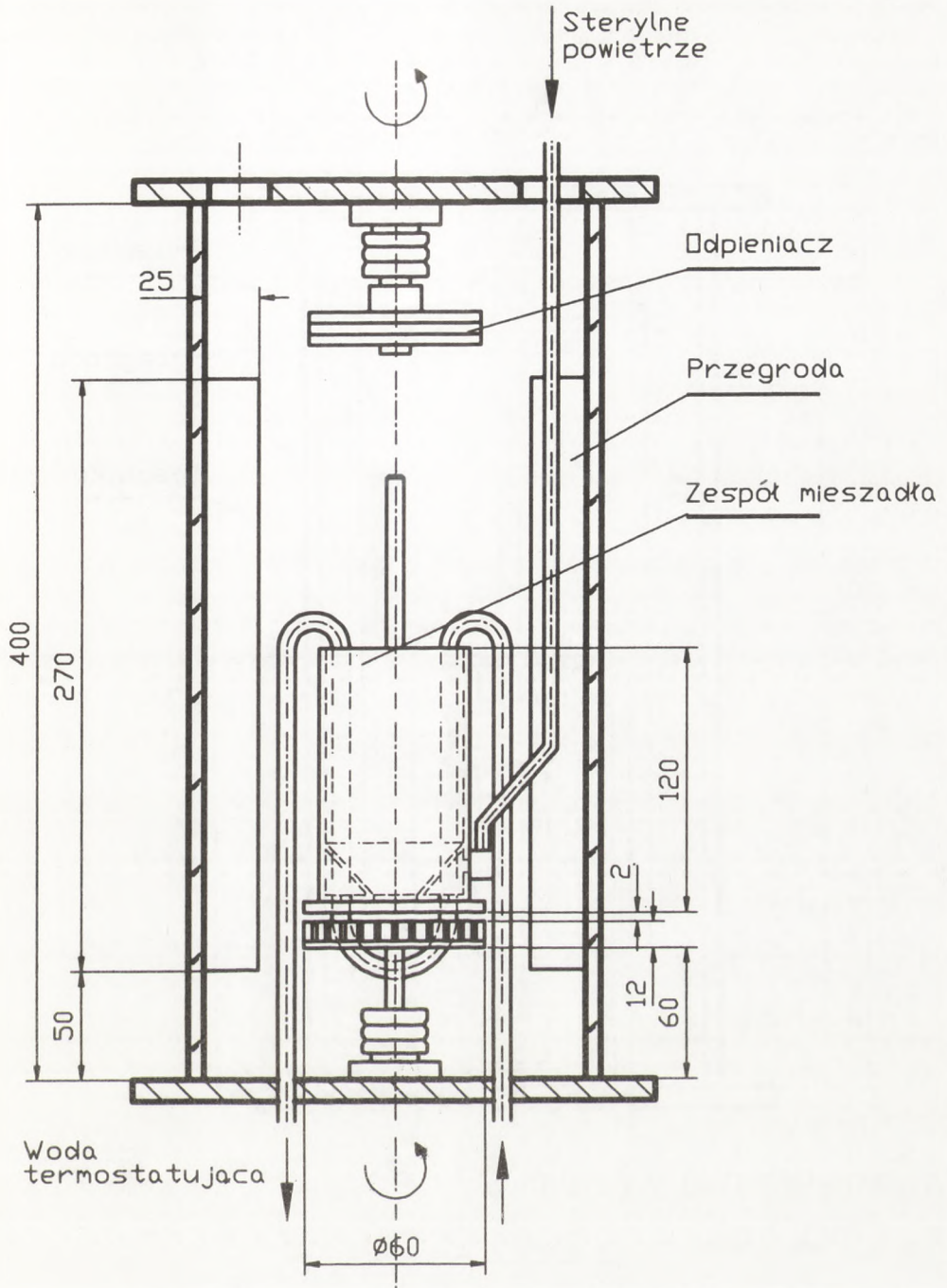
Integralną część laboratoryjnego zestawu fermentacyjnego stanowi zespół pomiarowo-regulacyjny zabudowany w szafie sterowniczej. Kieruje on pracą automatycznych zaworów regulacyjnych, silnikami mieszadła i odpieniacza mechanicznego, a także pompami perystaltycznymi w celu utrzymania na odpowiednim poziomie określonych parametrów procesu fermentacji, tj.

- temperatury,
- prędkości obrotowej wału mieszadła,
- wartości pH,
- poziomu tlenu rozpuszczonego w podłożu,
- poziomu piany.

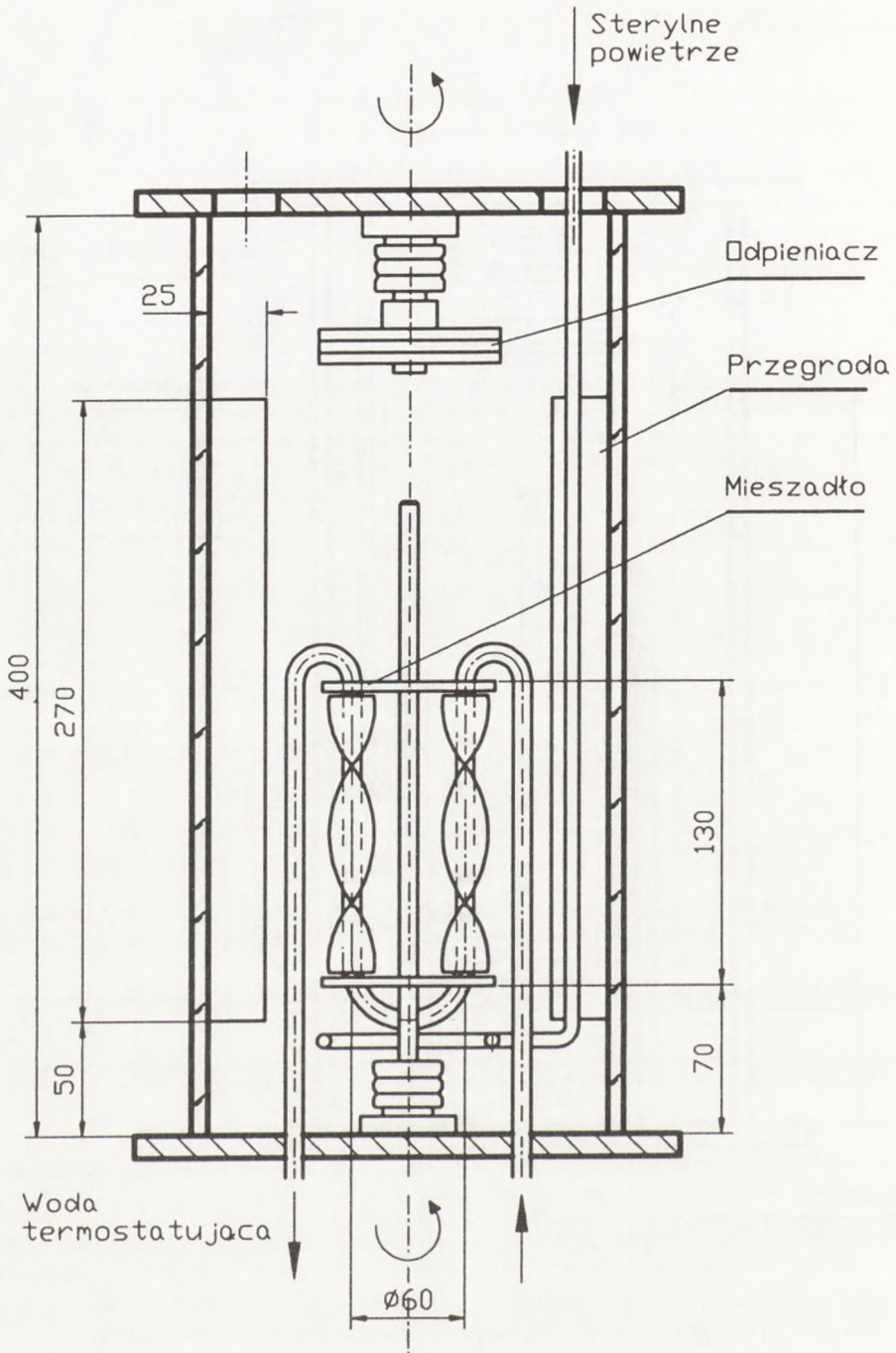
Wszystkie elementy aparatury zostały wykonane ze stali kwasoodpornej.

Fermentory stosowane do badań posiadały urządzenia mieszające następującej konstrukcji :

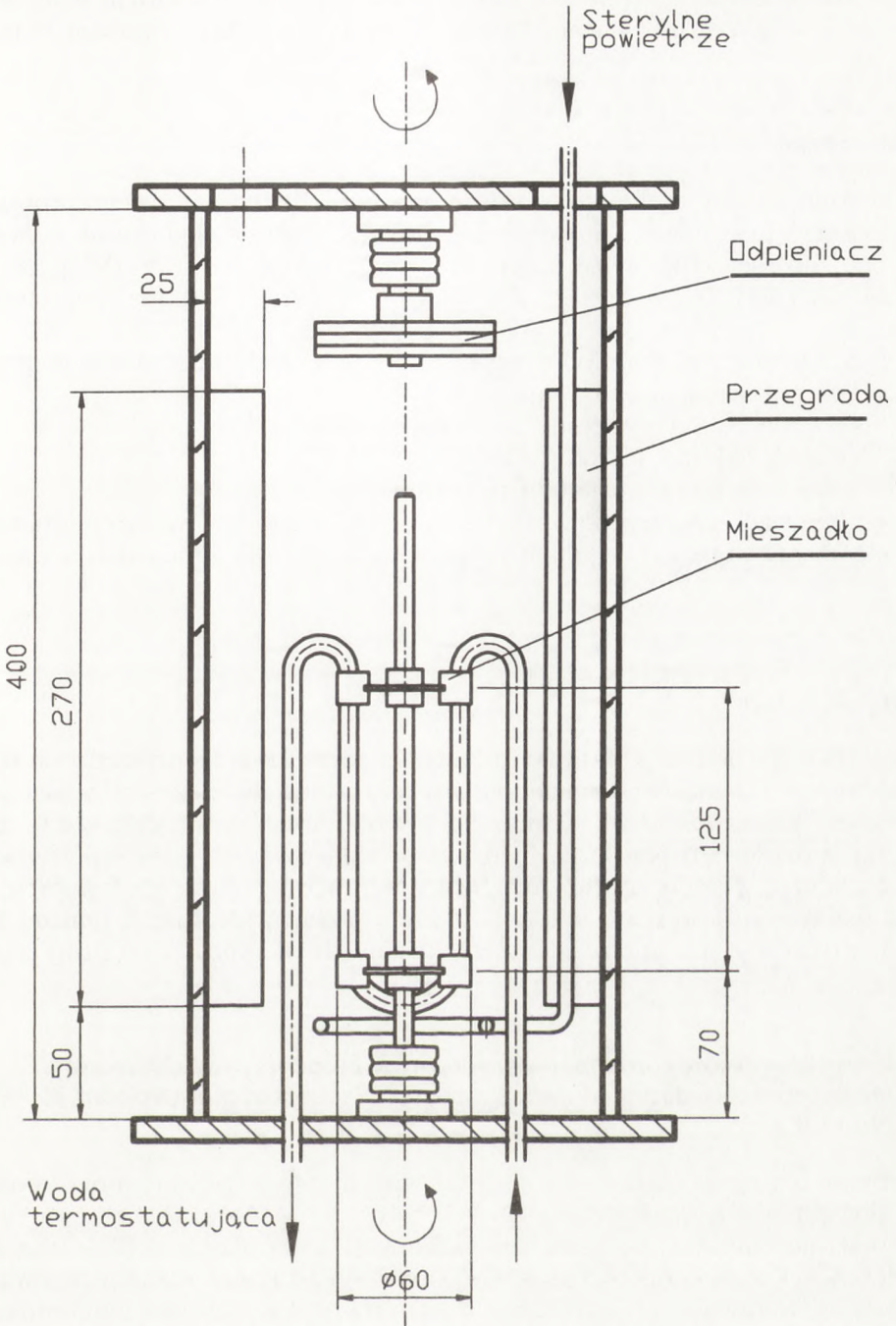
- mieszadło cyrkulacyjne z dyfuzorem (10) w fermentorze bez przegród (wariant A) i z czterema przegrodami (wariant B) (schemat 1),
- mieszadło o obrotowych elementach wstęgowych (11) w fermentorze bez przegród (wariant C) i z czterema przegrodami (wariant D) (schemat 2),



Schemat 1. Fermentor FL - 10 z mieszadłem cyrkulacyjnym z dyfuzorem i systemem czterech przegród (wariant B).



Schemat 2. Fermentor FL-10 z mieszadłami o obrotowych elementach wstęgowych i systemem czterech przegród (wariant D).



Schemat 3. Fermentor FL - 10 z dwoma mieszadłami turbinowo-tarczowymi i systemem czterech przegród (wariant F).

— dwa mieszadła turbinowo-tarczowe osadzone na wspólnym wale w fermentorze bez przegród (wariant E) i z czterema przegrodami (wariant F) (schemat 3).

Metodyka

Badania wykorzystania serwatki do produkcji białka paszowego prowadzono przy użyciu drożdży *Kluyveromyces fragilis*. Podłoże hodowlane odżywczo zbliżone do serwatki naturalnej zawierało: laktozę 4,0%; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — 0,46%; $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ — 0,25%; ekstrakt drożdżowy — 0,3%; peptobak — 0,5%.

Proces drożdżowania modelowego ścieku przemysłu mleczarskiego prowadzono przez 48 godzin oznaczając:

- stężenie biomasy metodą nefelometryczną,
- stężenie laktozy metodą antronową,
- zawartość etanolu metodą refraktometryczną,
- chemiczne zapotrzebowanie tlenu (ChZT) metodą dwuchromianową.

Poziom pH wymagał regulacji za pomocą NaOH dla zapewnienia wartości pH = 4,5.

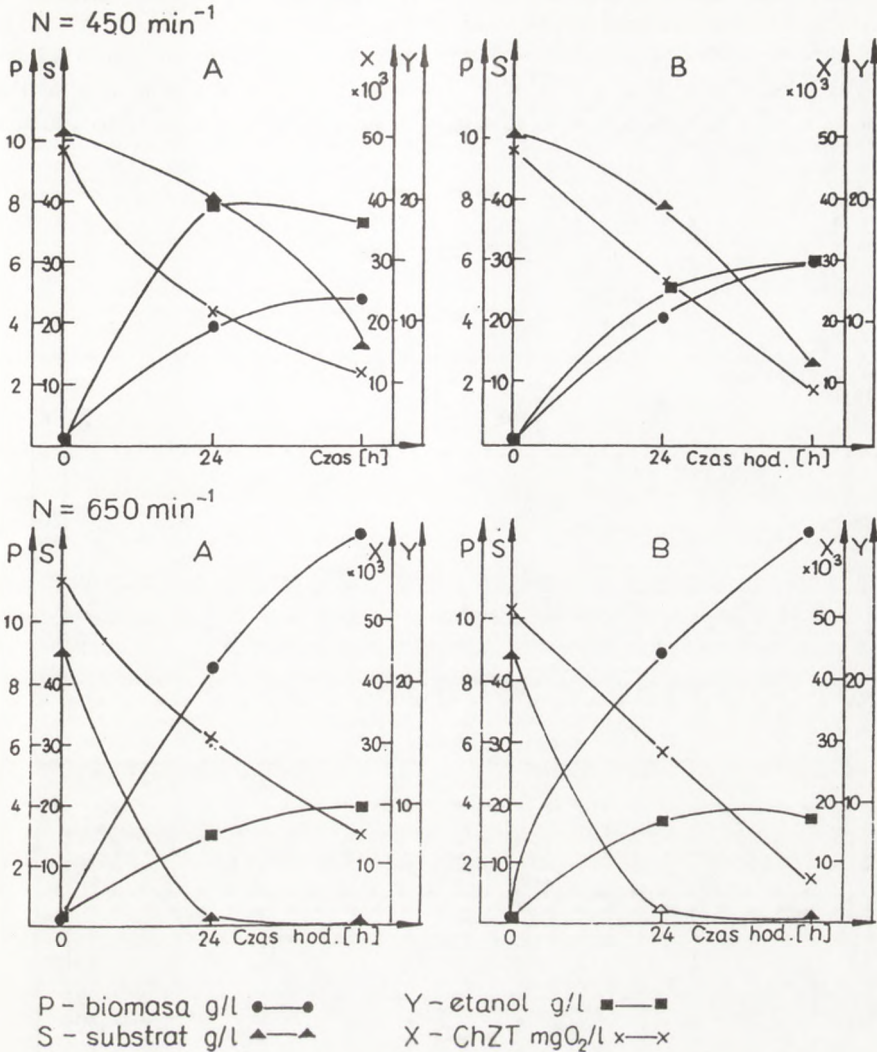
Wyniki badań

Proces utylizacji serwatki przy udziale drożdży *K. fragilis* prowadzono w fermentorach z mieszadłami mechanicznymi stosując dwie częstotliwości obrotów wału mieszadła: $N = 450 \text{ min}^{-1}$ i $N = 650 \text{ min}^{-1}$ oraz $VVm = 1,0$. Stałe natężenie przepływu powietrza było wystarczające i pokrywało zapotrzebowanie szczepu *K. fragilis* na tlen niezbędny w procesie tworzenia komórek. Poziom rozpuszczonego tlenu w czasie trwania procesu nie spadał poniżej 10%. Dla kontroli tego parametru stosowano elektrody sterylizowalne firmy Ingold.

Hodowla w fermentorze z mieszadłem cyrkulacyjnym z dyfuzorem bez przegród (wariant A) oraz z czterema przegrodami (wariant B) — schemat 1.

Proces utylizacji modelowego ścieku w fermentorze wymienionej konstrukcji przedstawiono na wykresach — rys. 1.

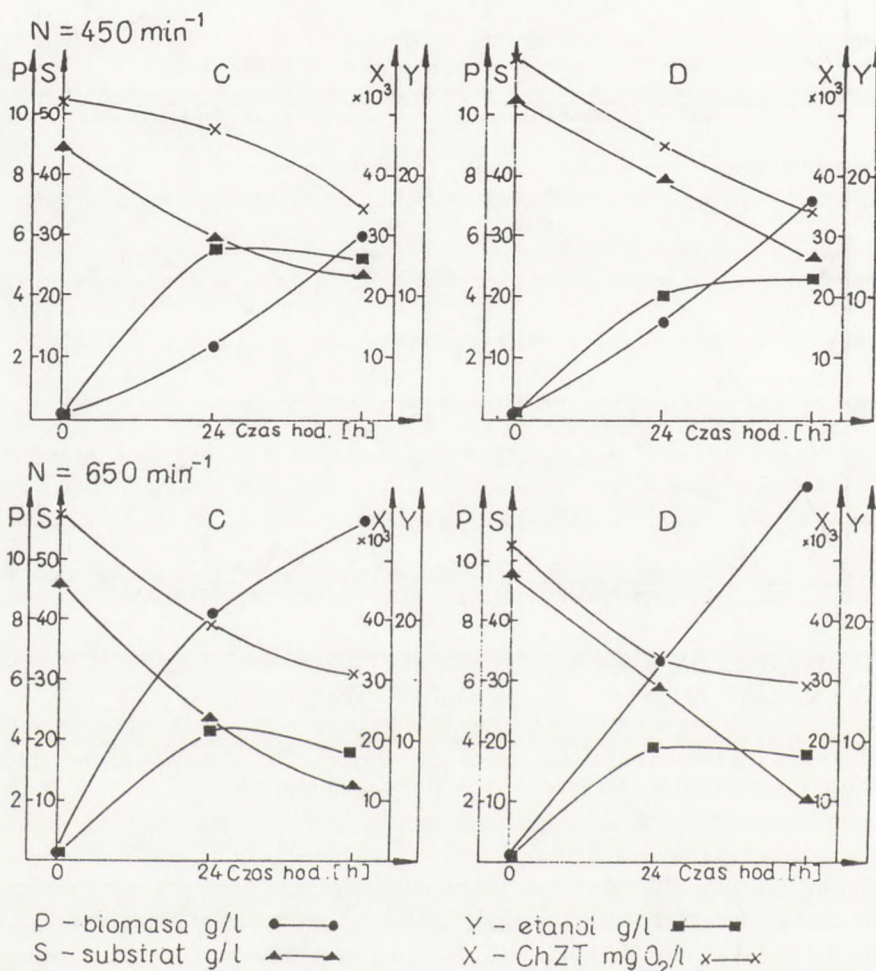
Analizując dane z procesów prowadzonych w fermentorze FL-10 z mieszadłem cyrkulacyjnym z dyfuzorem (wariant A i B) stwierdzono, że zarówno zmiana częstotliwości obrotów wału mieszadła oraz dodatkowe zamontowanie systemu czterech przegród mają wpływ na przebieg utylizacji. Po zmianie częstotliwości obrotów z $N = 450 \text{ min}^{-1}$ do $N = 650 \text{ min}^{-1}$ następowało zdecydowanie lepsze wykorzystanie substratu. Już po 24 godzinach trwania pro-



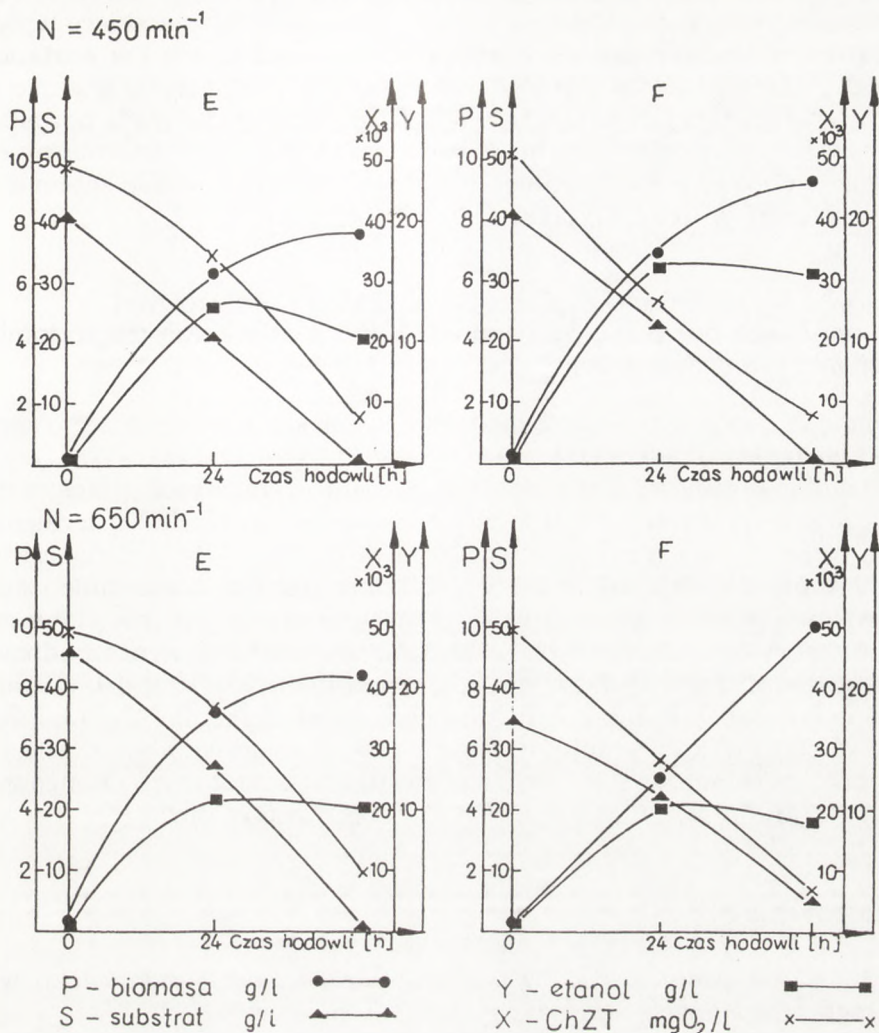
Rys. 1. Proces utylizacji modelowego ścieku w fermentorze FL - 10 z mieszadłem cyrkulacyjnym (wariant A) i systemem czterech przegród (wariant B).

cesu poziom laktozy obecnej w podłożu znacznie się obniżył i nie przekraczał 1,5 g/l. Stwierdzono również ponad dwukrotnie wyższy przyrost biomasy (z 4,5 do 12,5 g/l i z 5,7 do 12,9 g/l). Intensyfikacja procesów metabolicznych drożdży *K. fragilis* występująca przy zwiększonej częstotliwości obrotów spowodowała lepszą redukcję związków organicznych obecnych w podłożu. Zamontowanie przegród wpłynęło korzystnie na proces, przy czym efektywność utylizacji modelowego ścieku była znacznie wyższa w przypadku zwiększenia

częstotliwości obrotów wału mieszadła do 650 min^{-1} . Przy tej częstotliwości obserwowano równomierne rozproszenie pęcherzyków powietrza w podłożu, podczas gdy przy $N = 450 \text{ min}^{-1}$ powietrze doprowadzane do podłoża występowało w postaci dużych pęcherzy. Stosowanie więc małych częstotliwości obrotów dla tego mieszadła jest niecelowe, ze względu na bardzo słabe mieszanie i napowietrzanie.



Rys. 2. Proces utylizacji modelowego ścieku w fermentorze FL - 10 z mieszadłem o obrotowych elementach wstęgowych (wariant C) i systemem czterech przegród (wariant D).



Rys. 3. Proces utylizacji modelowego ścieku w fermentorze FL-10 z dwoma mieszadłami turbinowo-tarczowymi (wariant E) i systemem czterech przegród (wariant D).

Hodowla w fermentorze z mieszadłem o obrotowych elementach wstęgowych w fermentorze bez przegród (wariant C) oraz z czterema przegradami (wariant D) — schemat 2.

Przebieg procesu utylizacji modelowego ścieku przemysłu mleczarskiego w tym fermentorze przedstawiono na wykresach — rys. 2.

Mieszadło o obrotowych elementach wstęgowych powoduje bardzo intensywne mieszanie. Obroty ślimakowo zwiniętych elementów mieszających wir-

nika wokół własnej osi wymuszają dodatkowo ruch pionowy mieszanej cieczy. W przypadku utylizacji modelowego ścieku przemysłu mleczarskiego wpłynęło to niekorzystnie na ten proces. Zarówno w wariancie C, jak i w wariancie D dla obydwu częstotliwości obrotów zaobserwowano słabe wykorzystanie substratu, a tym samym wysokie stężenie związków organicznych pozostałych w podłożu zarówno po 24 godzinach jak i po 48 godzinach trwania procesu. Mieszadło o obrotowych elementach wstęgowych nie zapewniało zatem dobrego metabolizmu drożdży *K. fragilis*.

Hodowla w fermentorze z mieszadłami turbinowo-tarczowymi w fermentorze bez przegród (wariant E) oraz z czterema przegradami (wariant F) — schemat 3.

Dynamikę procesu utylizacji modelowego ścieku w fermentorze o wymiennej konstrukcji ilustrują wykresy — rys. 3.

Mieszadło turbinowo-tarczowe jest jednym z najczęściej stosowanych w bioreaktorach. W przypadku utylizacji modelowego ścieku w fermentorze wyposażonym w dwa mieszadła tego typu stwierdzono, że zmiana częstotliwości obrotów z $N = 450 \text{ min}^{-1}$ do $N = 650 \text{ min}^{-1}$ oraz zamontowanie czterech przegród nie spowodowało istotnych zmian w przebiegu procesu. Plon otrzymanej biomasy w analizowanych hodowlach był zbliżony i wynosił odpowiednio dla wariantu E $7,4 \div 8,2 \text{ g/l}$ oraz dla wariantu F $9,0 \div 10,2 \text{ g/l}$. Zawartość laktozy w podłożu po zakończeniu procesu nie przekraczała 1 g/l co świadczyło o dobrym wykorzystaniu substratu przez komórki *K. fragilis*. Mieszadło tego typu zapewniało wysoką redukcję związków organicznych. Końcowy poziom ChZT wahał się w granicach $6880 - 9580 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$.

Podsumowanie

Zbiornicze zestawienie wyników badań utylizacji modelowego ścieku w fermentorach omawianych konstrukcji przedstawiono w tab. 2.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono, że proces bioutylizacji modelowego ścieku zbliżonego składem do serwatki prowadzony w fermentorach FL - 10 przebiegał różnie w zależności od zastosowanego wariantu konstrukcyjnego (3,4). Najkorzystniejszym dla procesu okazał się fermentor z mieszadłem cyrkulacyjnym z dyfuzorem (5). Przy częstotliwości obrotów wału mieszadła $N = 650 \text{ min}^{-1}$ zaobserwowano wysoką redukcję obciążeń organicznych wynoszącą odpowiednio 79,4 % i 86,8 % zarówno w hodowli prowadzonej w fermentorze bez przegród (wariant A) jak i w fermentorze z przegradami (wariant B). Jednocześnie poziom otrzymanej biomasy w obydwu badanych wariantach konstrukcyjnych (wariant A i B) był wysoki i wynosił 12,5 i 12,9 g/l przy współczynniku wydajności 0,28 i 0,30 i prawie całkowitemu wykorzystaniu substratu 98,7 i 99,0 %.

TABELA 2
DANE CHARAKTERYZUJĄCE PROCES UTYLIZACJI MODELOWEGO ŚCIEKU PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO
W FERMENTORACH FL - 10

Typ mieszadła	Wariant konstr.	Częstotliwość obrotów (min^{-1})	Wydajność biomasy z laktozy P/S (-)	Zużycie substratu (%)	Wydaność etanolu z laktozy Y/S (-)	Redukcja ChZT (%)
cyrkulacyjne z dyfuzorem	A	450	0,11	76,4	0,46	69,4
	A	650	0,28	98,7	0,22	79,4
	B	450	0,14	81,4	0,35	72,3
	B	650	0,30	99,1	0,20	86,8
o obrotowych elementach wstęgowych	C	450	0,27	45,4	0,64	27,6
	C	650	0,35	69,6	0,27	37,9
	D	450	0,26	50,0	0,44	41,0
	D	650	0,33	78,0	0,24	46,0
turbinowo-tarczowe	E	450	0,19	98,4	0,26	85,0
	E	650	0,18	98,9	0,22	81,7
	F	450	0,23	99,2	0,26	85,3
	F	650	0,30	98,0	0,26	86,2

Równie dobre rezultaty wykorzystania związków organicznych modelowego ścieku uzyskano w fermentorze FL - 10 z mieszadłami turbinowo-tarczowymi (wariant F) przy $N = 650 \text{ min}^{-1}$, gdzie redukcja ChZT wynosiła 86,2%, a plon biomasy 10,2 g/l przy współczynniku wydajności biomasy 0,30.

Fermentor z mieszadłem o obrotowych elementach wstęgowych (wariant C i D) nie zapewniał dobrych warunków dla utylizacji modelowego ścieku. Przy otrzymanej biomase drożdży (11,0 g i 12,2 g dla $N = 650 \text{ min}^{-1}$) i współczynnika wydajności biomasy wynoszącym 0,35 i 0,33, poziom redukcji związków organicznych nie przekroczył 50 %. W podłożu pozostała znaczna ilość substratu węglowodanowego w postaci laktozy wahająca się w granicach od 22 do 54,6%.

Zwiększenie częstotliwości obrotów wału mieszadła z 450 min^{-1} do 650 min^{-1} oraz obecność systemu czterech przegród umieszczonych w fermentorach FL -10 wpływały korzystnie na przyrost biomasy drożdżowej oraz redukcję obciążeń organicznych we wszystkich badanych wariantach konstrukcyjnych. Zaobserwowano, że przy niższej częstotliwości obrotów wału mieszadła rozproszenie pęcherzyków powietrza w podłożu było słabsze co spowodowało nieznaczne przesunięcie przemian metabolicznych *K. fragilis* w kierunku procesów beztlenowych. Jednakże zawartość alkoholu etylowego, tworzonego podczas utylizacji ścieku nie przekraczała 2%, co odpowiadało teoretycznej ilości tego związku obecnego w tlenowym procesie tworzenia biomasy (tab. 2).

Literatura

1. Imbs B., Gawel J., Krajewski K., Jarosz K., (1986), *Przemysł Spożywczy*, 5 – 6, 102.
2. Jakubowska J., (1975), *Przemysł Spożywczy* 8 – 9.
3. Michalski H., Jamroz T., Sencio B., (1992), *Materiały XXVIII Zjazdu PT Bioch.*, s. 206.
4. Michalski H., Jamroz T., Sencio B., (1993), *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences B*, 3, 71 – 73.
5. Michalski H., Jamroz T., Sencio B., (1993), *Abstracts Book Proceedings of the 6th ECB, Firenze*, vol. II, TU 038.
6. Pijanowski E., (1974), *Zarys chemicznej technologii mleczarstwa*, PWRiL, Warszawa.
7. Popko R., Popko H., Komsta H., Hys L., Mucha K., Farian A., (1988), *Przemysł Spożywczy*, 6, 167-170.
8. Popko R., Popko H., Hys L., (1990), *Przetwórstwo mleka, nowe techniki i technologie przetwórstwa serwatki*, Wyd. Politechnika Lubelska, Lublin.
9. Zadov J.G., (1986), *Modern Dairy Technology V.1*, R.K. Robinson, London, NY.
10. Patent RP Nr 153035, 1991.
11. Patent PRL Nr 151391, 1991.

The bioutilization process of the model dairy waste in fermenters of different construction**Summary**

The purpose of the study was to determine the effect of the fermenter construction on the utilization of model dairy waste. The process was carried out using *K. fragilis* at controlled pH and temperature. The bioutilization process was performed in the fermenter FL-10 equipped with three different mixing systems with baffles and without them. A circulating stirrer with diffuser (A, B), a stirrer with rotating helical strips (C, D) and two turbine-disc impellers mounted to a common shaft (E, F) were used. The process was investigated at the aeration rate $VV_m=1.0$ and two rotation frequencies of the stirrer shaft: 450 min^{-1} and 650 min^{-1} .

The optimal results were obtained by using A and B systems.

Key words:

mixing-aerating systems, dairy waste degradation.

Adres do korespondencji:

Henryk Michalski, Katedra Inżynierii Bioprosesowej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczarska 175, 90 – 924 Łódź.