

PRÓBA ZASTOSOWANIA MIESZADEŁ TURBINOWYCH DO KWASOWO-PODPUSZCZKOWEGO  
SKRZEPU MLEKA

Zygmunt Zander, Ryszard Wasilewski, Lidia Zander, Jan Limanowski

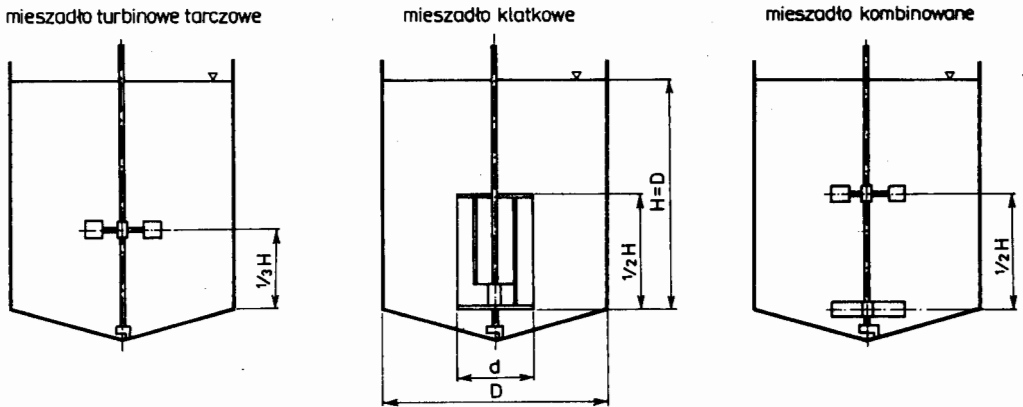
Instytut Inżynierii i Biotechnologii Żywności ART w Olsztynie

Podczas produkcji twarożków homogenizowanych o jakości produktu decyduje sposób przygotowania mleka i mechanicznej obróbki skrzepu przed wirowaniem. Proces ten prowadzi się w zbiornikach cylindrycznych o pojemności  $10 \text{ m}^3$ . Na początku prze-robu mleko odtłuszczone, zachowujące się jak ciecz niutonowska o małej lepkości, miesza się z zakwasem czystych kultur i roztworem enzymu - podpuszczki, a następnie pozostawia się układ na kilkanaście godzin w celu wytworzenia skrzepu. Po upływie tego czasu skrzep poddaje się mieszaniu, aby uzyskać równomiernie zdyspergowaną zawiesinę cząstek masy białkowej w serwatce. Zawiesinę tę poddaje się następnie wirowaniu i otrzymuje się twarożek. Proces opróżniania tanku trwa 2 godziny i w tym czasie konieczne jest dalsze mieszanie zawartości zbiornika, gdyż zawiesina wykazuje skłonność do sedimentacji. Wynika stąd, że mieszadło zainstalowane w zbiorniku musi przejąć na siebie szereg funkcji, z których najważniejszą jest zdolność „zerwania” struktury skrzepu, powstałego w wyniku zachodzących w mleku procesów biochemicznych. Znamienne są przy tym przemiany mieszanego ośrodka, który będąc początkowo płynem niutonowskim, staje się żelem przechodzącym następnie w zawiesinę o nieniu-tonowskiej charakterystyce płynięcia.

## METODY, ZAKRES DOŚWIADCZEŃ

Doświadczenia prowadzono na stanowisku modelowym. Stosowano szklany zbiornik cylindryczny z dnem stożkowym o średnicy  $D = 220 \text{ mm}$  i trzy rodzaje mieszadeł turbinowych o inwariancie geometrycznym  $d/D = 1/3$ . Schematy mieszadeł przedstawiono na rys. 1. Zespół napędowy wału mieszadła wyposażono w układ dynamometryczny do pomiarów mocy mieszania. Pomiary prowadzono przy częstościach obrotów  $5,0-8,3 \text{ s}^{-1}$ .

Badano kwasowo-podpuszczkowy skrzep otrzymywany w temperaturze  $26^{\circ}\text{C}$  z mleka odtłuszczonego, regenerowanego z proszku „instant”. W próbach skrzepu pobieranych



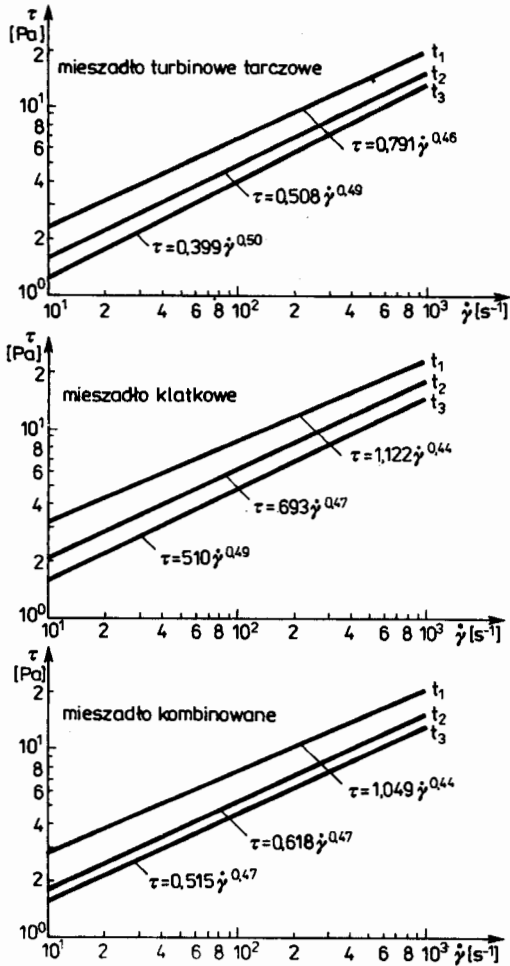
Rys. 1. Schematy badanych modeli mieszadeł turbinowych

trzykrotnie podczas dwugodzinnego procesu mieszania oceniano porównawczo zmiany stopnia dyspersji masy białkowej na podstawie wyników analizy sedymentacyjnej i zmiany właściwości reologicznych. Krzywe płynięcia skrzepu otrzymywano za pomocą wiskozymetru rotacyjnego Rheotest - 2. Za początek procesu mieszania przyjmowano moment „zerwania” struktury żelu, natomiast czas  $t$ , upływający od chwili uruchomienia mieszadła do tego momentu, stanowił numeryczną miarę skuteczności pracy badanego elementu mieszającego.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Doświadczenia przeprowadzone na mleku zestalonym w celce pomiarowej wiskozymetru wykazały, że „zerwanie” skrzepu może nastąpić, jeżeli w układzie powstanie naprężenie styczne  $\tau_x$  w granicach 107-270 Pa przy gradiencie prędkości  $\dot{\gamma}_x = 2,9 \text{ s}^{-1}$ . Średnia wartość  $\tau_x$  wynosiła 179,4 Pa przy odchyleniu standardowym  $s(x) = 51,7 \text{ Pa}$  i współczynniku zmienności  $V(x) = 28,8\%$ . Tak duża zmienność reologicznych właściwości skrzepu, zwłaszcza na początku procesu mieszania, jest cechą charakterystyczną tego czynnika i praktycznie nie ma możliwości jej zmniejszenia, ponieważ decydujące znaczenie mają tu procesy mikrobiologiczne i biochemiczne.

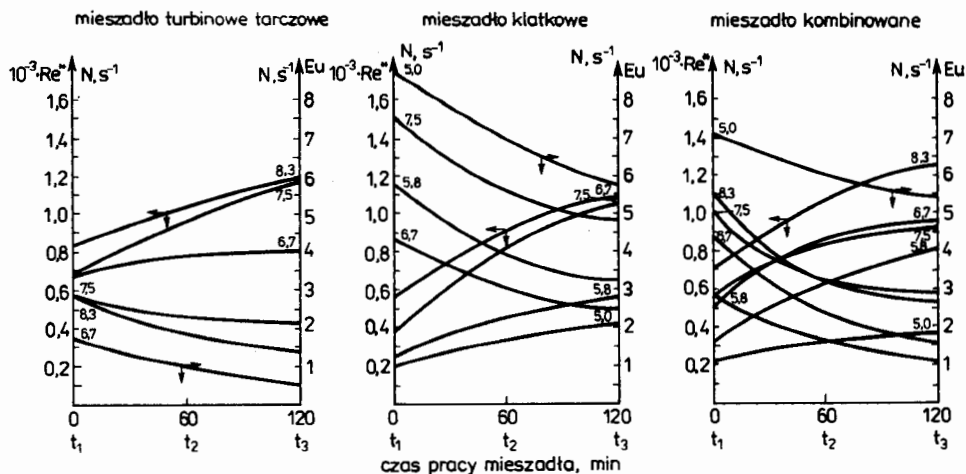
Badania reologicznych właściwości skrzepu rozbitego w wyniku pracy mieszadła wykazały, że kwasowo-podpuszczkowy skrzep mleka zachowuje się jak płyn nieniu-tonowski, rozrzedzany ścinaniem. Krzywe płynięcia skrzepu w układzie współrzędnych  $\log \dot{\gamma} - \log \tau$  można było aproksymować liniami prostymi w zakresie prędkości ścinania  $\dot{\gamma} = 10 \pm 10^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na tej podstawie przyjęto, że dla potrzeb praktycznych z wystarczającą dokładnością reologiczne właściwości skrzepu może reprezentować model potęgowy Ostwalda - de Waele  $\tau = k \dot{\gamma}^n$ . Jednocześnie skrzep był wrażliwy na działanie naprężeń ścinających, ponieważ stopień dyspersji masy białkowej ulegał



Rys. 2. Krzywe płynięcia kwasowo-podpuszczkowego skrzepu mleka;  $t$  - czas trwania procesu:  $t_1$  - w momencie zerwania skrzepu,  $t_2$  - 1 godzina mieszania,  $t_3$  - 2 godziny mieszania

zmianom. Z upływem czasu przebywania skrzepu w polu naprężeń ścinających wymiary cząstek stawały się coraz mniejsze, a konsekwencją tego była niestabilność reologicznych parametrów skrzepu. Zaobserwowano bowiem tendencję do spadku wartości współczynnika konsystencji  $k$  i wzrostu wskaźnika płynięcia  $n$  ze wzrostem czasu  $t$ . Na rysunku 2 pokazano charakter zmian krzywych płynięcia skrzepu podczas mieszania.

Statystyczna analiza zebranego materiału liczbowego wykazała, że współczynniki  $k$  i  $n$  zależą przede wszystkim od czasu mieszania. Wpływ rodzaju mieszadła okazał się słabszy, chociaż był on istotny na poziomie  $\alpha = 0,05$ . Pomijając trudny do zdefiniowania początkowy okres pracy mieszadła od momentu jego uruchomienia do chwili zerwania skrzepu, cały proces mieszania zawieszony odbywał się w obszarze przejściowym. Stąd też wyraźny spadek pozornej lepkości ośrodka z upływem czasu



Rys. 3. Zmiany liczby Reynoldsa  $Re$  i liczby Eulera  $Eu$  podczas procesu mieszania kwasowo-podpuszczkowego skrzepu mleka

trwania procesu pociągał za sobą stopniowo zmniejszanie się mocy mieszania. Zmiany liczb Reynoldsa  $Re$  i Eulera  $Eu$  w ciągu dwóch godzin mieszania przedstawiono na rys. 3.

Czas pracy mieszadła  $t$ , potrzebny na „zerwanie” skrzepu w mieszalniku, zmienił się w szerokich granicach. W tabeli 1 podano wartości czasu  $t$  otrzymane podczas doświadczeń. Wynika stąd, że mieszadło turbinowe tarczowe nie było zdolne do wprawienia skrzepu w ruch, gdy częstość obrotów wału mieszadła wynosiła  $5,0-6,3 s^{-1}$ . Pozostałe elementy mieszające okazały się mniej zawodne pod tym względem. Relatywnie najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku zastosowania mieszadła klatkowego, które zwłaszcza przy częstościach obrotów  $5,8 - 7,5 s^{-1}$  gwarantowało krótkie czasy „zrywania” skrzepu przy niewysokiej zmienności porównywalnej ze zmiennością naprężeń  $\tau_x$ , występującą podczas pomiarów wiskozymetrycznych. Cyrkulacja cieczy wywoływana przez ten element była tak silna, że przy częstościach  $7,9 - 8,3 s^{-1}$ . powstał lej sięgający krawędzi łopatek mieszadła, co powodowało zasysanie powietrza i uniemożliwiało prawidłowy pomiar.

W kolumnie 7 tabeli 1 przytoczono także wartości liczby efektywności  $Le = Eu.Re.N.t$  [1] obliczone na podstawie mocy mieszania w chwili „zerwania” skrzepu i czasu  $t$  potrzebnego do zrealizowania tej operacji. Wynika stąd jednoznacznie, że pod wpływem zdolności „zrywania” skrzepu za najbardziej efektywne należałoby uznać mieszadło klatkowe. Jeżeli jednak weźmie się pod uwagę, że po „zerwaniu” skrzepu następuje przy ciągłej pracy mieszadła trwające 2 godziny opróżnianie zbiornika, to w warunkach przemysłowych korzystniejsze jest zastosowanie mieszadła dwuelementowego. Wynika to z analizy tabeli 2, gdzie podano oczekiwane w skali 1:1 wartości czasu „zrywania” skrzepu i zużycia energii, obliczone na pod-

Tabela 1

## Efektywność procesu „zrywania” skrzepu dla badanych mieszadeł

Mieszadło	Częstość obrotów $N, s^{-1}$	Czas zerwania skrzepu s	Średni czas zerwania s	Współczynnik zmienności $V(x) \%$	Odchylenie standardowe s(x)	Liczba efektywności $10^{-6} \cdot L_e$
1	2	3	4	5	6	7
tarczowe	5,0	$\infty$				$\infty$
	5,4	$\infty$				$\infty$
	5,8	$\infty$				$\infty$
	6,3	$\infty$				$\infty$
	6,7	283 $\rightarrow$ $\infty$	316,4	59,9	189,5	0,19 $\rightarrow$ $\infty$
	7,1	245 $\rightarrow$ $\infty$				1,17 $\rightarrow$ $\infty$
	7,5	600 $\rightarrow$ $\infty$				8,04 $\rightarrow$ $\infty$
	7,9	195 $\rightarrow$ $\infty$				2,70 $\rightarrow$ $\infty$
8,3	150 $\rightarrow$ 232				1,48 $\rightarrow$ 3,56	
klatkowe	5,0	720 $\rightarrow$ $\infty$				9,55 $\rightarrow$ $\infty$
	5,4	320 $\rightarrow$ 611				3,75 $\rightarrow$ 10,91
	5,8	47 $\rightarrow$ 91				0,91 $\rightarrow$ 1,47
	6,3	12 $\rightarrow$ 69	194,2	148,8	289,0	0,29 $\rightarrow$ 1,68
	6,7	36 $\rightarrow$ 87	52,6	42,5	22,4	0,51 $\rightarrow$ 1,45
	7,1	34 $\rightarrow$ 82				1,05 $\rightarrow$ 2,29
	7,5	40 $\rightarrow$ 46				1,22 $\rightarrow$ 1,40
dwuelemen- towe	5,0	120 $\rightarrow$ $\infty$				0,96 $\rightarrow$ $\infty$
	5,4	$\infty$				$\infty$
	5,8	411 $\rightarrow$ $\infty$				2,74 $\rightarrow$ $\infty$
	6,3	510 $\rightarrow$ $\infty$	355,0	124,8	443,0	4,58 $\rightarrow$ $\infty$
	6,7	195 $\rightarrow$ 1800				2,26 $\rightarrow$ 31,72
	7,1	60 $\rightarrow$ 705				1,16 $\rightarrow$ 13,74
	7,5	28 $\rightarrow$ 95				0,65 $\rightarrow$ 2,07
	7,9	100 $\rightarrow$ 190				2,87 $\rightarrow$ 4,98
	8,3	55 $\rightarrow$ 142				1,64 $\rightarrow$ 4,08

T a b e l a 2

Porównanie energochłonności badanych modeli mieszadeł w warunkach przemysłowych

Wyszczególnienie	Mieszadło tarczowe	Mieszadło klatkowe	Mieszadło dwuelementowe
Czas „zrywania” skrzepu t, min	45	5	13
Moc mieszania P, W	320	1650	660
Moc „zrywania” skrzepu, W	360	1550	650
Zapotrzebowanie energii na mieszanie w ciągu 2 godzin, kWh	0,64	3,30	1,32
Zapotrzebowanie energii na „zrywanie” skrzepu, kWh	0,27	0,14	0,14
Zapotrzebowanie energii na obróbkę skrzepu w tanku, kWh	0,91	3,44	1,46

stawie kryterium  $Le = idem$  i jednocześnie prędkości obwodowej  $u = idem$  dla modelu i wzorca.

#### Oznaczenia

$k$  - współczynnik konsystencji,  $n$  - wskaźnik płynięcia,  $N$  - częstość obrotów mieszadła,  $P$  - moc mieszania,  $t$  - czas pracy mieszadła,  $u$  - prędkość obwodowa krańców łopatek mieszadła,  $\alpha$  - poziom istotności,  $\dot{\gamma}$  - gradient prędkości,  $\tilde{\tau}$  - naprężenie styczne,  $\rho$  - gęstość cieczy.

$Eu = P/N^3 d^5 \rho$  - liczba Eulera,

$Le = Re \cdot Eu \cdot N \cdot t$  - liczba efektywności mieszadła,

$Re = (4\pi)^{1-n} N^{2-n} d^2 \rho / k$  - liczba Reynoldsa.

#### PIŚMIENICTWO

1. E. Rzyński, 1981, Inż. Chem. i Proc. 2 (2), 379-392.

З. Зандер, Р. Василевски, Л. Зандер, Я. Лимановски

ПРОВЕРКА ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБИНОВЫХ МЕШАЛОК ДЛЯ КИСЛОТНО-СЫЧУЖНОГО МОЛОЧНОГО СГУСТКА

#### Р е з ю м е

Проведено испытания процесса смешивания кислотно - сычужного молочного сгустка. Были применены три типа турбинных мешалок с геометрическим инвариантом  $d/D = 1/3$ . Установлено, что в отношении возможности "срывания" молочного сгустка более эффективным надо считать клеточную мешалку. Однако, если принять, что после "сорвания" сгустка, при непрерывной работе мешалки происходящей два часа, происходит опорожнение резервуара то в условиях предприятия более благоприятным является применение двухтурбиновой мешалки.

Z. Zander, R. Wasilewski, L. Zander, J. Limanowski

AN ATTEMPT AT EMPLOYMENT THE TURBINE IMPELLERS TO MIXING THE ACID - RENNET CURD

#### S u m m a r y

An acid - rennet curd of milk mixing with turbine impellers were studied. Three types of impellers of geometric variant  $d/D = 1/3$  were applied. It was found that the cage impeller may be assumed to be the most effective in respect of capacity for "breaking" the curd. However, considering that the curd takes two - hours to empty from the tank while continuously mixing, it would be more advantageous to use in industrial conditions a double - turbine impeller.