

Czesław Strumiłło  
Adam S. Markowski  
Janusz Adamiec

Instytut Inżynierii Chemicznej  
i Procesowej  
Politechnika Łódzka

## Zmiany właściwości produktów biosyntezy w czasie procesu suszenia

### 1. Wstęp

Suszenie materiałów wilgotnych jest nie tylko procesem wymiany ciepła i masy, ale także procesem technologicznym posiadającym istotny wpływ na jakość produktu. Jest to szczególnie aktualne w odniesieniu do materiałów mikrobiologicznych i produktów biotechnologicznych ze względu na specyficzne właściwości tych substancji. Właściwe przeprowadzenie procesu suszenia przyczynia się do zachowania, a w szeregu przypadków do znacznego polepszenia technologicznych właściwości produktów, np. zwiększenia czasu zachowania aktywności mikroorganizmów, czy aktywności chemicznej biopreparatów. Z wielu czynników mających wpływ na jakość produktu przemiany mikrobiologicznej za najważniejsze można uznać temperaturę i wilgotność – stąd materiały te często są określane jako termo- i kserolabilne.

W suszeniu produktów biosyntezy należy uwzględnić i rozwiązać trzy zasadnicze zagadnienia:

1. Statykę i kinetykę procesu suszenia, obejmujące właściwości fizyczne, izotermy sorpcji oraz wymianę ciepła i masy podczas procesu suszenia danego bioproduktu.
2. Zmiany właściwości produktu występujące w toku operacji suszenia.
3. Optymalizację procesu suszenia uwzględniającą zarówno koszt tej operacji jak i jakość uzyskiwanego produktu.

Niniejszy artykuł dotyczy zagadnienia zmian właściwości produktów biosyntezy w czasie procesu suszenia. Omówione zostały także niektóre mechanizmy powodujące te zmiany, ich charakterystykę oraz współzależność z metodami i parametrami suszenia. Zaprezentowano ogólną koncepcję modelowania procesu suszenia z uwzględnieniem kinetyki procesów degradacyjnych. Koncepcja ta została zilustrowana wynikami obliczeń jedno- i dwustopniowego aparatu fluidyzacyjnego do suszenia drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae*.

### 2. Zmiany właściwości bioproduktów w czasie procesu suszenia

Większość produktów otrzymywanych w procesach biotechnologicznych należy do wieloskładnikowych i wielofazowych biopolimerów o wysokiej początkowej zawartości wilgoci od 80 do 95% wag. Poszczególne składniki mogą być częściowo rozpuszczone albo występują w postaci ciała stałego lub żelu. Posiadają zwykle wysoką masę cząsteczkową (np. antybiotyki ponad 1000 a enzymy ponad 10 000). Wiele bioproduktów zawiera w swoim składzie związki białkopodobne, a ich skład i koncentracja zależy od stosowanych surowców w procesie fermentacji. Woda będąca zasadniczym składnikiem bioproduktów jest czynnikiem strukturotwórczym, środowiskiem dla reakcji enzymatycznych i procesów życiowych mikroorganizmów, jak również środowiskiem przenoszącym energię cieplną. Obecność wody wyrażana jako aktywność wody  $a_w$  (stosunek prężności pary wodnej nad produktem do prężności pary wodnej nad czystą wodą) wpływa z jednej strony na właściwości bioproduktów, zaś z drugiej decyduje o procesach degradacyjnych. Różnorodność bioproduktów, zarówno z punktu widzenia ich natury jak i struk-

tury, nie pozwala na sprecyzowanie konkretnej postaci związku wilgoci z materiałem. Przyjmuje się, że bioprodukty należą do ciał koloidalno-kapilarno-porowatych, w których możliwe są wszystkie formy związku wilgoć-produkt (1). Formy te mają zasadniczy wpływ na mechanizm usuwania wody, np. dla usuwania wody adsorpcyjnej konieczne jest przekształcenie wody znajdującej się wewnątrz materiału w parę. Woda osmotyczna transportowana jest w postaci cieczy, a woda w makro- i mikrokapilarach może przemieszczać się zarówno w postaci cieczy, jak i pary w zależności od warunków procesu.

Różnorodne kultury mikrobiologiczne oraz produkty syntezy mikrobiologicznej charakteryzują się odmienną reakcją na stosowane metody i warunki suszenia cieplnego. W czasie tego procesu następują istotne zmiany jakościowe, które mogą być zarówno pożądane jak i niekorzystne. Przebieg i charakter tych zmian zależy od składu bioproduktu oraz stosowanej metody i parametrów procesu suszenia, a w szczególności temperatury i szybkości ogrzewania oraz wilgotności końcowej i szybkości odprowadzenia wilgoci. Niektóre dane dotyczące mechanizmu tych procesów oraz stosowanej technologii można znaleźć w pracach związanych z konserwacją żywności (2,3,4,5). Można tu wyróżnić następujące grupy zmian:

- a) mikrobiologiczne (ZM),
- b) reakcje enzymatyczne (RE),
- c) reakcje chemiczne (RCh),
- d) właściwości fizycznych (ZF).

Zmiany mikrobiologiczne odnoszą się do żywych kultur mikrobiologicznych (drożdże, bakterie, etc.), gdzie zasadniczym mechanizmem jest zniszczenie komórki i zmiany procesów metabolicznych (np. zakłócenie funkcji transportu składników odżywczych do komórki, uszkodzenie funkcji tworzenia energii, depolimeryzacja membran czy zniszczenie systemu rybosomalnego syntetyzującego białko).

Suszenie cieplne często wywołuje raptowne konwersje enzymatyczne, które zwykle zachodzą przy wysokiej aktywności wody. Taką typową reakcją jest rozkład enzymu (fosfatazy alkalicznej) podczas suszenia rozpryskowego mleka (6).

Występowanie reakcji chemicznych może być zarówno pożądane, jak np. hydroliza węglowodanów oraz niekorzystne prowadzące do destrukcji produktów, np. rozkład witaminy C i B<sub>6</sub>, chlorofilu, a w szczególności denaturacja białka będącego głównym składnikiem większości bioproduktów.

Niekorzystne zmiany fizyczne i strukturalne sprowadzają się do następujących efektów:

- kurczenie się, pęknięcia i powstawanie szczelin,
- strata zdolności rehydracyjnych,
- zmiana zwilżalności, rozpuszczalności i dyspersyjności,
- zmiana powierzchni właściwej, średnicy cząstek i objętości por, oraz
- zmiany właściwości aromatycznych i zapachowych.

Tabela 1

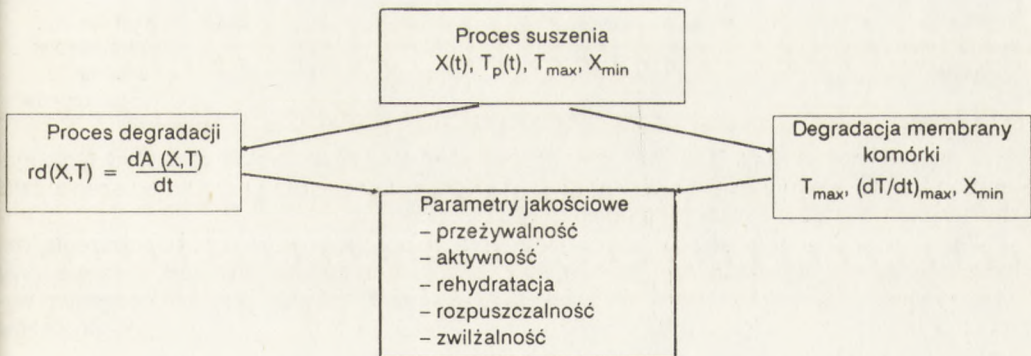
#### Typy procesów degradacyjnych występujące podczas suszenia bioproduktów

Składnik bioproduktu		Typ procesu degradacyjnego	Wynik przemiany	Sposób suszenia	Literatura
Witaminy	RCh	tworzenie się nowych aminokwasów	częściowa dezaktywacja	niska szybkość dopływu ciepła	(4)
Lipidy	RE	utlenianie (zmiana barwy)	reakcje z innymi składnikami (z białkiem i enzymami)	zmniejszenie poziomu tlenu lub dodatek antyutleniaczy	(1,3)

Białka	RCh	nowe aminokwasy	częściowa denaturacja strata właściwości odżywczych,	wielostopniowe suszenie (I–suszenie w temp. mokrego termometru, II–suszenie próżniowe lub sublimacyjne)	(1,4,5,6,7)
	RE	rozkład aminokwasów reakcje między aminokwasami	denaturacja białka i enzymów zmiana właściwości białka	atmosfera obojętna lub stosowanie próżni	
Węglowodany	RCh	żelowanie hydroliza (podział cząsteczki)	poprawa stopnia przyswajania	to jest zaleta	
Cukry proste	ZF	karmelizacja topienie	strata koloru i zapachu zmiana lepkości	szybkie suszenie w zakresie $a_w = 0,5-0,8$ obniżenie temperatury i redukcja pH do niskiego	(2)
Żywe mikroorganizmy	ZM	zniszczenie membrany komórki	denaturacja białka i śmierć komórki	niska temperatura lub próżnia	(1,6,7,8)

Dane zawarte w tab. 1 przedstawiają typy procesów degradacyjnych, które mogą występować w czasie procesu suszenia cieplnego w zależności od składników wchodzących w skład danego bioproduktu. Procesy te mogą występować pojedynczo lub równocześnie i każdy z nich posiada charakterystyczną energię dezaktywacji, po przekroczeniu której następuje degradacja produktu. Stopień degradacji zależy od parametrów procesu suszenia – można go często zminimalizować przez właściwy dobór parametrów, np. dla większości białek, których denaturacja zachodzi w temperaturach od 40 do 80°C, można stosować suszenie cieplne aż do krytycznej zawartości wilgoci, przy której następuje proces degradacji, a następnie zmienić warunki temperaturowe lub zewnętrzne (np. stosując suszenie sublimacyjne lub próżniowe).

Procesy degradacyjne są ściśle powiązane zarówno z parametrami suszenia, jak również z jakością otrzymywanych produktów (rys. 1).



Rys.1. Współzależność procesów suszenia i degradacji oraz jakości produktu biosyntezy.

Dopuszczalne zakresy temperatury, czasu suszenia, jak również minimalnej zawartości wilgoci oraz związane z tym parametry jakościowe bioproduktu ustalane są w drodze doświadczalnej, wykorzystując złożoną technikę analityczno-pomiarową (np. spektroskopię, mikroskopię elektronową lub laserowe analizatory wielkości cząstek). Pozwała to na prowadzenie badań w mikroskali, na poziomie molekularnym. Interesujące dane przytacza Genskow (7).

Kinetyka procesów degradacyjnych wyrażana jest równaniem kinetycznym I rzędu

$$r_d = dA/dt = -k_d A, \quad (1)$$

natomiast stałą szybkości procesów degradacyjnych  $k_d$  określa równanie Arrheniusa

$$k_d = k_\infty \exp(-E_d/RT), \quad (2)$$

gdzie:  $A$  – aktywność lub liczba żywych komórek,

$k_\infty$  – stała charakterystyczna dla danego produktu będąca funkcją wilgotności, 1/s

$E_d$  – energia dezaktywacji będąca funkcją wilgotności,

$R$  – stała gazowa, kJ/mol · K

$T$  – temperatura, °K.

Kinetykę degradacji drożdży piekarskich badali Zimmermann i Bauer (6) oraz Labuza i wsp. (8), natomiast dla innych produktów spożywczych (enzymów, witamin, etc.) Bruin i Luyben (4,9). Również Tutova i Kuc (1) przeprowadzili szerokie badania w tym zakresie, w efekcie których dokonano klasyfikacji bioproduktów na dwie zasadnicze grupy:

1) wegetatywne kultury bakterii, wirusów, drożdży, pleśni i grzybów oraz enzymy i białka – grupa materiałów termolabilnych;

2) zarodnikowe kultury mikroorganizmów oraz produkty fermentacji enzymatycznej – materiały termostabilne.

Charakterystyczne dane dla tych grup zawarte są w tab. 2

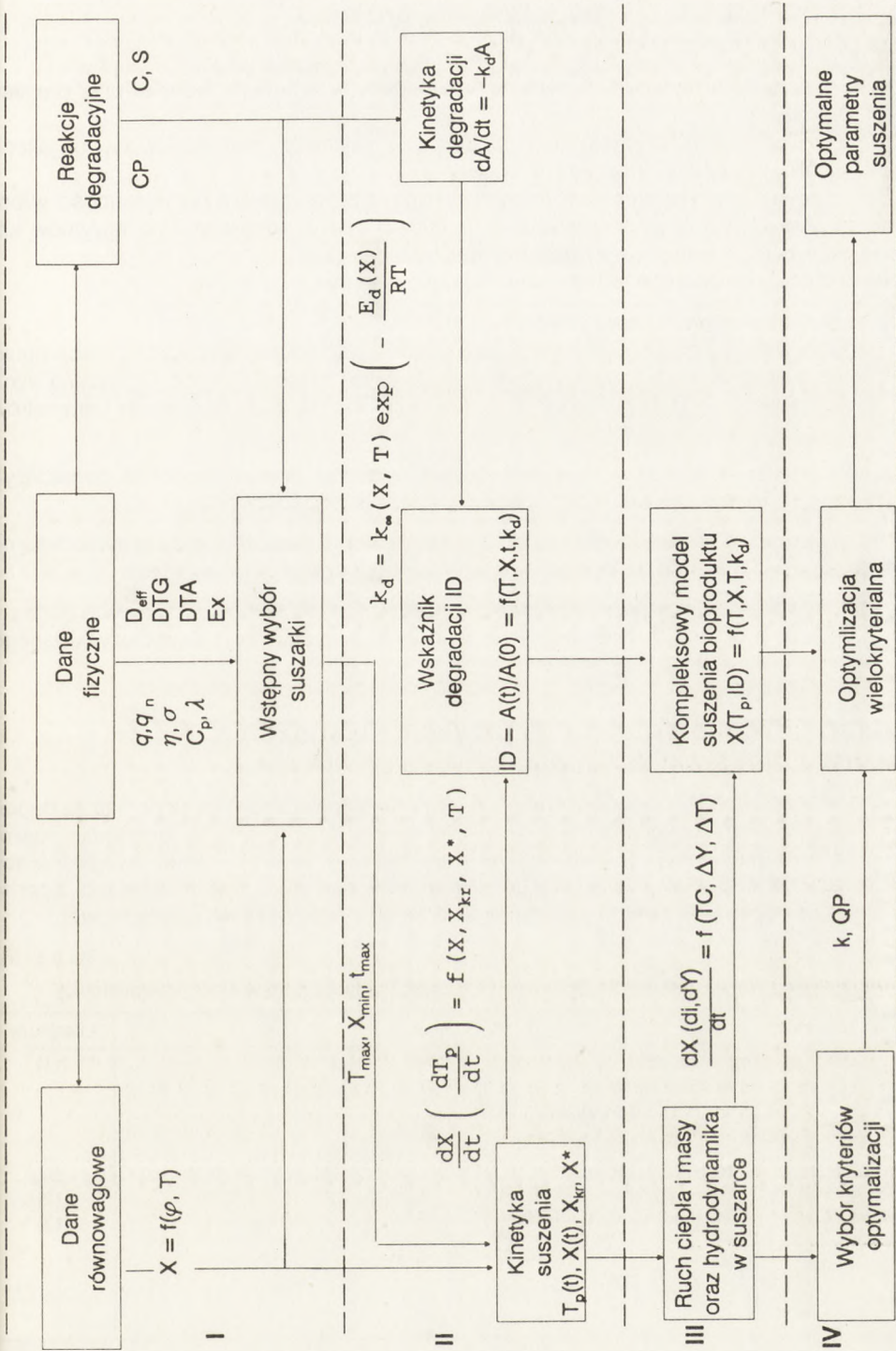
Tabela 2

Klasyfikacja bioproduktów według Tutovej i Kuca (1)

	Współczynnik $k_\infty$ , 1/s	Zakres $k_\infty$ , 1/s	Zakres $E_d$ , kJ/mol	Temperatura $T_{max}$ °C	Wilgotność $X_{min}$ , %
materiały termolabilne (I grupa)	$\ln k_\infty = -3,24 + 0,36 E_d$	$10^{20} - 10^{80}$	100–900	61	35–40
materiały termostabilne (II grupa)	$\ln k_\infty = -4,26 + 0,25 E_d$	$10^6 - 10^{10}$	30–100	208	8–9 dla zarodników 5–6 dla antybiotyków

Z badań Tutovej i Kuca (1) wynika, że podstawowym mechanizmem degradacyjnym dla materiałów I grupy jest denaturacja białka komórkowego, natomiast dla grupy II naruszenie całej struktury komórki lub molekuly bioproduktu.

Zaproponowana klasyfikacja pozwala na wstępny dobór parametrów procesu suszenia, natomiast ustalenie dopuszczalnej temperatury  $T_{max}$  oraz czasu suszenia jest możliwe przy wykorzystaniu analizy termogravimetrycznej (TDA), a w szczególności przy jednoczesnym wykonaniu badań doświadczalnych, kinetyki procesu suszenia  $X(t)$  i  $T_p(t)$  i kinetyki procesów degradacyjnych  $k_d$ .



Rys. 2. Koncepcja modelowania procesu suszenia bioproduktów. Znaczenie symboli podano na końcu artykułu.

### 3. Ogólna koncepcja modelowania procesu suszenia bioproduktów

Zmiany właściwości bioproduktów w zasadniczy sposób utrudniają modelowanie procesu suszenia. Dla rozwiązania problemu należy:

1. Określić wszystkie rodzaje reakcji degradacyjnych mających zasadniczy wpływ na jakość produktu i ustalić wielkości kontrolujące te procesy.

2. Sprezycować kinetykę procesów degradacyjnych, a zatem stopień przeżywalności w odniesieniu do żywych komórek oraz wskaźnik degradacji (ID) w odniesieniu do enzymów lub składnika aktywnego zawartego w cząsteczce danego bioproduktu.

Dane pozwalają na podjęcie modelowania tego procesu (rys. 2).

Można go ująć w czterech głównych punktach:

I. Badania wstępne obejmujące wyznaczenie właściwości fizyko-chemicznych bioproduktu, danych równowagowych oraz danych dotyczących reakcji degradacyjnych. Otrzymane wyniki pozwalają na wstępny dobór metody suszenia oraz zakresu dopuszczalnych parametrów ( $T_{max}$ ,  $X_{max}$ ,  $t_{max}$ ).

II. Jednoczesne określenie kinetyki procesu suszenia oraz kinetyki procesów degradacyjnych. Otrzymuje się wówczas zależność opisującą wskaźnik degradacji (ID).

III. Sformułowanie kompleksowego modelu suszenia bioproduktu w oparciu o hydrodynamikę, wymianę ciepła i masy dla danej metody suszenia wraz z procesami degradacji.

IV. Zastosowanie wielokryterialnej analizy optymalizacyjnej do wyboru właściwych parametrów prowadzenia procesu. W metodzie tej zarówno koszt suszenia, jak i jakość uzyskiwanego bioproduktu stanowią kryteria optymalizacyjne.

### 4. Modelowanie procesu na przykładzie suszenia drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae*

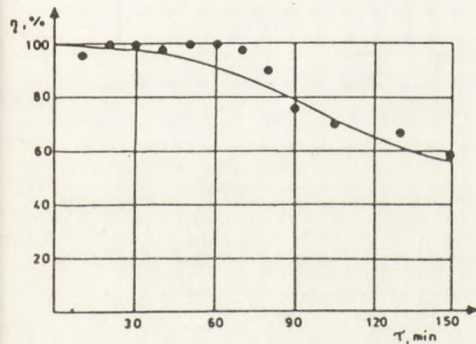
Weryfikację koncepcji modelowania procesu suszenia bioproduktów, które podlegają degradacji w toku tej operacji dokonano dla drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae* suszonych w suszarce fluidyzacyjnej. Pełny model matematyczny takiego układu uwzględniający kinetykę procesów degradacyjnych został przedstawiony w pracy (10), natomiast w tab. 3 podano podstawowe dane wyjściowe do obliczeń projektowych suszarki w skali przemysłowej.

Tabela 3

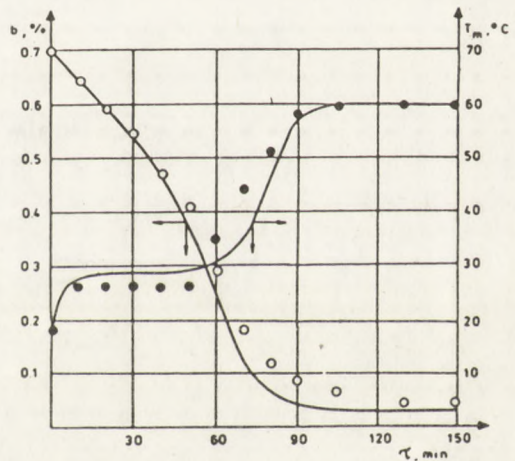
Dane wyjściowe do obliczeń projektowych suszarki fluidyzacyjnej w skali przemysłowej

Wyszczególnienie	Dane	Literatura
dane fizyczne	$b_0 = 70-75\%$ , $b_2 = 7-10\%$ $q = 1060 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = -0,61 + 0,54x + 0,25E$ $a = -1,35 + 1,51x + 0,78E$ $t_{max} = 33-37^\circ\text{C}$	(11)
dane równowagowe	$X = 1,787 \left( \frac{\varphi}{1-\varphi} \right) \left( \frac{1}{1+35,135\varphi} \right)$ $\left( \frac{dX}{dT} \right) = -0,075 X$	(12) (13)

kinetyka degradacji	<p>–aktywność enzymu ADH (dehydrogenaza alkoholowa)</p> $k_d = (1 - 0,255X + 9,529 \cdot 10^{-2} X^2 + 1,859 \cdot 10^{-3} X T) \cdot \exp\left(-\frac{310,4 + 339,8X}{T + 273,15}\right)$ <p>– wydzielanie CO<sub>2</sub></p> $k_d = \{1,0023 + \exp[2,269 \cdot 10^{-4}(T-20) + 9,124 \cdot 10^{-4}(T-20)^2]\} \cdot \exp\left(-\frac{515,27 + 240,72X}{T + 273,15}\right)$ <p>– zapotrzebowanie tlenu</p> $k_d = -\{1,0045 + \exp[7,51 \cdot 10^{-3}(T-20) + 5,276 \cdot 10^{-4}(T-20)^2]\} \cdot \exp\left(-\frac{525,75 + 200,25X}{T + 273,15}\right)$	(10)
wymiana ciepła i masy	$Nu = 0,106' Re Ar^{0,0437} (dp/H)^{0,803}$	(10)
charakterystyka suszarki fluidalnej	<p><math>L = 6,0m, w = 0,5m, H = 0,2m</math>  <math>W_S/W_B = 0,22, U_S = 0,81 m/s</math>  <math>d_p = 0,85 mm, \psi' = 0,87</math>  <math>X_0 = 2,33 kg H_2O/kg s.m.</math>  <math>Y_0 = 0,01 kg H_2O/kg s.pow.</math>  <math>T_0 = 20^\circ C</math></p>	(10)



Rys.3. Zmiana aktywności enzymu dehydrogenazy alkoholowej (ADH) w czasie suszenia (6,14).



Rys.4. Kinetyka suszenia drożdży piekarskich w złożu fluidalnym (6,14).

Rysunki 3 i 4 ilustrują porównanie rezultatów otrzymanych w wyniku obliczeń z danymi doświadczalnymi Zimmermanna i Bauera (6).

Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają rezultaty doświadczalne i stały się podstawą do podjęcia próby wielokryterialnej analizy optymalizacyjnej. Szczegóły przytoczone są w pracy

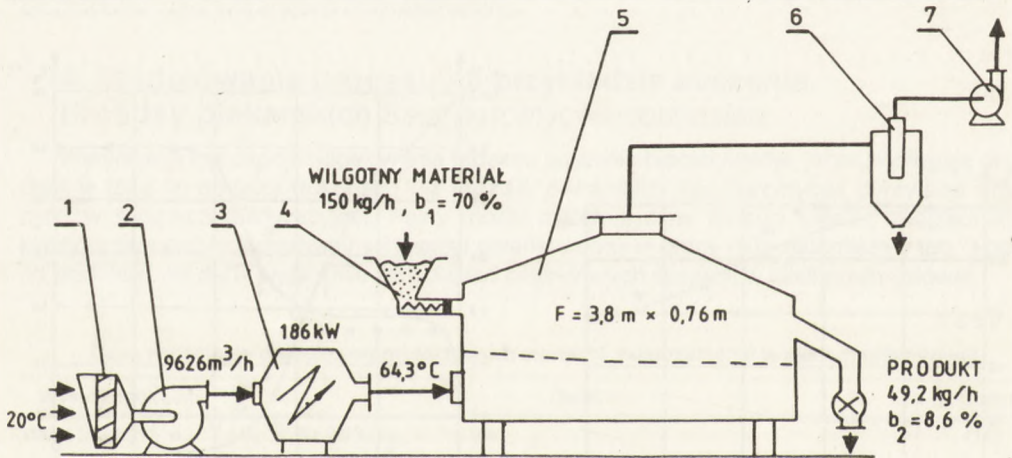
(14). Jako zmienne procesowe przyjęto czas przebywania materiału w suszarce ( $t$ ), temperaturę powietrza na wlocie ( $T_1$ ) oraz masowe natężenie przepływu powietrza ( $W_1$ ), natomiast jako funkcję celu przyjęto przeżywalność drożdży określaną przez aktywność enzymu dehydrogenazy alkoholowej (ADH), wydzielanie  $CO_2$  oraz zapotrzebowanie tlenu. Dodatkowymi kryteriami były: wilgotność końcowa produktu ( $b_2$ ) oraz współczynnik wykorzystania energii cieplnej ( $k$ ). Optymalne warunki procesu zawarte są w tab. 4.

Tabela 4

Optymalne warunki prowadzenia procesu suszenia w jednostopniowej suszarce fluidyzacyjnej (14)

Lp	$T_{G1}$ °C	t min	$W_{G1}$ kg/m <sup>2</sup> h	L m	Kryteria				
					ADH	$CO_2$	$O_2$	k	$b_2$ %
1	75,5	83	3160	3,72	0,86	0,78	0,76	0,51	7,90
2	51,4	92	4900	4,09	0,84	0,78	0,76	0,48	7,71
3	62,2	96	3580	4,05	0,83	0,76	0,74	0,50	7,19
4	64,3	83	3880	3,79	0,86	0,79	0,77	0,50	8,64
5	73,4	67	4060	3,40	0,88	0,82	0,82	0,495	7,19
6	61,2	78	4460	3,72	0,86	0,80	0,78	0,48	7,23

Podane wyniki posłużyły do obliczeń projektowych suszarki fluidyzacyjnej o działaniu ciąglem dla wytwórni drożdży piekarskich. Schemat instalacji i niezbędne dane procesowe przedstawia rys. 5.

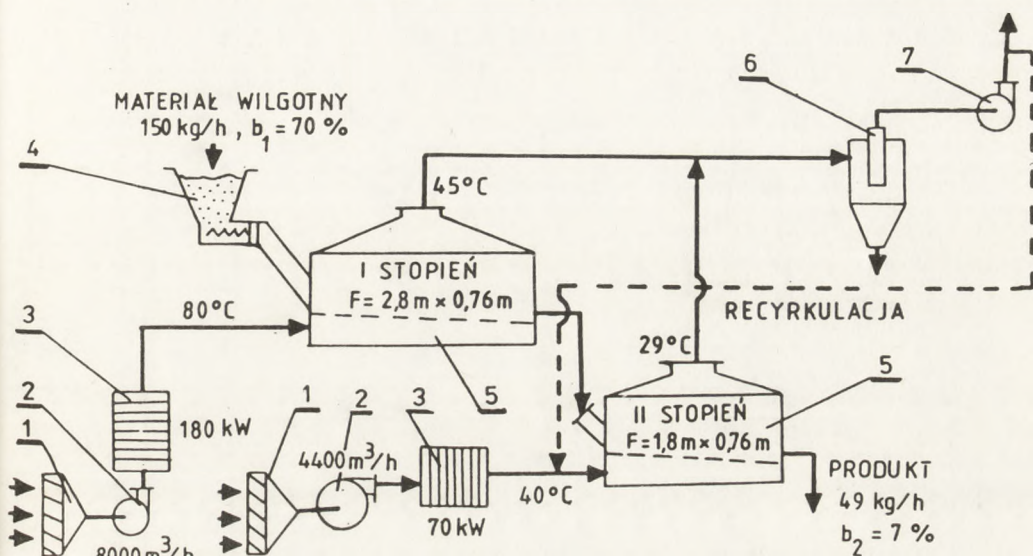


Rys.5. Schemat 1-stopniowej suszarki fluidyzacyjnej do suszenia drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae*; 1- filtr, 2- wentylator tłoczący, 3- nagrzewnica, 4- zasilacz ekstrudera, 5- suszarka fluidyzacyjna, 6- cyklon, 7- wentylator ssący.

W jednostopniowej suszarce fluidyzacyjnej zachodzi niebezpieczeństwo przegrzania materiału do  $45^{\circ}C$  co znacznie przekracza maksymalną dopuszczalną temperaturę materiału równą  $33-37^{\circ}C$ . W konsekwencji prowadzi to do dalszej dezaktywacji produktu i wymaga dodatkowego czasu na jego schłodzenie.



Dlatego też obliczenia projektowe zostały powtórzone zakładając układ dwustopniowy – rys. 6.



Rys.6. Schemat dwustopniowej suszarki fluidyzacyjnej do suszenia drożdży *Saccharomyces cerevisiae*; 1-filtr, 2- wentylator tłoczący, 3-nagrzewnice, 4-zasilacz ekstruder, 5- suszarka fluidyzacyjna, 6-cyklon, 7-wentylator ssący.

W I stopniu stosuje się temperaturę wlotową  $80^{\circ}\text{C}$  i po osiągnięciu wilgotności  $X_{kr} = 0,4$  kg/kg ( $b_{kr} = 28,5\%$ ) materiał jest wprowadzony do stopnia II, gdzie temperatura czynnika suszącego wynosi  $40^{\circ}\text{C}$ . Zmiany parametrów procesu w suszarce dwustopniowej (II), ilustruje rys. 7 A.

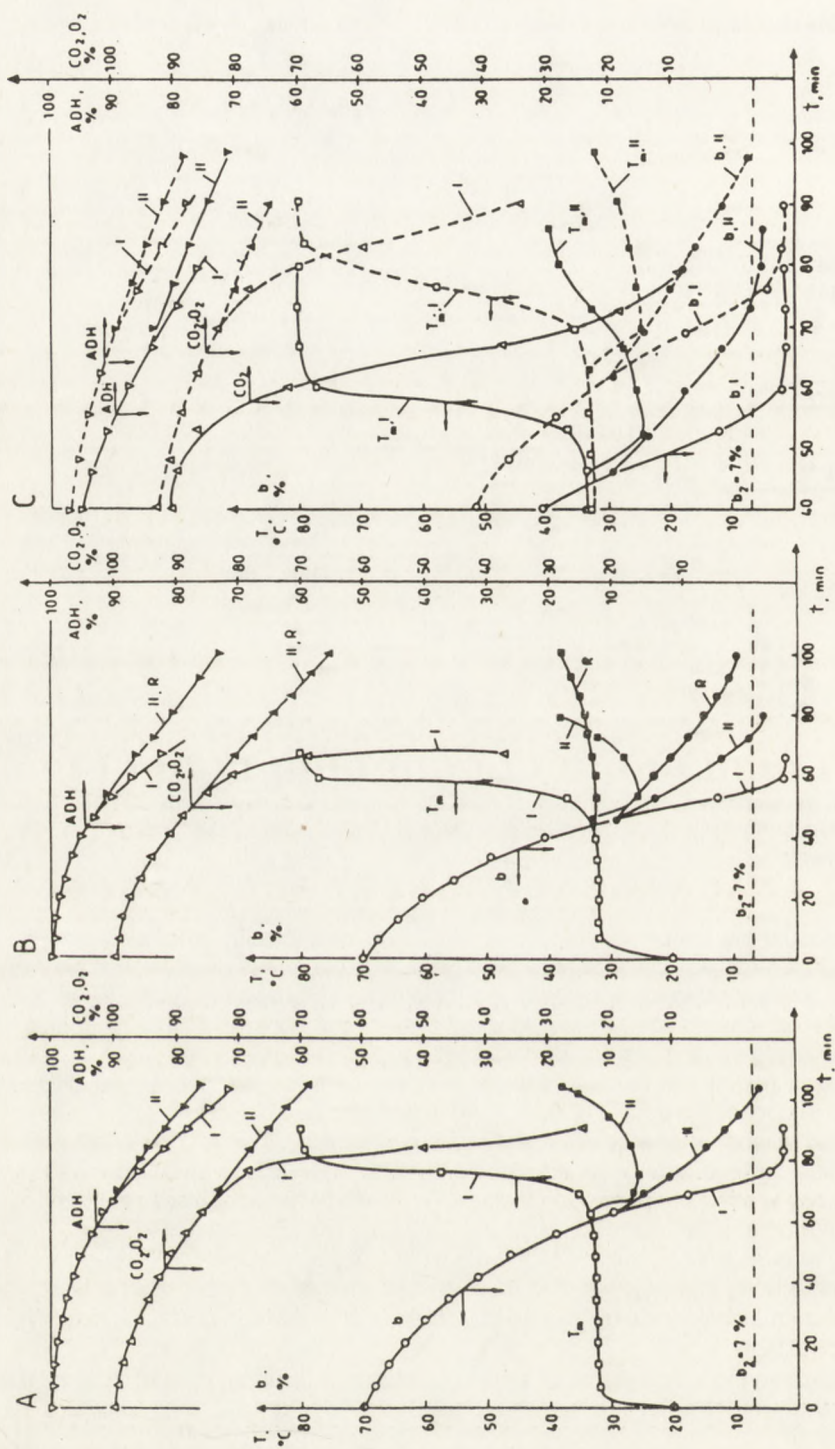
Dla porównania naniesiono również wyniki dla suszarki jednostopniowej (I). Temperatura materiału ( $T_{mII}$ ) obniża się do  $25^{\circ}\text{C}$  i stopniowo wzrasta do  $35^{\circ}\text{C}$  (przy  $b_2 = 7\%$ ).

Kinetyka suszenia ( $dx/dt$ ) jest bardziej stabilna, lecz całkowity czas suszenia jest dłuższy, wynosi około 100 min. Jakość produktu ( $\text{CO}_2$  i  $\text{O}_2$ , ADH) jest również korzystniejsza.

Niska zawartość wilgoci w powietrzu na wylocie z pierwszego stopnia ( $Y = 0,023$  kg/kg) pozwala na recykulację tego strumienia do stopnia II – rys. 7 B. Proces suszenia może być wówczas prowadzony w stałej temperaturze materiału  $T_{MR} = 32\text{--}35^{\circ}\text{C}$ , odpowiadającej temperaturze wilgotnego termometru, lecz czas suszenia jest tu również wydłużony ( $t = 140$  min).

Wpływ zmiany masowego natężenia przepływu gazu  $W_B$  w stosunku do masowego natężenia przepływu materiału  $W_S$  pokazuje rys. 7 C. Korzystniejsze wyniki, w szczególności w odniesieniu do temperatury materiału, daje układ z wyższą wartością masowego natężenia przepływu powietrza ( $W_S/W_B = 0,224$ ).

W konkluzji, suszenie drożdży piekarskich winno przebiegać w dwustopniowym układzie fluidalnym ze zmiennymi warunkami w każdym ze stopni. Zestawienie danych otrzymanych parametrów ilustruje tab. 5.



Rys. 7. Zmiana wilgotności materiału ( $b$ ), temperatury materiału ( $T_m$ ) oraz wskaźnika degradacji (ID) z czasem suszenia (t): A- suszarka jedno- i dwustopniowa,  $W_S/W_B = 0,298$ ; B- suszarka dwustopniowa z recyrkulacją czynnika suszącego  $W_S/W_B = 0,224$ ; C- suszarka jedno- i dwustopniowa dla  $W_S/W_B = 0,224$  (—) i  $0,298$  (---)

○ -  $b$  I  
 ● -  $b$  II  
 ◻ -  $T_m$  I  
 ◼ -  $T_m$  II  
 ◻ -  $ADH$   
 ◼ -  $ADH$   
 ◽ -  $ADH$

△ -  $CO_2$   
 ▲ -  $CO_2$   
 ▼ -  $CO_2$

○ -  $b$  I  
 ● -  $b$  II  
 ◻ -  $T_m$  I  
 ◼ -  $T_m$  II  
 ◻ -  $ADH$   
 ◼ -  $ADH$   
 ◽ -  $ADH$

Tabela 5

## Parametry procesu suszenia drożdży piekarskich w dwustopniowej suszarce fluidyzacyjnej

	Układ dwustopniowy		Jednostopniowa suszarka fluidyzacyjna
	I stopień	II stopień	
$T_1$ (wlot) °C	80	40	80
$T_2$ (wylot) °C	45	29	53
$T_m$ °C	32,5	25-33	46
$Y_1$ kg/kg	0,01	0,01	0,01
$Y_2$ kg/kg	0,023	0,14	0,023
$X_1$ kg/kg ( $b_1$ %)	2,33 (70)	0,4 (28,5)	2,33 (70)
$X_2$ kg/kg ( $b_2$ %)	0,4 (28,5)	0,075 (7,0)	0,075 (7,0)
t min	45	27	56
$W_S/W_B$	0,224	0,224	0,224
ADH %	-	84	87,5
CO <sub>2</sub> %	-	78	84,0
O <sub>2</sub> %	-	78	83

Podane wyniki mogą służyć do projektowania instalacji przemysłowej, zapewniającej uzyskanie produktu końcowego o wysokich wymaganiach jakościowych.

## 5. Wnioski

1. Podczas suszenia cieplnego produktów biosyntezy mogą występować różnorodne zmiany właściwości produktu, a ich zakres i przebieg zależy zarówno od składu danego materiału, jak i warunków prowadzenia procesu suszenia.

2. Modelowanie i obliczanie aparatów suszarniczych dla bioproduktów winno uwzględniać równocześnie kinetykę danego procesu degradacyjnego. Parametr odpowiedzialny za jakość produktu stanowi jedną z podstawowych funkcji celu w wielokryterialnej analizie optymalizacyjnej.

3. Przedstawiono proces modelowania na przykładzie suszenia drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae* w aparacie fluidyzacyjnym.

4. Podano niezbędne dane dla projektowania dwustopniowej suszarki fluidyzacyjnej zapewniającej uzyskiwanie produktu końcowego o wysokich wskaźnikach jakościowych.

## Oznaczenia

A – aktywność (przeżywalność); a – dyfuzyjność cieplna, m<sup>2</sup>/s;  $a_w$  – aktywność wody; b – zawartość wilgoci, %; C – stężenie; CP – parametr kontrolny;  $c_p$  – ciepło właściwe, kJ/kgK;  $D_{eff}$  – efektywny współczynnik dyfuzji, m<sup>2</sup>/s; DTA, DTG – różniczkowe krzywe deriwatograficzne;  $d_p$  – średnica cząstek, m; E – energia aktywacji, kJ/mol; H – wysokość złoza, m; ID – wskaźnik degradacji; i – entalpia, kJ/kg; k – współczynnik wykorzystania ciepła;  $k_d$  – stała szybkości reakcji degradacji, s<sup>-1</sup>;  $k_\infty$  – współczynnik, s<sup>-1</sup>; QP – parametr jakościowy; R – stała gazowa;  $r_d$  – szybkość procesu degradacji, s<sup>-1</sup>; S – struktura; T – temperatura, K; TC – współczynnik transportu (masy, ciepła); t – czas, s;  $u_s$  – prędkość liczona na pusty aparat, m/s; W – masowe natężenie przepływu, kg/s; w – szerokość suszarki, m; X – zawartość wilgoci, kg H<sub>2</sub>O/kg; Y – wilgotność powietrza, kg H<sub>2</sub>O/kg;  $\varphi$  – wilgotność względna, %;  $\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>;  $\eta$  – lepkość, Pa.s;  $\delta$  – napięcie powierzchniowe, N/m;  $\lambda$  – przewodnictwo cieplne, W/mK;

## Indeksy

o – początkowa; B – suche powietrze; 1 – wlot; m – materiał; 2 – wylot; S – suchy materiał; a – średni

## Liczby bezwymiarowe

Ar – liczba Archimedes;  $Ar = gd_p^3(\rho_n - \rho)\rho/\eta^2$ ;

Nu – liczba Nusselta;  $Nu = \alpha d_p/\lambda$

Re – liczba Reynoldsa;  $Re = ud_p\rho/\eta$

## Literatura

1. Tutova E. G., Kuc P. S., (1987), *Suszka Produktov Mikrobiologiczeskovo Proizvodstva*, Agropromizdat, Moskwa.
2. *Concentration and Drying of Foods*, (1986), ed. D. MacCarthy, Elsevier Appl. Sci. Publ., London.
3. *Advances in Preconcentration and Dehydradation of Foods*, (1974), ed. A. Spicer, Appl. Sci. Publ. Ltd., UK.
4. Bruin S., Luyben K. Ch. A. M., (1980), *Advances in Drying*, 1, ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation.
5. Jones R. P., (1987), *Proc. Biochem.*, 8, 22.
6. Zimmermann K., Bauer W., (1987), *Chem. Ing. Tech.*, 4, 54, 350–351.
7. Genskow L. R., (1988), IDS'88 KL 34, Versailles.
8. Labuza T. P., Le Roux J. P., Fan T. S., Tannenbaum S. R., (1970), *Biotechnol. Bioeng.*, 12, 135–140.
9. Luyben K. Ch. A. M., Lion J. K., Bruin S., (1982), *Biotechnol. Bioeng.*, 24, 533–552.
10. Strumiłło C., Grabowski S., Kamiński W., Zbiciński I., (1989), *Chem. Eng. Process*, 26, 139–145.
11. Sprawozdanie z badań: Opracowanie metod i urządzeń do suszenia produktów biosyntezy, CPBP nr 04.11 (1988, 1989), JJC PŁ, Łódź.
12. Jaafar F., Michałowski S., (1988), IDS'88, PB 45, Versailles.
13. Krischer O., (1967), *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Springer-Verlag, Berlin.
14. Strumiłło C., Adamiec J., Grabowski S., Kamiński W., Zbiciński I., (1990), Congress CHISA, IDS,90, Praha.

## Change of Properties of Bioproducts During Drying

### Summary

Drying of bioproducts is a complex technological process which involves removal of water from the products of different physico-chemical, structural and biological properties. During drying, change of properties can take place thus influencing the quality of bioproducts. It depends on the temperature, moisture content, time of drying and the composition of bioproducts.

In the paper a variety of degradation processes are reviewed and their characteristics and relationships with drying parameters and drying methods are discussed. The concept of modelling of the drying process in which degradation kinetics is included, has been proposed. That concept has been illustrated by the result of the calculation of one- and two-stage fluidized bed dryer for drying of baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*. The optimal drying parameters have been proposed.

### Adres dla korespondencji:

Czesław Strumiłło, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Łódzka,  
ul. Wólczańska 175, 90–924 Łódź.