

MATEMATYCZNE PODSTAWY DYFUZJI PODCZAS PEKLOWANIA MIĘSA

Zbigniew J. Dolatowski

Instytut Techniki Rolno-Spożywczej

Bogusław A. Skierczyński

Instytut Podstaw Techniki AR w Lublinie

Od wielu lat prowadzi się badania biofizykochemicznego procesu peklowania mięsa. Ma on na celu przede wszystkim wyjaśnienie faz tworzenia barwy. Ocena stanu faktycznego, w jakim zachodzą procesy peklowania, a szczególnie powstawanie charakterystycznej barwy uwarunkowana jest złożonością i kompleksowością substratów uczestniczących w reakcjach [1]. W trakcie trwania procesu występują zjawiska dyfuzyjno-osmotyczne, które związane są z penetracją do struktur tkanki składników solanki i ich równomiernym rozmieszczeniem. Stąd też stosuje się różnorodne techniki, które mają na celu przyspieszenie procesu. Poszukiwania teoretycznych podstaw kształtowania barwy mają swoje uzasadnienie nie tylko w przyspieszeniu procesu, ale i w zakresie minimalizacji składników biorących udział w tej reakcji.

W dostępnej literaturze niewiele jest publikacji [1,3] charakteryzujących szybkość procesów dyfuzyjnych i osmotycznych w mięsie. Problem ten jest równie skomplikowany, jak i fazy tworzenia charakterystycznej barwy. Jedno jest pewne, że tworzenie barwy jest możliwe w przypadku zbliżenia się NO do mioglobiny, czyli musi nastąpić rozproszczenie NO w tkance mięsnej. Podstawą tego zjawiska są procesy osmotyczno-dyfuzyjne. Dla procesu peklowania ten problem jest ważniejszy od procesu rozchodzenia się NaCl w tkance. Rozproszczenie soli w tkance odbywa się również w mięsie po obróbce termicznej, podczas gdy tworzenie barwy zachodzi przede wszystkim w mięsie surowym, tj. przed denaturacją termiczną mioglobiny. W związku z powyższym istotnym elementem procesu peklowania jest szybkość rozchodzenia się NO w tkance, czego wynikiem jest tworzenie barwnego związku. O szybkości dyfuzji mówi nam tzw. współczynnik dyfuzji, zależy on od wielu czynników, a szcze-

gólnie od rodzaju tkanki, gatunku zwierzęcia, stanu fizykochemicznego tkanki, jak też od metod obróbki w czasie peklowania, składu solanki, temperatury itp. W związku z tym istotnego znaczenia nabiera określenie współczynnika dyfuzji soli w tkance.

W niniejszej pracy przedstawiono model matematyczny obliczania współczynnika dyfuzji oraz przy jego pomocy wyznaczono współczynnik dyfuzji NO w mięsie wieprzowym, wołowym i końskim.

MATEMATYCZNY MODEL OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI SKŁADNIKÓW SOLANKI PODCZAS PEKLOWANIA

Współczynnik dyfuzji obliczono z aproksymacji równania Ficka [4]. Interpretację matematycznej zależności dyfuzji w mięsie podczas peklowania przeprowadzono w następującym uproszczonym modelu matematycznym, przy założeniach:

- bodziec przebiegu dyfuzji w tkance mięsnej podczas peklowania jest tylko gradientem stężenia c składników solanki,
- rozpatrując matematyczny model dyfuzji podczas peklowania mięsa uwzględnia się tylko jeden bodziec, a mianowicie gradient stężenia NO - czynnik tworzący barwę (w kierunku osi x)

$$\text{grad } c = \frac{\partial c}{\partial x} . \quad (1)$$

Zależność (1) można przedstawić wykorzystując pojęcie strumienia

$$\emptyset = \frac{dm}{A dt} , \quad (2)$$

gdzie: A - powierzchnia,
 m - masa,
 t - czas.

Z fizycznego punktu widzenia charakter rozchodzenia się NO w tkance jest istotny, jeżeli zależność między bodźcem (grad c) a strumieniem \emptyset jest funkcyjna

$$\emptyset = f(\text{grad } c),$$

f - zależność funkcyjna pomiędzy strumieniem a bodźcem,
 Dla dyfuzji zależność tę określa I prawo Ficka

$$\emptyset = - D \frac{\partial c}{\partial x} , \quad (3)$$

D - współczynnik dyfuzji.

Zjawisko dyfuzji opisywane jest równaniem różniczkowym o pochodnych cząstkowych typu parabolicznego. Równanie to jest postaci

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D \frac{\partial c}{\partial t}, \quad x \in (0,1), \quad t \in (0, \infty). \quad (4)$$

Rozpatrujemy zjawisko dyfuzji w zakresie rozchodzenia się NO w tkance mięsnej na długości l

$$0 \leq x \leq l.$$

Zakładamy izolowaną powierzchnię zewnętrzną, z końcami utrzymywanymi w stałych stężeniach C_1 i C_2

$$c(x, 0) = c_0 = \text{const} \quad x \in (0,1). \quad (5)$$

Rozkład c_0 w chwili początkowej $t=0$ jest stały na całej długości l .

Warunki brzegowe zgodnie z poprzednimi założeniami są postaci

$$c(0, t) = C_1 = \text{const}, \quad t \in (0, \infty). \quad (6)$$

$$c(l, t) = C_2 = \text{const}, \quad (7)$$

Badamy stężenie NO w punkcie $x = l/2$ (l - odległość rozchodzenia się NO).

Rozwiązanie równania (4) z warunkami brzegowymi (6) i (7) oraz z warunkiem początkowym (5) jest postaci

$$c(x, t) = C_1 + (C_2 - C_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ c_0 - C_1 [1 - (-1)^n] + (-1)^{n+1} (C_1 - C_2) \right\} \exp\left(\frac{n^2 \pi^2 D}{l^2} t\right) \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (8)$$

Istotna jest wartość współczynnika dyfuzji D przy znanych $c(\frac{l}{2}, t_1)$, $\frac{l}{2}$, t_1 ,

gdzie: c - stężenie,

$\frac{l}{2}$ - odległość rozchodzenia się NO w czasie t_1 .

Wartość współczynnika dyfuzji D można wyznaczyć ze wzoru (8), który po przekształceniach przybiera następującą postać

$$D = \frac{-1^2}{\pi^2 t_1} \ln \frac{\pi [c(\frac{l}{2}, t_1) - \frac{1}{2}C_1 - C_2]}{2(C_0 - C_1 - C_2)} \quad (9)$$

W prowadzonej analizie matematycznej na długości $\frac{l}{2}$ wartość stężenia C_2 można przyjąć równą c_0 . Jednocześnie zakładając, że stężenie $c(\frac{l}{2}, t_1)$ ma być minimalne, przyjmujemy że

$$c\left(\frac{l}{2}, t_1\right) \approx c_0,$$

przy powyższych założeniach wyrażenie (9) przybiera postać

$$D \approx \frac{-1^2}{\pi^2 t_1} \ln \frac{\pi}{4}, \quad \frac{\text{mm}^2}{\text{h}}. \quad (10)$$

Wymiarem współczynnika dyfuzji jest mm^2/h , przekształcając do jednostek stosowanych m^2/s oraz wyznaczając stałe liczbowe wzór (10) przybiera postać

$$D \approx 6,7 \cdot 10^{-12} \frac{l^2}{t_1}, \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}},$$

gdzie:

l - długość drogi dyfuzji w mm,

t_1 - czas rozchodzenia się substancji na długości $l/2$ w godzinach.

BADANIA WŁASNE

W niniejszej pracy zbadano współczynnik dyfuzji NO w tkance mięsa wieprzowego, wołowego i końskiego. Badania prowadzono w ten sposób, że do określonej wielkości kawałka mięsa wypreparowanego po 48 godzinach od uboju wprowadzano solankę w ściśle określonej odległości nastrzykującej igły. Następnie mięśnie poddawano masowaniu. Po określonym czasie przetrzymywania mięsa w temperaturze 4°C poddawano je denaturacji termicznej i analizowano odległość charakterystycznej barwy mięsa peklowanego. Mając czas i drogę obliczano współczynniki dyfuzji. Otrzymano wyniki:

	współczynnik dyfuzji	
mięso wieprzowe	$1,985 \cdot 10^{11}$	- $2,269 \cdot 10^{11}$,
mięso wołowe	$1,361 \cdot 10^{11}$	- $1,429 \cdot 10^{11}$,
mięso końskie	$0,794 \cdot 10^{11}$	- $0,992 \cdot 10^{11}$.

Obliczone współczynniki dyfuzji znalazły potwierdzenie w praktyce. Charakteryzują one nie tylko drogę i szybkość rozchodzenia się NO w tkance, ale również szybkość reakcji barwnej, jak i przenikanie NO przez błony. Przeprowadzone pomiary nie dają możliwości rozdzielenia poszczególnych czynników, natomiast dają globalny przyrost czasu. Bardziej dokładne obliczenia współczynnika dyfuzji przy pomocy proponowanej metody byłyby możliwe przy analizie czasu rozchodzenia się substancji znakowanych podczas procesu peklowania. Rodger i współpr. [2] analizując na atomach znakowanych szybkość rozchodzenia się soli (NaCl) w tkance mięsnej śledzi w temperaturze 20°C otrzymali nieco wyższe wartości współczynnika dyfuzji ($2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$).

Reasumując można powiedzieć, że proponowana zależność matematyczna może służyć do wyznaczania współczynnika dyfuzji. Znając współczynnik dyfuzji możemy określić czas peklowania dla tkanki o znanych i charakterystycznych parametrach.

PIŚMIENNICTWO

1. Dowierciał R., Muzyka L., Pisula A.: Zmiany fizykochemiczne zachodzące podczas peklowania mięsa baraniego. Gosp. Mięсна 1987, 3, 7.
2. Duda Z.: Tendencje postępu technicznego i technologicznego procesu peklowania mięsa. Medycyna Wet. 1978, 34, 543.
3. Rodger G., Hastings R., Cryne C., Bailey J.: Diffusion properties of salt and acetic acid into herring and their subsequent effect on the muscle tissue. J. Food Sci. 1984, 49, 714.
4. Tichonow A. N., Samarski A. A.: Urownienia matematycznej fiziki. Moskwa Nauka 1977.

З. Долятовски

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИФУЗИИ ВО ВРЕМЯ ПОСОЛА МЯСА

Р е з ю м е

В работе представлено упрощение решения уравнения Фика к форме, позволяющей подсчитать коэффициент диффузии веществ рассола в мясе. Исследовался коэффициент диффузии NO в свинине, говядине и конине. Отмечено, что наивысшей величиной коэффициента диффузии обладает свинина, наименьшей же - конина. Проведенные исследования показали, что подсчитанный коэффициент диффузии при помощи предлагаемой формулы $D = 6,7 \cdot 10^{-12} \frac{l^2}{t_1}, \left[\frac{m^2}{s} \right]$, может быть хорошим измерителем времени засола мяса.

Z. Dolatowski

MATHEMATICAL BASIS OF DIFFUSION WHILE CORNING MEAT

S u m m a r y

The paper presents the simplification of the solution of Fick's equation to the form allowing for the calculation of diffusions coefficient of brine components in meat. The coefficient of diffusion NO in pork, beef, and horseflesh have been examined. It has been found out that, the highest value of diffusion coefficient can be observed in the case of pork, and the lowest one in the case of horseflesh. The executed examinations revealed, that the calculated by the presented formula the coefficient of diffusion

$$D = 6,7 \cdot 10^{-12} \frac{l^2}{t_1}, \left[\frac{m^2}{s} \right], \text{ can be good}$$

meter of the time of meat corning.