

Jan KRZYSZTOFORSKI¹, Janusz ZAŁUSKI², Radosław PŁOTKOWIAK², Marek HENCZKA¹

e-mail: jan.krzysztoforski@pw.edu.pl

¹ Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa² Polski Ogród Sp. z o.o., Warszawa

Modelowanie zjawisk wymiany ciepła w procesie produkcji wieloskładnikowych mrozonek warzywnych i owocowych

Wstęp

Wymiana ciepła odgrywa istotną rolę w procesie produkcji mrożonych artykułów spożywczych, takich jak wieloskładnikowe mrożonki warzywne i owocowe [Gruda i Postolski, 1999]. Z tego względu przydatna jest umiejętność modelowania tych zjawisk w celu projektowania nowych linii produkcyjnych, a także optymalizacji pracy istniejących obiektów. W procesie produkcji wieloskładnikowych mrozonek warzywnych i owocowych obok zapewnienia odpowiedniego składu mrożonki [Krzysztoforski i in., 2018] kluczowe znaczenie ma zachowanie tzw. łańcucha chłodniczego dla produktu, co oznacza, że jego temperatura w żadnym momencie nie może przekroczyć -15°C . W trakcie procesu produkcyjnego poszczególne składniki mrozonek wieloskładnikowych są mieszane ze sobą, a następnie transportowane do urządzeń łączących i pakujących, gdzie są pakowane w torebki foliowe. W tym czasie mrożonki mają bezpośredni kontakt z powietrzem otoczenia, którego temperatura znacznie przekracza wartość -15°C . Jako że produkt ulega ciągłemu ogrzewaniu od momentu opuszczenia komory chłodniczej przez półfabrykaty do momentu wstawienia do niej palety z zapakowanym produktem, kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa produktu ma minimalizacja jego czasu przebywania poza komorą chłodniczą.

W ramach niniejszej pracy opracowano metodę modelowania matematycznego zjawisk wymiany ciepła zachodzących na każdym etapie procesu produkcji mrozonek wieloskładnikowych z uwzględnieniem specyficznych właściwości fizykochemicznych poszczególnych składników mieszanek. Metoda ta umożliwi przewidywanie lokalnej temperatury mrożonki w zależności od warunków prowadzenia procesu, takich jak temperatury otoczenia i czasu przebywania w poszczególnych sekcjach linii produkcyjnej.

Metodyka badawcza

Proces produkcji mrozonek

W przemysłowej produkcji wieloskładnikowych mrozonek warzywnych i owocowych można wyróżnić trzy etapy produkcji, podczas których półfabrykaty i produkty znajdują się poza komorą chłodniczą i są narażone na przerwanie łańcucha chłodniczego (Rys. 1):

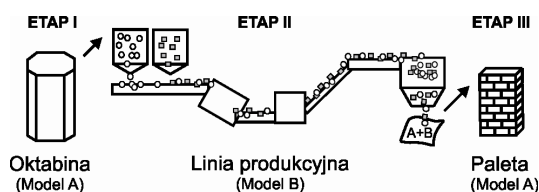
Etap I: Poszczególne składniki danej mieszanki (półfabrykaty) przechowywane w kartonowych pojemnikach (tzw. oktabinach) zostają wystawione z komory chłodniczej na halę produkcyjną.

Etap II: Półfabrykaty zostają wysypane z oktabin do zbiorników buforowych wchodzących w skład właściwej linii produkcyjnej, składającej się z wielu sekcji, takich jak przenośniki, bębny mieszające, układy ważące, itp. Tutaj rozpoczyna się właściwa produkcja mieszanki, która obejmuje m.in. transport, mieszanie składników oraz usuwanie zanieczyszczeń z produkowanej mieszanki. Produkcja kończy się zapakowaniem produktu do torebek foliowych, które następnie są umieszczane w pudełkach kartonowych i układane na palety.

Etap III: Paleta zawierająca pudełka z produktem oczekuje na hali produkcyjnej na wstawienie do komory chłodniczej.

Przedstawione powyżej etapy produkcji różnią się znacznie warunkami wymiany ciepła pomiędzy mrożonką i otoczeniem. W eta-

pach I oraz III mrożonka jest nieruchoma i występuje w dużych skupiskach, natomiast na etapie II mrożonka porusza się po linii produkcyjnej i występuje w znacznym rozproszeniu, chwilami nawet w postaci pojedynczych elementów. Z tego względu opracowano różne dwa modele matematyczne dla różnych etapów procesu produkcji.



Rys. 1. Schemat procesu produkcji mrozonek wieloskładnikowych.

Modele matematyczne

Model A opracowano dla I oraz III etapu procesu produkcji. Modelowanie oparto jest na rozwiązywaniu równania przewodzenia ciepła wewnątrz oktabiny/palety:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

gdzie: T – temperatura materiału, [$^{\circ}\text{C}$]; ρ – gęstość materiału, [kg/m^3]; C_p – ciepło właściwe materiału, [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]; λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału, [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$].

W przypadku oktabiny (etap I) równ. (1) jest rozwiązywane dla wnętrza oktabiny, zatem ośrodkiem przewodzenia ciepła jest wyłącznie mrożonka. W przypadku palety (etap III) równanie jest rozwiązywane dla wnętrza palety (tj. dla całej objętości palety z pominięciem ścianek pudełek kartonowych graniczących z otoczeniem), zatem ośrodkiem przewodzenia ciepła jest mrożonka lub karton. Warunki brzegowe wynikają z oporów transportu ciepła między pojemnikiem a otoczeniem (konwekcja swobodna i promieniowanie, a także przewodzenie przez zewnętrzną warstwę kartonu). Równanie przewodzenia ciepła rozwiązywane było metodą objętości skończonych przy użyciu oprogramowania *OpenFOAM*.

Model B opracowano dla II etapu procesu produkcji. Model zakłada, że mrożonka przemieszcza się – bez mieszania wzdłużnego – przez poszczególne sekcje linii produkcyjnej, charakteryzujące się różnymi warunkami wymiany ciepła. Dla danej sekcji zakłada się stałą temperaturę otoczenia, stały współczynnik przenikania ciepła oraz stały stosunek powierzchni wymiany ciepła do objętości mrożonki. Temperaturę mrożonki w danym czasie można wtedy dla określonej sekcji obliczyć z następującego równania:

$$T(t) = T(0) + (T_a - T(0)) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2)$$

gdzie: T – temperatura mrożonki, [$^{\circ}\text{C}$]; T_a – temperatura otoczenia, [$^{\circ}\text{C}$]; t – czas (liczony od momentu pojawienia się mrożonki w danej sekcji), [s]; oraz τ – stała czasowa dynamiki wymiany ciepła, [s] obliczona według następującego wzoru:

$$\tau = \frac{\rho C_p V}{kA} \quad (3)$$

gdzie: ρ – gęstość mrożonki, [kg/m^3]; C_p – ciepło właściwe mrożonki, [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]; k – współczynnik przenikania ciepła, [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$];

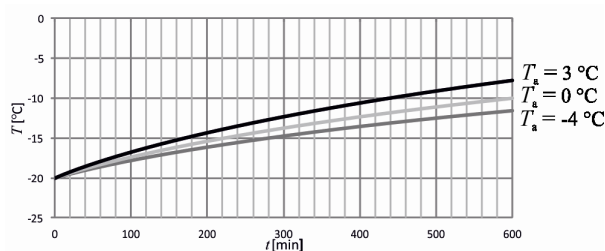
V/A – stosunek objętości mrożonki do jej powierzchni wymiany ciepła, [m]. Dowolna sekcja i jest zatem opisana przez trzy parametry: czas przebywania mrożonki t_i , stałą czasową τ_i oraz temperaturę otoczenia T_{oi} . Ponadto kluczowym parametrem do obliczeń jest temperatura początkowa półfabrykatów przed pierwszą sekcją. Obliczenia zmian temperatury mrożonki w czasie wykonuje się po kolei dla poszczególnych sekcji, przy czym temperatura końcowa mrożonki w danej sekcji jest równocześnie temperaturą początkową mrożonki w kolejnej sekcji.

Wyniki i dyskusja

Przedstawione przykładowe wyniki symulacji numerycznych uzyskano dla mrożonki o właściwościach mieszanki marchewki z groszkiem (stosunek wagowy 1:1), o gęstości nasypowej 665 kg/m³ i o cieple właściwym 1850 J/(kg·K).

Etap I – Oktabina (Model A)

Na rys. 2 przedstawiono zmiany w czasie średniej temperatury mrożonki przechowywanej w oktabinie (rozmiary wewnętrzne 1170 x 770 x 1500 mm), dla temperatury początkowej równej -20°C oraz dla trzech różnych wartości temperatury otoczenia. Na podstawie wyników symulacji można oszacować średnią temperaturę mrożonki w dowolnym czasie oraz zbadać wpływ parametrów operacyjnych (w tym przypadku temperatury otoczenia) na szybkość procesu ogrzewania zawartości oktabiny.



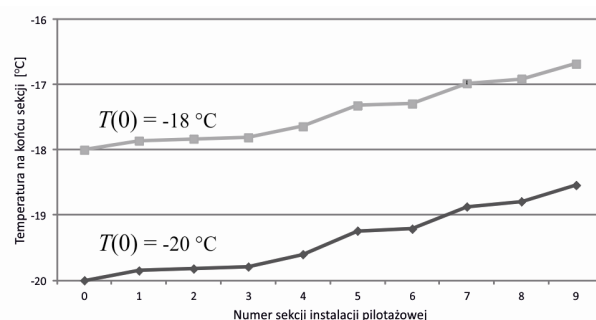
Rys. 2. Zmiany średniej temperatury mrożonki w czasie (Etap I - oktabina).

Etap II – Linia produkcyjna (Model B)

Symulacje numeryczne wykonano dla przykładowej konfiguracji linii produkcyjnej, scharakteryzowanej w tab. 1, dla dwóch wariantów. Temperatura otoczenia we wszystkich sekcjach wynosiła 0°C, natomiast temperatura początkowa wynosiła -20°C lub -18°C. Na podstawie stałych czasowych dynamiki wymiany ciepła dla poszczególnych sekcji przedstawionych w tab. 1, widać, że linia produkcyjna charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem intensywności wymiany ciepła między mrożoną a otoczeniem. Na rys. 3 przedstawiono temperaturę mrożonki na końcu poszczególnych sekcji linii produkcyjnej dla obydwóch wariantów. Możliwe jest odczytanie lokalnej temperatury mrożonki za każdą sekcją linii produkcyjnej. Opracowany model matematyczny umożliwia również zbadanie wpływu zmian poszczególnych parametrów operacyjnych na temperaturę końcową mieszanki (w przedstawionym przykładzie są to dwie różne temperatury początkowe mrożonki).

Tab. 1. Sekcje linii produkcyjnej

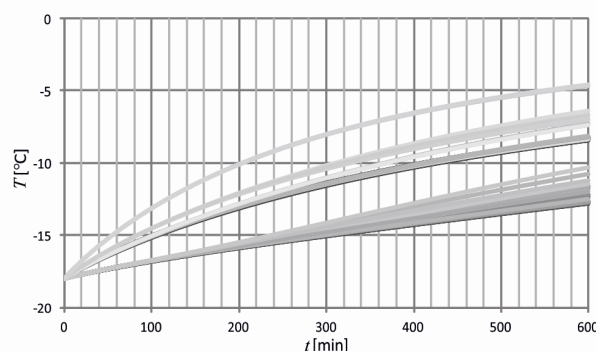
Oznaczenie	Opis	t_i [s]	τ_i [s]
Przeñośnik 1	Przeñośnik za zbiornikami buforowymi z półfabrykatem	100	12303
Bęben	Bęben mieszający	2	1230
Przeñośnik 2	Przeñośnik z bębniem mieszającym	50	30756
Sortex	Urządzenie sortujące (sortex) do usuwania zanieczyszczeń/ciał obcych z mrożo-	2	205
Przeñośnik 3	Przeñośnik za sortexem	60	3076
Gęsia szyja	Przeñośnik typu gęsia szyja	30	18454
Przeñośnik 4	Przeñośnik wibracyjny	200	12303
Waga	Układ ważący	120	30756
Torebka	Torebka z produktem	60	4921



Rys. 3. Temperatury mrożonki na linii produkcyjnej (Etap II – linia produkcyjna).

Etap III – Paleta (Model A)

Na rys. 4 przedstawiono zmiany w czasie średniej temperatury mrożonki znajdującej się w pojedynczych pudełkach kartonowych ułożonych na palecie (99 pudełek o rozmiarach 380 x 250 x 150 mm, ułożonych w 11 warstwach). Temperatura początkowa wynosiła -18°C, natomiast temperatura otoczenia wynosiła 0°C.



Rys. 4. Zmiany średniej temperatury mrożonki w czasie (Etap III – paleta).

Na podstawie przedstawionych wyników symulacji widać, że występuje duże różnicowanie szybkości wymiany ciepła między poszczególnymi pudełkami kartonowymi a otoczeniem. Najbardziej podatne na wymianę ciepła z otoczeniem (a więc na niekorzystne ogrzewanie produktu) są pudełka ułożone na palecie w najwyższej warstwie oraz pudełka narożne, gdyż charakteryzują się dużą powierzchnią wymiany ciepła z otoczeniem.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono modele matematyczne zjawisk wymiany ciepła w produkcji wieloskładnikowych mrozonek warzywnych i owocowych oraz zademonstrowano możliwości modeli przy pomocy przykładowych obliczeń. Modele umożliwiają analizę szybkości wymiany ciepła w zależności od różnych parametrów operacyjnych.

Dzięki opracowanej metodzie możliwe jest określenie maksymalnego czasu przebywania mrozonek poza komorą chłodniczą bez przerywania łańcucha chłodniczego. Wiedza ta może być wykorzystana do optymalizacji procesu produkcyjnego.

LITERATURA

Gruda Z., Postolski J., (1999). *Zamrażanie żywności*. WNT, Warszawa
 Krzysztoforski J., Boczkowski M., Załuski J., Płotkowiak R., Henczka M., (2018). System monitorowania składu wieloskładnikowych mrozonek warzywnych i owocowych na linii produkcyjnej. *Inż. Ap. Chem.*, 57(5), 136-137
 OpenCV, 2018. *Open Source Computer Vision Library* (09.2018): <https://opencv.org/>

Praca finansowana z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, działanie I.1, poddziałanie I.1.1.