

Dr hab. inż. Zbigniew PAŁACHA, prof. SGGW  
Inż. Grzegorz ŚWISTAK  
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, SGGW w Warszawie

# ANALIZA CZASU ZAMRAŻANIA WYBRANYCH WARZYZW PRZY ZMIENNYCH PARAMETRACH PROCESU ZAMRAŻANIA®

Freezing time analysis of some vegetables the variable  
parameters of freezing®

**Słowa kluczowe:** warzywa, czas zamrażania, metody zamrażania.

*W pracy prezentowanej w artykule przeprowadzono analizę czasu zamrażania 10 wybranych warzyw (brukselka, buraki, fasolka szparagowa, groszek zielony, marchew, ogórki, pomidory, szparagi, szpinak, ziemniaki). Obliczono i porównano czas zamrażania warzyw, w zależności od zastosowanej metody zamrażania (owiewowa tradycyjna, owiewowa fluidyzacyjna, LIN i LIC) oraz temperatury końcowej warzyw (-18 i -30°C). Niezależnie od zastosowanej metody zamrażania, najkrótszy czas zamrażania otrzymano dla groszku zielonego, a najdłuższy dla plasterków ogórków w opakowaniu.*

**Key words:** vegetables, freezing time, freezing methods.

*In the work presented in the article analyzes freezing time 10 selected vegetables (Brussels sprouts, red beets, French beans, green peas, carrot, cucumbers, tomatoes, asparagus, spinach, potatoes). Calculated and compared vegetable freezing time, depending upon the freezing method (traditional air blast, fluidized bed, LIN and LIC) and the final temperature of the vegetables (-18 and -30°C). Irrespective of the method freezing, the shortest freezing time obtained for green peas and slices cucumbers in packing longest.*

## WSTĘP

Istotę procesu zamrażania stanowi niestacjonarny proces wymiany ciepła, który odbywa się pomiędzy materiałem a zimniejszym od niego otoczeniem. Wymiana ciepła dokonuje się głównie na drodze przewodzenia i konwekcji, w mniejszym stopniu promieniowania. Szybkość i czas trwania procesu zamrażania są zależne od intensywności wymiany ciepła, na którą mają wpływ: aparat i metoda stosowana do przeprowadzenia procesu, sposób jego przeprowadzenia oraz właściwości fizyczne zamrażanego materiału.

Obecnie najbardziej znanymi i rozpowszechnionymi wzorami do przybliżonego obliczania czasu zamrażania są wzory podane przez Planka i Rjutowa [1, 6]. Wzór Planka oraz jego modyfikacje stały się wyrażeniami klasycznymi dla technologii zamrażalniczej.

Przy wyprowadzaniu wzoru na czas zamrażania autor wprowadził założenia upraszczające:

- ciało jednorodne zawierające wodę, przed początkiem zamrażania, zostaje ochłodzone do temperatury krioskopowej,
- powstawanie lodu w tym ciele następuje bez przechłodzenia i przebiega izotermicznie w temperaturze krioskopowej,
- ciepło właściwe zamrożonej części ciała jest równe zero,
- przewodność cieplna właściwa zamrożonego ciała jest stała i niezależna od temperatury,
- temperatura medium odprowadzającego ciepło oraz współczynnik wnikania ciepła są stałe.

Do przybliżonego obliczania całkowitego czasu zamrażania zaleca się stosowanie wzoru uproszczonego, który opiera się wyłącznie wartościami entalpii początkowej i końcowej, a które mogą być ściśle określone. Jednak dokładność wyników uzyskanych za pomocą tego wzoru jest duża i wystarczająca do obliczeń technicznych i praktyki przemysłowej. Udowodniono, że odchylenia od danych doświadczalnych nie przekraczają  $\pm 10\%$  [1, 6].

Wpływ na czas zamrażania ma wąska grupa dobrze już poznanych czynników. Wśród nich występują czynniki zależne od rodzaju i właściwości fizycznych zamrażanego materiału, takie jak: wielkość, kształt, gęstość i przewodność cieplna właściwa oraz czynniki zależne od warunków, w jakich prowadzony jest proces, takie jak: współczynnik wnikania ciepła ( $\alpha$ ) i czynna różnica temperatury [10]. Kluza i Góral [3] przeprowadzili analizę oddziaływania poszczególnych parametrów zamrażania na całkowity czas zamrażania produktów spożywczych. Stwierdzili, że parametrem mającym największy wpływ na czas zamrażania był wymiar charakterystyczny materiału. Nieco mniejszym wpływem charakteryzowały się kształt materiału, współczynnik wnikania ciepła, temperatura medium chłodzącego i rodzaj surowca. Natomiast najmniejszy wpływ wykazały temperatura początkowa oraz temperatura centrum termicznego materiału w końcowym etapie procesu zamrażania.

**Celem artykułu jest analiza czasu zamrażania dziesięciu wybranych warzyw. Zakres pracy obejmował obliczenie i porównanie czasu zamrażania warzyw o różnych kształtach, w zależności od zastosowanej metody zamrażania oraz temperatury końcowej warzyw.**

## METODYKA BADAŃ

### 1. Materiał badawczy

Materiałem badawczym wybranym do analizy czasu zamrażania były warzywa o różnych kształtach: brukselka, groszek zielony i pomidory (kształt kuli), fasolka szparagowa i szparagi (kształt walca), buraki i marchew (kształt kostki), ziemniaki (kształt prostopadłościanu), ogórki i szpinak (plastry ogórków i szpinak puree w opakowaniu, kształt prostopadłościanu).

### 2. Założenia wstępne

Założono, że temperatura początkowa ( $t_p$ ) wszystkich warzyw przed procesem zamrażania wynosiła 15°C. Warzywa zamrażano do średniej temperatury końcowej ( $t_e$ ) - 18 i -30°C. Entalpia warzyw w temperaturze -40°C wynosiła 0 kJ/kg [1].

Warzywa zamrażano czterema metodami: owiewową tradycyjną, owiewową fluidyzacyjną (oprócz ogórków i szpinaku), w ciekłym azocie (LIN) i w ciekłym CO<sub>2</sub> (LIC).

### 3. Metody obliczeniowe

#### 3.1. Obliczanie czasu zamrażania

Czas zamrażania warzyw w kształcie kuli o średnicy  $d_e$  obliczano z równania [6]:

$$\tau_e = \frac{\Delta i \cdot \rho_z}{6\Delta t} \left( \frac{d_e}{\alpha} + \frac{d_e^2}{4\lambda_e} \right) \quad (1)$$

Czas zamrażania warzyw w kształcie walca o średnicy  $d_e$  obliczano z równania [6]:

$$\tau_e = \frac{\Delta i \cdot \rho_z}{4\Delta t} \left( \frac{d_e}{\alpha} + \frac{d_e^2}{4\lambda_e} \right) \quad (2)$$

Czas zamrażaniu warzyw w kształcie prostopadłościanu (kostki buraka i marchwi o boku  $l_e = 10$  mm; ziemniaki  $a = 60$  mm,  $b = 10$  mm,  $l_e = 10$  mm) obliczano z równania [6]:

$$\tau_e = \frac{\Delta i \cdot \rho_z}{\Delta t} \left( P \frac{l_e}{\alpha} + R \frac{l_e^2}{\lambda_e} \right) \quad (3)$$

Czas zamrażaniu warzyw w kształcie prostopadłościanu w opakowaniu (ogórki i szpinak  $a = 135$  mm,  $b = 90$  mm,  $l_e = 45$  mm) obliczano z równania [6]:

$$\tau_e = \frac{\Delta i \cdot \rho_z}{\Delta t} \left[ P e \left( \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta}{\lambda} p \right) + R \frac{l_e^2}{\lambda_e} \right] \quad (4)$$

gdzie:  $\Delta i = i_p - i_e$  - różnica entalpii produktu w temperaturze odpowiednio początkowej ( $t_p$ ) i końcowej ( $t_e$ ), kJ/kg,

$\rho_z$  - gęstość produktu w stanie zamrożenia, kg/m<sup>3</sup>,

$\Delta t = t_{kr} - t_m$  - różnica temperatury między temperaturą krioskopową produktu ( $t_{kr}$ ) i temperaturą medium chłodzącego ( $t_m$ ), °C,

$\alpha$  - współczynnik wnikania ciepła od powierzchni produktu do medium, W/(m<sup>2</sup>×K),

$\lambda_e$  - przewodność cieplna właściwa produktu w stanie zamrożonym, W/(m×K),

$P, R$  - współczynniki zależne od stosunku boków odpowiednio  $a:l$  i  $b:l$  (dla buraka i marchwi  $P = 0,1677$  i  $R = 0,0417$ ; dla ziemniaka  $P = 0,2308$  i  $R = 0,0592$ ; dla ogórków i szpinaku  $P = 0,2812$  i  $R = 0,0796$  [6]),

$\sum \frac{\delta}{\lambda} p$  - sumaryczny opór cieplny opakowania (folia PE o grubości 0,004 mm), 0,000138 (m<sup>2</sup>×K)/W [8].

#### 3.2. Obliczanie entalpii produktu

Entalpię produktu w temperaturze początkowej ( $t_p$ ) obliczano ze wzoru:

$$i_p = c_e [t_{kr} - (-40)] + q_z + c_0 (t_p - t_{kr}) \quad (5)$$

Entalpię produktu w temperaturze końcowej ( $t_e = -18$ °C) obliczano ze wzoru:

$$i_e = c_e [-18 - (-40)] \quad (6)$$

Entalpię produktu w temperaturze końcowej ( $t_e = -30$ °C) obliczano ze wzoru:

$$i'_e = c_e [-30 - (-40)] \quad (7)$$

gdzie:  $c_0$  - ciepło właściwe produktu nie zamrożonego, kJ/(kg×K),

$c_e$  - ciepło właściwe produktu zamrożonego, kJ/(kg×K),

$q_z$  - jednostkowe ciepło zamrażania produktu, kJ/kg.

Jednostkowe ciepło zamrażania produktu ( $q_z$ ) obliczano ze wzoru [8]:

$$q_z = q_{zw} \cdot x_w \quad (8)$$

gdzie:  $q_{zw}$  - jednostkowe ciepło zamrażania czystej wody, 335,2 kJ/kg,

$x_w$  - ułamek masowy wody w produkcie, kg/kg.

#### 3.3. Obliczanie gęstości produktu w stanie zamrożonym

Gęstość owoców w stanie zamrożonym obliczano ze wzoru [9]:

$$\rho_z = \rho_o \left[ 1 - x_w \left( 1 - \frac{t_k}{t_e} \right) \cdot 0,083 \right] \quad (9)$$

gdzie:  $\rho_o$  - gęstość produktu w stanie nie zamrożonym, kg/m<sup>3</sup>.

#### 3.4. Obliczanie średniej temperatury medium chłodzącego podczas zamrażania w ciekłym azocie i ditlenku węgla

Średnią temperaturę medium chłodzącego ( $t_{N_2}$  i  $t_{CO_2}$ ) obliczano ze wzorów:

$$t_{N_2} = \frac{t_w + t_p}{2} \quad (10)$$

$$t_{CO_2} = \frac{t_s + t_p}{2} \quad (11)$$

Tabela 1. Dane wyjściowe warzyw do obliczania czasu zamrażania

Table 1. Output data of vegetables to calculating freezing time

Warzywa Dane	Brukselka	Buraki	Fasolka szparagowa	Groszek zielony	Marchew	Ogórki	Pomidory	Szparagi	Szpinak	Ziemniaki
Kształt surowca	kula	kostka	walec	kula	kostka	prostopad- łościan	kula	walec	prostopad- łościan	prostopad- łościan
Wymiar [mm]	$d_p = 18^{[1]}$	$10 \times 10 \times 10^{[1]}$	$d_p = 9^{[1]}$	$d_p = 9^{[1]}$	$10 \times 10 \times 10^{[1]}$	$l_p = 45^*$	$d_p = 50^{[11]}$	$d_p = 15^{[11]}$	$l_p = 45^{[1]}$	$60 \times 10 \times 10^*$
$X_w$ [kg/kg]	0,849 <sup>[8]</sup>	0,876 <sup>[8]</sup>	0,889 <sup>[8]</sup>	0,743 <sup>[8]</sup>	0,882 <sup>[8]</sup>	0,954 <sup>[7]</sup>	0,929 <sup>[7]</sup>	0,930 <sup>[4]</sup>	0,927 <sup>[8]</sup>	0,778 <sup>[8]</sup>
$t_{kr}$ [°C]	-0,55 <sup>[7]</sup>	-0,5 <sup>[7]</sup>	-1,3 <sup>[7]</sup>	-1,1 <sup>[7]</sup>	-1,35 <sup>[7]</sup>	-0,8 <sup>[1]</sup>	-0,85 <sup>[7]</sup>	-1,2 <sup>[1]</sup>	-0,95 <sup>[7]</sup>	-1,7 <sup>[7]</sup>
$\rho_o$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1050 <sup>*</sup>	1053 <sup>[8]</sup>	950 <sup>[8]</sup>	1020 <sup>[8]</sup>	1035 <sup>[8]</sup>	990 <sup>*</sup>	1000 <sup>[8]</sup>	1000 <sup>*</sup>	1000 <sup>*</sup>	1055 <sup>[8]</sup>
$\rho_{z(-18)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	978	979	885	961	965	915	926	928	927	993
$\rho_{z(-30)}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	977	978	883	959	963	914	925	926	926	991
$c_o$ [kJ/(kg×K)]	3,69 <sup>[8]</sup>	3,77 <sup>[8]</sup>	3,81 <sup>[8]</sup>	3,31 <sup>[8]</sup>	3,77 <sup>[8]</sup>	4,06 <sup>[1]</sup>	3,98 <sup>[8]</sup>	3,94 <sup>[1]</sup>	3,94 <sup>[8]</sup>	3,44 <sup>[8]</sup>
$c_p$ [kJ/(kg×K)]	1,92 <sup>[8]</sup>	1,92 <sup>[8]</sup>	1,97 <sup>[8]</sup>	1,76 <sup>[8]</sup>	1,92 <sup>[8]</sup>	2,05 <sup>[1]</sup>	2,01 <sup>[8]</sup>	2,01 <sup>[1]</sup>	2,01 <sup>[8]</sup>	1,80 <sup>[8]</sup>
$\lambda_e$ [W/(m×K)]	1,91 <sup>[8]</sup>	1,96 <sup>[8]</sup>	1,92 <sup>[8]</sup>	1,66 <sup>[8]</sup>	1,90 <sup>[8]</sup>	2,10 <sup>[1]</sup>	2,06 <sup>[8]</sup>	2,00 <sup>[1]</sup>	2,02 <sup>[8]</sup>	1,69 <sup>[8]</sup>
$q_z$ [kJ/kg]	284,3 <sup>[8]</sup>	293,6 <sup>[8]</sup>	298,2 <sup>[8]</sup>	247,0 <sup>[8]</sup>	293,6 <sup>[8]</sup>	319,2 <sup>[1]</sup>	312,2 <sup>[8]</sup>	312,2 <sup>[1]</sup>	307,6 <sup>[8]</sup>	258,6 <sup>[8]</sup>
$i_p$ [kJ/kg]	417,4	427,9	436,5	368,8	429,4	463,7	454,0	454,0	448,9	385,0
$i_e$ [kJ/kg]	42,2	42,2	43,3	38,7	42,2	45,1	44,2	44,2	44,2	39,60
$i_e'$ [kJ/kg]	19,2	19,2	19,7	17,6	19,2	20,5	20,1	20,1	20,1	18,0

Źródło: Indeks górny <sup>[n]</sup> oznacza pozycję literaturową, indeks górny \* oznacza wartość założoną, brak indeksu – wartości obliczone

Tabela 2. Dane wyjściowe metod zamrażania do obliczania czasu zamrażania

Table 2. Output data of freezing method to calculating freezing time

Dane Warzywa	Średnia temperatura medium chłodzącego, °C				Współczynnik wnikania ciepła, W/(m <sup>2</sup> ·K)					
	Metoda owiewowa tradycyjna		Metoda owiewowa fluidyzacyjna		Metoda LIN	Metoda LIC	Metoda owiewowa tradycyjna	Metoda owiewowa fluidyzacyjna	Metoda LIN	Metoda LIC
	$t_e = -18^\circ\text{C}$	$t_e = -30^\circ\text{C}$	$t_e = -18^\circ\text{C}$	$t_e = -30^\circ\text{C}$						
Brukselka	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	80 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Buraki	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	110 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Fasolka szparagowa	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	100 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Groszek zielony	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	130 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Marchew	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	110 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Ogórki	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	-	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Pomidory	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	60 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Szparagi	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	90 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Szpinak	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	-	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>
Ziemniaki	-30 <sup>[1]</sup>	-40 <sup>[1]</sup>	-28 <sup>[1]</sup>	-38 <sup>[1]</sup>	-113	-49,3	25 <sup>[1]</sup>	100 <sup>[2]</sup>	55 <sup>[1]</sup>	30 <sup>[1]</sup>

Źródło: Indeksy górne oznaczają pozycje literaturowe, brak indeksu – wartości obliczone

gdzie:  $t_w$  – temperatura wrzenia ciekłego azotu, -195,9°C [1],  
 $t_s$  – temperatura sublimacji zestalonego CO<sub>2</sub>, -78,5°C [1],  
 $t_{po}$  – temperatura par odlotowych N<sub>2</sub> (-30°C) i CO<sub>2</sub> (-20°C) [1].

#### 4. Zestawienie danych wyjściowych przyjętych do analizy czasu zamrażania

W tabelach 1 i 2 zestawiono dane wyjściowe warzyw i metod zamrażania niezbędne do obliczenia czasu zamrażania.

Tabela 3. Obliczony czas zamrażania dla wybranych warzyw  
Table 3. The calculated freezing time for selected vegetables

Warzywa	Czas zamrażania warzyw [min] do średniej temperatury końcowej ( $t_e$ ) -18°C i -30°C							
	Zamrażanie owiewowe tradycyjne		Zamrażanie owiewowe fluidyzacyjne		Zamrażanie LIN		Zamrażanie LIC	
	-18°C	-30°C	-18°C	-30°C	-18°C	-30°C	-18°C	-30°C
Brykselka	26,4	20,9	9,9	7,7	3,4	3,6	13,4	14,3
Buraki	14,8	11,7	4,0	3,1	1,8	1,9	7,5	7,9
Fasolka szparagowa	18,7	14,7	5,5	4,2	2,3	2,4	9,4	9,9
Groszek zielony	11,4	9,0	2,7	2,1	1,4	1,5	5,7	6,1
Marchew	15,1	11,8	4,1	3,1	1,8	1,9	7,5	8,0
Ogórki	127,8	100,7	-	-	17,6	18,6	65,9	69,6
Pomidory	83,3	65,6	44,2	34,1	11,4	12,1	42,9	45,3
Szparagi	34,6	27,1	11,5	8,9	4,3	4,5	17,4	18,4
Szpinak	126,5	99,6	-	-	17,4	18,4	65,1	68,9
Ziemniaki	19,4	15,2	5,8	4,4	2,3	2,5	9,7	10,2

Źródło: Badania własne

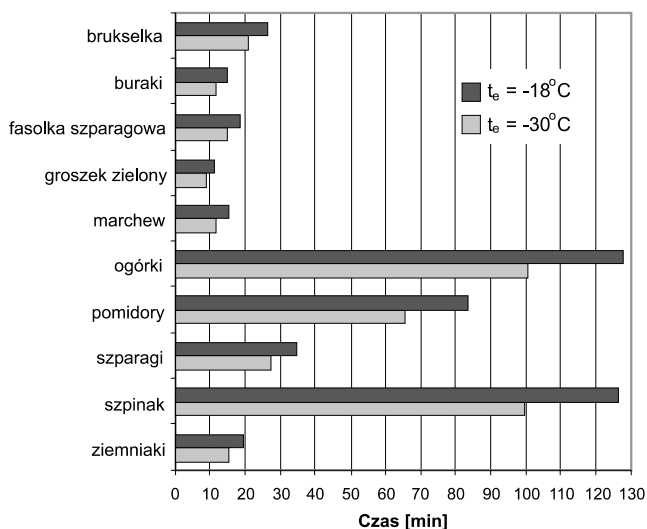
## OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

W tabeli 3 podano obliczone wartości czasu zamrażania dla poszczególnych warzyw w zależności od zastosowanej metody zamrażania, a na rysunkach 1 - 4 zilustrowano zmiany czasu zamrażania w zależności od metody zamrażania dla poszczególnych warzyw.

Analiza poszczególnych wartości czasu zamrażania wykazała, że bez względu na rodzaj warzyw, najdłuższym czasem zamrażania charakteryzowała się metoda owiewowa tradycyjna, a najkrótszy czas zamrażania stwierdzono dla metody zamrażania w ciekłym azocie (LIN). Ogólnie bez względu na rodzaj warzyw, czas zamrażania metodą owiewową tradycyjną był od 6 do 8 razy dłuższy od czasu zamrażania metodą LIN. Podobną zależność stwierdzili Pałacha i Krystian [5] analizując wartości czasu zamrażania dla owoców zamrażanych tymi samymi metodami.

Zastosowanie efektu fluidyzacji w metodzie zamrażania owiewowego spowodowało ponad 3-krotne skrócenie czasu zamrażania warzyw (ogórki i szpinak w opakowaniu nie zamrażano metodą owiewową fluidyzacyjną) w odniesieniu do tradycyjnej metody zamrażania owiewowego. Decydującym czynnikiem, który wpłynął na tak znaczne skrócenie czasu zamrażania warzyw metodą fluidyzacyjną była znacznie wyższa wartość współczynnika wnikania ciepła ( $\alpha$ ) (od 2,4 do 5,2 razy), wynikająca z wprowadzenia surowca w stan fluidalny. Dzięki temu stanowi uzyskano równomierne omywanie powierzchni surowca strumieniem zimnego powietrza o prędkości większej niż w tradycyjnej metodzie owiewowej, poprawiając tym samym warunki wnikania ciepła i w konsekwencji skracając czas zamrażania.

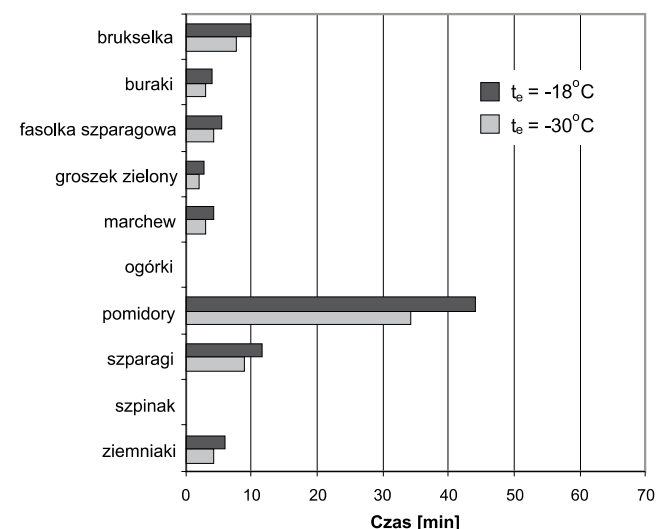
Stosując metody kriogeniczne do zamrażania warzyw, stwierdzono, że czas zamrażania metodą w ciekłym azocie (LIN) był ok. 4 razy krótszy od czasu zamrażania w ciekłym



Rys. 1. Czas zamrażania warzyw metodą owiewową tradycyjną.

Fig. 1. Freezing time of vegetables by traditional air blast freezing method.

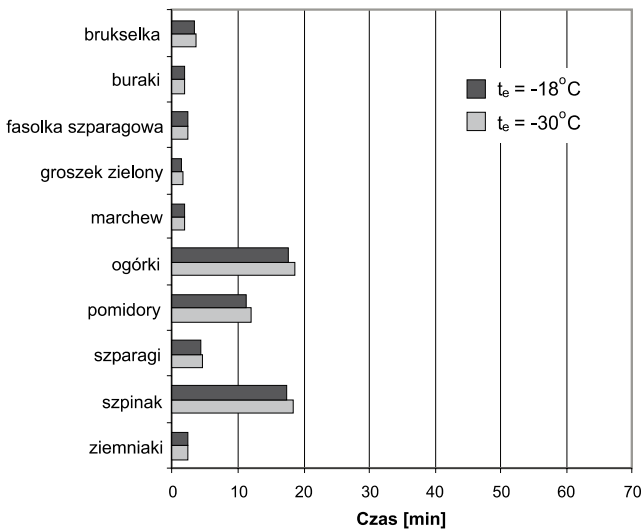
Źródło: Badania własne



Rys. 2. Czas zamrażania warzyw metodą owiewową fluidyzacyjną.

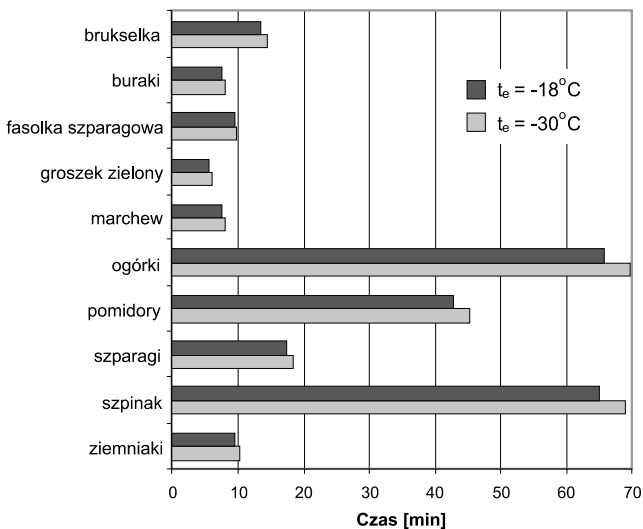
Fig. 2. Freezing time of vegetables by fluidized bed freezing method.

Źródło: Badania własne



**Rys. 3. Czas zamrażania warzyw metodą LIN.**  
**Fig. 3. Freezing time of vegetables by LIN method.**

Źródło: Badania własne



**Rys. 4. Czas zamrażania warzyw metodą LIC.**  
**Fig. 4. Freezing time of vegetables by LIC method.**

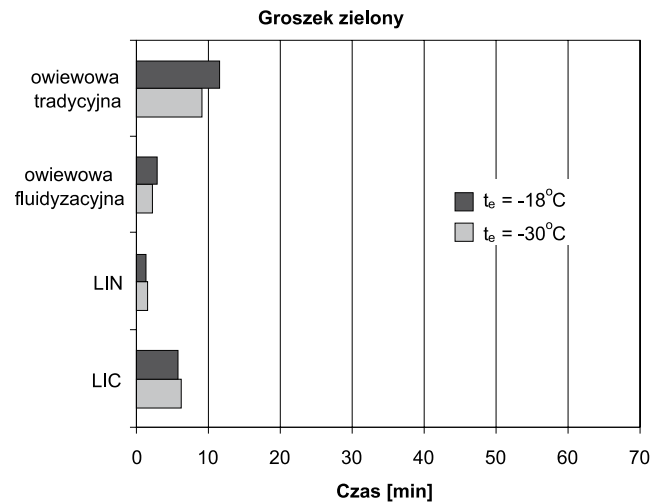
Źródło: Badania własne

ditlenku węgla (LIC), bez względu na rodzaj zamrażanych warzyw. Na znacznie krótszy czas zamrażania warzyw metodą w ciekłym azocie miały wpływ dwa czynniki, wartość średniej temperatury medium chłodzącego (ponad dwukrotnie wyższa w metodzie LIN) oraz wartość współczynnika wnikania ciepła (prawie dwukrotnie większa) (tab. 2). Analogiczne (ok. 4-krotne) skrócenie czasu zamrażania odnotowano w przypadku analizy czasu zamrażania owoców zamrażanych metodami LIN i LIC [5].

Obniżenie średniej temperatury końcowej ( $t_e$ ) warzyw z  $-18$  do  $-30^\circ\text{C}$ , w przypadku metod zamrażania owiewowe tradycyjnego i fluidyzacyjnego, spowodowało skrócenie czasu zamrażania dla każdego warzywa. Średnio długość czasu zamrażania warzyw zmniejszyła się o ok. 21% w metodzie owiewowej tradycyjnej i o ok. 23% w metodzie owiewowej fluidyzacyjnej. Decydującym czynnikiem, który wpłynął na skrócenie czasu zamrażania była wyższa o  $10^\circ\text{C}$  wartość czynnej różnicy temperatury przy zamrażaniu warzyw do  $-30^\circ\text{C}$  (tab. 2). Natomiast w przypadku metod kriogenicznych, obniżenie średniej temperatury końcowej warzyw z  $-18$

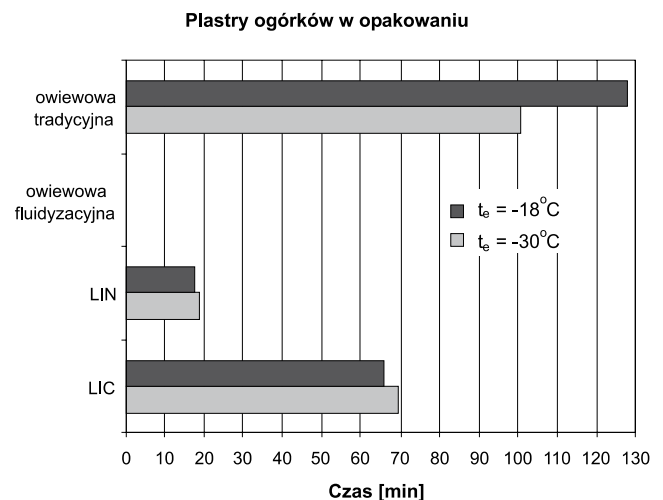
do  $-30^\circ\text{C}$  spowodowało nieznaczne wydłużenie czasu zamrażania dla każdego warzywa. Średnio długość czasu zamrażania zwiększyła się o ok. 6%. Tłumaczy to fakt, iż obniżenie temperatury końcowej wiązało się z obniżeniem wartości entalpii materiału dla temperatury końcowej, a to spowodowało, że różnica entalpii w temperaturze początkowej i końcowej zamrażanych warzyw nieco się zwiększyła, co z kolei nieznacznie wydłużyło czas zamrażania przy zachowaniu takiej samej wartości czynnej różnicy temperatury.

Analiza czasu zamrażania poszczególnych warzyw w zależności od zastosowanej metody zamrażania wykazała podobną tendencję jego zmiany. Na rysunkach 5 i 6 przykładowo zilustrowano zmianę czasu zamrażania groszku zielonego i plasterków ogórków w opakowaniu w zależności od zastosowanej metody zamrażania. Generalnie, dla każdego warzywa najdłuższy obliczony czas zamrażania otrzymano dla metody owiewowej tradycyjnej, znacznie krótszy dla metody LIC i metody owiewowej fluidyzacyjnej, a najkrótszy czas zamrażania stwierdzono dla metody LIN (tab. 3).



**Rys. 5. Czas zamrażania groszku zielonego wybranymi metodami.**  
**Fig. 5. Freezing time of green peas by selected methods.**

Źródło: Badania własne



**Rys. 6. Czas zamrażania plasterków ogórków w opakowaniu wybranymi metodami.**  
**Fig. 6. Freezing time of slices cucumbers in packing by selected methods.**

Źródło: Badania własne



Bez względu na zastosowaną metodę zamrażania, najkrótszym czasem zamrażania charakteryzował się groszek zielony (tab.3, rys. 5). W metodzie zamrażania owiewowego tradycyjnego wyniósł on 11,4 minuty ( $t_e = -18^\circ\text{C}$ ) i 9,0 minut ( $t_e = -30^\circ\text{C}$ ) i był ponad 4 razy dłuższy niż w metodzie owiewowej fluidyzacyjnej, od 6 do 8 razy dłuższy niż w metodzie LIN i od 1,5 do 2 razy dłuższy niż w metodzie LIC. Z kolei, najdłuższym czasem zamrażania charakteryzowały się plastry ogórków w opakowaniu (tab. 3, rys. 6). W metodzie zamrażania owiewowego tradycyjnego wyniósł on 127,8 minut ( $t_e = -18^\circ\text{C}$ ) i 100,7 minut ( $t_e = -30^\circ\text{C}$ ) i był od 5 do 7 razy dłuższy niż w metodzie LIN i od 1,4 do 1,9 razy dłuższy niż w metodzie LIC. Największy wpływ na wartość czasu zamrażania miały kształt i wymiar charakterystyczny zamrażanego surowca, a nieco mniejszy obecność opakowania. Groszek zielony posiadał kształt kuli o średnicy 9 mm, a plastry ogórków w opakowaniu posiadały kształt prostopadłościanu o wysokości 45 mm (tab. 2). Ponadto, obecność opakowania stanowiła nieznaczny, lecz dodatkowy opór ciepła wpływający na wydłużenie czasu zamrażania. Tym samym, czas zamrażania plastrów ogórków w opakowaniu przy zastosowaniu każdej z metod był od 11 do 12 razy dłuższy od czasu zamrażania groszku zielonego.

Groszek zielony, brukselka i pomidory posiadały kształt kuli o średnicy wynoszącej odpowiednio 9, 18 i 50 mm (tab. 1). Obliczony czas zamrażania pomidorów był ponad 7 razy dłuższy od czasu zamrażania zielonego groszku i ponad 3 razy dłuższy od czasu zamrażania brukselki w metodach zamrażania owiewowego tradycyjnego, LIN i LIC i odpowiednio 16 i 4 razy dłuższy w metodzie owiewowej fluidyzacyjnej (tab. 3). Tym samym, decydujący wpływ na czas zamrażania miał wymiar charakterystyczny warzywa (średnica), a cechy fizyczne warzyw praktycznie nie miały istotnego wpływu.

Wartości czasu zamrażania kostek buraka i marchwi (tab. 3) były zbliżone do siebie w każdej z metod zamrażania i były od 22 do 29% krótsze od czasu zamrażania słupek ziemniaka (warzywa posiadały ten sam wymiar charakterystyczny  $l_e = 10$  mm, lecz słupek ziemniaka miał 6 razy większą długość).

Z kolei, w przypadku warzyw o kształcie walca, czas zamrażania szparagów był od 1,9 do 2,1 razy dłuższy od czasu zamrażania fasolki szparagowej, bez względu na rodzaj zastosowanej metody zamrażania, przy czym średnica szparagów była 1,7 razy większa od średnicy fasolki szparagowej. Natomiast czas zamrażania plastrów ogórków i szpinaku puree zapakowanych w woreczki z PE był praktycznie taki sam, bez względu na zastosowaną metodę zamrażania (tab. 3). Tym samym, rodzaj warzywa oraz jego cechy fizyczne nie miały tak istotnego wpływu na długość czasu zamrażania, jaki miał wymiar charakterystyczny zamrażanych warzyw.

Wybierając optymalną metodę zamrażania warzyw należy, oprócz czasu zamrażania, uwzględnić również inne czynniki natury technologicznej, technicznej, ekonomicznej i organizacyjnej.

## WNIOSKI

1. Najkrótszym czasem zamrażania charakteryzowała się metoda LIN, zaś najdłuższym metoda owiewowa tradycyjna, bez względu na rodzaj zamrażanych warzyw.

2. Wprowadzenie warzyw zamrażanych luzem w stan fluidalny poprawiło warunki wymiany ciepła, zwiększając wartość współczynnika wnikania ciepła, a tym samym spowodowało ponad 3-krotne skrócenie czasu zamrażania w odniesieniu do metody owiewowej tradycyjnej.
3. Czas zamrażania warzyw w ciekłym azocie był ok. 4 razy krótszy od czasu zamrażania w ciekłym ditlenku węgla, bez względu na rodzaj zamrażanych warzyw.
4. Niezależnie od zastosowanej metody zamrażania najkrótszy czas zamrażania otrzymano dla groszku zielonego, a najdłuższy dla plastrów ogórków zapakowanych w woreczki z PE.
5. Wymiar charakterystyczny warzyw okazał się decydującym czynnikiem wpływającym na długość czasu zamrażania.
6. Obniżenie temperatury końcowej poszczególnych warzyw z  $-18$  do  $-30^\circ\text{C}$ , spowodowało, w przypadku metod kriogenicznych, nieznaczne wydłużenie czasu zamrażania o ok. 6%. Natomiast w przypadku metod owiewowych tradycyjnej i fluidyzacyjnej stwierdzono skrócenie czasu zamrażania o ok. 22%.
7. Przedstawiona analiza czasu zamrażania wybranych warzyw pozwoli bardziej racjonalnie podejmować decyzje przy wyborze najkorzystniejszej metody zamrażania.

## LITERATURA

- [1] GRUDA Z., POSTOLSKI J. 1999. Zamrażanie żywności. Wyd. 3. WNT, Warszawa.
- [2] GRUDA Z., POSTOLSKI J. 1985. Zamrażanie żywności. Wyd. 2. WNT, Warszawa.
- [3] KLUZA F., GÓRAL D. 1993. *Statystyczna charakterystyka oddziaływania podstawowych parametrów zamrażania produktów spożywczych na efektywny czas trwania procesu*. Chłodnictwo, 28(1), 27-28.
- [4] KUNACHOWICZ H., NADOLNA I., PRZYGODA B., IWANOW K. 2005. Tabele składu i wartości odżywczej żywności. PZWL, Warszawa.
- [5] PAŁACHA Z., KRYSZTIAN J. 2014. *Analiza czasu zamrażania wybranych owoców przy zmiennych parametrach procesu zamrażania*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 24/25(2), 62-67.
- [6] PAŁACHA Z. 2014. Zamrażanie żywności. W: Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego. Wyd. 4. (red. P.P. Lewicki), WNT, Warszawa, 320-345.
- [7] PAŁACHA Z. 2010. Właściwości cieplne. W: Właściwości fizyczne żywności (red. Z. Pałacha, I. Sitkiewicz), WNT Warszawa, 81-112.
- [8] PAŁACHA Z., JANISZEWSKA E. 2012. Zamrażanie żywności. W: Wybrane zagadnienia obliczeniowe inżynierii żywności (red. D. Wiatrowa-Rajchert, P.P. Lewicki), Wyd. SGGW, Warszawa, 252-281.
- [9] PAŁACHA Z., RACZYŃSKI W. 2005. *Opracowanie metody oznaczania gęstości wybranych owoców w stanie zamrożonym*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 16/27(2), 55-59.
- [10] POSTOLSKI J. 2007. *Prawie wszystko o... technologii chłodniczej żywności* (cz. 24). Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 1, 11-16.
- [11] PRACA ZBIOROWA 2008. Surowce spożywcze pochodzenia roślinnego (red. K. Świetlikowska), Wyd. SGGW, Warszawa.