

MODELOWANIE PRZYROSTU TEMPERATURY BULWY ZIEMNIAKA W TRAKCIE JEJ MIKROFALOWEGO OGRZEWANIA

Tomasz Jakubowski

Institut Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Praca prezentuje badania dotyczące efektu cieplnego mikrofalowego ogrzewania bulwy ziemniaka. Badania prowadzono w latach 2008-2009 z wykorzystaniem urządzenia generującego promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 2,45 GHz. W doświadczeniu wykorzystano bulwy bardzo wczesnej odmiany ziemniaka Velox będące w stadium pełnej dojrzałości technicznej. Oszacowany model w 81% wyjaśnia zmienność przyrostu temperatury bulwy ziemniak w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania.

Słowa kluczowe: mikrofałe, ziemniak, temperatura, model

Wykaz oznaczeń i symboli

T_p – temperatura początkowa bulwy ziemniaka [K],

T_k – temperatura końcowa bulwy ziemniaka [K],

ΔT – różnica między T_k a T_p ,

t – czas napromieniania mikrofalami [s],

M – moc generatora mikrofal [W],

m – masa napromienianej bulwy ziemniaka [g],

D_C – dawka całkowita promieniowania mikrofalowego [J] - iloczyn M i t ,

D_J – jednostkowa dawka promieniowania mikrofalowego [$J \cdot g^{-1}$] - iloraz D_C i m .

Wstęp

Temperatura jest miarą stanu cieplnego danego ciała i w termodynamice jedną z podstawowych wielkości fizycznych. Z termodynamicznego punktu widzenia temperatura jest wielkością reprezentującą wspólną własność dwóch układów pozostających w równowadze ze sobą, przy czym związana jest ze średnią energią kinetyczną ruchu i drgań wszystkich cząsteczek tworzących dany układ i jest miarą tej energii. Działanie mikrofalami o częstotliwości 2,45 GHz na uwodniony materiał biologiczny powoduje drganie dipoli cząsteczek wody. W trakcie ekspozycji organizmu na tego typu promieniowanie, część energii docierającej do obiektu zostaje pochłonięta i zamieniona na ciepło. Ilość pochłania-

nej energii oraz jej rozkład przestrzenny w obiekcie biologicznym zależne są od częstotliwości promieniowania oraz parametrów elektrycznych napromienianych tkanek: głównie przewodności elektrycznej i stałej dielektrycznej. Oba te parametry wykazują właściwości dyspersyjne i uzależnione są od stopnia uwodnienia tkanek. Zgodnie z równaniem Arrheniusa temperatura wpływa na tempo przemian chemicznych. Bulwa ziemniaka jest materiałem biologicznym wysoko uwodnionym, a więc efektem działania na nią mikrofalami będzie wzrost jej temperatury. Założyć należy, że przyrost temperatury w napromienianej roślinie będzie modyfikował procesy biochemiczne bulwy ziemniaka. Mając na uwadze powyższe wskazany jest poznanie zależności pomiędzy dawką promieniowania mikrofalowego a zmianą temperatury w ogrzewanej bulwie ziemniaka. W niniejszym opracowaniu zależność tę opisano matematycznie przy użyciu modelu regresji liniowej. Metoda ta (regresja) pozwala na estymację warunkowej wartości oczekiwanej a samo modelowanie matematyczne to użycie języka matematyki do opisanego zachowania jakiegoś układu [Szóstka 2006; Cempel 1993 Carmer i in.1989]. W pracach autorstwa Marksa i in. [2005] oraz Jakubowskiego [2008] opisany został wpływ promieniowania mikrofalowego na rośliny ziemniaka *Solanum tuberosum* L. Prezentowany eksperyment stanowi kontynuację badań dotyczących efektu cieplnego mikrofalowego ogrzewania bulwy ziemniaka [Jakubowski 2009]. Celem pracy było określenie, poprzez konstrukcję modelu regresyjnego, związku statystycznego pomiędzy jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego a przyrostem temperatury bulwy ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania. Jako hipotezę badawczą przyjęto założenie, że wraz ze wzrostem wartości jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego wzrastać będzie temperatura ogrzewanej bulwy ziemniaka.

Zakres pracy i materiał

Badania prowadzono w latach 2008-2009 z wykorzystaniem urządzenia generującego promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 2,45 GHz. Urządzenie posiadało regulację mocy w zakresie 100-1000 W i wyposażone było w precyzyjny wyłącznik czasowy. W doświadczeniu wykorzystano bulwy bardzo wczesnej odmiany ziemniaka Velox będące w stadium pełnej dojrzałości technicznej. W doborze odmiany kierowano się wynikami badań autora [Jakubowski 2008a] wg których bulwy ziemniaka odmiany Velox, w porównaniu z odmianami Felka Bona i Rosara, uzyskała najwyższe współczynniki korelacji pomiędzy wartościami jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego a przyrostem temperatury. Zaznaczyć należy, że w przywołanych powyżej badaniach, przeprowadzona analiza wariancji nie wykazała statystycznie istotnego zróżnicowania między bulwami odmian ziemniaków Velox, Felka Bona i Rosara. Bulwy do badań pobrano kierując się jednorodnością ich masy (tab. 1). Materiał do badań przechowywano przez okres dwóch miesięcy w chłodni wg zaleceń Sęka i in. [2004]. Eksperyment podzielono na dwa etapy. Etap I (doświadczalny) obejmował zebranie i przygotowanie danych do oszacowania modelu oraz etap II w którym dokonano predykcji oszacowanego modelu.

Modelowanie przyrostu temperatury...

Tabela 1. Charakterystyka bulw ziemniaka użytych w doświadczeniu
Table 1. Characteristics of potato tubers used in the experiment

Etap doświadczenia	Liczba bulw	Masa bulwy			Odchylenie standardowe	Zmienność
		Średnia	Minimalna	Maksymalna		
Szacowanie modelu	400 sztuk	43,3 g	27,1 g	69,8 g	8,9 g	20,4%
Predykcja modelu	100 sztuk	44,8 g	29,2 g	61,4 g	7,7 g	17,0%

Źródło: obliczenia własne autora

Zakresem pracy objęto:

- 520 bulw ziemniaka, w etapie I 400 bulw podzielonych na 40 prób po 10 sztuk każda a w etapie II 120 bulw podzielonych na 40 prób po 3 sztuk każda,
- 4 czasy napromieniowania mikrofalami: 10, 20, 30 i 60 s,
- oraz 10 wartości mocy urządzenia generującego mikrofałę: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 i 1000 W.

Metoda badań

Przed rozpoczęciem doświadczenia bulwy ziemniaka wyjęto z chłodni i ustabilizowano termicznie przez okres 48 godzin w pomieszczeniu gdzie średnia temperatura wynosiła około 19°C. W losowo wybranych 10 bulwach zmierzono temperaturę początkową (T_p). Bezpośrednio przed umieszczeniem w komorze generatora mikrofal określono masę bulwy przy użyciu wagi laboratoryjnej o dokładności pomiaru 0,1 g. Pojedynczą bulwę ziemniaka umieszczano na obrotowym talerzu we wnętrzu szczelnej komory urządzenia generującego mikrofałę. Natychmiast po napromieniowaniu bulwy dokonywano pomiaru jej temperatury (T_k) przy użyciu termometru kontaktowego o dokładności pomiaru 0,1°C wyposażonego w sondę igłową. W celu wykonania pomiaru temperatury wnętrza bulwy dokonywano prostopadłego do podłoża nakłucia perydermy na głębokości 10 mm. Nakłucia dokonywano w trzech miejscach bulwy ziemniaka: w części pępkowej w pobliżu przyczepu stolonu, w części wierzchołkowej w pobliżu oczka wierzchołkowego i w części środkowej.

Aby dokonać specyfikacji modelu jako punkt wyjścia przyjęto założoną hipotezę badawczą dodatkowo zakładając, że wzrost wartości jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego powodował będzie proporcjonalny wzrost temperatury ogrzewanej bulwy ziemniaka a charakter tego wzrostu będzie miał przebieg liniowy. Estymację i weryfikację modelu przeprowadzono w oparciu o analizę regresji. Do ustalenia i oceny powiązań badanej zmiennej dT ze zmienną D_f oraz jako metodę estymacji parametrów modelu wybrano analizę regresji prostej. Parametry linii regresji szacowano metodą najmniejszych kwadratów. Metoda ta poprzez sumę kwadratów reszt opisuje rozbieżność między wartościami empirycznymi zmiennej zależnej a jej wartościami teoretycznymi obliczonymi z modelu. Parametrem mającym bezpośredni wpływ na kształtowanie się przyrostu temperatury w bulwie ziemniaka jest jednostkowa dawka promieniowania mikrofalowego D_f . Parametr ten jest kompilacją: mocy urządzenia generującego mikrofałę M (W), czasu ekspozycji materiału t (s) oraz masą ogrzewanego materiału m (g). Możliwym jest, że zastosowanie do estymacji parametrów budowanego modelu metody regresji wielorakiej i uwzględnienie w obliczeniach parametrów składowych D_f stanowiłoby o lepszym zastosowaniu równania

do predykcji zmiennej niezależnej. Jednakże zaistniała przyczyna dla której do konstrukcji modelu nie wybrano bezpośrednio parametrów t , M i D_C . Estymatory otrzymane metodą najmniejszych kwadratów będą tylko wtedy efektywne i nieobciążone gdy spełnione zostaną odpowiednie założenia dotyczące: liniowości modelu, liczby obserwacji, wartości oczekiwanej i wariancji składnika losowego, normalność rozkładu reszt oraz korelacji składników losowych. Ostatni postulat dotyczący korelacji składników losowych zakłada niezależność reszt. W przypadku zmiennych t , M i D_C (iloczyn t i M) można stwierdzić, że parametry te są ze sobą silnie skorelowane [Stanisz 2007; Lehmann 1983; Silvey 1978].

Wyniki badań

Wyniki badań dotyczące związku statystycznego pomiędzy jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego a przyrostem temperatury bulwy ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania zestawiono w tabelach. Tabele 2 i 3 zawierają wynik analizy regresji prostej i estymacji parametrów dla oszacowanego modelu. W tabeli 4 przedstawiono oszacowany model wraz z obliczonymi błędami a w tabeli 5 wynik analizy wariancji. Rysunek 1 prezentuje wykres rozrzutu wartości obserwowanych względem przewidywanych.

Tabela 2. Wynik analizy regresji prostej dla oszacowanego modelu
Table 2. Result of line regression analysis for the assessed model

Liczba przypadków	400
R wielorakie	0,899
Wielorakie R^2	0,808
Skorygowane R^2	0,807
Wartość statystyki F (df=1,398)	1670,630
Poziom prawdopodobieństwa	0,000
Błąd standardowy estymacji	4,009
D_J BETA	0,899

Źródło: obliczenia własne autora

Tabela 3. Wynik estymacji parametrów oszacowanego modelu
Table 3. Result of parameter estimation for the assessed model

	BETA	Błąd standardowy BETA	Wyraz wolny	Błąd standardowy	t(398)	poziom p
Wyraz wolny			2,183	0,33	6,607	0,00
D_J	0,899	0,022	0,025	0,001	40,873	0,00

Źródło: obliczenia własne autora

Oszacowany model weryfikowano poprzez współczynnik zmiennej zależnej względem zmiennej niezależnej (BETA) oraz elastyczność modelu. Postulat o koincydencji pominięto gdyż w modelu z jedną zmienną jest on zawsze spełniony. Wartość współczynnika BETA, w przypadku analizy regresji przy udziale jednej zmiennej niezależnej, jest równa współczynnikowi korelacji między zmiennymi. W przypadku opracowanego modelu współczyn-

Modelowanie przyrostu temperatury...

nik ten informuje jak zmieni się wartość dT przy zmianie D_J ; zmiana jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego o jedno odchylenie standardowe powoduje przyrost temperatury ogrzewanej bulwy ziemniaka o 0,899 jej odchylenia standardowego. Wartość elastyczności zmiennej zależnej względem zmiennej niezależnej informuje o ile procent zmieni się wartość pierwszej zmiennej względem tej drugiej. W analizowanym modelu wzrost wartości D_J o 1% powoduje przyrost dT o około 0,001%. W przeprowadzonym doświadczeniu, na istotność regresji, poza wartościami statystyki F i testu t, wskazała istotność współczynnik BETA oraz parametrów modelu.

Tabela 4. Postać oszacowanego modelu wraz z obliczonymi błędami

Table 4. Form of the assessed model including computed errors

$dT = 2,18 + 0,025 D_J$		
(0,33) Błąd standardowy dla wyrazu wolnego	(0,001) Błąd standardowy dla D_J	(+/- 4,01) Błąd standardowy estymacji

Źródło: obliczenia własne autora

Tabela 5. Wynik analizy wariancji dla oszacowanego modelu

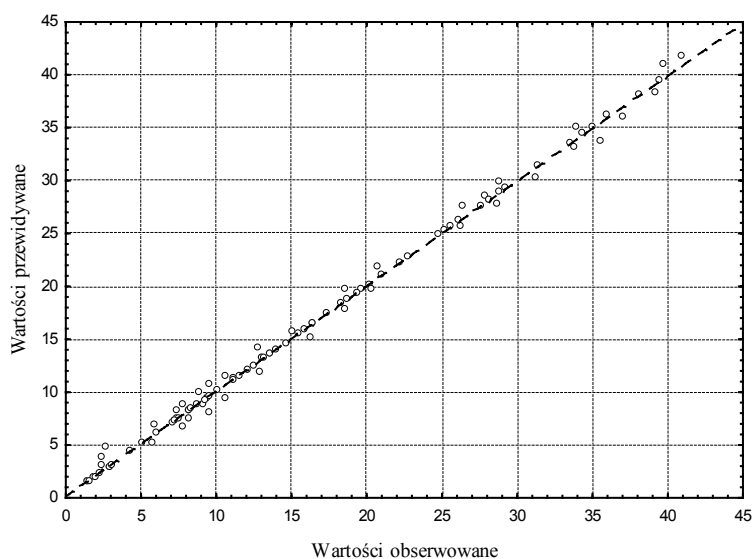
Table 5. Variance analysis result for the assessed model

Efekt	Sumy kwadratów	Stopnie swobody	Średnie sumy kwadratów	Wartość testu F	Poziom p
Suma kwadratów wytłumaczona przez regresję	26851,34	1	26851,34	1670,630	0,00
Suma kwadratów reszt niewytłumaczona regresją	6396,89	398	16,07		
Całkowita suma kwadratów	33248,23				

Źródło: obliczenia własne autora

Jak wynika z tabeli 5 suma kwadratów wytłumaczona przez regresję jest istotna. Iloraz sumy kwadratów wytłumaczonych przez regresję i całkowitej sumy kwadratów pozwala na stwierdzenie, że oszacowany model w 80,8% wyjaśnia zmienność przyrostu temperatury bulwy ziemniak w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania. Predykcję modelu przeprowadzono *ex post* - przy znanych wartościach D_J oraz pomierzonych wartościach dT na 100 bulwach ziemniaka odmiany Velox (rys. 1). Konstrukcja modelu uwzględniającego wszystkie czynniki mogące mieć wpływ na badane zjawisko jest praktycznie niemożliwa. Możliwe, nieuwzględnione, w modelu czynniki omówiono już w pracy autora [Jakubowski 2009] (energię spożytkowaną na parowanie bulwy ziemniaka, na zmianę objętości bulwy z uwzględnieniem zmian zachodzących w jej strukturach wewnętrznych czy na procesy chemiczne zachodzące w komórkach i strukturach komórkowych). Zaznaczyć jednak należy, że przeważająca część energii dostarczanej bulwie ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania przeznaczana jest na zmianę jej temperatury.

Temperatura jest wielkością reprezentującą wspólną własność dwóch układów pozostających w równowadze ze sobą oraz jest miarą stanu cieplnego danego ciała. Z termodynamicznego punktu widzenia temperatura jest miarą reprezentującą energię kinetyczną ruchu i energię drgań molekuł tworzących układ. Wyniki badań wskazują, że pomiędzy jednostkową dawką promieniowania a przyrostem temperatury bulwy ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania zachodzi wysoka korelacja liniowa (wartości współczynnika korelacji 0,9). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzić można, że w przypadku prowadzenia prac doświadczalnych dotyczących napromieniowania mikrofalami materiału roślinnego oszacowany model może być przydatny w celu określenia stanu cieplnego bulwy ziemniaka. Zaznaczyć należy, że jest to metoda prosta i nieinwazyjna pozwalająca na ocenę wpływu promieniowania mikrofalowego na przebieg procesów ontogenezy roślin ziemniaka.



Źródło: obliczenia własne autora

Rys. 1. Wykres rozrzutu wartości obserwowanych względem przewidywanych
Fig. 1. Scatter diagram showing observed values relative to the predicted ones

Wnioski

1. Oszacowany model może być przydatny w celu określenia stanu cieplnego bulwy w doświadczeniach związanych z napromieniowaniem mikrofalami roślin ziemniaka.
2. Wartości współczynnika korelacji między jednostkową dawką promieniowania a przyrostem temperatury bulwy ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania wynosi 0,9.

Bibliografia

- Carmer S., Nyquist W., Walker W.** 1989. Least significant differences for combined analyses of experiments with two - or three - factor treatment designs. *Agronomy J.* nr 81. s. 665-672.
- Cempel C.** 1993. Theory of energy transformation systems and their application in diagnostics of operating systems, *Applied Mathematics and Computer Science.* No 3. pp. 533-548.
- Jakubowski T.** 2008. Badania dotyczące wpływu metod fizycznych na przebieg niektórych procesów ontogenezy roślin ziemniaka. <http://ziemniak.wa.ur.krakow.pl:80/>
- Jakubowski T.** 2009. Efekt cieplny mikrofalowego ogrzewania bulwy ziemniaka. *Acta Agrophysica* nr 171, vol. 14(2). s. 345-354.
- Lehmann E.L.** 1983. Theory of point estimation, Wiley, New York. s. 294-408.
- Marks N., Lipiec J., Jakubowski T.** 2005. Ocena przydatności metod fizycznych do zwalczania przechowalniczych chorób bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza* 7(67). Kraków. s. 169-175.
- Sęk T., Przybył J.** 2004. Zbiór, obróbka i przechowalność roślin okopowych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, s. 90-103.
- Silvey S.D.** 1978. Wnioskowanie statystyczne, PWN, Warszawa, s. 66.
- Stanisz A.** 2007. Modele liniowe i nieliniowe. StatSoft. s. 21-35.
- Zóstką J.** 2006. Mikrofała. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. s. 131-144.

MODELLING OF POTATO TUBER TEMPERATURE RISE DURING ITS MICROWAVE HEATING

Abstract. The work presents the research on thermal effect of potato tuber microwave heating. The research was conducted in years 2008-2009 using a device generating microwave radiation at the frequency of 2.45 GHz. In the experiment, the researchers used tubers of a very early potato variety - Velox - being at the stage of full technical maturity. The analysed model explains in 81% variability of potato tuber temperature rise during its microwave heating.

Key words: microwaves, potato, temperature, model

Adres do korespondencji:

Tomasz Jakubowski: e-mail: tjakubowski@ar.krakow.pl
Instytut Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków