

Mgr inż. Anna MIESZKALSKA
Dr hab. inż. Dariusz PIOTROWSKI
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji – Wydział Nauk o Żywności
SGGW w Warszawie

WYKORZYSTANIE MODELI BARWY DO OCENY SUSZONYCH SUROWCÓW ROŚLINNYCH®

The use of colour models to assess dried plant materials®

Słowa kluczowe: barwa, modelowanie, barwa surowców roślinnych, jakość żywności.

Kolor jest istotną cechą postrzeganą przez konsumenta decydującą o ogólnej percepcji produktu. Jakość suszonych surowców roślinnych może być oceniona na podstawie zmian parametrów barwy. W artykule opisano instrumentalny pomiar barwy oraz przedstawiono przykłady metod wykorzystywanych do opisu kinetyki parametrów barwy suszonych surowców roślinnych, między innymi równania reakcji oraz sztuczne sieci neuronowe. Ze względu na różne systemy pomiarowe a także badanie wielu różnych parametrów dotyczących barwy, istnieją trudności w porównaniu wyników badań. W związku z tym zachodzi konieczność ujednoczenia systemu pomiarowego w celu porównywania otrzymanych wyników. Tworzenie modeli opisujących zmiany barwy podczas procesu suszenia jest drogą do optymalizacji procesu.

Wykaz oznaczeń:

L^* – jasność w systemie CIE $L^*a^*b^*$,
 a^* – parametr barwy od czerwonej do zielonej w systemie CIE $L^*a^*b^*$,
 b^* – parametr barwy od żółtej do niebieskiej w systemie CIE $L^*a^*b^*$,
 C^* – nasycenie, h^* – ton barwy,
 ΔE^* – bezwzględna różnica barwy,
 BI – brunatnienie,
 L – jasność w systemie Hunter Lab ,
 a – parametr barwy od czerwonej do zielonej w systemie Hunter Lab ,
 b – parametr barwy od żółtej do niebieskiej w systemie Hunter Lab .

WROWADZENIE

Kolor jest pierwszą cechą postrzeganą przez konsumenta, decydującą o ogólnej percepcji całego wyrobu [9]. Zmiany parametrów barwy mogą stanowić wskaźnik innych zmian np. żywieniowych czy teksturalnych, które zaszły w produkcji podczas jego przetwarzania [8]. Na przykład pomiar zmian jasności barwy wskazuje na zmiany w budowie wewnętrznej ekstrudatu [19].

Właściwości optyczne surowców roślinnych mogą zmieścić się znacznie na skutek suszenia. Wynika to ze zmian fizycznych i chemicznych, jakie zachodzą podczas tego procesu. Rozpatrywane zmiany są spowodowane koncentracją pigmentu na skutek utraty wody, degradacją bawników,

Key words: colour, modelling, plant materials colour, food quality.

Colour is an important quality attribute for consumer and it influences his preferences. Colour changes indicate quality changes of dried plant materials. In this review instrumental colour measurement was described. Different approaches applied to model colour of dried plant materials were also presented, like reaction mechanisms, neural networks and others. Colour measurements are often based on different measurement systems and many colour parameters, making it difficult to compare results. There is a need for standardization in measuring system to improve the traceability of measurements. Colour change models can help to optimize drying process.

procesem brązowienia, wymianą gazów [13]. Na skutek suszenia zmianie ulegają wszystkie parametry barwy, a intensywność zachodzących zmian jest zależna m.in. od temperatury suszenia, czasu suszenia i rodzaju surowca [32]. Uzyskanie suszu o pożądanym przez konsumentów kolorze wymaga stosowania takich parametrów suszenia i sposobu przygotowania surowca, które pozwolą zminimalizować wiele niekorzystnych reakcji (np. rozpad chlorofilu, karotenoidów, nieenzymatyczne brązowienie, utlenianie kwasu L-askorbinowego) przyczyniających się do pogarszania barwy.

Niekorzystne zmiany wartości odżywczej są trudne do określenia – wymagają zastosowania kosztownych i długotrwałych metod ilościowej analizy chemicznej. Szybszą metodą oceny jest pomiar cech fizycznych metodami instrumentalnymi, wśród których barwa odgrywa istotną rolę.

Celem artykułu jest zaprezentowanie modeli stosowanych do opisu barwy i przedstawienie przykładów ich wykorzystania w opisie suszonych surowców roślinnych.

PRZESTRZENIE BARW

Kolor może być opisywany przez szereg przestrzeni barw [12, 20, 28, 31]. Niektóre z najpopularniejszych przestrzeni barw to Hunter Lab , CIE $L^*a^*b^*$ (określanych również jako CIE LAB), CIE XYZ, CIE $L^*u^*v^*$, CIE Yxy i CIE LCH . System CIE XYZ był pierwszym systemem zdefiniowanym matematycznie przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE (fr. *Comission Internationale de l'Eclairage*) w 1931 roku. Barwa w tym systemie jest opisana przez współrzędne

X, Y, Z [31,42,46]. Przestrzeń barw Hunter $L a b$ została stworzona w 1948 roku, a jej modyfikację CIE $L^*a^*b^*$ znormalizowano w 1976 przez CIE.

W systemie CIE $L^*a^*b^*$ jest możliwe określenie jasności obrazu za pomocą parametru L^* (od 0 – czarny do 100 – biały), chromatyczności za pomocą parametrów: a^* (od -60 (zielony) do +60 (czerwony) oraz b^* od -60 (niebieski) do +60 (żółty) [10, 51]. Parametr a^* ma dodatnie wartości dla odcieni barwy czerwonej i ujemne dla odcieni barwy niebieskiej. Parametr b^* ma dodatnie wartości dla odcieni barwy żółtej i ujemne dla odcieni barwy niebieskiej. Parametr L^* określa jasność w skali szarości od barwy czarnej do białej [23].

Nasycenie (C^*) przyjmuje wartości od 0 (w środku układu współrzędnych) i wzrasta w miarę oddalania się od środka. Im wyższa wartość nasycenia, tym większa intensywność barwy. Nasycenie oblicza się z poniższego wzoru [7, 34]:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

Parametr barwy określany jako ton barwy (h^*) reprezentuje stopnie od 0° (czerwony), przez 90° (żółty), 180° (zielony), 270° (niebieski), do 360° (czerwony). Ton barwy (h^*) obliczamy z poniższego wzoru [7, 34]:

$$h^* = \text{artg}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

Stosowanie systemu CIE $L^*a^*b^*$ umożliwia także wyliczanie bezwzględnej różnicy barwy (ΔE) [2, 4, 24, 30, 35, 37, 49, 50]. Bezwzględną różnicę barwy (ΔE^*) wylicza się z poniższego wzoru [7, 34]:

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

gdzie: $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$ – wskaźniki różnicy barw powierzchni badanych próbek przed obróbką i po obróbce.

Bezwzględna różnica barw może być bardzo znaczna ($\Delta E > 3$), znaczna ($1.5 < \Delta E < 3$) lub mała ($1.5 < \Delta E$) [1].

Przestrzeń barw Hunter $L a b$ jest podobna do przestrzeni CIE $L^*a^*b^*$, jednak wyniki pomiarów w tych systemach nie pokrywają się. W systemie Hunter Lab jest możliwość określenia tych samych parametrów, a symbole tych parametrów to odpowiednio L, a, b .

Bazując na współrzędnych systemu CIE $L^*a^*b^*$ lub współrzędnych systemu CIE XYZ , można wyznaczyć brunatnienie (BI) [36, 37, 40, 45]:

$$BI = 100 \times \frac{X - 0,31}{0,17} \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } X = \frac{(a^* + 1,75L^*)a^*}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)} \quad (5)$$

INSTRUMENTALNY POMIAR BARWY

Przyrządy służące do pomiarów współczynników przepuszczania (transmisji) T lub odbicia (reemisji) R należą do dwóch zasadniczych grup [10]. Do pierwszej należą trójbódcowe filtrowe kolorymetry i fotokolorymetry. Drugą

stanowią dokładniejsze spektrokolorymetry. W instrumentalnych pomiarach wykorzystuje się różnego rodzaju systemy barwy najczęściej w postaci punktu o trzech współrzędnych. Na podstawie rozkładu widma promieniowania, które zostało odbite od próbki, program obsługujący urządzenie wylicza współrzędne barwy określone w systemie barwy np. XYZ przy wcześniej ustalonym standardowym kątowym polu widzenia (10° i 2°) i iluminacji ($D65, C, A$). Na podstawie tych trzech składowych istnieje możliwość wyliczenia innych systemów barwy, np. CIE L^*C^*h [31].

W 1931 roku utworzono układ kolorymetryczny dla pola widzenia 2° przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE (fr. *Comission Internationale de l'Eclairage*). W 1964 roku utworzono drugi układ kolorymetryczny, dla pola widzenia 10° przez CIE, który jest bardziej zbliżony do widzenia przez ludzkie oko niż układ ustalony dla pola widzenia 2° . Programy komputerowe do analizy obrazu umożliwiają porównanie danych uzyskanych w czasie pomiaru barwy dla pola widzenia 2° z danymi uzyskanymi dla pola widzenia 10° przez ich przekonwertowanie [10].

PRZYKŁADY METOD OPISUJĄCYCH KINETYKĘ PARAMETRÓW BARWY SUSZONYCH SUROWCÓW ROSLINNYCH

Modelowanie kinetyczne może być wykorzystane do przewidzenia zmian koloru owoców i warzyw w czasie suszenia. Zmiany, jakie wpływają na barwę suszonych surowców, to destrukcja pigmentu, oksydacja, brązowienie enzymatyczne, brązowienie nieenzymatyczne i polimeryzacja fenoli [5, 16].

Aby opisać zmianę barwy żywności jako funkcję czasu zaproponowano wiele równań [3, 4, 11, 14, 15, 36]. Do opisu jakości produktu proponuje się równanie matematyczne:

$$\frac{dc}{dt} = -kc^n \quad (6)$$

gdzie: k – współczynnik reakcji,
 c – koncentracja czynnika określającego jakość w czasie t ,
 n – stopień reakcji.

Dla wielu produktów żywnościowych zależność danych charakteryzujących ich jakość w zależności do upływającego czasu, jest opisana równaniem reakcji zerowego lub pierwszego rzędu [4, 37, 38, 39, 55, 56].

$$C = C_0 \pm k_0 t \quad (7)$$

$$C = C_0 \exp(\pm k_1 t) \quad (8)$$

gdzie: C_0 – początkowa wartość barwy,
 C – wartość barwy po pewnym czasie,
 t – czas suszenia (min),
 k_0 – stała w równaniu zerowego rzędu (min^{-1}),
 k_1 – stała w równaniu pierwszego rzędu (min^{-1}).

Sposób suszenia i rodzaj suszonego materiału ma wpływ na kinetykę barwy podczas procesu suszenia. W tabeli 1 zestawiono badania, jakie wykonuje się, aby zbadać kinetykę parametrów barwy. Jak wynika z przedstawionych danych,

Tabela 1. Modele kinetyki barwy wybranych surowców roślinnych

Table 1. Colour kinetics models of selected plant materials

Parametry barwy Colour parameters	Materiał Plant material	Sposób suszenia Drying method	Parametry procesu Operating conditions	Model / rząd równania reakcji Model / order kinetics reaction	Autorzy References
a^* , b^* , ΔE^* , ΔC^*	marchew	suszenie fluidyzacyjne	60, 70, 80, 90°C	pierwszego rzędu	Zielińska i Markowski 2012 [54]
L , b , C , BI ΔE , a , h	bambus	mikrofalowe	140, 210, 280 i 350 W	pierwszego rzędu zerowego rzędu	Bal i in. 2011 [6]
L , a , b	liściokwiat garbnikowy	konwekcyjne	60°C	zerowego rzędu	Gupta i in., 2011 [25]
ΔE $L \cdot b$	chlebowiec różnolistny	konwekcyjne	50, 60, 70°C 2,0 m/s	zerowego rzędu pierwszego rzędu	Saxena i in. 2010 [48]
L , ΔE , h a , b , C , BI	bazylia	mikrofalowe	180, 360, 540, 720, 900 W	zerowego rzędu pierwszego rzędu	Demirhan i Ozbek 2009 [17]
L , b , C ΔE , a , BI	kiwi	konwekcyjne	40 -80°C 1,0 m/s	pierwszego rzędu zerowego rzędu	Mohammadi i in. 2008 [39]
L , b , BI ΔE , a , h	szpinak	mikrofalowe	180, 360, 540, 720, 900 W	pierwszego rzędu zerowego rzędu	Dadali i in. 2007 [14]
L , b , BI , C ΔE , a , h	piżmian jadalny	mikrofalowe	180 – 900 W	zerowego rzędu pierwszego rzędu	Dadali i in. 2007 [15]
ΔE L , a , b , C , h	truskawki	próżniowe	50 - 60°C 5 kPa	zerowego rzędu pierwszego rzędu	Piotrowski i Chodyn-Semczuk 2006 [43]
L^* , a^* , b^*	papryka wysycana kwasem cytrynowym	sublimacyjne	10-60°C	pierwszego rzędu	Polak i Rudy 2005 [44]
a , b	jabłka, banany, ziemniaki, marchew	konwekcyjne próżniowe mikrofalowe i konwekcyjne sublimacyjne osmotyczne	–	piewszego rzędu	Krokida i in. 2001 [32]
ΔE , L , b a	kiwi	konwekcyjne mikrofalowe	60°C, 1,29 m/s 210 W	piewszego rzędu zerowego rzędu	Maskan 2001 [37]

Źródło: Opracowanie własne na podstawie cytowanych autorów

Source: Own elaboration on the basis of the quoted authors

zmianę parametrów barwy opisuje się równaniem reakcji pierwszego lub zerowego rzędu.

Maskan [37] opisał kinetykę zmiany barwy owoców kiwi podczas suszenia konwekcyjnego, mikrofalowego i konwekcyjno-mikrofalowego. Wykazał, iż podczas suszenia wartości parametru L i b malały, natomiast wartości a i ΔE rosły. Badania wykazały, iż suszenie mikrofalowe miało większy wpływ na zmianę koloru suszonego kiwi niż suszenie konwekcyjne. Parametr a w czasie suszenia zmienił się od wartości ujemnych reprezentujących barwę zieloną do wartości dodatnich reprezentujących barwę czerwoną, natomiast parametr b pozostał w obszarze wartości dodatnich. Kinetykę zmiany parametrów L i b dla suszenia konwekcyjnego opisano za pomocą równania zerowego i pierwszego rzędu, natomiast kinetykę zmiany wartości a i ΔE dla suszenia konwekcyjnego oraz kinetykę zmiany barwy dla suszenia mikrofalowego opisano równaniem reakcji pierwszego rzędu.

Dadali i in. [15] badali wpływ suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego na kinetykę zmiany barwy szpinaku. Badania

były prowadzone w przestrzeni barw Hunter *Lab*. Autorzy wykazali, iż wartości L , a , b , ΔE , C , h , BI zależą od zastosowanej mocy mikrofal. Wartości ΔE , C , BI i a wzrastały w miarę zwiększania mocy promieniowania mikrofalowego i czasu suszenia. Wartości L , b i h malały w miarę zwiększania mocy mikrofal i czasu suszenia. Parametr b pozostał w obszarze wartości dodatnich, natomiast parametr a pozostał w obszarze wartości ujemnych. Parametr BI wzrastał w miarę zwiększania mocy mikrofal. Demirhan i Ozbek [17] badali wpływ mocy mikrofal dla bazylii na kinetykę dla następujących parametrów: L , a , b , ΔE , C , BI . Wartości L , b , h i C malały w czasie, natomiast takie wartości, jak: BI , a , ΔE , wzrastały w miarę wydłużania czasu suszenia, jak również zwiększania mocy promieniowania mikrofalowego. Bal i in. [6] zbudowali matematyczny model kinetyki barwy plasterków bambusa suszonego z wykorzystaniem mikrofal. Podczas procesu suszenia wartości L i b malały, natomiast wartości a i ΔE rosły. Parametry a i b pozostały w obszarze wartości dodatnich. Dadali i in. [14] ustalili, że podczas suszenia

piżmianu jadalnego wartości L , b , C i h malały w miarę wydłużania czasu suszenia i mocy mikrofal, natomiast parametr barwy a , ΔE i BI rosły w miarę wydłużania czasu suszenia i mocy mikrofal. Suszenie odbywało się dla następujących mocy mikrofal: 180, 360, 540, 720 i 900 W. Zmiana wartości parametrów L i b w czasie odpowiada równaniu zerowego rzędu, podczas gdy zmiana wartości ΔE odpowiada równaniu reakcji pierwszego rzędu. Zmiana wartości C i BI w czasie odpowiada równaniu pierwszego rzędu, natomiast kinetyka wartości h równaniu zerowego rzędu.

Dla plastrów kiwi suszonych konwekcyjnie wartości L , b , C i h zmalały, natomiast parametry a , ΔE i BI wzrastały w miarę jak rosła temperatura suszenia. Parametr a w czasie suszenia zmienił się od wartości ujemnych reprezentujących barwę zieloną do wartości dodatnich reprezentujących barwę czerwoną, natomiast parametr b pozostał w obszarze wartości dodatnich [39]. Gupta i in. [25] badali wpływ metody blanszowania na zachowanie parametrów barwy po suszeniu liściokwiatu garbnikowego. Suszeniu konwekcyjnemu w temperaturze 60°C przy prędkości powietrza 1,2 m/s poddano próbę kontrolną, próbę blanszowaną w wodzie, próbę blanszowaną w 3% roztworze soli, próbę blanszowaną w 0,3% roztworze pirosiarczanu potasu. Blanszowanie próbek prowadzono przez 3 min w temperaturze 80°C. Proces suszenia spowodował spadek wartości parametrów barwy L i b oraz wzrost wartości parametru barwy a . Badania pokazały, iż najmniejsze zmiany parametrów barwy zachodzą dla próby poddanej blanszowaniu w 0,3% roztworze pirosiarczanu potasu. Saxena i in. [48] badali kinetykę degradacji koloru dla plastrów owocu chlebowca różnolistnego (łac. *Artocarpus heterophyllus*) podczas suszenia strumieniem gorącego powietrza w temperaturze 50, 60 i 70°C. Plastry owoców suszono z prędkością powietrza 2 m/s. Czas suszenia wynosił 10 h do uzyskania wilgotności 6-10%. Pomiar barwy odbywał się co 60 min za pomocą kolorymetru. Wartości L i b zmalały, natomiast wartości a wzrosły podczas suszenia. Autorzy zastosowali wskaźnik barwy $L \cdot b$ w celu opisu efektu suszenia na degradację koloru. Wskaźnik barwy $L \cdot b$ został opisany równaniem reakcji pierwszego rzędu. Dla temperatury 50, 60 i 70°C spadek wskaźnika $L \cdot b$ wyniósł odpowiednio 51,5%, 67,1% i 77,8% po 10 godzinach suszenia. Zastosowany wskaźnik pokazał, iż większe zmiany barwy owoców następowały przy suszeniu w wyższej temperaturze.

Zielińska i Markowski [54] suszyli marchew w suszarce fluidyzacyjnej w temperaturze 60, 70, 80 i 90°C. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla marchwi zmiana koloru uzależniona była od temperatury suszenia. Zmianę wartości a^* , b^* , ΔE^* i ΔC^* opisano za pomocą równania pierwszego rzędu. Polak i Rudy [44] zbadali wpływ warunków sublimacyjnego suszenia i wysycania papyriki kwasem cytrynowym na przebieg zmian współrzędnych chromatycznych barwy (L^* , a^* , b^*). Autorzy stwierdzili, iż głównym czynnikiem determinującym zmiany jasności, tonu barwy i nasycenia barwy jest temperatura płyt liofilizatora. Najmniejszą całkowitą zmianą barwy charakteryzował się susz uzyskany w najniższej temperaturze (10°C), natomiast największą susz uzyskany w temperaturze 60°C. Badane wartości (L^* , a^* , b^*) autorzy opisali równaniem pierwszego rzędu.

Krokida i in. [32] wykazali, że metoda suszenia ma istotny wpływ na parametry barwy. Autorzy suszyli jabłka, banany, ziemniaki oraz marchew pięcioma różnymi metodami. Konwekcyjne suszenie było prowadzone w temperaturze 70°C, suszenie próżniowe w temperaturze 70°C przy ciśnieniu 33 mbar (3,3 kPa). Zastosowano również suszenie mikrofalowo – konwekcyjne, polegające na wstępnej obróbce mikrofalowej przez 1 min przy mocy 810 W, a następnie suszenie konwekcyjne w temperaturze 70°C. Materiał do suszenia sublimacyjnego był mrożony w temperaturze -35°C przez 48 h, hartowany przez godzinę w ciekłym azocie, a następnie suszony sublimacyjnie. Kolejną metodą było zastosowanie odwadniania osmotycznego przed suszeniem konwekcyjnym. Próbkę odwadniano w 50% roztworze sacharozy w temperaturze 40°C, a następnie suszono w temperaturze 70°C. Wyniki badań wykazały, iż parametry barwy są najbardziej stabilne przy suszeniu konwekcyjnym z zastosowaniem wcześniejszego odwadniania osmotycznego i sublimacyjnego.

Badano również wpływ temperatury na parametry barwy (L , a , b) truskawek odmiany Senga Senga suszonych próżniowo. Badania przeprowadzono dla temperatury 50, 60 i 70°C przy ciśnieniu 5 kPa. Barwę badano w systemie Hunter Lab. Autorzy stwierdzili, iż im dłuższy czas suszenia i temperatura suszenia, tym większej zmianie uległy parametry barwy badanych truskawek. Wartości parametrów a i b malały w miarę zwiększania temperatury i czasu suszenia, pozostały jednak w obszarze wartości dodatnich, malały również wartości h i C , a rosły wartości parametru ΔE . Zmiany wartości L , a , b , h i C przebiegały zgodnie z równaniem reakcji pierwszego rzędu, natomiast zmiany wartości ΔE przebiegały zgodnie z równaniem reakcji zerowego rzędu [43].

Inną metodą do określania zmian barwy są sztuczne sieci neuronowe (SNN), które są ogólną nazwą struktur matematycznych realizujących obliczenia poprzez rzędy elementów zwane neuronami. SNN są systemem imitującym zachowanie mózgu [22, 26].

Zenoozian i in. [52] wykorzystali sieci neuronowe, aby przewidzieć bezwzględną różnicę barwy (ΔE) osmotycznie odwodnionej i suszonej strumieniem gorącego powietrza dyni. Model ten był dokładniejszy od stosowanych wcześniej modeli empirycznych. Zeonozian w kolejnej pracy [53] wykorzystał sieci neuronowe i impulsowe sieci neuronowe do zamodelowania zmiany zawartości wilgoci, deformacji produktu i bezwzględnej różnicy barwy (ΔE) osmotycznie odwadnianej dyni podczas procesu suszenia gorącym powietrzem.

Sarimeseli i in. [47] badali wpływ mocy mikrofal oraz masy próbki tymianku na parametry barwy, przebieg procesu suszenia i charakterystykę rehydratacji. Badania przeprowadzono dla mocy mikrofal w zakresie 180-900 W oraz masy próbki poddanej suszeniu od 25 do 100 g. Dane otrzymane z eksperymentu zostały wykorzystane w modelu opartym na systemie sieci neuronowych. Model przewiduje wartości L , a , b i C dla próbek po procesie suszenia. Di Scala i in. [18] badali efekt suszenia strumieniem gorącego powietrza m.in. na kolor suszonych jabłek. Autorzy wykorzystali algorytmy genetyczne w celu przewidzenia wartości a , b , L i ΔE . Model posłużył także do doboru najkorzystniejszych warunków suszenia.

Metoda powierzchni odpowiedzi (ang. *Responce Surface Methodology, RSM*) jest wykorzystywana do opisu zmiany barwy surowców roślinnych pod wpływem procesu suszenia. Metoda powierzchni odpowiedzi została zaproponowana przez Boxa i Wilsona [41]. Jest to jedna z częściej stosowanych metod metamodelowania, wykorzystywanych do rozwiązania problemów wielokryterialnych. Metoda powierzchni odpowiedzi pozwala znaleźć związek między jedną lub kilkoma wartościami wejściowymi i wyjściowymi. Pozwala ona na uzyskanie statystycznie akceptowalnych wyników przy ograniczonej liczbie eksperymentów [29].

Kumar i in. [33] wykorzystali metodę powierzchni odpowiedzi do zbadania wpływu parametrów suszenia (mocy mikrofal, temperatury i szybkości przepływu powietrza) na jakość suszonego piżmianu jadalnego, a także w celu zoptymalizowania warunków suszenia w odniesieniu do jakości suszu i zużycia energii podczas procesu. Jednym z badanych wyróżników jakości była barwa. Autorzy mierzyli wartości L , a , b i ΔE .

Metoda powierzchni odpowiedzi (ang. *RSM*) została wykorzystana w celu dobrania optymalnych parametrów suszenia (temperatury, współczynnika cyrkulacji i grubości próbki) w odniesieniu do cech jakościowych buraka, między innymi minimalnej bezwzględnej różnicy barwy (ΔE). Barwa próbki była mierzona w skali Hunter *Lab*. W celu dopasowania danych został wykorzystany wielomian kwadratowy. Na bezwzględną różnicę barwy (ΔE) miały wpływ temperatura i grubość próbki, co może być spowodowane degradacją czerwonego pigmentu pod wpływem temperatury [21].

Wpływ mocy mikrofal (2400 – 4000 W) i czas suszenia (10 – 13 min) na jakość suszonej kurkumy badano w odniesieniu do wyróżników jakości, między innymi barwy w skali Hunter *Lab*. Kurkumę suszono w suszarce wykorzystującej próżnię i mikrofałę przy różnej mocy mikrofal (2400, 3200 i 4000 W) i przy różnych czasach suszenia (10, 20, 30 min). W celu zoptymalizowania warunków suszenia zastosowano metodę powierzchni odpowiedzi. Wyniki analizy pokazały, iż najlepsza jakość dla badanych parametrów została osiągnięta przy wysokiej mocy mikrofal (3500 – 4000 W) i długim czasie suszenia (27 – 30 min) [27].

PODSUMOWANIE

Modele zmiany barwy podczas procesu suszenia pozwalają tak dobrać parametry procesu suszenia, aby zachować barwę jak najbardziej zbliżoną do wzorca jakim jest zwykle surowiec przed suszeniem.

Obecnie najczęściej do opisu zmiany barwy są wykorzystywane równania reakcji pierwszego lub drugiego rzędu. Niektórzy autorzy wykorzystują także sieci neuronowe oraz metodę powierzchni odpowiedzi. Kinetyczne modele matematyczne są tworzone dla każdego eksperymentu oddzielnie, natomiast metoda powierzchni odpowiedzi pozwala na ograniczenie liczby eksperymentów. Sieci neuronowe pozwalają zamodelować jednocześnie zakres eksperymentów. Przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych istnieje możliwość dobrania optymalnych warunków suszenia dla kilku czynników jednocześnie.

Sztuczne sieci neuronowe pozwalają zamodelować proces suszenia surowców roślinnych z większą dokładnością niż modele kinetyczne.

Przegląd literatury dotyczącej badania kinetyki zmiany barwy ujawnia trudności w porównywaniu wyników badań ze względu na różne systemy pomiarowe i badanie różnych współczynników. W prezentowanych pracach badano parametry L^* , a^* i b^* w systemie CIE $L^*a^*b^*$ oraz parametry L , a i b w systemie Hunter *Lab*. Badane były także parametry C i h . Obliczono wartości ΔE , ΔC i BI . Przegląd literatury wskazuje na konieczność ujednoczenia systemu pomiarowego w celu porównywania wyników badań.

Przebieg krzywej przedstawiającej kinetykę zmiany parametrów barwy podczas procesu suszenia zależy od rodzaju surowca poddawanego suszeniu, sposobu suszenia oraz temperatury suszenia.

Tworzenie modeli opisujących zmiany barwy podczas procesu suszenia jest drogą do optymalizacji procesu.

LITERATURA

- [1] ADEKUNTE A., TIWARI B., CULLEN P., SCANNELLA., O'DONNELL C. 2010. *Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice*. Food Chemistry, 122 (3), 500-507.
- [2] AHMED J., SHIVHARE U.S., RAGHAVAN G.S.V. 2001. *Color degradation kinetics and rheological characteristics of onion puree*. Transactions of ASAE, 44 (1), 95-98.
- [3] AHMED J., KAUR, A., SHIVHARE, U. 2002. *Colour degradation kinetics of spinach, mustard leaves and mixed puree*. Journal of Food Science, 67 (3), 1088-1091.
- [4] AVILA I.M.L.B., SILVA C.L.M. 1999. *Modelling kinetics of thermal degradation of colour of peach puree*. Journal of Food Engineering, 39 (2), 161-166.
- [5] BAHLOUL N., BOUDHRIOUA N., KOUHILA M., KECHAOU N. 2009. *Effect of convective solar drying on colour, total phenols and radical scavenging activity of olive leaves (Olea europaea L.)*. International Journal of Food Science & Technology, 44 (12), 2561-2567.
- [6] BAL L.M., KAR A., SATYA S., NAIK S. N. 2011. *Kinetics of colour change of bamboo shoot slices during microwave drying*. International Journal of Food Science & Technology, 46 (4), 827-833.
- [7] BARREIRO J., MILANO M., SANDOVALA. 1997. *Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment*. Journal of Food Engineering, 33 (3-4), 359-371.
- [8] BILLER E., EKIELSKI A. 2005. *Modelowanie cech teksturalnych pieczywa pszennego z wykorzystaniem wskaźnika dynamiki zmian barwy powierzchni w czasie obróbki termicznej*. Inżynieria Rolnicza 10 (70), 23-32.
- [9] BILLER E., WIERZBICKA A., PÓLTORAK A. 2005. *Wpływ obróbki termicznej na zmiany parametrów barwy na przykładzie marchwi*. Inżynieria Rolnicza, 9 (69), 7-12.
- [10] BRIMELOW C. J. B., JOSHI P. 2001. *Colour measurement of food by colour reflectance*. In: Instrumentation and Sensors for the Food Industry (2nd edition)

- Ed. Kress-Rogers E.; Brimelow C.J.B., Woodhead Publishing, 85-116.
- [11] **CHEN C.R., RAMASWAMY H.S. 2002.** *Colour and texture change kinetics in ripening bananas.* Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 35 (5), 415-419.
- [12] **CLYDESDALE F. M. 1978.** *Colorimetry—methodology and applications.* Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 10 (3), 243-301.
- [13] **CONTRERAS C., MARTÍN-ESPARZA M.E., CHIRALT A., MARTÍNEZ-NAVARRETE N. 2007.** *Quality Aspects of Dehydrated and Rehydrated Fruit in Relation to Drying Method,* In: Focus on Food Engineering Research and Developments, Pletney. Ed. Vivian N., Nova Science Publishers, 339.
- [14] **DADALI G., APAR D.K., OZBEK B. 2007.** *Color change kinetics of okra undergoing microwave.* Drying Technology, 25 (5), 925-936.
- [15] **DADALI G., DEMIRHAN E., OZBEK B. 2007.** *Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying.* Drying Technology, 25 (10), 1713-1723.
- [16] **DANDAMRONGRAK, R., MASON R., YOUNG G. 2003.** *The effect of pretreatments on the drying rate and quality of dried bananas.* International Journal of Food Science and Technology, 38 (8), 877-882.
- [17] **DEMIRHAN E., ÖZBEK, B. 2009.** *Color change kinetics of microwave-dried basil.* Drying Technology, 27 (1), 156-166.
- [18] **DI SCALA K., MESCHINO G., VEGA-GÁLVEZ A., LEMUS-MONDACA R., ROURA S., MASCHERONI R. 2013.** *An artificial neural network model for prediction of quality characteristics of apples during convective dehydration.* Food Science and Technology, 33 (3), 411-416.
- [19] **EKIELSKI A. 2013.** Wykorzystanie analizy obrazu do oceny wybranych parametrów opisujących struktury porowate na przykładzie ekstrudatów zbożowych, Warszawa, Wydawnictwo Wieś Jutra, 1-72.
- [20] **FRANCIS F. 1980.** *Colour quality evaluation of horticultural crops.* HortScience, 15 (1), 14-15.
- [21] **GOKHALE S.V., LELE S.S. 2012.** *Optimization of Convective Dehydration of Beta vulgaris for Color Retention.* Food and Bioprocess Technology 5 (3), 868-878.
- [22] **GOLDEN R.M. 1996.** *Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design,* MIT Press, Cambridge, 1-411.
- [23] **GRANATO D., MASSON M. L. 2010.** *Instrumental color and sensory acceptance of soy-based emulsions: a response surface approach.* Ciência e Tecnologia de Alimentos, 30 (4), 1090-1096.
- [24] **GUNAWAN M.I., BARRINGER S.A. 2000.** *Green colour degradation of blanched broccoli (Brassica oleracea) due to acid and microbial growth.* Journal of Food Processing and Preservation, 24 (3), 253-263.
- [25] **GUPTA R.K.; KUMAR P., SHARMA A. PATIL R.T. 2011.** *Color kinetics of aonla shreds with amalgamated blanching during drying.* International Journal of Food Properties, 14 (6), 1232-1240.
- [26] **HAYKIN S. 1998.** *Neural Networks, A Comprehensive Foundation,* Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, 2nd edition. New York. 1-842.
- [27] **HIRUN S., UTAMA-ANG N. ROACH PAUL D. 2012.** *Turmeric (Curcuma longa L.) drying: an optimization approach using microwave-vacuum drying.* Journal of Food Science and Technology, May, 1-7. <http://link.springer.com.springer.han.bg.sggw.pl/search?query=Turmeric+%28Curcuma+longa+L.%29+drying%3A+an+optimization+approach+using+microwave-vacuum+drying> , dostęp w dniu 25.06.2014.
- [28] **HUNTER R. S., HAROLD R.W. 1987.** *The measurement of appearance.* Hoboken, New York: Wiley-Interscience, 3-280.
- [29] **KAUR S., SARKAR B.C., SHARMA H.K., SINGH C. 2009.** *Optimization of enzymatic hydrolysis pretreatment conditions for enhanced juice recovery from guava fruit using response surface methodology.* Food and Bioprocess Technology, 2 (1), 96-100.
- [30] **KIDMOSE U., HANSEN M. 1999.** *The influence of postharvest storage, temperature and duration on quality of cooked broccoli florets.* Journal of Food Quality, 22 (2), 135-146.
- [31] **KONICA-MINOLTA. 2009.** Spektrofotometr CM-5 instrukcja obsługi. Firmowa instrukcja użytkownika, Konica Minolta, Sensing, INC, 1-150.
- [32] **KROKIDA M.K., MAROULIS Z.B., SARAVACOS G.D. 2001.** *The effects of the method of drying on the colour of dehydrated products.* International Journal of Food Science and Technology, 36 (1), 53-59.
- [33] **KUMAR D., PRASAD S., MURTHY G.S. 2014.** *Optimization of microwave-assisted hot air drying conditions of okra using response surface methodology.* Journal of Food Science and Technology, 51 (2), 221-232.
- [34] **LOPEZ A., PIQUE M., BOATELLA J., ROMERO A., FERRAN A., GARCIA J. 1997.** *Influence drying conditions on the hazelnut quality. III. Browning.* Drying Technology, 15 (3-4), 989-1002
- [35] **LOZANO J.E., IBARZ A. 1997.** *Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures.* Journal of Food Engineering, 31 (3), 365-373.
- [36] **LU S., LUO Y., TURNER E., FENG H. 2007.** *Efficacy of sodium chlorite as an inhibitor of enzymatic browning in apple slices.* Food Chemistry, 104 (2), 824-829.
- [37] **MASKAN M. 2001.** *Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying.* Journal of Food Engineering, 48 (2), 169-175.
- [38] **MASKAN A., KAYA S., MASKAN M. 2002.** *Effect of concentration and drying processes on colour change of grape juice and leather (pestil).* Journal of Food Engineering, 54 (1), 75-80.
- [39] **MOHAMMADI A., RAFIEE S., EMAM-DJOMEH Z., KEYHANI A. 2008.** *Kinetic models for colour changes in kiwifruit slices during hot air drying.* World Journal of Agricultural Sciences, 4 (3), 376-383.

- [40] **MOHAPATRA D., BIRA Z.M., KERRY J.P., FRÍAS J. M., RODRIGUES F. A. 2010.** *Postharvest hardness and color evolution of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*)*. Journal of Food Science, 75 (3), 146-152.
- [41] **MYERS R.H., MONTGOMERY D.C. 2009.** *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 3rd edition* New York, Wiley 1-704.
- [42] **PAPADAKIS S.E., ABDUL-MALEK S., KAMDEM R.E., YAM K.L. 2000.** *A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods*. Food Technology, 54 (12), 48-51.
- [43] **PIOTROWSKI D., CHODYN-SEMCZUK K. 2006.** *Influence of temperature on colour of vacuum dried strawberries*. In: Drying 2006 – Proceedings of the 15th International Drying Symposium (IDS 2006). Budapest, Hungary 20-23 August 2006. Ed. Farkas I. Szent István University Publisher, Gödöllő, vol. C, 1628-1635.
- [44] **POLAK R., RUDY S. 2005.** *Model matematyczny zmiany barwy papryki podczas procesu sublimacyjnego suszenia*. Inżynieria Rolnicza, 4 (64), 145-153.
- [45] **PRISTIJONO P., WILLS R., GOLDING J. 2006.** *Inhibition of browning on the surface of apple slices by short term exposure to nitric oxide (NO) gas*. Postharvest Biology and Technology, 42 (3), 256-259.
- [46] **SAHIN S., SUMNU S.G. 2007.** *Physical properties of foods*. New York, Springer, 1-248
- [47] **SARIMESELI A., COSKUN M., AL. YUCEER M. 2014.** *Modeling microwave drying kinetics of thyme (*Thymus Vulgaris L.*) leaves using ANN methodology and dried product quality*. Journal of Food Processing and Preservation, 38 (1), 558-564.
- [48] **SAXENA A., MAITY T., RAJU P.S., BAWA A.S. 2010.** *Degradation kinetics of colour and total carotenoids in jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) bulb slices during hot air drying*. Food and Bioprocess Technology, 5 (2), 672-679.
- [49] **SHIN S., BHOWMIK S.R. 1995.** *Thermal kinetics of color changes in pea puree*. Journal of Food Engineering, 24 (1), 77- 86.
- [50] **TIJSKENS L.M.M., SCHIJVENS E.P.H.M., BIEKMAN E.S.A. 2001.** *Modelling the change in colour of broccoli and green beans during blanching*. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2 (4), 303-313.
- [51] **ZAUSZNICA A. 1959.** *Nauka o barwie*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [52] **ZENOOZIAN M.S., DEVAHASTIN S., RAZAVI M.A., SHAHIDI F., POREZA H.R. 2008.** *Use of artificial neural network and image analysis to predict physical properties of osmotically dehydrated pumpkin*. Drying Technology, 26 (1), 132-144.
- [53] **ZENOOZIAN M.S. 2009.** *Application of wavelet transform coupled with artificial neural network for predicting physicochemical properties of osmotically dehydrated pumpkin*. Journal of Food Engineering, 90 (2), 219-227.
- [54] **ZIELINSKA M., MARKOWSKI M. 2012.** *Color Characteristics of Carrots: Effect of Drying and Rehydration*. International Journal of Food Properties, 15 (2), 450-466.
- [55] **VILLOTA R., HAWKES J.G. 2007.** *Reaction kinetics in food systems* In: Handbook of Food Engineering. Ed. D.R. Heldman & D.B. Lund, 2nd edition Boca Raton: CRC Press, 125-286.