

การออกแบบการทดลองในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำนมข้าว

Experimental Design in Spray Drying of Rice-milk Powder

สืบสกุล จินดาพล* อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล* และกมลทิพย์ สัจจอนันตกุล**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำนมข้าว โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง การออกแบบการทดลองที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมคือ วิธีพื้นผิวผลตอบ (response surface methodology, RSM) เลือกใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง (central composite design) ตัวแปรต้นมี 3 ตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราไหลของอากาศร้อนและอัตราป้อนสาร ผลตอบที่ทำการศึกษาและเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (<3 %) วอเตอร์แอคติวิตี (water activity 0.2 – 0.3) ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI 3.2 – 5.935) ดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index, WSI 4.3 – 6.545 %) พารามิเตอร์สีของผลิตภัณฑ์หลังคั้นรูป ($L^*=45.40$ $dE^*=54.55$ $h^*=115.067$) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิอากาศร้อน 192.5 °C อัตราไหลของอากาศร้อน 35 m³/h และอัตราป้อนสาร 740 ml/h ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าวพบว่า มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 6%

Abstract

The objective of this research is to study on the optimum condition of rice-milk powder produced by a spray dryer. The design of experiment for optimization was response surface methodology (RSM). Central composite design was applied with three independent variables namely, drying air temperature, volumetric flow rate of drying air and rice-milk feed rate. Responses and acceptable criterion were moisture content (<3 %), water activity (0.2-0.3), water absorption index (3.2 - 5.935), water

solubility index (4.3 - 6.545 %) and color parameters of rehydrated form ($L^*=45.40$ $dE^*=54.55$ $h^*=115.067$). Statistic analysis indicating that the optimum process condition was drying air temperature of 192.55 °C, volumetric air flow rate of 35.05 m³/h and feed rate of 740.68 ml/h. Verification results at this condition gave an error less than 6% for all response parameters.

Keywords : Rice; RSM; Spray drying; Optimization; Colour; experimental design; Rice-mil

1. บทนำ

น้ำนมข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากข้าว โดยใช้ข้าวอ่อนซึ่งเมล็ดข้าวอยู่ในระยะที่เป็นน้ำนม (milky) เป็นวัตถุดิบหลัก (กิตติศักดิ์, 2545) มีคุณค่าทางอาหารสูง และได้รับความนิยมจากผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะกลุ่มผู้ที่นิยมบริโภคอาหารจากธรรมชาติ การแปรรูปน้ำนมข้าวให้อยู่ในสภาพเป็นผง เป็น วิธีการหนึ่งที่จะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาและลดต้นทุนค่าขนส่งได้ ซึ่งจะทำให้สามารถกระจายผลิตภัณฑ์ไปสู่ผู้บริโภคที่อยู่ในภูมิภาคที่ห่างไกล อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้มีการนำข้าวอ่อนมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น

โดยทั่วไป ในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารผง วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เป็นวิธีการหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะมีคุณภาพดีกว่าการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) และใช้เวลาในการทำแห้ง รวมถึงค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีการทำแห้งแบบระเหิด (freeze drying) พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการทำแห้งอาหารมีหลายปัจจัย เช่น ปริมาณของแข็งในอาหาร ความหนืดของอาหาร

*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ระบบของอาหาร (food system) อุณหภูมิของอาหาร อุณหภูมิของอากาศร้อน อัตราการไหลของอากาศร้อนและ อัตราการป้อนสาร เป็นต้น

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทำแห้งแบบพ่นฝอย ที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า อัตราการไหลของอากาศร้อนและอัตราการป้อนน้ำนมข้าว โดยที่ อุณหภูมิอากาศร้อน เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมอัตราการระเหยของน้ำในอาหาร หากใช้อุณหภูมิสูงก็จะทำให้อัตราการทำให้แห้งสูง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาในการทำให้แห้งลงได้ แต่อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ สารอาหารบางชนิดสูญเสียไปด้วย อีกทั้งยังเพิ่มต้นทุนในการผลิต อัตราการไหลของอากาศร้อนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ ระยะเวลาที่หยุดของเหลวอยู่ในห้องทำแห้ง โดยหากทำแห้งจากการใช้อัตราการไหลของอากาศสูง จะส่งผลให้ ระยะเวลาที่หยุดของเหลวอยู่ในห้องทำแห้งลดลง ซึ่งหาก อุณหภูมิอากาศไม่สูงเพียงพอ ก็อาจจะทำให้ไม่สามารถลด ปริมาณความชื้นในอาหารลงได้ตามข้อกำหนด สำหรับ อัตราการป้อนน้ำนมข้าวจะแปรผันโดยตรงกับขนาดหยุด ของเหลว ซึ่งหากป้อนสารในอัตราที่สูง จะส่งผลให้หยุด ของเหลวมีขนาดใหญ่ และ ใช้เวลาในการทำแห้งนานขึ้น ดังนั้นในการทำแห้งจึงต้องการสภาวะที่เหมาะสม ซึ่ง สามารถให้ทั้งผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ และ ประหยัดต้นทุนการผลิต (Heldman (1992); Masters (1991); Mujumdar (1987))

สมบัติของผลิตภัณฑ์หลังจากทำแห้งมีผลต่อการ ยอมรับของผู้บริโภค สมบัติของผลิตภัณฑ์นมข้าวผงที่ ทำการศึกษา คือ ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี (water activity) ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index) ดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index) ของ ผลิตภัณฑ์ก่อนคั้นรูปและพารามิเตอร์สีของผลิตภัณฑ์หลัง คั้นรูป

ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการทำแห้งได้มีการ นำวิธีการเชิงสถิติมาประยุกต์ใช้ การออกแบบการทดลอง (experimental design) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยในการเก็บ ข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีความ ถูกต้องสมเหตุสมผล โดยใช้หลักการทางสถิติ อันจะทำให้ สภาวะที่เหมาะสมที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น อีกทั้ง ยังสามารถลดจำนวนการทดลองที่ต้องใช้ในการเก็บข้อมูล

ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย (ปารเมศ (2545); Cochran (1957) และ Myers (1995))

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การศึกษาเพื่อหา สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำนมข้าว โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ (response surface methodology, RSM) (Myers, 1995)

2. วิธีพื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบเป็นการรวบรวมเทคนิคทาง คณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ในการสร้าง แบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจ ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร (Myers, 1995)

การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (response surface design) ในการวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบส่วนประสม กลางแบบหมุนได้ (central composite rotatable design) ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก 2^k แฟกตอเรียล (factorial 2^k) โดยเพิ่ม การทดลองในแนวแกน (axial) และที่จุดศูนย์กลาง (center) สำหรับการทดลองที่มีตัวแปรต้น 3 ตัวแปรจะใช้ การทดลองทั้งสิ้น 20 การทดลอง

เมื่อทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบแล้ว จะนำ ข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ เนื่องจากวิธีการ พื้นผิวผลตอบให้ความสำคัญกับความสัมพันธ์ระหว่างตัว แปรอิสระกับผลตอบ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดง ในรูปสมการทั่วไปดังนี้ (Cochran, 1957)

$$y = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_k) + e \quad (1)$$

โดย y คือผลตอบ Φ คือพื้นผิวผลตอบ x_k คือตัว แปรอิสระ และ e คือค่าความผิดพลาด

ฟังก์ชัน (function, Φ) สามารถใช้อธิบายผลสรุป ของการทดลองได้ รวมถึงสามารถพยากรณ์ผลตอบสำหรับ ค่าตัวแปรอิสระที่ไม่ได้ทดลอง (Cochran, 1957)

แต่โดยทั่วไป ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบจะไม่ ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสม สำหรับใช้ เป็นตัวแทนแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริง ซึ่งตามปกติจะใช้ ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ (ปารเมศ, 2545)

แบบจำลองพหุนามกำลังสองที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ แสดงดังสมการ (Myers, 1995)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j < k} \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (2)$$

โดย β_{ij} คือสัมประสิทธิ์การถดถอย i และ j คือลำดับของตัวแปร

การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบหลายตัว จะดำเนินการตามวิธีการของ Derringer และ Suich (Myers, 1995) โดยกำหนดฟังก์ชันความต้องการ (desirability function, d) เป็นค่าที่แสดงความใกล้เคียงของผลตอบกับค่าที่ต้องการ (target) ในกรณีนี้ต้องการค่าผลตอบให้อยู่ภายในช่วง หากผลตอบมีค่าอยู่นอกช่วงจะไม่ยอมรับ ค่าความต้องการ (d) นิยามดังสมการ

$$d = \begin{cases} \left[\frac{\hat{y} - A}{B - A} \right]^s, & A \leq \hat{y} \leq B \\ \left[\frac{\hat{y} - C}{B - C} \right]^t, & B \leq \hat{y} \leq C \end{cases} \quad (3)$$

โดยช่วงเป้าหมาย คือ $A \leq B \leq C$ หากค่าของผลตอบอยู่นอกช่วงนี้จะทำให้ค่า d เป็น 0 สำหรับค่า s และ t จะใช้สำหรับปรับค่า d ในสมการ สำหรับกรณีที่ต้องการผลตอบเป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด จะนิยามเฉพาะช่วง $A \leq \hat{y} \leq B$ และ $B \leq \hat{y} \leq C$ ตามลำดับ

หลังจากได้ค่า d ของแต่ละผลตอบ จะนำมาคำนวณค่าผลตอบประกอบเดี่ยว (single composite response) ซึ่งนิยามตามสมการ

$$D_{scr} = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdots d_m)^{1/m} \quad (4)$$

โดยที่ m แทน จำนวนผลตอบที่ทำการศึกษา สำหรับค่า D_{scr} หากเข้าใกล้ 1 หมายความว่า ผลตอบทุกตัวอยู่ในช่วงที่ต้องการ สถานะที่สามารถให้ค่า D_{scr} สูงสุด จะเรียกว่า “สถานะที่เหมาะสม”

3. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การตรวจสอบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำนมข้าว การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำนมข้าวและการตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์นมข้าวผง

3.1 การตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำนมข้าว

ตรวจสอบความหนาแน่นโดยใช้ขวดวัดความหนาแน่นขนาด 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30°C ตรวจสอบความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Brookfield Model RVDVI+ ที่อุณหภูมิ 30°C ตรวจสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TS) โดยอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 – 70 °C ความดันไม่เกิน 100 ม.ม.ปรอท ตามวิธีของ AOAC (1984) ตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (°Brix) โดยใช้แอนดรีแฟรกโตมิเตอร์ (hand refractometer) Model No.507-I ที่อุณหภูมิ 30°C

ตรวจสอบพารามิเตอร์สีของน้ำนมข้าวโดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab 11491 ในการวัดสีจะระบุสีที่วัดได้ผ่านทางพารามิเตอร์สีดังนี้ (deMan, 1991) L^* ใช้กำหนดความสว่าง โดยที่ $L^* = 0$ แสดงว่าวัตถุสีดำสมบูรณ์ (perfect black) $L^* = 100$ แสดงว่าวัตถุสีขาวสมบูรณ์ (perfect white) a^* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว โดย a^* เป็นบวก แสดงว่าวัตถุมีสีแดง a^* เป็นลบ แสดงว่าวัตถุมีสีเขียว b^* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน โดยที่ b^* เป็นบวก แสดงว่าวัตถุมีสีเหลือง b^* เป็นลบ แสดงว่าวัตถุมีสีน้ำเงิน

ในระบบ CIELAB สามารถระบุสีในรูปของมุมเฉดสี (hue angle, h^*) ตามสมการ

$$h^* = \tan^{-1} \left[\frac{b^*}{a^*} \right] \quad (5)$$

จากสมการจะพบได้ว่า h^* เป็นการแปลงค่าของ a^* และ b^* ให้อยู่ในรูปแบบเชิงมุม ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$h^* = 0$ องศา แสดงว่า วัตถุมีสีแดง

$h^* = 90$ องศา แสดงว่า วัตถุมีสีเหลือง

$h^* = 180$ องศา แสดงว่า วัสดุมีสีเขียว

$h^* = 270$ องศา แสดงว่า วัสดุมีสีน้ำเงิน

นอกจากนั้น ยังสามารถระบุสีของวัตถุในรูปของค่าสีรวม (dE^*) ดังสมการ

$$dE^* = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}} \quad (6)$$

3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำนมข้าวและการตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์นมข้าวผง

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ การออกแบบส่วนประสมกลาง ในการทดลองใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย Buchi B-191 โดยกำหนดความดันและอัตราไหลของอากาศสำหรับสร้างละอองเท่ากับ 6 บาร์และ 600 ลิตรต่อชั่วโมงตามลำดับ การเข้ารหัสตัวแปรต้น (coding of independent variables) และ ผลการออกแบบการทดลองแสดงใน ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์นมข้าวผงที่ได้นำมาตรวจสอบคุณภาพดังนี้

ตารางที่ 1 การเข้ารหัสตัวแปรต้น

ตัวแปรต้น	สัญลักษณ์		ระดับ	
	จริง	เข้ารหัส	จริง	เข้ารหัส
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	X_1	x_1	165	-1
			180	0
			195	1
อัตราการไหลของอากาศร้อน (m ³ /h)	X_2	x_2	26.60	-1
			29.75	0
			32.90	1
อัตราการป้อนสาร (ml/h)	X_3	x_3	270	-1
			450	0
			630	1

ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (%MC) ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 – 70 °C ความดันไม่เกิน 100 ม.ม.ปรอท โดยปริมาณความชื้นคำนวณดังนี้

$$\% MC = 100 - \% TS \quad (7)$$

วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ทำการทดลองโดยใช้เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี Aqua Lab CX-2

ดัชนีการดูดซับน้ำ ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างหนัก 2.5 กรัมใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตรในหลอดเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วจึงทำการเหวี่ยงแยกที่ 3000 ×g เป็นเวลา 10 นาที รินน้ำใสออก นำเจลที่เหลืออยู่ไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าที่ได้ ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) นิยามให้เท่ากับ น้ำหนักของเจลที่เหลือ (Wt_{gel}) ต่อน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ (Wt_{dry}) (Anderson (1969) Cited in Jones (2000)) ดังสมการที่(8)

$$WAI = \frac{Wt_{gel}}{Wt_{dry}} \quad (8)$$

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบการทดลอง

ลำดับการทดลอง*	ลำดับมาตรฐาน**	อุณหภูมิอากาศร้อน (X_1) (°C)	อัตราการไหลอากาศร้อน (X_2) (m ³ /h)	อัตราการป้อนสาร (X_3) (ml/h)
1	12	180	35.05***	450
2	20	180	29.75	450
3	3	165	32.90	270
4	4	195	32.90	270
5	9	155	29.75	450
6	15	180	29.75	450
7	10	205	29.75	450
8	16	180	29.75	450
9	19	180	29.75	450
10	13	180	29.75	147.3
11	5	165	26.60	630
12	2	195	26.60	270
13	17	180	29.75	450
14	6	195	26.60	630
15	8	195	32.90	630
16	11	180	24.45	450
17	1	165	26.60	270
18	7	165	32.90	630
19	18	180	29.75	450
20	14	180	29.75	752.7

หมายเหตุ *ลำดับการทดลองจริงที่ได้จากการสุ่ม

**ลำดับมาตรฐานของการออกแบบการทดลอง

***ทำการทดลองจริงที่ 35.0 m³/h

ดัชนีการละลายน้ำ (*WSI*) คือ เปอร์เซ็นต์ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในสารละลายที่เหลือจากการเหวี่ยงแยกที่ $3000 \times g$ ซึ่งสามารถหาได้โดยทำการอบที่อุณหภูมิ $60 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันไม่เกิน 100 ม.ม.ปรอท

พารามิเตอร์สี ทำการทดลองโดยนำผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มาละลายกลับคืนในน้ำกลั่น กำหนดให้มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดเท่ากับก่อนที่จะทำแห้ง ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดสี โดยในการวัดค่าจะทำซ้ำ 3 ซ้ำ

และสุดท้ายปริมาณไขมันของนมข้าวผง ทำการสกัดโดยใช้เครื่องสกัด Buchi Extraction System B-811 และ Cooling Model CTL911

4. ผลการวิจัย

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของนมข้าว แสดงใน ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีและกายภาพของนมข้าว

สมบัติ	ผลการทดลอง*
ความหนาแน่น (kg/m^3)	996.3
ความหนืด (cP)	17.6
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TS)	5.59
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ($^{\circ}\text{Brix}$)	5.17
ปริมาณไขมันของนมข้าวผง (%น้ำหนักแห้ง)**	0.15
L^*	45.42
a^*	-7.17
b^*	15.33
h^*	115.07

*ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ

**วัดจากนมข้าวผงที่สถานะการทำแห้ง อุณหภูมิอากาศร้อน $193 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการไหลของอากาศร้อน $35 \text{ m}^3/\text{h}$ และอัตราการป้อนนมข้าว 738 ml/h

4.1 การวิเคราะห์หาพื้นผิวผลตอบ

ผลการทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยของผลตอบต่างๆ แสดงใน ตารางที่ 4 แบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป (full quadratic model) แสดงใน สมการ (9) – (15)

ผลตอบสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มดังนี้

4.1.1 ผลตอบปริมาณน้ำและสภาวะ (state) ของน้ำของผลิตภัณฑ์

ผลตอบในกลุ่มนี้ได้แก่ ปริมาณความชื้น และ วอเตอร์แอกติวิตี ซึ่งเกี่ยวข้องกับอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ โดยที่ผลการวิเคราะห์เป็นไปในแนวเดียวกัน คือ ทั้งสามปัจจัย (อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการไหลของอากาศร้อน และอัตราการป้อนสาร) มีอิทธิพลหลักต่อผลตอบทั้งสอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยหากเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศร้อน จะทำให้ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนสาร จะส่งผลให้ผลตอบทั้งสองมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ อัตราการไหลของอากาศร้อนกับอัตราการป้อนสารยังมีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความชื้น ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยหากปรับอัตราการไหลของอากาศร้อนหรืออัตราการป้อนสารจนทำให้ผลคูณของทั้งสองเทอมเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง

4.1.2 ผลตอบด้านความสามารถในการคินรูปของผลิตภัณฑ์

ผลตอบในกลุ่มนี้คือ ดัชนีการดูดซับน้ำและการละลายน้ำ พบว่า พารามิเตอร์ทั้งสองมีผลการวิเคราะห์คล้ายกัน โดยอัตราการป้อนสารเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อผลตอบทั้งสอง และมีอิทธิพลร่วมกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศร้อน สาเหตุอาจเนื่องมาจากการดูดซับและละลายน้ำของอนุภาคผงเป็นกลไกที่เกิดขึ้นร่วมกัน สำหรับการที่อุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการไหลของอากาศร้อนไม่มีอิทธิพลหลัก อาจเนื่องมาจากในการวิจัยนี้ใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยขนาดเล็ก ทำให้หยดของเหลวหรืออนุภาคมีเวลาอยู่ในเครื่องสั้นมาก หากให้ปัจจัยอื่นๆคงที่ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศร้อนจะส่งผลต่อระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง โดยในช่วงดังกล่าวอุณหภูมิ

ของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น เข้าใกล้อุณหภูมิอากาศร้อนที่ทางออก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ในการทำแห้งส่วนใหญ่จะเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล ที่มีความชันลดลง ดังนั้นอิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิอากาศร้อนจึงต้องขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสาร ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคผง

4.1.3 ผลตอบด้านสีของผลิตภัณฑ์

ผลตอบในกลุ่มนี้คือ พารามิเตอร์สี L^* dE^* และ h^* ผลตอบกลุ่มนี้จะได้รับอิทธิพลจากอัตราการป้อนสาร

เป็นหลัก จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสีของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างซับซ้อน สาเหตุน่าจะมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารอาหาร โดยเกิด Maillard browning reaction เนื่องจากในน้ำนมข้าวมีทั้งน้ำตาลและหมู่เอมีน (amine) ซึ่งเป็นสารตั้งต้น อีกสาเหตุหนึ่งอาจเนื่องมาจากการสูญเสียรงควัตถุคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) โดยเมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็น pheophytin ซึ่งมีสีเขียวแกมน้ำตาล (dull olive brown) (Fennema, 1985)

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยของผลตอบต่างๆ (แสดงในรูปของ P-value)

Term	MC^{***}	a_w	WAI	WSI	L^*	dE^*	h^*
constant	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
temp	0.014*(-)	0.016*(-)	0.089**(+)	0.165	0.490	0.503	0.887
flow	0.004*(-)	0.001*(-)	0.694	0.583	0.744	0.782	0.906
feed	0.000*(+)	0.003*(+)	0.287	0.744	0.003*(+)	0.003*(-)	0.011*(-)
temp • temp	0.704	0.249	0.942	0.945	0.569	0.592	0.517
flow • flow	0.692	0.764	0.057**(+)	0.062**(+)	0.249	0.254	0.184
feed • feed	0.057**(+)	0.055**(+)	0.006*(+)	0.003*(+)	0.027*(-)	0.028*(+)	0.018*(+)
tem • flow	0.613	0.701	0.644	0.198	0.316	0.303	0.210
temp • feed	0.207	0.701	0.085**(-)	0.020*(-)	0.084**(+)	0.086**(-)	0.112
flow • feed	0.049*(-)	0.342	0.007*(-)	0.024*(-)	0.067**(+)	0.070**(-)	0.085**(-)

หมายเหตุ: *มีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 **มีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 ***ผลตอบปริมาณความชื้นยกกำลังสอง เครื่องหมายในวงเล็บบอกถึงแนวโน้มของผลตอบ เมื่อเทอมนั้นมีค่าสูงขึ้น

$$Y_{MC}^2 = -151.721 + 0.809X_1 + 4.369X_2 + 0.183X_3 - 0.0012X_1^2 - 0.029X_2^2 + (4.6 \times 10^{-5})X_3^2 - 0.01X_1X_2 - (4.66 \times 10^{-4})X_1X_3 - (3.67 \times 10^{-3})X_2X_3 \quad (9)$$

$$Y_{aw} = 0.019 + (4.82 \times 10^{-3})X_1 - (1.99 \times 10^{-3})X_2 - (1.183 \times 10^{-5})X_3 - (1.962 \times 10^{-5})X_1^2 - (1.123 \times 10^{-4})X_2^2 + (2.42 \times 10^{-7})X_3^2 + (4.056 \times 10^{-5})X_1X_2 + (7.099 \times 10^{-7})X_1X_3 - (8.524 \times 10^{-6})X_2X_3 \quad (10)$$

$$Y_{WAI} = -4.281 + 0.122X_1 - 1.022X_2 + 0.046X_3 + (4.8 \times 10^{-5})X_1^2 - 0.032X_2^2 + (1.543 \times 10^{-5})X_3^2 - (1.968 \times 10^{-3})X_1X_2 - (1.385 \times 10^{-4})X_1X_3 - (1.152 \times 10^{-3})X_2X_3 \quad (11)$$

$$Y_{WSI} = -21.126 + 0.233X_1 - 0.385X_2 + 0.042X_3 + (4.152 \times 10^{-5})X_1^2 + 0.028X_2^2 + (1.6 \times 10^{-5})X_3^2 - (5.156 \times 10^{-3})X_1X_2 - (1.805 \times 10^{-4})X_1X_3 - (8.269 \times 10^{-4})X_2X_3 \quad (12)$$

$$Y_l = 97.015 - 0.291X_1 - 0.243X_2 - 1.51X_3 - (1.778 \times 10^{-3})X_1^2 - 0.084X_2^2 - (5.437 \times 10^{-5})X_3^2 + 0.02X_1X_2 + (6.483 \times 10^{-4})X_1X_3 + (3.307 \times 10^{-3})X_2X_3 \quad (13)$$

$$Y_{dE} = 8.378 + 0.276X_1 + 0.292X_2 + 0.120X_3 + (1.347 \times 10^{-3})X_1^2 + 0.067X_2^2 + (4.353 \times 10^{-5})X_3^2 - 0.017X_1X_2 - (5.181 \times 10^{-4})X_1X_3 - (2.627 \times 10^{-3})X_2X_3 \quad (14)$$

$$Y_h = -244.155 + 2.104X_1 + 1.732X_2 + 0.893X_3 + (1.37 \times 10^{-2})X_1^2 + 0.66X_2^2 + (4 \times 10^{-4})X_3^2 - 0.175X_1X_2 - (3.97 \times 10^{-3})X_1X_3 - 0.021X_2X_3 \quad (15)$$

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า (adjusted coefficient of determination, R_{adj}^2) และ ผลการทดสอบ แล็กออฟฟิต (lack of fit) ของแบบจำลองตามสมการ (9) – (15) แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตี เป็นผลตอบที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรต้นค่อนข้างชัดเจน สามารถประมาณสมการถดถอยโดยใช้สมการพหุนามได้ ดีดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำและสีของผลิตภัณฑ์ หลังคั้นรูปมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน ผลการทดสอบแล็กออฟฟิตชี้ว่า ความผิดพลาดในการทำนายที่เกิดขึ้นไม่ได้มีที่มาจากรูปแบบของแบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่าชี้ว่า แบบจำลองพหุนามอันดับสองยังไม่เพียงพอในการอธิบายความสัมพันธ์ ดังนั้นจึงควรพิจารณาหารูปแบบความสัมพันธ์อื่นๆ หรือเพิ่มทอมอันดับสูงขึ้นไปในแบบจำลอง เพื่อให้ได้สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่าและผลการทดสอบแล็กออฟฟิตของแบบจำลองต่างๆ

ผลตอบ	R_{adj}^2 (%)	lack of fit (P-value)	หมายเลขสมการ
MC	82	0.001	9
a_w	69	0.353 ^{NS}	10
WAI	58.1	0.003	11
WSI	60.3	0.108 ^{NS}	12
L^*	55	0.000	13
dE*	54.3	0.001	14
h^*	49.5	0.000	15

หมายเหตุ : ^{NS} = ไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้ง

ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองการถดถอยของผลตอบตามสมการ (9) – (15) มีเกณฑ์ของค่าผลตอบที่ต้องการแสดงใน ตารางที่ 6 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข ระบุว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งนมข้าว คือ อุณหภูมิอากาศร้อน 192.55 °C อัตราการไหลของอากาศร้อน 35.05 m³/h และอัตราการป้อนน้ำนมข้าว 740.68 ml/h จากนั้นทำการทดลองทำแห้งน้ำนมข้าวที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ (อุณหภูมิอากาศร้อน 193 °C อัตราการไหลของอากาศร้อน 35 m³/h และอัตราการป้อนน้ำนมข้าว 738 ml/h) นำผลมาเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเชิงสถิติดังแสดงใน ตารางที่ 7 พบว่า ค่าที่ได้จากผลการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองเชิงสถิติมีความแตกต่างกันเล็กน้อย (ไม่เกิน 6 %)

5. สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ ในการหาสภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ก่อนคั้นรูปและพารามิเตอร์สีของผลิตภัณฑ์หลังคั้นรูป พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งน้ำนมข้าว คือ อุณหภูมิอากาศร้อน 192.55 °C อัตราการไหลของอากาศร้อน 35.05 m³/h และอัตราการป้อนน้ำนมข้าว 740.68 ml/h การทดสอบเพื่อยืนยันผล พบความแตกต่างจากผลการทำนายจากแบบจำลอง ไม่เกินร้อยละ 6

ตารางที่ 6 เกณฑ์ของค่าผลตอบที่ต้องการ

ผลตอบ	ขอบเขตล่าง	ค่าเป้าหมาย	ขอบเขตบน	อ้างอิง
ปริมาณความชื้น ¹	-	7.84	9.00	Valentas (1991)
วอเตอร์แอกติวิตี*	0.20	0.25	0.30	Singh (1993)
ดัชนีการดูดซับน้ำ*	3.2**	5.935**	-	-
ดัชนีการละลายน้ำ*	4.3**	6.545**	-	-
L^*	31.00	45.40	-	น้ำนมข้าว ก่อนทำ แห้ง
dE^*	-	54.55	61.00	
h^*	-	115.067	135.00	

หมายเหตุ: 1 ปริมาณความชื้นที่ใช้เป็นค่าที่ยกกำลังสอง

*กำหนดให้ค่า s และ t ซึ่งแสดงถึงการให้น้ำหนัก (weighted) และความสำคัญเท่ากับ 1

**พิจารณาจากค่าที่ได้จากผลการทดลอง

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการ

ทำนายจากแบบจำลองทางสถิติ ที่สภาวะที่เหมาะสม

ผลตอบ	ค่าที่ได้จากการทดลอง	ค่าที่ได้จากการทำนาย	ความแตกต่าง (%)
ปริมาณความชื้น (%)	2.63	2.58	1.90
วอเตอร์แอกติวิตี	0.28	0.29	-3.57
ดัชนีการดูดซับน้ำ	3.88	3.75	3.35
ดัชนีการละลายน้ำ	4.54	4.31	5.07
L^*	36.34	37.57	-3.38
dE^*	61.86	60.94	1.49
h^*	140.14	134.52	4.01

รายการสัญลักษณ์

- a^* พารามิเตอร์สี่ แสดงสีแดง-เขียว
- a_w วอเตอร์แอกติวิตี
- A ขอบเขตล่าง
- b^* พารามิเตอร์สี่ แสดงสีเหลือง-น้ำเงิน
- B ค่าเป้าหมาย

- $^{\circ}Brix$ ความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายน้ำได้
- C ขอบเขตบน
- d ฟังก์ชันความต้องการ
- D_{scr} ผลตอบประกอบเดี่ยว
- dE^* พารามิเตอร์สี่รวม
- e ความผิดพลาด
- h^* มุม แสดงเจดสี
- k จำนวนปัจจัยอิสระ
- L^* พารามิเตอร์สี่ แสดงความสว่าง
- m จำนวนผลตอบ
- MC ปริมาณความชื้น
- R^2_{adj} สัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า
- s, t ค่าที่ใช้ปรับฟังก์ชันความต้องการ
- TS ปริมาณของแข็งทั้งหมด
- WAI ดัชนีการดูดซับน้ำ
- WSI ดัชนีการละลายน้ำ
- Wt_{dry} น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง
- Wt_{gel} น้ำหนักเจล
- x ตัวแปรอิสระแบบเข้ารหัส
- X ตัวแปรอิสระ
- y, Y ผลตอบ
- \wedge ผลตอบที่ทำนายจากแบบจำลองการถดถอย
- β_{ij} สัมประสิทธิ์การถดถอย
- ϕ ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบกับตัวแปรอิสระ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอขอบคุณคุณกิตติศักดิ์ ขุนทองไชย สถาบันราชภัฏเพชรบุรีวิทยาเขตฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำนมข้าวสำหรับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. กิตติศักดิ์ ขุนทองไทย. ปฏิรูปการเรียนรู้ กว่าจะมาเป็น
น้ำนมข้าวกระยาคู. ปทุมธานี : สถาบันราชภัฏเพชรบุรี
วิทยาลัยการณ, 2545.
2. Heldman, D. R. Handbook of Food Engineering.
New York : Marcel Dekker Inc, c1992.
3. Masters, K. Spray Drying Handbook. 5th ed.
London : Longman Scientific & Technical, c1991.
4. Mujumdar, A. S. Handbook of Industrial Drying.
New York : Marcel Dekker Inc, c1987.
5. ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.
พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2545.
6. Cochran, W. G., Cox, G. M. Experimental Designs.
John Wiley & Sons Inc, c1957.
7. Myers, R. H. Response Surface Methodology :
Process and Product Optimization Using Designed
Experiments. New York : John Wiley & Sons Inc,
c 1995.
8. AOAC. Official Methods of Analysis. 14th ed.
Washington, D.C : Association of Official Chemists,
c1984.
9. deMan, P. Principle of Food Chemidtry. New
York : Marcel Dekker Inc, c1991.
10. Anderson, R. A. "Roll and extrusion cooking of
grain sorghum grits." Cereal Sci. Today 14:4
(1969) Cited in D. Jones et al., "Physicochemical
Properties of Ready-to-eat Breakfast Cereals."
CFW Research. 45:5 (2000) : 164-168.
11. Fennema, O. R. Food Chemistry. 2nd ed. New
York : Marcel Dekker Inc, c1985.
12. Valentas, K. J. Food Processing Operations and
Scale-up. New York : Marcel Dekker Inc, c1991.
13. Singh, R. P. Introduction to Food Engineering.
2nd ed. New York : Academic Press Inc, c1993.