

การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย  
Study of the Variables Affecting Spray Drying



ปาริฉัตร สุรินทร์  
สาริตา พุทธิวนิช  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทระอัมพร  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## STUDY OF THE VARIABLES AFFECTING SPRAY DRYING

PARICHAT SURIN

SARISA BUDDHIVANID

ADVISOR ASSOC. PROF. DR. WALAIRAT CHANDRA-AMBHORN

CO-ADVISOR DR. EKARACH BUMRUNGTHAICHAICHAN

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย	
นักศึกษา	นางสาวปาริฉัตร สุรินทร์	รหัสนักศึกษา 63010599
	นางสาวสาริศา พุทธิวิเศษ	รหัสนักศึกษา 63010964
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทอัมพร	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ	
ปริญญานิพนธ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

วลัยรัตน์ จันทอัมพร.

(รศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทอัมพร)

ประธานกรรมการ

ธชชนต์ สมานมุลย์

(ผศ.ดร.ธชชนต์ สมานมุลย์)

กรรมการ

ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์

(ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย	
นักศึกษา	นางสาวปาริฉัตร สุรินทร์	รหัสนักศึกษา 63010599
	นางสาวสาริศา พุทธิวิเศษ	รหัสนักศึกษา 63010964
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขา	วิศวกรรมเคมี	
ปีการศึกษา	2566	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทระอำพร	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน โดยศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ 1. ความเข้มข้นมอลโตเดกซ์ตรินที่ 30, 40 และ 50 %wt 2. อัตราเร็วสายป้อนที่ 2,000 3,000 และ 4,000 mL/h 3. อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ 180, 200 และ 220 °C และศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำการทดลองซึ่งพิจารณาจากสภาวะที่ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้มากที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จากการออกแบบการทดลองทำให้ได้แผนการทดลองที่เหมาะสมจำนวน 15 การทดลอง เมื่อนำผลการทดลองไปคำนวณค่าร้อยละผลได้ แล้วนำค่าร้อยละผลได้มาสร้างสมการถดถอย (Regression model) ได้สมการ คือ  $Y = 89.583 + 0.558A + 0.047B + 0.95C + 0.923AC + 0.981BC - 1.603A^2 - 1.940B^2 - 0.387C^2$  ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.96 จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าร้อยละผลได้อย่างมีนัยสำคัญ ( $P$ -value < 0.05) ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ผลกระทบของตัวแปรร่วมระหว่างความเข้มข้นสายป้อนกับอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า และผลกระทบของตัวแปรร่วมระหว่างอัตราเร็วสายป้อนกับอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองคือ ความเข้มข้นสายป้อน 45 %wt อัตราเร็วสายป้อน 3,500 mL/h และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 220 °C โดยจะให้ค่าร้อยละผลได้มากที่สุดเท่ากับ 90.52

**คำสำคัญ:** เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย, การอบแห้งแบบพ่นฝอย, มอลโตเดกซ์ตริน, การออกแบบการทดลอง, วิธีพื้นผิวตอบสนอง

<b>Project Title</b>	Study of the variables affecting spray drying	
<b>Student</b>	Parichat Surin	<b>Student ID</b> 63010599
	Sarisa Buddhivanid	<b>Student ID</b> 63010964
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Chemical Engineering	
<b>Year</b>	2023	
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Walairat Chandra-ambhorm	
<b>Co-Advisor</b>	Dr. Eakarach Bumrunghthaichaichan	

### Abstract

This project aims to study the variables affecting spray drying powder yield and to optimize the suitable condition for spray drying. The three studied variables included 1. Feed concentration at 30, 40 and 50 %wt 2. Feed flow rate at 2,000 3,000 and 4,000 mL/h 3. Inlet hot air temperature at 180, 200 and 220 °C. Maltodextrin with a dextrose equivalent (DE) of 10 was selected as the feed solution. The optimal condition was considered from the maximum powder yield identified by using Box-Behnken design (BBD) and Response surface methodology (RSM). The BBD data suggested the appropriate experimental conditions and number of runs were 15 runs. The experiment results were used to calculate powder yields for constructing the Regression model as  $Y = 89.583 + 0.558A + 0.047B + 0.95C + 0.923AC + 0.981BC - 1.603A^2 - 1.940B^2 - 0.387C^2$  with correlation coefficient ( $R^2$ ) 0.96. From the statistical data analysis, The P-value of the inlet hot air temperature variable, the interaction between feed concentration and inlet hot air temperature variable and the interaction between feed flow rate and inlet air temperature variable are less than 0.05 indicating that these variables are statistically significant to the product yield. The optimal condition obtained from the Regression model is at 45 %wt of maltodextrin of feed concentration, 3,500 mL/h of feed flow rate and 220 °C of inlet air temperature, which produced maximum percent yield is equal to 90.52

**Keywords:** Spray dryer, Spray drying, Maltodextrin, Design of experiment, Response surface methodology

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอำพร และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนโครงการทางด้านเครื่องมือและสถานที่

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธัชพันธ์ สมานมุลย์ และผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์ กรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการสอบปริญญาานิพนธ์ ซึ่งทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ทำให้ผู้ศึกษามีความรู้ที่จะใช้ในการประกอบอาชีพในอนาคต

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและส่งเสริมในทุกๆด้าน คอยเป็นกำลังใจในการฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นเรียนในภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวปาริฉัตร สุรินทร์  
นางสาวสาริศา พุทธิวิช

## สารบัญ

	หน้า
ปกภาษาไทย	ก
ปกภาษาอังกฤษ	ข
ใบเซ็นรับรองของอาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
สารบัญตาราง	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	1
1.3 ขอบเขตโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 มอลโตเดกซ์ตริน	3
2.2 หลักการอบแห้งแบบพ่นฝอย	4
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	5
2.4 สมดุลมวลสารและสมดุลพลังงาน	7
2.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	8
2.6 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	9
2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)	11
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง</b>	<b>16</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	16
3.2 วิธีการทดลอง	16
3.3 การวิเคราะห์หาร้อยละผลได้ (%yield)	18
3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ	18
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	<b>20</b>
4.1 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของมอลโตเดกซ์ตริน	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน	21
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>28</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	28
5.2 ข้อเสนอแนะ	28
บรรณานุกรม	29
ภาคผนวก	32
ภาคผนวก ก. ข้อมูลดิบ	33
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	34
ภาคผนวก ค. ภาพผลิตภัณฑ์ผงหลังการอบ	35

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ผงมอลโตเดกซ์ตริน	3
รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงาน	7
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	9
รูปที่ 2.4 หัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์	10
รูปที่ 2.5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ	11
รูปที่ 2.6 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	12
รูปที่ 2.7 (a) Response surface plot (b) Contour plot	12
รูปที่ 3.1 เครื่องปั่นกวน	16
รูปที่ 3.2 การต่ออะตอมไมเซอร์	17
รูปที่ 3.3 ผลิตกัณฑ์ที่ได้ในหอบแห้งหลังการอบ	17
รูปที่ 4.1 พื้นผิวตอบสนอง AB	22
รูปที่ 4.2 Contour plot AB	23
รูปที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนอง AC	24
รูปที่ 4.4 Contour plot AC	24
รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนอง BC	25
รูปที่ 4.6 Contour plot BC	26
รูปที่ ค.1 มอลโตเดกซ์ตรินหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C	35
รูปที่ ค.2 มอลโตเดกซ์ตรินหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 °C	35

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ระดับของตัวแปรที่ใช้ศึกษา	18
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD)	19
ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละผลได้ของการอบแห้งแบบพ่นฝอยสารละลายมอลโตเดกซ์ตรินที่สภาวะการทดลองต่างๆที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	20
ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ทางสถิติ	21
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร AB	22
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร AC	23
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร BC	25
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร ABC	26
ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง	33
ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการศึกษากับค่าร้อยละผลได้	34

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันกระบวนการอบแห้งได้เข้ามามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยกระบวนการอบแห้งมีอยู่หลากหลายชนิด เช่น กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กระบวนการอบแห้งแบบเยือกแข็ง กระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศ และกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น สำหรับการศึกษานี้ครั้งนี้ได้ทำการศึกษาระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวชั้นกลายเป็นผงแห้ง โดยการพ่นให้เป็นละอองฝอยในหอบแห้ง โดยกระบวนการนี้ถือว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบอื่นๆ เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถลดปริมาตรและน้ำหนักลงได้อย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยจึงสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน ทำให้ยังสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง เช่น สี กลิ่น รส และคุณค่าทางอาหาร ได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้นกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอาหารและยา เป็นต้น

โครงการนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งแบบพ่นฝอย และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อศึกษาพื้นผิวตอบสนอง แล้วศึกษาหาสภาวะที่ทำให้ได้การอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งแบบพ่นฝอย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

### 1.3 ขอบเขตโครงการ

ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยมีผลตอบสนองคือ ปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินที่ได้หลังจากการอบแห้งแบบพ่นฝอย (%yield) หาสมการถดถอยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร และหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า อัตราเร็วสายป้อน และความเข้มข้นสายป้อน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย
- 1.4.2 มีความรู้พื้นฐานและสามารถใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้
- 1.4.3 สามารถออกแบบการทดลองและวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองได้
- 1.4.4 สามารถหาสมการถดถอยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มอลโตเดกซ์ตริน



รูปที่ 2.1 ผงมอลโตเดกซ์ตริน

ที่มา : <https://encrypted->

[tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSEpGre2Oci2LM9hHWB8WoWubpClixL\\_yAgzpohO0J4FKsrAQU\\_0jVh1DGJbubGfaBm6qk&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSEpGre2Oci2LM9hHWB8WoWubpClixL_yAgzpohO0J4FKsrAQU_0jVh1DGJbubGfaBm6qk&usqp=CAU) (19 ตุลาคม 2566)

มอลโตเดกซ์ตรินจัดเป็นสารอาหารในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตจำพวกโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกับกลูโคสไซรัปที่ประกอบไปด้วยหน่วยของ D-glucose หลายๆ หน่วยเชื่อมต่อกัน มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{6n}H_{10n+2}O_{5n+1}$  ;  $2 < n < 20$  โดยสามารถเตรียมมอลโตเดกซ์ตรินได้จากการย่อยโมเลกุลของสตาร์ช การไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส เพื่อให้เกิดสารละลายกลูโคสพอลิเมอร์ (Glucose polymer solution) ที่มีสายยาว สารละลายนี้จะถูกรองและทำให้แห้งหรือทำให้เข้มข้นมากขึ้นเพื่อให้ได้มอลโตเดกซ์ตริน (ชญานิศ มันทาดิลก และคณะ, 2559) โดยสตาร์ชที่นำมาใช้ ได้แก่ สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวดังรูปที่ 2.1 มีรสหวานเล็กน้อย ไม่มีกลิ่น และสามารถละลายในน้ำได้ดี อีกทั้งยังปลอดภัยและราคาไม่แพง จึงนิยมใช้เป็นวัตถุดิบแต่งอาหารในอุตสาหกรรมอาหารและยา ความชื้นประมาณร้อยละ 3-5 ความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $0.31-0.61 \text{ g/cm}^3$  สารละลายมอลโตเดกซ์ตรินที่ได้มีความหนืดสม่ำเสมอ เนื้อสัมผัสเรียบเนียน ซึ่งการเติมมอลโตเดกซ์ตรินจะให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และทำให้สัดส่วนของน้ำในผลิตภัณฑ์ลดลง จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีช้าลง มีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ต่ำ (Low hygroscopicity) จึงช่วยลดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ผงแห้ง (Siew Young, Q. et.al., 2007)

##### 2.1.1 ประเภทของมอลโตเดกซ์ตริน

มอลโตเดกซ์ตรินสามารถแบ่งออกตามค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent; DE) ได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่ำ ( $5 < DE < 20$ )
2. มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE สูง ( $DE > 20$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า DE บ่งบอกถึงจำนวนโมเลกุลของสตาร์ชที่ถูกย่อยไปเป็นน้ำตาลกลูโคสได้ ซึ่งมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE สูงจะมีความหวานมากกว่ามอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่ำ

### 2.1.2 การประยุกต์ใช้มอลโตเดกซ์ตริน

การใช้งานมอลโตเดกซ์ตรินในอุตสาหกรรมขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารและยา (ชญาנית มันทาดิลก และคณะ, 2559)

1. สารเพิ่มเนื้อ (Bulking agent)
2. สารให้ความหวาน (Sweetener)
3. สารทดแทนไขมัน (Fat substitute)
4. สารป้องกันการเกาะตัวเป็นก้อน (Anticaking agent)
5. สารที่ใช้ห่อหุ้มสารให้กลิ่นรส (Flavor encapsulation)

## 2.2 หลักการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสาร โดยการฉีดพ่นของเหลวชั้นเป็นหยดละอองขนาดเล็กให้ไหลผ่านอากาศร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อระเหยความชื้นออกจากของเหลวชั้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของผงแห้ง ซึ่งหลักการการอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

2.2.1 การฉีดของเหลวชั้นให้เป็นหยดละอองฝอย เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น ทำให้อัตราการระเหยสูงและผลิตภัณฑ์แห้งเร็วขึ้น

2.2.2 การสัมผัสกันระหว่างละอองฝอยของสารป้อนกับอากาศร้อน เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งหัวฉีดของอากาศร้อนเข้าจะสามารถแบ่งรูปแบบของการสัมผัสกับอากาศร้อนได้ดังนี้

- การไหลของสารป้อนกับอากาศร้อนในทิศทางเดียวกัน (Co-current flow)  
สารป้อนจะถูกฉีดเข้าไปในทิศทางเดียวกับอากาศร้อน จากนั้นหยดละอองของสารป้อนจะสัมผัสเข้ากับอากาศร้อนที่มีความชื้นสูงแล้วหยดละอองจะระเหยทันทีจนกลายเป็นผงแห้ง
- การไหลของสารป้อนกับอากาศร้อนในทิศสวนทางกัน (Counter-current flow)  
สำหรับการไหลชนิดนี้สารป้อนจะถูกฉีดในทิศตรงกันข้ามกับอากาศร้อน โดยสารป้อนจะถูกฉีดจากด้านบนลงล่าง ส่วนอากาศร้อนจะไหลจากด้านล่างขึ้นไปด้านบน
- การไหลของสารป้อนกับอากาศร้อนในทิศทางแบบผสม (Mixed flow)  
สารป้อนและอากาศร้อนจะไหลผ่านทั้งหอบแห้งทั้งในทิศทางเดียวกันและสวนทางกัน

2.2.3 การระเหยของหยดละอองฝอย เมื่อหยดละอองฝอยสัมผัสกับอากาศร้อนจะเกิดการระเหยบริเวณที่ผิวของละอองฝอยอย่างรวดเร็ว

2.2.4 การแยกผลิตภัณฑ์แห้งออกจากอากาศชื้น ผงอนุภาคที่แห้งแล้วทั้งหมดที่ผสมอยู่กับอากาศ จะถูกแยกออกจากอากาศโดยใช้ไซโคลน

ข้อดีของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

1. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงที่มีความละเอียดสูง เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยาสุด (ใช้ในการรักษาผู้ป่วยโรคหอบหืดและโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง)
2. มีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบอื่นๆ เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถลดปริมาตรและน้ำหนักลงได้อย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อย

ข้อเสียและข้อจำกัดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

1. มีค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะต้องมีการใช้หัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์เพื่อทำให้สารป้อนเป็นละอองที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีราคาที่สูงมาก
2. การอบแห้งแบบพ่นฝอยเหมาะสำหรับสารป้อนที่มีลักษณะเป็นของเหลวเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้กับของแข็งได้ (Ozmen and Langrish, 2002)

## 2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

2.3.1 อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำในของเหลวชั้นที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนน้ำในผงแห้งให้ระเหยออกไป ทำให้ความสามารถในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง อีกนัยหนึ่งยังหมายถึงว่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ลดลง (คณิตนนท์, 2557) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ วสันต์ (2544) ซึ่งได้ศึกษาการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อนำมาแปรรูปกระเจี๊ยบให้เป็นอาหารผงสุขภาพพร้อมดื่มพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าแล้วจะทำให้ปริมาณความชื้นของกระเจี๊ยบผงมีค่าลดลง เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศจะทำให้ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำมากขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้ามากเกินไปอาจจะส่งผลทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของผงแห้งที่ไวต่อความร้อนบิดเบือนไปจากความเป็นจริงได้ (Michael JK, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ สโรบล สโรชวิกสิต และ ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี (2554) ได้รายงานผลการศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินที่ใช้เป็นสารช่วยอบแห้งสับประรดผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ความชื้นและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลดลง ช่วยให้การละลายดีขึ้นแต่ทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตลดลง อีกทั้งอุณหภูมิที่สูงเกินไป (170 °C) ทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.2 อัตราการฉีดของของเหลวชั้น ส่งผลต่อขนาดอนุภาคที่ออกมาจากหัวฉีด ถ้าเพิ่มอัตราการฉีดของของเหลวชั้นมากขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคที่ออกมาละเอียด แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลทำให้อุณหภูมิขาออกลดลงและจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกาะติดที่ผนังเครื่อง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ โพธิ์ทอง (2563) พบว่า ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายชั้นในขณะใช้อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าและปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่ให้ระบบคงที่ มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของผงแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกมาจากของเหลวชั้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระบบสามารถระเหยน้ำออกไปได้ในอัตราที่คงเดิม

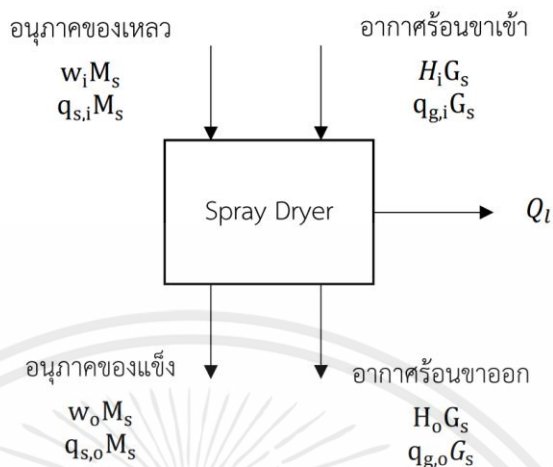
2.3.3 อัตราการไหลของอากาศร้อน ส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าลดอัตราการไหลของอากาศร้อนลงจะทำให้เวลาที่ผงแห้งอยู่ในหอบแห้งนานขึ้นทำให้สัมผัสกับอากาศร้อนได้นานขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ความชื้นในผงแห้งลดลงเนื่องจากสามารถระเหยความชื้นออกได้มากขึ้น นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศร้อนต่ำ ยังช่วยทำให้การแยกผงแห้งหลังการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (คณิตนันท์, 2557) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ วสันต์ (2544) พบว่า เมื่อลดอัตราการไหลของอากาศร้อนจะทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งมากขึ้น แล้วปริมาณความชื้นของกระเจียบผงลดลง

2.3.4 ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำในของเหลวชั้นที่ต้องการอบแห้ง ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำลดลงเนื่องจากอากาศอิ่มตัวทำให้น้ำไม่สามารถระเหยไปสู่บรรยากาศได้

2.3.5 ชนิดของหัวฉีด จากรายงานของ โพธิ์ทอง (2563) พบว่า หัวฉีดแต่ละแบบจะทำให้ได้ลักษณะอนุภาคของผงแห้งที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกหัวฉีดจะขึ้นอยู่กับการออกแบบและลักษณะเฉพาะของการใช้งาน เช่น หัวฉีดชนิดจาน สามารถผลิตอนุภาคผงแห้งที่มีขนาดเล็กจนไปถึงขนาดใหญ่ และยังสามารถผลิตผงแห้งได้มากถึง 5,000 kg<sub>dry solid</sub>/h ซึ่งหัวฉีดชนิดนี้สามารถใช้ได้กับของเหลวทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือสารแขวนลอย หัวฉีดแต่ละชนิดจะมีอุปกรณ์ที่ออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้แตกต่างกันไป

## 2.4 สมดุลมวลสารและสมดุลพลังงาน

ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย อนุภาคของของเหลวจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศร้อน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารและแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูป



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงาน

สมการสมดุลมวลสารของน้ำในระบบ

มวลน้ำเข้า = มวลน้ำออก

$$M_s w_i + G_s H_i = w_o M_s + H_o G_s$$

$$M_s (w_i - w_o) = G_s (H_o - H_i)$$

(2.1)

โดยที่  $M_s$  คือ ปริมาณของสารป้อน ( $\text{kg}_{\text{solid}}/\text{h}$ )

$w_i$  คือ อัตราส่วนความชื้นของสารป้อน ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{solid}}$ )

$w_o$  คือ อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{solid}}$ )

$G_s$  คือ ปริมาณอากาศร้อนขาเข้า ( $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{h}$ )

$H_i$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศร้อนขาเข้า ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ )

$H_o$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศร้อนขาออก ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ )

สมการสมดุลพลังงานของระบบ

$$q_{s,i} M_s + q_{g,i} G_s = q_{s,o} M_s + q_{g,o} G_s + Q_l$$

(2.2)

โดยที่  $Q_l$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากเครื่องอบแห้ง

$q_s$  คือ เอนทาลปีของสารป้อน ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.3

$$q_s = c_s \Delta T + w_d c_w \Delta T$$

(2.3)

เมื่อ  $c_s$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของแข็งในสารละลาย ( $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$c_w$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $1 \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$\Delta T$  คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่สารป้อนเข้ากับอุณหภูมิอ้างอิง ( $^\circ\text{C}$ )

$w_d$  คือ ผลต่างระหว่างความชื้นของสารป้อนและความชื้นของสารผลิตภัณฑ์

( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{solid}}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $q_g$  คือ เอนทาลปีของอากาศร้อน ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.4

$$q_g = c_H \Delta T + H \lambda \quad (2.4)$$

ซึ่งค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศร้อนขึ้น ( $c_H$ ) หาได้จาก (K.masters,1972)

$$c_H = 0.24 + 0.46H \quad (2.5)$$

เมื่อ  $c_H$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศร้อนขึ้น (kcal/kg $^{\circ}$ C)

$\lambda$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (kcal/kg)

เอนทาลปีของอากาศขาเข้า หาได้จากแทนสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.4

$$q_{g,i} = 0.24T + (597+0.46T)H \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้ อุณหภูมิอ้างอิง เท่ากับ 0 องศาเซลเซียส

## 2.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

ในการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งสามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ใช้ในการระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์กับความร้อนที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง

$$Q' = Q_d + Q_s + Q_l \quad (2.7)$$

ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยความชื้นออกและเพิ่มความร้อนแก่วัสดุ หาได้จาก

$$Q_d + Q_s = W r_w = G_a (c_{H1} T_1 - c_{H2} T_2) \quad (2.8)$$

โดยที่  $W$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย

$r_w$  คือ ความร้อนแฝงของการระเหย

$Q'$  คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

$Q_d$  คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออก

$Q_s$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม โดยการนำความร้อน การแผ่รังสี การรั่วของลมร้อน และการแทรกซึมของอากาศเย็น

ปริมาณความร้อนที่ให้กับเครื่องอบแห้งมาจากปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง รวมกับปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปหลังจากกระบวนการอบแห้ง

$$Q = Q' + Q''$$

$$Q = G_a (c_{H1} T_1 - c_{H2} T_2) \quad (2.9)$$

โดยที่  $Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่เติมให้กับเครื่องอบแห้ง

$Q''$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมีค่าเป็น

บวกและมากกว่า  $Q'$  เสมอ

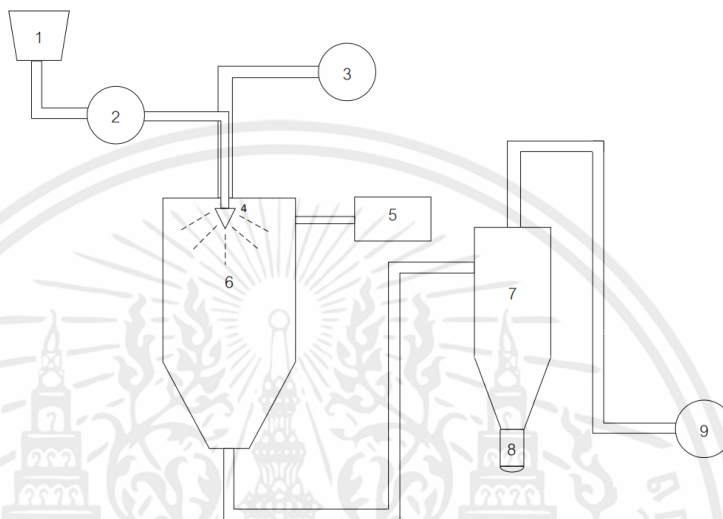
ในกรณีที่ใช้ลมร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง สามารถหาได้จาก

$$\eta_D = (Q_d/Q) \times 100 \quad (2.10)$$

$$\eta_D = [(Q_d + Q_s)/Q] \times 100 \quad (2.11)$$

## 2.6 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 2.6.1 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยประกอบไปด้วย

1. ภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายชั้น
2. บีมของเหลวร้อน
3. วาล์วอัดอากาศ
4. หัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์
5. เครื่องทำอากาศร้อน
6. หอบแห้ง
7. ไชโคลน
8. ภาชนะรองรับผลิตภัณฑ์
9. เครื่องดูดอากาศ

### 2.6.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเครื่องที่ใช้ในการทำให้ของเหลวชั้นเป็นผงแห้ง โดยอาศัยการพ่นเป็นละอองฝอยขนาดเล็กให้สัมผัสกับอากาศร้อนภายในหอบแห้ง ซึ่งอากาศร้อนจะถูกดูดมาผ่านตัวให้ความร้อนแล้วเข้ามาที่หัวฉีด และของเหลวชั้นจะถูกดูดด้วยบีมเข้ามาที่หัวฉีด จากนั้นจะถูกฉีดเข้าไปที่หอบแห้งเมื่อของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารและถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้น้ำในของเหลวระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เปลี่ยนลักษณะจากของเหลวกลายเป็นผงแห้ง โดยผงแห้งและอากาศร้อนจะถูกแยกออกจากกันด้วยไชโคลน ผงแห้งจะตกลงสู่ภาชนะรองรับผลิตภัณฑ์ที่ต่ออยู่ทางด้านล่างของไชโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอากาศร้อนถูกส่งไปยังด้านบนของไซโคลนแล้วถูกดูดออกสู่บรรยากาศด้วยเครื่องดูดอากาศ

### 2.6.3 หัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์



รูปที่ 2.4 หัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์

ที่มา :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124045682000054>

(19 ตุลาคม 2566)

หัวฉีดชนิดนี้ทำงานเกี่ยวข้องกับของไหลสองชนิดคือ ของเหลว และอากาศ ซึ่งอากาศที่มีความเร็วสูงไหลผ่านเข้าอะตอมไมเซอร์จะทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองฝอย โดยการแตกตัวของของเหลวอาศัยการอัดก๊าซภายใต้ความดัน ทำให้เกิดแรงเสียดทานบนผิวของเหลวมากแล้วส่งผลให้ของเหลวแตกกระจายเป็นละอองฝอยขนาดเล็ก ซึ่งสามารถทำให้ละอองฝอยมีขนาดอนุภาค 10 ถึง 30  $\mu\text{m}$  ซึ่งอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลต่อการกระจายตัวเป็นละอองของเหลว ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของอากาศขึ้นจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวเป็นละอองของเหลวได้มากขึ้น ในทางกลับกันถ้าลดอัตราการไหลของอากาศลงจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวเป็นละอองของเหลวได้น้อยลง สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดละอองฝอย ได้แก่ สมบัติของของเหลว แรงตึงผิว ความหนาแน่นและความหนืด การไหลของก๊าซ ความเร็วของก๊าซ และความหนาแน่นของก๊าซ ซึ่งก๊าซที่อัดเข้าสู่หัวฉีดอาจเป็นอากาศ ไอน้ำ หรือก๊าซเฉื่อย สำหรับการฉีดจะต้องกำหนดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของเหลวกับก๊าซที่อัดให้มีค่ามาก เพื่อให้ของเหลวมีแรงเสียดทานที่เหมาะสม ซึ่งเกิดจากความเร็วจนอากาศที่ขยายตัวมาสัมผัสกับของเหลวหรือการไหลของอากาศผ่านของเหลวบางๆที่ไม่เสถียร ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของของเหลวขึ้นอย่างรวดเร็วและมีอนุภาคขนาดเล็ก สำหรับมุมการฉีดของเหลวออกเป็นละอองฝอยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการฉีดของเหลวและก๊าซผสมเข้าด้วยกัน ถ้าอัตราการป้อนของเหลวต่ำและอากาศที่อัดมีความเร็วมาก จะทำให้อากาศเข้าไปในหยดของเหลวแล้วส่งผลให้ของเหลวกระจายตัวออกได้ดี ซึ่งมุมในการฉีดที่เหมาะสมคือ 70-80° โดยหัวฉีดชนิดนี้นิยมใช้กับการอบแห้งที่ต้องการอัตราการอบแห้งต่ำ เช่น ผลิตภัณฑ์ยา และเซรามิก เป็นต้น (นพรัตน์ หล้าคำ และ ลิดา สิมะสาธิตกุล, 2549)

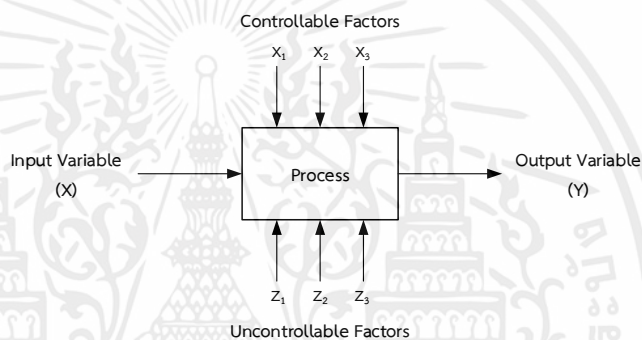
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือทางสถิติที่สำคัญในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ ช่วยในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (X) กับตัวแปรตาม (Y) โดยการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ) เพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้แก้ไขปัญหาที่จะทำการศึกษา ซึ่งวิธีนี้จะสามารถให้ผลความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลมากกว่าวิธีการโดยทั่วไป โดยสามารถระบุเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงให้เห็นถึงระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ

ปัจจัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

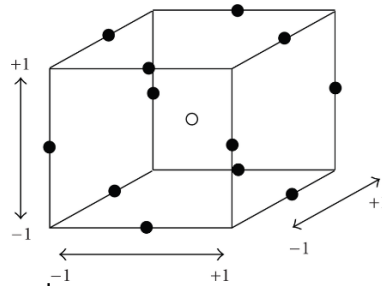
1. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้หรือเป็นปัจจัยที่เรายังไม่สนใจศึกษา
2. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้ในการดำเนินการทดลอง



รูปที่ 2.5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ

### 2.7.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD)

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ค่าของตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง จึงต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic relationship) การกำหนดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมและครอบคลุม ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 3 ตัว จำนวนการทดลองจะเท่ากับ  $3^3 = 27$  แผนการทดลอง ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรมากเกินไป ดังนั้นจึงมีการใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อลดจำนวนการทดลอง ยกตัวอย่างเช่น กรณี 3 ตัวแปรจะใช้เพียง 13 แผนการทดลอง การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์  $-1, 0, +1$  ซึ่งจะมีการปรับตัวแปรที่ศึกษาตัวแปรละ 3 ค่า โดยทำการเลือกสถานะการทดลองบางการทดลองที่จำเป็นเพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติรูปแบบที่ได้จะยังคงมีผลของตัวแปรหลัก (Main effect) ความสัมพันธ์ของตัวแปร (Interaction) และสมการกำลังสอง (Quadratic terms) โดยใช้ทรัพยากรที่น้อยที่สุด



รูปที่ 2.6 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

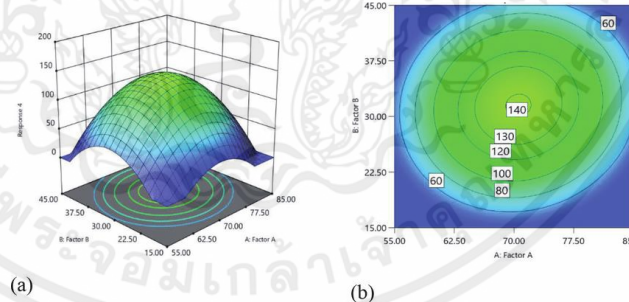
ที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Box-Behnken-design-for-three-factors\\_fig2\\_50283811](https://www.researchgate.net/figure/Box-Behnken-design-for-three-factors_fig2_50283811) (19 ตุลาคม 2566)

### 2.7.2 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามหนึ่งตัวกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัวขึ้นไปโดยใช้เส้นตรง หรือระนาบในกรณีที่มีตัวแปรอิสระสองตัวขึ้นไป เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง จากนั้นหาสถานะที่ใช้ในการทดลองที่ดีที่สุด

### 2.7.3 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีพื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัว และทำให้สามารถหาสถานะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการได้ ซึ่งกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลลัพธ์ในรูปแบบ 3 มิติ เรียกว่า “พื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot)” และกราฟที่แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบ 2 มิติ เรียกว่า “กราฟโครงร่าง (Contour plot)” ซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถอ่านค่าตำแหน่งของจุดที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 2.7 (a) Response surface plot (b) Contour plot

ที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Graphical-presentation-of-3D-surface-a-and-contour-plot-b-where-there-is-a-maximum\\_fig3\\_355043712](https://www.researchgate.net/figure/Graphical-presentation-of-3D-surface-a-and-contour-plot-b-where-there-is-a-maximum_fig3_355043712) (19 ตุลาคม 2566)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 ผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินต่อคุณภาพของแก้มังกรผงโดยวิธีการอบแห้ง

ศศิมา เรืองมนัสสุทธิ และคณะ (2557) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งน้ำแก้มังกรแดงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและปริมาณมอลโตเดกซ์ตริน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $3^k$  full factorial โดยตัวแปรที่ใช้ในศึกษามีทั้งหมด 2 ตัวแปรคือ อุณหภูมิอากาศขาเข้า 170, 180 และ 190 °C และปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 75, 100 และ 125 ของของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ โดยควบคุมสภาวะของเครื่องทำแห้งดังนี้ อุณหภูมิอากาศออก 75 °C และอัตราเร็วป้อน 40 mL/s ซึ่งทำการศึกษาวาดำแปรที่จะทำการศึกษาส่งผลอย่างไรต่อค่าความชื้น, ร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้, ปริมาณเบตาไซยานิน, ค่าการดูดความชื้นกลับ, ค่าการละลาย, ค่าความเป็นกรดต่าง, ค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดง, ค่าความเป็นสีเหลือง, ค่าความหนาแน่น และค่าการกระจาย จากการศึกษาพบว่า ความชื้นลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 190 °C และปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 125 ของของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ จะมีค่าความชื้นต่ำสุด และร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 170 °C และปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 125 ของของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ จะมีค่าร้อยละปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มากที่สุด

### 2.8.2 ปัจจัยในการทำงานที่สำคัญสำหรับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย:

กรณีศึกษากระเจียบผง

วสันต์ ดวงคำจันทร์ (2546) ได้ศึกษาการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อนำมาแปรรูปกระเจียบให้เป็นอาหารผงสุขภาพพร้อมดื่ม โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยให้เหมาะสมสำหรับการผลิตกระเจียบผง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 3 ส่วนคือ ชุดหัวฉีด หออบแห้ง และระบบดักเก็บผลิตภัณฑ์ผง จากการคำนวณและออกแบบทำให้ได้ขนาดของหออบแห้งคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 m สูง 1.50 m ได้ทำการทดลองอบแห้งกระเจียบภายใต้สภาวะการอบที่แตกต่างกัน โดยศึกษาตัวแปรที่ทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ ร้อยละความเข้มข้นของสารละลายวัตถุดิบ 10 20 และ 30 อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า 130, 140, 150, 160 และ 170 °C และอัตราการไหลของอากาศ 0.0148, 0.0213, 0.0277, 0.0345 และ 0.0410  $\text{m}^3/\text{s}$  ซึ่งให้อัตราการป้อนสารละลายวัตถุดิบคงที่เท่ากับ 2.25 kg/h จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นของกระเจียบผงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าวัดอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าหรือลดความเข้มข้นของสารละลายวัตถุดิบลง จะส่งผลให้ปริมาณความชื้นของกระเจียบผงมีค่าเพิ่มขึ้น

### 2.8.3 ผลของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งชนิดผง

พิไลรัก อินธิปัญญา และ ธนกิจ ถาหมี (2557) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งด้วยวิธีพ่นฝอย โดยศึกษาตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปรคือ อัตราส่วนของแห้งในน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งกับมอลโตเดกซ์ตริน 1.0:1.1, 1.0:1.2 และ 1.0:1.3 และอุณหภูมิร้อนชาเข้า 150, 160 และ 170 °C เพื่อศึกษาว่าส่งผลต่อคุณภาพของน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งและการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาอย่างไร จากการศึกษาพบว่า การใช้ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารลดความเหนียวในอัตราส่วนของแห้งในน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งต่อมอลโตเดกซ์ตรินเท่ากับ 1.0:1.3 ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงที่สุดคือ ร้อยละ 24.67±0.38 การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินทำให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงขึ้น และผลผลิตที่ได้จะมีแนวโน้มของค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำ แต่ทำให้ค่าการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น และการทดลองที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 170 °C ปริมาณผลผลิตสูงสุด คือ ร้อยละ 24.92±0.57 ผลผลิตที่ได้จะมีแนวโน้มของค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำลง การเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถการดูดความชื้น ความสามารถในการละลาย และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

### 2.8.4 อิทธิพลของสภาวะในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของผงซีรีซินจากน้ำต้มรังไหมพันธุ์ดั้งเดิมของไทย

ณัฐภูมิ เครือพงษ์ศักดิ์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่อสมบัติของผงซีรีซิน โดยการนำรังไหมเปล่ามาต้มน้ำที่อุณหภูมิ 95 °C ให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 2 %Brix จากนั้นนำน้ำต้มรังไหมที่ได้มาอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ อุณหภูมิอากาศร้อนชาเข้า 100, 120 และ 140 °C อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนชาเข้า 28 และ 35 m<sup>3</sup>/h และอัตราการป้อนน้ำต้มรังไหม 9 และ 12 mL/min พบว่า ความชื้นของผงซีรีซินลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนชาเข้า และลดอัตราการป้อนน้ำต้มรังไหม นอกจากนี้แล้วอัตราการป้อนน้ำต้มรังไหมยังส่งผลต่อขนาดอนุภาค สี และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของผงซีรีซินด้วย ถ้าอัตราการป้อนน้ำต้มรังไหมสูงจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงที่มีขนาดใหญ่ สีเข้ม และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง อย่างไรก็ตามสภาวะการอบแห้งที่ต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

### 2.8.5 ผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของนมผง

Viviane S. Birchall และคณะ (2004) ได้ศึกษาหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอยของนมผง ทำการทดลองโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยและใช้เทคนิค 3<sup>k</sup> full factorial ในการออกแบบการทดลอง หาข้อมูลและความสัมพันธ์ที่ทำนายคุณสมบัติของนมที่เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรหลักของกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ อัตราเร็วสายป้อน อัตราเร็วในการหมุนของหัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์ และอุณหภูมิอากาศร้อนชาเข้า ซึ่งตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่ใช้บอกคุณภาพของนมผง ได้แก่ ความชื้น (moisture content) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesion force) และขนาดของอนุภาค ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ได้ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนากระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเร็วของสายป้อน จะมีผลทำให้ขนาดของละอองฝอย ขนาดของอนุภาคนมผงมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการจับกันเป็นก้อน และยังทำให้ความชื้นของนมผงกับความหนาแน่นรวมมากขึ้นด้วย ในส่วนของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าหากเพิ่มให้มากขึ้นจะเป็นการเร่งให้กระบวนการอบแห้งเกิดเร็วขึ้น และเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค เป็นผลทำให้นมผงที่ได้มีขนาดละเอียดอย่างสม่ำเสมอ และในส่วนของอัตราเร็วในการหมุนของหัวฉีดอะตอมไมเซอร์ หากเพิ่มอัตราเร็วจะส่งผลให้ขนาดของอนุภาคของนมผงเล็กลง

#### 2.8.6 แนวโน้มการพัฒนาของการอบแห้งแบบพ่นฝอย: การทบทวนการวิจัยการอบแห้งน้ำผักและผลไม้

Mohammad Rezaul Islam Shishir, Wei Chen (2016) ได้ทำการสรุปแนวโน้มการพัฒนาการอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำผักและผลไม้ รวมถึงหลักการการอบแห้งแบบพ่นฝอย ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย การหาสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งที่ดีที่สุด และวิธีการใหม่ๆของการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งวิธีการเหล่านี้ได้ถูกเผยแพร่เพื่อที่จะสร้างมาตรฐานในการอบแห้งใหม่สำหรับการผลิตผักและผลไม้ที่มีคุณภาพสูงไว้ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลมากที่สุดต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย
2. หัวฉีดแบบอะตอมไมเซอร์
3. เครื่องกวนผสมสาร
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ปีกเกอร์
7. ซ้อนตักสาร
8. เขยือกพลาสติก
9. แปรงสำหรับปิดผงผลิตภัณฑ์
10. เศษผ้าสำหรับเช็ดหอบแห้ง
11. มอลโตเดกซ์ตริน
12. น้ำกลั่น

#### 3.2 วิธีการทดลอง

##### 3.2.1 การเตรียมสารละลายมอลโตเดกซ์ตรินเข้มข้น 30 %wt

1. ชั่งผงมอลโตเดกซ์ตริน 300 g ใส่ในปีกเกอร์โดยใช้เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
2. ชั่งน้ำกลั่น 700 g ใส่ในเขยือกพลาสติก
3. ผสมผงมอลโตเดกซ์ตรินกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องปั่นกวน



รูปที่ 3.1 เครื่องปั่นกวน

##### 3.2.2 การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

1. เสียบปลั๊กเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เปิดสวิทช์เครื่อง เครื่องดูดอากาศ และเครื่องกำเนิดความร้อน ตามลำดับ
2. ตั้งค่าอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ตู้อุปกรณ์ควบคุมให้ได้ตามต้องการ
3. ต่อหัวฉีดอะตอมไมเซอร์เข้ากับเครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การต่ออะตอมไมเซอร์

4. เปิดปั๊มและตั้งค่าอัตราการไหลของสารป้อนให้ได้ตามต้องการ
5. เมื่ออุณหภูมิของเครื่องอบแห้งได้ตามที่ตั้งค่าไว้แล้ว ให้เริ่มการทำงานของปั๊มเพื่อฉีดพ่นของเหลวชั้นลงในหอบแห้ง จากนั้นเริ่มจับเวลาและบันทึกความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิขาเข้าและขาออก ทุกๆ 5 นาที
6. เมื่อของเหลวชั้นหมด ให้ปิดเครื่องกำเนิดความร้อน จากนั้นถอดอะตอมไมเซอร์ออกมาจากเครื่องอบ แล้วปั๊มน้ำกลั่นเพื่อทำการล้างอะตอมไมเซอร์และสายป้อน จากนั้นจึงทำการปิดปั๊ม
7. รอจนอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเย็นลงแล้วจึงปิดเครื่องดูดอากาศ
8. ถอดชิ้นส่วนเครื่องอบแห้งเพื่อเอาผงผลิตภัณฑ์ออกมาชั่งน้ำหนัก โดยถอดส่วนภาชนะรองรับผลิตภัณฑ์ (Dust collector) และไซโคลนออกก่อน แล้วจึงปิดเอาผงผลิตภัณฑ์ใส่ลงในภาชนะ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
9. ปิดเอาผงผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในหอบแห้งใส่ลงในภาชนะ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล



รูปที่ 3.3 ผลึกที่ได้ออกมาในหอบแห้งหลังการอบ

10. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวิเคราะห์หาร้อยละผลได้ (%yield)

เมื่อทำการทดลองแล้ว ผลการทดลองที่นำมาใช้ในการสร้างพื้นผิวตอบสนองคือ ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินที่ได้หลังจากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งจะต้องคำนวณให้อยู่ในรูปของร้อยละผลได้ (%yield) เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติต่อไป ซึ่งสามารถหาร้อยละผลได้ (%yield) ได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละผลได้} = \frac{\text{ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินหลังอบ}}{\text{ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินก่อนอบ}} \times 100 \quad (3.1)$$

### 3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

สำหรับการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอยและการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง จะใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยใช้เทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) เพื่อทำการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยโปรแกรม Microsoft excel จากนั้นจึงนำสมการถดถอยไปสร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง ซึ่งโครงการนี้จะศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นสายป้อน (A), อัตราเร็วสายป้อน (B) และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (C) โดยแต่ละตัวแปรจะทำการศึกษาร่วมกัน 3 ระดับ กำหนดให้ค่าที่น้อยที่สุดแทนค่าเป็น -1 และค่าที่มากที่สุดแทนค่าเป็น +1 ซึ่งระดับของตัวแปรที่ใช้ศึกษาจะแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระดับของตัวแปรที่ใช้ศึกษา

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับ (Level)		
		-1	0	+1
ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)	A	30	40	50
อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)	B	2,000	3,000	4,000
อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	C	180	200	220

สำหรับการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร แล้วนำมาออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) ซึ่งได้กำหนดให้ทำทดลองซ้ำที่จุดกลางของระดับ 2 ครั้ง เพื่อความแม่นยำของการทดลอง ทำให้ได้แผนการทดลองที่เหมาะสมจำนวน 15 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD)

จำนวนการทดลอง	A	B	C	ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)	อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)	อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)
1	+1	+1	0	50	4,000	200
2	+1	-1	0	50	2,000	200
3	-1	+1	0	30	4,000	200
4	-1	-1	0	30	2,000	200
5	+1	0	+1	50	3,000	220
6	+1	0	-1	50	3,000	180
7	-1	0	+1	30	3,000	220
8	-1	0	-1	30	3,000	180
9	0	+1	+1	40	4,000	220
10	0	+1	-1	40	4,000	180
11	0	-1	+1	40	2,000	220
12	0	-1	-1	40	2,000	180
13	0	0	0	40	3,000	200
14	0	0	0	40	3,000	200
15	0	0	0	40	3,000	200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การออกแบบพ่นฝอยของมอลโตเดกซ์ตริน

การศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการออกแบบพ่นฝอยของสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง โดยศึกษา 3 ตัวแปร คือ

1. ความเข้มข้นสายป้อนที่ 30, 40, 50 %wt
2. อัตราเร็วสายป้อนที่ 3000, 4000, 5000 mL/h
3. อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ 180, 200, 220 °C

เมื่อทำการทดลองตามจำนวนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนทั้งหมด 15 การทดลอง แล้วนำค่าน้ำหนักมอลโตเดกซ์ตรินหลังการอบแห้งมาคำนวณร้อยละผลได้จากสมการที่ 3.1 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละผลได้ของการอบแห้งแบบพ่นฝอยสารละลายมอลโตเดกซ์ตรินที่สภาวะการทดลองต่างๆที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

จำนวนการทดลอง	A	B	C	ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)	อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)	อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	ร้อยละผลได้ (%Yield)
1	+1	+1	0	50	4,000	200	86.08
2	+1	-1	0	50	2,000	200	86.48
3	-1	+1	0	30	4,000	200	85.60
4	-1	-1	0	30	2,000	200	86.00
5	+1	0	+1	50	3,000	220	90.10
6	+1	0	-1	50	3,000	180	86.84
7	-1	0	+1	30	3,000	220	86.50
8	-1	0	-1	30	3,000	180	86.93
9	0	+1	+1	40	4,000	220	89.73
10	0	+1	-1	40	4,000	180	85.38
11	0	-1	+1	40	2,000	220	87.18
12	0	-1	-1	40	2,000	180	86.75
13	0	0	0	40	3,000	200	89.20
14	0	0	0	40	3,000	200	89.95
15	0	0	0	40	3,000	200	89.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพหุคูณตอบสนองร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาใช้ในการสร้างสมการถดถอยและวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษาที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.96 และตารางการวิเคราะห์ทางสถิติดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวแปร	สัมประสิทธิ์ (Coefficients)	P-value
Intercept	89.583	$1.647 \times 10^{-9}$
A	0.558	0.067
B	0.047	0.844
C	0.950	0.013
AB	0.000	1
AC	0.923	0.043
BC	-0.981	0.036
ABC	0.000	-
A <sup>2</sup>	-1.603	-
B <sup>2</sup>	-1.940	0.004
C <sup>2</sup>	-0.387	0.304

จากตารางที่ 4.2 จะพิจารณาที่ค่า P-value เพื่อศึกษาว่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาใด มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ ซึ่งจะพบว่า ตัวแปร C (อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า) ตัวแปร AC (ผลคูณของความเข้มข้นสายป้อนและอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า) และตัวแปร BC (ผลคูณของอัตราเร็วสายป้อนและอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า) มีค่า P-value < 0.05 หมายความว่า อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า ผลกระทบของตัวแปรร่วมระหว่างความเข้มข้นสายป้อนและอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า และผลกระทบของตัวแปรร่วมระหว่างอัตราเร็วสายป้อนและอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละผลได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปร A (ความเข้มข้นสายป้อน) และตัวแปร B (อัตราเร็วสายป้อน) มีค่า P-value > 0.05 หมายความว่า ความเข้มข้นสายป้อนและอัตราเร็วสายป้อนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละผลได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรจากตารางที่ 4.2 มาสร้างเป็นสมการถดถอยแบบเต็ม (Full regression model) ได้ดังนี้

$$Y = 89.583 + 0.558A + 0.047B + 0.95C + 0.923AC + 0.981BC - 1.603A^2 - 1.940B^2 - 0.387C^2 \quad (4.1)$$

โดยที่ A คือ ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)

B คือ อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)

C คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)

จากนั้นนำสมการถดถอยที่ได้ไปใช้ในการสร้างพหุคูณตอบสนอง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ได้แก่ AB BC และ AC ในรูปแบบกราฟ 3 มิติ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 พื้นผิวตอบสนองของ AB

ในการสร้างพื้นผิวตอบสนองของ AB ที่เกิดจากการสร้างสมการถดถอยของ AB โดยการตัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากสมการถดถอยแบบเต็ม (4.1) จะได้สมการถดถอยของ AB ดังสมการที่ 4.2

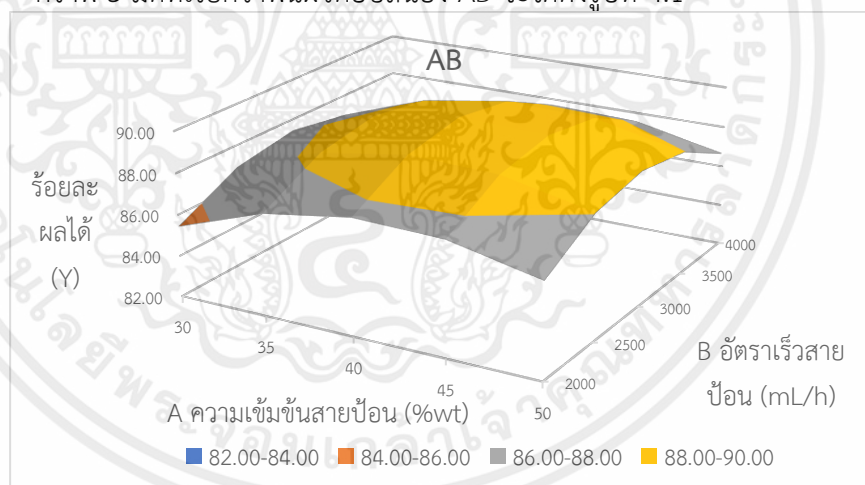
$$Y = 89.583 + 0.558A + 0.047B - 1.603A^2 - 1.940B^2 \quad (4.2)$$

เมื่อนำค่า A และ B ในช่วงที่ทำการทดลอง แทนลงในสมการถดถอย AB จะได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร AB

A: ความเข้มข้น สายป้อน (%wt)	B: อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)				
	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000
30	85.43	86.91	87.42	86.96	85.53
35	86.92	88.39	88.90	88.44	87.01
40	87.60	89.07	89.58	89.12	87.69
45	87.47	88.95	89.46	89.00	87.57
50	86.55	88.03	88.54	88.08	86.65

เมื่อนำค่าร้อยละผลได้กับค่า A และ B ในตารางที่ 4.3 มาสร้างในรูปแบบกราฟ 3 มิติที่เรียกว่าพื้นผิวตอบสนอง AB จะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 พื้นผิวตอบสนอง AB

จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง AB สามารถวิเคราะห์ได้ว่า

ตัวแปร A

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสายป้อน (A) ตั้งแต่ 30-40 %wt ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสายป้อน (A) มากกว่า 40 %wt จะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นสายป้อนสูงเกินไป จะส่งผลให้สารละลายมีความหนืดมากขึ้นทำให้มีอนุภาคของแข็งไปเกาะที่ผนังของหอบแห้งมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง

ตัวแปร B

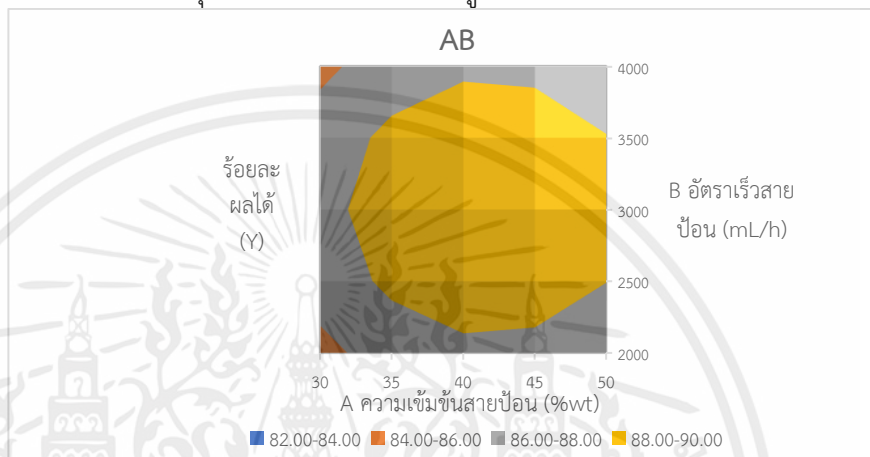
การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วสายป้อน (B) ตั้งแต่ 2,000-3,000 mL/h ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วสายป้อน (B) มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3000 mL/h จะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วสายป้อนที่มากเกินไป จะส่งผลให้การกระจายตัวของละอองฝอยในหอบบแห้งเกิดได้ไม่ดี จึงทำให้อัตราการระเหยน้ำออกจากสารละลายต่ำ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ผงจึงเหนียวติดที่ผนังหอบบแห้ง

ผลของ AB การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสายป้อน และการลดลงของอัตราเร็วสายป้อน ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง

จากนั้นสร้างกราฟ Contour ของ AB เพื่อให้อ่านค่า A และ B ที่ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้มากที่สุดได้แม่นยำขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 Contour plot AB

จากกราฟ Contour ของ AB จะเห็นว่า หากต้องการให้ได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ในช่วง 88-90 ต้องทำการทดลองที่ความเข้มข้นสายป้อน 35-50 %wt อัตราเร็วสายป้อน 2,500-3,500 mL/h

#### 4.2.2 พื้นผิวตอบสนองของ AC

ในการสร้างพื้นผิวตอบสนองของ AC ที่เกิดจากการสร้างสมการถดถอยของ AC โดยการตัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากสมการถดถอยแบบเต็ม (4.1) จะได้สมการถดถอยของ AC ดังสมการที่ 4.3

$$Y = 89.2 + 0.558A + 0.95C + 0.923AC - 1.411A^2 - 0.195C^2 \quad (4.3)$$

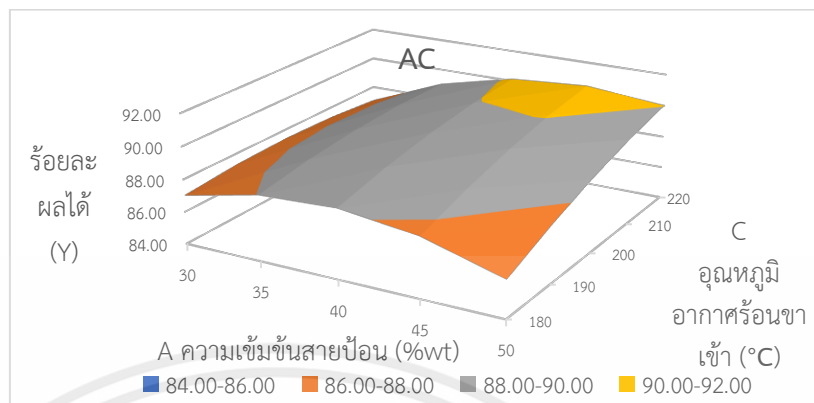
เมื่อนำค่า A และ C ในช่วงที่ทำการทดลอง แทนลงในสมการถดถอย AC จะได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร AC

A: ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)	C: อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)				
	180	190	200	210	220
30	87.01	87.31	87.42	87.34	87.06
35	88.03	88.56	88.90	89.05	89.01
40	88.25	89.01	89.58	89.96	90.15
45	87.66	88.66	89.46	90.07	90.49
50	86.28	87.51	88.54	89.38	90.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าร้อยละผลได้กับค่า A และ C ในตารางที่ 4.4 มาสร้างในรูปแบบกราฟ 3 มิติที่เรียกว่าพื้นผิวตอบสนอง AC จะได้ดังรูปที่ 4.3

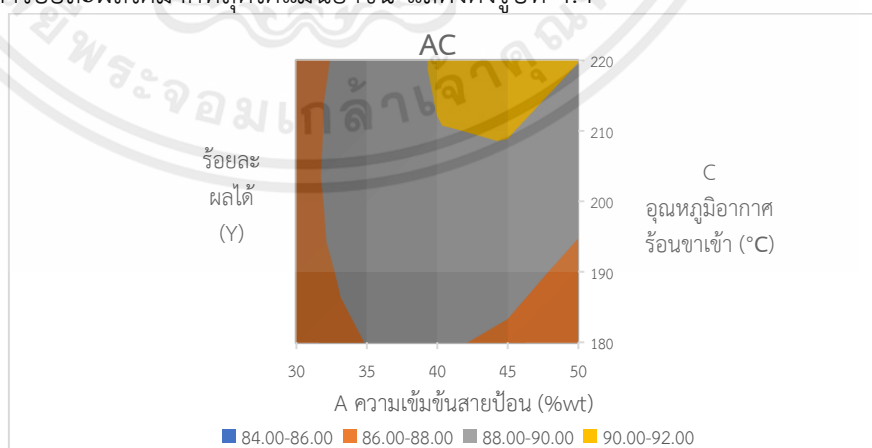


รูปที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนอง AC

จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง AC สามารถวิเคราะห์ได้ว่า  
ตัวแปร A การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสายป้อน (A) จะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสายป้อนมากกว่า 40 %wt ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นสายป้อนสูงเกินไป จะส่งผลให้สารละลายมีความหนืดมากขึ้นทำให้มีอนุภาคของแข็งไปเกาะที่ผนังของหอบแห้งมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง

ตัวแปร C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (C) ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้เพิ่มขึ้น (Y) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารและพลังงานความร้อน  
ผลของ AC การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสายป้อน และการลดลงของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง

จากนั้นสร้างกราฟ Contour ของ AC เพื่อให้อ่านค่า A และ C ที่ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้มากที่สุดได้แม่นยำขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 Contour plot AC

จากกราฟ Contour ของ AC จะเห็นว่า หากต้องการให้ได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ในช่วง 90-92 ต้องทำการทดลองที่ความเข้มข้นสายป้อน 40-50 %wt อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 220 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 พื้นผิวตอบสนองของ BC

ในการสร้างพื้นผิวตอบสนองของ BC ที่เกิดจากการสร้างสมการถดถอยของ BC โดยการตัดตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากสมการถดถอยแบบเต็ม (4.1) จะได้สมการถดถอยของ BC ดังสมการที่ 4.3

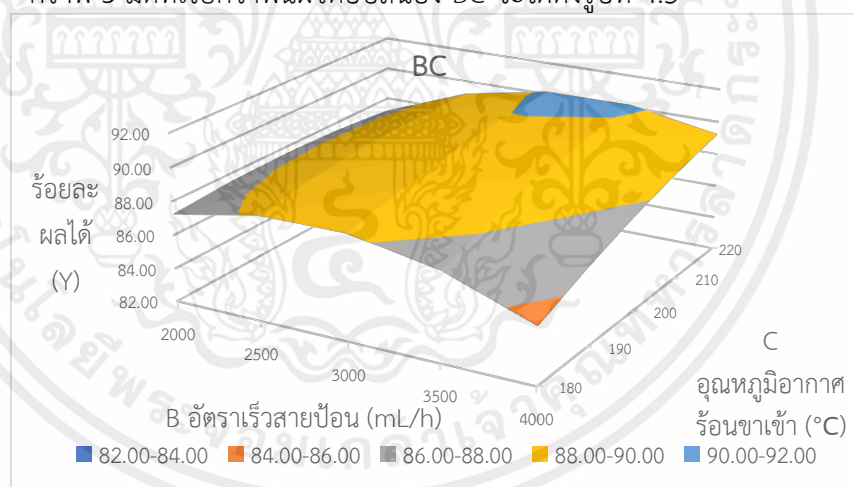
$$Y = 89.2 + 0.047B + 0.95C + 0.981BC - 1.940B^2 - 0.387C^2 \quad (4.3)$$

เมื่อนำค่า B และ C ในช่วงที่ทำการทดลอง แทนลงในสมการถดถอย BC จะได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร BC

B: อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)	C: อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)				
	180	190	200	210	220
2,000	87.24	87.52	87.60	87.48	87.18
2,500	88.23	88.75	89.07	89.21	89.15
3,000	88.25	89.01	89.58	89.96	90.15
3,500	87.29	88.30	89.12	89.75	90.18
4,000	85.37	86.63	87.69	88.56	89.23

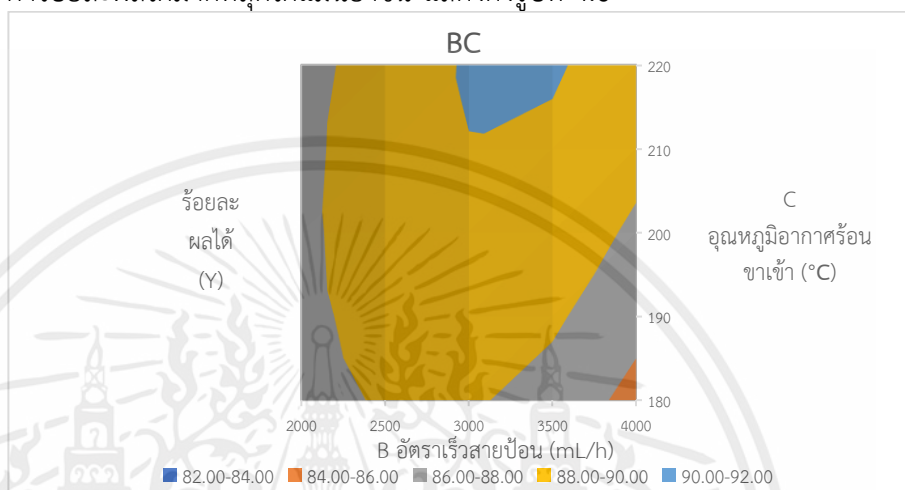
เมื่อนำค่าร้อยละผลได้กับค่า B และ C ในตารางที่ 4.5 มาสร้างในรูปแบบกราฟ 3 มิติที่เรียกว่าพื้นผิวตอบสนอง BC จะได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนอง BC

จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง BC สามารถวิเคราะห์ได้ว่า  
 ตัวแปร B การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วสายป้อน (B) ตั้งแต่ 2,000-3,000 mL/h จะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วสายป้อน (B) มากกว่า 3,000 mL/h จะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วสายป้อนที่มากเกินไป จะส่งผลให้การกระจายตัวของละอองฝอยในหอบแห้งเกิดได้ไม่ดี จึงทำให้อัตราการระเหยน้ำออกจากสารละลายต่ำ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ผงจึงเหนียวติดที่ผนังหอบแห้ง

- ตัวแปร C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (C) ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารและพลังงานความร้อน
- ผลของ BC การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วสายป้อน (B) และการลดลงของอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า (C) ส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ลดลง
- จากนั้นสร้างกราฟ Contour ของ BC เพื่อให้อ่านค่า B และ C ที่ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้มากที่สุดได้แม่นยำขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Contour plot BC

จากกราฟ Contour ของ BC จะเห็นว่า หากต้องการให้ได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) ในช่วง 90-92 ต้องทำการทดลองที่อัตราเร็วสายป้อน 3,000-3,500 mL/h อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 220 °C

#### 4.2.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition)

การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การหาสภาวะที่ทำการทดลองของทั้ง 3 ตัวแปรซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นสายป้อน (A) อัตราเร็วสายป้อน (B) และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (C) ที่ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) มากที่สุด ซึ่งค่าร้อยละผลได้สามารถคำนวณได้จากการแทนค่าทั้ง 3 ตัวแปร คือ A B และ C ลงในสมการถดถอยแบบเต็มจากสมการที่ 4.1 จะได้ค่าร้อยละผลได้แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ (Y) และตัวแปร ABC

A: ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)	B: อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)	C: อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)				
		180	190	200	210	220
30	2,000	86.00	85.82	85.43	84.86	84.09
35	2,500	88.01	88.30	88.39	88.30	88.01
40	3,000	88.25	89.01	89.58	89.96	90.15
45	3,500	86.71	87.95	89.00	89.58	90.52
50	4,000	83.40	85.12	86.65	87.98	89.11

เนื่องจากไม่สามารถสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองของตัวแปร ABC ได้ ทำให้ไม่สามารถดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ABC ที่ส่งผลต่อค่า Y ได้ ดังนั้นจึงหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองได้จากตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นสายป้อน 45 %wt อัตราเร็วสายป้อน 3,500 mL/h และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 220 °C จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ (Y) มากที่สุดอยู่ที่ 90.52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ ความเข้มข้นสายป้อน อัตราเร็วสายป้อน และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบพหุคูณตอบสนองโดยใช้เทคนิคบล็อกซ์-เบห์นเคนและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าร้อยละผลได้อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ผลกระทบของตัวแปรร่วมระหว่างความเข้มข้นสายป้อนกับอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า และผลกระทบของตัวแปรร่วมระหว่างอัตราเร็วสายป้อนกับอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า

จากกราฟพหุคูณตอบสนองสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะแปรผันตรงกับค่าร้อยละผลได้ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสายป้อนร่วมกับการลดลงของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วสายป้อนร่วมกับการลดลงของอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าจะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ลดลง

จากสมการถดถอยสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองคือ ความเข้มข้นสายป้อน 45 %wt อัตราเร็วสายป้อน 3,500 mL/h และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 220 °C จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้มากที่สุดอยู่ที่ 90.52

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรนำผงมอลโตเดกซ์ตรินที่ได้หลังจากการอบแห้งแล้วไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เช่น สี ขนาดอนุภาค ความชื้น เป็นต้น เนื่องจากในขณะทำการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองในสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้สีของมอลโตเดกซ์ตรินหลังการอบแห้งเหลืองขึ้น และจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองความละเอียดของมอลโตเดกซ์ตรินหลังการอบแห้งไม่เหมือนกัน

5.2.2 สำหรับการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นสูง (>40%wt) ควรจะล้างหัวอะตอมไมเซอร์ด้วยน้ำร้อนหลังการใช้งานเสมอ เนื่องจากสารละลายที่ความเข้มข้นสูงอาจจะทำให้หัวอะตอมไมเซอร์ตันได้

5.2.3 สำหรับการเปิดอากาศที่ใช้ในการพ่นฝอยที่หัวอะตอมไมเซอร์ควรเปิดพร้อมกันกับสารป้อนที่กำลังจะไหลเข้าสู่หัวอะตอมไมเซอร์ เนื่องจากการเปิดให้อากาศเข้าไปที่หัวอะตอมไมเซอร์ก่อนสารละลาย อาจจะทำให้อากาศดันเข้าไปในสายป้อนสารละลาย ซึ่งจะส่งผลให้สารละลายไม่สามารถไหลไปยังหัวอะตอมไมเซอร์ได้

## บรรณานุกรม

- [1] คณิตนันท์ เอชัน. “การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่อคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลมะพร้าวผง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2557.
- [2] ชญานิศ มั่นตาติลก, ธนัชพร มังคลาด และ ภัทรภร กระแสร์ภูกิจ. “การกักเก็บสีจากกระเจี๊ยบโดยใช้มอลโตเดกซ์ตริน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [3] ญัฐภูมิ เครือพงษ์ศักดิ์, จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และ ชลิตา เนียมมัญญ์. “อิทธิพลของสภาวะในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของผงชิริชินจากน้ำตาลมรั้งไหมพันธุ์ดั้งเดิมของไทย.” วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น., ปีที่ 16, ฉบับที่ 7 (2554): หน้า 813-824
- [4] นพรัตน์ หล้าคำ และ ลิดา สิมะสาธิตกุล. “การปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับห้องปฏิบัติการ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [5] นิรนาม. “มอลโตเดกซ์ตริน.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSEpGre2OCi2LM9hHWB8WoWubpClxl\\_yAgzpoH00J4FKsrAOU\\_0jVh1DGJbubGfaBm6qk&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSEpGre2OCi2LM9hHWB8WoWubpClxl_yAgzpoH00J4FKsrAOU_0jVh1DGJbubGfaBm6qk&usqp=CAU). (2023)
- [6] ปิยวรรณ ใจเบิกบาน. “การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเส้นใยอาหารจากเปลือกทุเรียนโดยใช้วิธีพื้นผิวดอบสนอง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562
- [7] พิไลรัก อินธิปัญญา และ ธนกิจ ถาหมี. “ผลของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพน้ำหมอนผสมน้ำผึ้งชนิดผง.” วารสารวิชาการเกษตร., ปีที่ 32, ฉบับที่ 2 (2557): หน้า 139-153
- [8] โพธิ์ทอง ปราณิตพลกรัง. “เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร” วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย., ฉบับที่ 12 (2563): หน้า 347-361
- [9] วสันต์ ต้วงคำจันทร์. “ปัจจัยในการทำงานที่สำคัญสำหรับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย: กรณีศึกษากระเจี๊ยบผง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2546.
- [10] ศศิมา เรื่องมนัสสุทธิ, หทัยชนก วาณิชเจริญทรัพย์ และ ญฐกฤช จารุวัฒนาสกุล. “ผลของอุณหภูมิอากาศเข้าและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินต่อคุณภาพของแก้วมังกรผงโดยวิธีการอบแห้ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [11] สโรบล สโรชวิกสิต และ ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี. “ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและสารช่วยอบแห้งต่อคุณภาพผงโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย.” วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี., ฉบับที่ 34, หน้า 203-215

- [12] Irwin C. J. “Chapter 5 – Atomization and Spray-Drying Processes.” *Microencapsulation in the Food Industry*, (2014): p.47-56
- [13] Karin K. “Using the Response Surface Method to Optimize the Turning Process of AISI 12L14 Steel.” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Box-Behnken-design-for-three-factors\\_fig2\\_50283811](https://www.researchgate.net/figure/Box-Behnken-design-for-three-factors_fig2_50283811). (2015)
- [14] K. Masters. *Spray Drying*. London: Leonard hill Books. 1972.
- [15] Michael JK. “Spray drying and spray congealing of pharmaceuticals.” *Encyclopedia of pharmaceutical technology*, vol.14 (1993): p.207-221
- [16] Mahboubeh Fazaeli, Zahra Emam-Djomeh, Ahmad Kalbasi Ashtari and Mahmoud Omid. “Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308512000326?via%3Dihub>. (2012)
- [17] Maskat M.Y. et.al. “Temperature and Feed Rate Effects Properties of Spray Dried Hibiscus Sabdariffa Powder” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/286349250\\_Temperature\\_and\\_Feed\\_Rate\\_Effects\\_Properties\\_of\\_Spray\\_Dried\\_Hibiscus\\_sabdariffa\\_Powder](https://www.researchgate.net/publication/286349250_Temperature_and_Feed_Rate_Effects_Properties_of_Spray_Dried_Hibiscus_sabdariffa_Powder). (2014)
- [18] Mohammad Rezaul Islam Shishir and Wei Chen. “Trends of sprays drying: A critical review on drying of fruit and vegetables juices.” *Trends in Food Science & Technology*, 65 (2017): p.49-67
- [19] Ozemen, L. and Langrish, T.A.G. “Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder” *Drying Technology*, vol.20 (2002): p.1177- 1192
- [20] Ramesh Sharma. “Optimization of spray-drying conditions using response surface methodology, physico-chemical characterization and shelf-life estimation of pineapple powder.” [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/fb/d3fb00008g>. (2023)
- [21] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery and Christine M. Anderson-cook. *Response Surface Methodology*. 3<sup>rd</sup> ED. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [22] Renata V. Tonon, Catherine Brabet and Miriam D. Hubinger. “Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai powder produced by spray drying.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877408001179?via%3Dihub>. (2008)

[23] Siew Young,Q. et.al. “The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders” **Chemical Engineering and Processing**, vol.46 (2007): p.386-392.

[24] Soloman Worku K. “Application of Response Surface Methodology in Food Process Modeling and Optimization.” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Graphical-presentation-of-3D-surface-a-and-contour-plot-b-where-there-is-a-maximum\\_fig3\\_355043712](https://www.researchgate.net/figure/Graphical-presentation-of-3D-surface-a-and-contour-plot-b-where-there-is-a-maximum_fig3_355043712). (2021)

[25] Viviane S. Birchal, M. Laura Passos, Gloria R. S. Wildhagen and Arun. S. Mujumdar. “The influence of spray dryer operation variables on milk powder quality.” **Mechanical Engineering, Federal university of Minas Gerais**, (2004)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง

จำนวนการทดลอง	ความเข้มข้นสายป้อน (%wt)	อัตราเร็วสายป้อน (mL/h)	อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินก่อนอบ (g)	ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินหลังอบ (g)	ร้อยละผลได้ (%Yield)
1	50	4,000	200	250*	215.2	86.08
2	50	2,000	200	250*	216.2	86.48
3	30	4,000	200	300	256.8	85.60
4	30	2,000	200	300	258	86.00
5	50	3,000	220	500	450.5	90.10
6	50	3,000	180	250	217.1	86.84
7	30	3,000	220	300	259.5	86.50
8	30	3,000	180	300	260.8	86.93
9	40	4,000	220	400	358.9	89.73
10	40	4,000	180	400	341.5	85.38
11	40	2,000	220	400	348.7	87.18
12	40	2,000	180	400	347	86.75
13	40	3,000	200	400	356.8	89.20
14	40	3,000	200	400	359.8	89.95
15	40	3,000	200	400	358.4	89.60

\* หมายเหตุ เมื่อป้อนสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงในปริมาณมากจะทำให้หัวฉีดอะตอมไมเซอร์เกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงลดปริมาณสารป้อนลง

ภาคผนวก ข.  
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการศึกษากับค่าร้อยละผลได้

SUMMARY OUTPUT								
<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.98028328							
R Square	0.96095532							
Adjusted R Square	0.86334361							
Standard Error	0.63160029							
Observations	15							
ANOVA								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>			
Regression	10	39.2722614	3.92722614	9.84467252	0.02058881			
Residual	4	1.59567568	0.39891892					
Total	14	40.867937						
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	89.583	0.36465459	245.666268	1.6471E-09	88.5708899	90.5957768	88.5708899	90.5957768
A	0.558	0.22330442	2.50032367	0.06674345	-0.0616591	1.1783258	-0.0616591	1.1783258
B	0.047	0.22330442	0.20991523	0.84399233	-0.5731175	0.66686747	-0.5731175	0.66686747
C	0.950	0.22330442	4.25521503	0.01310347	0.33021586	1.5702008	0.33021586	1.5702008
AB	0.000	0.31580014	1.1669E-14	1	-0.8768018	0.87680176	-0.8768018	0.87680176
AC	0.923	0.31580014	2.92379011	0.04308003	0.04653157	1.80013509	0.04653157	1.80013509
BC	0.981	0.31580014	3.10718669	0.03596974	0.10444824	1.85805176	0.10444824	1.85805176
ABC	0.000	0	65535	-	0	0	0	0
A <sup>2</sup>	-1.603	0.32869521	-4.8772387	-	-2.5157292	-0.6905208	-2.5157292	-0.6905208
B <sup>2</sup>	-1.940	0.32869521	-5.9027582	0.00412182	-2.8528125	-1.0276041	-2.8528125	-1.0276041
C <sup>2</sup>	-0.387	0.32869521	-1.1770022	0.30444985	-1.2994792	0.52572921	-1.2994792	0.52572921

ภาคผนวก ค.  
ภาพผลิตภัณฑ์ผงหลังการอบ



รูปที่ ค.1 มอลโตเดคซ์ตรินหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ ค.2 มอลโตเดคซ์ตรินหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้