

ผลของสภาวะการดำเนินงานต่อการกระจายตัวของโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/
มอลโตเดกซ์ตรินที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of process conditions on the dispersion of protein on spray dried protein/
maltodextrin powder surface

Miss Suttiluck Siripornlert



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสภาวะการดำเนินงานต่อการกระจายตัวของ
โปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ได้จากการ
อบแห้งแบบพ่นฝอย
โดย นางสาวสุทธิลักษณ์ ศิริพรเลิศ
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปารวี วาสน์อำนวย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อรุษา รักรัตนันทชัย)

สุทธิลักษณ์ ศิริพรเลิศ : ผลของสภาวะการดำเนินงานต่อการกระจายตัวของโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Effects of process conditions on the dispersion of protein on spray dried protein/maltodextrin powder surface) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช, 100 หน้า.

การห่อหุ้มมอลโตเดกซ์ด้วยโปรตีนถูกศึกษาด้วยการเปลี่ยนโปรตีน 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมคาร์ซิเนต โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และ เจลาติน และผลิตผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาการกระจายตัวของขนาด และรูปร่าง ร้อยละผลได้ ปริมาณของโปรตีนบนผิว อัตราเร็วในการดูดความชื้นในอากาศของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยปริมาณโปรตีนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS แสดงให้เห็นว่าโปรตีนแต่ละชนิดนั้นให้ปริมาณของโปรตีนบนผิวที่แตกต่างกันซึ่งมีผลมาจากจำนวนและขนาดขององค์ประกอบของโปรตีนที่มีไม่เท่ากัน โดยขนาดของโปรตีนเป็นปัจจัยหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแพร่หรือถูกพาโปรตีนไปปกคลุมที่ผิวของอนุภาคได้มากและน้อยแตกต่างกัน และความเข้มข้นของโปรตีนที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มโอกาสให้โปรตีนเคลื่อนที่ไปยังผิวของอนุภาคได้มากขึ้น แต่ทั้งนี้สภาวะดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนบนผิว โดยอัตราการระเหย (drying rate) ส่งผลต่อการลดขนาดของหยดสารละลายและรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำซึ่งการลดขนาดของรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำเร็วหรือช้าส่งผลต่อปริมาณโปรตีนจะมาสามารถจากภายในหยดสารละลายที่จะเคลื่อนที่ออกไปยังรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำได้มากหรือน้อย แต่ถึงแม้ว่าการมีโปรตีนปกคลุมที่บนผิวของอนุภาคนั้นจะไม่ได้ช่วยลดอัตราการดูดซับความชื้นในอากาศได้แต่การมีอยู่ของโปรตีนนั้นสามารถที่จะช่วยชะลอการเกาะกันของอนุภาคลงได้ เนื่องจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ผิวมีค่าสูงขึ้นดังนั้นผงที่ผลิตได้จึงสามารถยืดอายุการใช้งานออกไปได้

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770331221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SPRAY DRYING / ENCAPSULATION / MALTODEXTRIN / PROTEIN / SODIUM CASEINATE / SOY PROTEIN ISOLATE / GELATIN / HYGROSCOPICITY

SUTTILUCK SIRIPORNLEERT: Effects of process conditions on the dispersion of protein on spray dried protein/maltodextrin powder surface. ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., 100 pp.

Encapsulation of Maltodextrin by protein was studied with changing three types of protein, sodium caseinate, soy protein isolate and gelatin, and produce powder by using spray dryer in different conditions. After that studying size distribution and morphology, yield, amount of protein on surface and hygroscopicity of protein/maltodextrin powder. Quantity of protein on surface was analyzed by X-ray Photoelectron Spectroscopy. XPS showed that each proteins type can provide proteins quantity at surface at different level which is depended on amount and size of composition. The size of protein can show the ability of diffusion or convection of protein. The increasing of protein concentration also increase the opportunity for protein to move on particle surface. The operating condition is the factor that affect on protein quantity. Drying rate effected to decreasing of size of droplet and air-water interface. The decreasing of size of air-water interface, fast or slow, affect to migration of the protein from inside of the droplet to the air and water interface more or less. But even if the protein covering the surface of the particles cannot reduce the hygroscopic rate, but the presence of a protein that can help slow down the cohesiveness of the particles because the glass transition temperature of the surface is higher up the powder, it can prolong the lifetime away.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากหลายๆฝ่าย ท่านแรกข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช ผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆรวมถึงแนวทางการทำโครงการมาโดยตลอด ทำให้โครงการนี้เป็นรูปเป็นร่างขึ้นมา และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ทั้งนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล อาจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวยการ และ ดร.อรุชา รักษาพันธ์ชัย ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบุพการีของข้าพเจ้าที่ช่วยสนับสนุน เข้าใจ และให้กำลังใจด้วยดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา อีกทั้ง น.ส นฤพร สงวนทรัพย์ากร น.ส ภารดา จึงสุระ และเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้ข้าพเจ้ากลับมามีความมุ่งมั่นอีกครั้ง

ขอบคุณครอบครัว CEPT อาจารย์ทุกท่าน พี่ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและเป็นเพื่อน เป็นพี่ที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการ "ทุนพัฒนาศักยภาพการวิจัยเชิงสถาบันของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย" จากสำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย สัญญาเลขที่ IRG 5780014 และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รหัสประกาศ RES_57_411_21_076

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การกักเก็บสาร (Encapsulation).....	5
2.2 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer).....	5
2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	6
2.2.2 การถ่ายโอนความร้อนและมวล.....	7
2.2.3 หัวฉีด (Atomizer).....	10
2.2.3.1 Two - fluid atomizer.....	10
2.2.3.2 หัวฉีดแรงดันสูง (Pressure atomizer).....	11
2.2.3.3 หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง (Centrifugal atomizer).....	12
2.2.4 ทิศทางการไหลของอากาศร้อน.....	12
2.2.4.1 การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current flow).....	12

2.2.4.2 การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow).....	13
2.2.4.3 การไหลแบบผสม (Mixed flow).....	14
2.2.5 ข้อจำกัดของการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับการกักเก็บอาหาร	14
2.3 คุณสมบัติของผง	15
2.3.1 ความเหนียวเหนอะ (Stickiness).....	15
2.3.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg).....	16
2.4 สารห่อหุ้ม (Wall Material)	16
2.4.1 มอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin).....	18
2.4.1.1 คุณสมบัติในการดูดความชื้นในอากาศได้ดี (Hygroscopicity).....	18
2.4.1.2 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE).....	18
2.4.2 โปรตีน (Protein)	19
2.4.2.1 โครงสร้างของโปรตีน.....	19
2.4.2.2 การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Denaturation of Proteins)...	21
2.4.2.3 โซเดียมเคอซีเนต (Sodium Caseinate).....	22
2.4.2.4 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (Soy Protein Isolate).....	23
2.4.2.5 เจลาติน (Gelatin)	24
2.4.2.6 การใช้โปรตีนในการกักเก็บสาร	25
2.5 โปรตีนบนผิวของอนุภาคหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	26
2.6 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)	28
2.6.1 หลักการทำงาน.....	28
2.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่อง XPS.....	31
2.6.3 ปริมาณการปกคลุมของโปรตีนบนผิวของอนุภาค	32

2.6 กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism).....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.2 วิธีการทดลอง.....	34
3.2.1 การเตรียมสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน.....	34
3.2.2 การเตรียมอนุภาคจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	34
3.3 การวิเคราะห์สาร.....	35
3.3.1 ร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	35
3.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักมวลโมเลกุลของโปรตีน	36
3.3.3 การวิเคราะห์ความหนืดของสารละลาย	38
3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของอนุภาค	39
3.3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบบนผิวของอนุภาค	39
3.3.6 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศ (Hygroscopicity).....	40
3.3.7 การวิเคราะห์รูปร่างและพื้นผิวของอนุภาค.....	40
3.3.8 การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	42
4.1 อิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของโปรตีนที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	42
4.1.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน.....	42
4.1.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	48
4.1.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน.....	50

4.1.4	อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	52
4.1.5	อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	55
4.2	อิทธิพลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	57
4.2.1	อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	57
4.2.1.1	อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	57
4.2.1.2	อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	62
4.2.1.3	อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	63
4.2.1.4	อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	64
4.2.1.5	อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	67
4.2.2	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	69
4.2.2.1	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	69
4.2.2.2	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	72

4.2.2.3	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	73
4.2.2.4	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	74
4.2.2.5	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	76
4.2.3	อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	77
4.2.3.1	อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	77
4.2.3.2	อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	81
4.2.3.3	อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	81
4.2.3.4	อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	82
4.2.3.5	อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	85
บทที่ 5	สรุปผลงานวิจัย	88
5.1	สรุปผลงานวิจัย	88
5.1.1	อิทธิพลที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	88
5.1.2	อิทธิพลที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	88
5.1.3	อิทธิพลที่ส่งผลต่อร้อยละโปรตีนบนผิวของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน	88

5.1.4 อิทธิพลที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศของผงมอลโตเดกซ์ตริน/ โปรตีน.....	89
5.1.5 อิทธิพลที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงมอลโตเดกซ์ ตริน/โปรตีน	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้.....	89
5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งถัดไป.....	89
รายการอ้างอิง	90
ผนวก ก.....	95
ก.1 ตัวอย่างการคำนวณมวลโมเลกุลของโปรตีน.....	95
ก.2 ตัวอย่างการคำนวณ Pore diffusion model	97
ก.3 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณของโปรตีนบนผิวและภายในของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ ตริน.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	100

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer)	6
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	7
รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายโอนความร้อน มวล และกระบวนการแข็งตัวในการอบแห้งแบบพ่นฝอย .8	
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา.....	9
รูปที่ 2.5 Two-fluid atomizer	11
รูปที่ 2.6 Pressure atomizer	11
รูปที่ 2.7 Centrifugal atomizer.....	12
รูปที่ 2.8 การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current flow)	13
รูปที่ 2.9 การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow)	13
รูปที่ 2.10 การไหลแบบผสม (Mixed flow).....	14
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่า DE กับคุณสมบัติอื่นๆ.....	19
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีน.....	20
รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน	20
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างตติยภูมิของโปรตีน.....	21
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างจตุรภูมิของโปรตีน	21
รูปที่ 2.16 แสดงการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน	22
รูปที่ 2.17 โซเดียมคาร์ซิเนต	23
รูปที่ 2.18 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	23
รูปที่ 2.19 เจลาติน.....	24
รูปที่ 2.20 องค์ประกอบและมวลโมกุลของเจลาติน.....	25
รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของโปรตีนและมอลโตเดกซ์ทรินบนผิวของอนุภาค	27

รูปที่ 2.22 X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS	28
รูปที่ 2.23 แผนผังกระบวนการทำงานของ XPS.....	29
รูปที่ 2.24 ภาพจำลองการปฏิสัมพันธ์ของรังสีเอ็กซ์เรย์กับอิเล็กตรอนในอะตอม	30
รูปที่ 2.25 ภาพการสูญเสียพลังงานจลน์ของโฟโตโฟโตอิเล็กตรอน.....	30
รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น B-290	35
รูปที่ 3.2 SDS-Page.....	38
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหนืด รุ่น SV-10.....	38
รูปที่ 3.4 Halogen moisture balance	39
รูปที่ 3.5 X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS	39
รูปที่ 3.6 Oven.....	40
รูปที่ 3.7 Scanning Electron Microscope, SEM.....	40
รูปที่ 3.8 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer.....	41
รูปที่ 4.1 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของผงโซเดียมคาร์ซีเนต / มอลโตเดกซ์ตริน.....	43
รูปที่ 4.2 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของผงโปรตีนถั่วเหลืองสกัด/ มอลโตเดกซ์ตริน.....	44
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของผงเจลาติน/ มอลโตเดกซ์ตริน	44
รูปที่ 4.4 รูปร่างของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์.....	45
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตริน	46
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลืองสกัด/มอลโตเดกซ์ตริน.....	47
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน.....	48

รูปที่ 4.8 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	49
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อค่าความหนืดของสารละลายของมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนทั้ง 3 ชนิด.....	50
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนบนผิวของอนุภาค 51	
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาของ MD:Na-C	52
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาของ MD:SPI	53
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาของ MD:G	53
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดความชื้นและความชื้นต่างๆ.....	54
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับความชื้นกับความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน.....	54
รูปที่ 4.16 อิทธิพลจากความเข้มข้นของโปรตีนที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิว	56
รูปที่ 4.17 อิทธิพลจากความเข้มข้นของโปรตีนที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิว	56
รูปที่ 4.18 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์.....	57
รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/โซเดียมคาร์ซิเนต	58
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	58
รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/เจลาติน	59

รูปที่ 4.22 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคมอลต์เดกซ์ ตริน.....	60
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโซเดียมคาร์ซิเนต / มอลต์เดกซ์ตริน.....	60
รูปที่ 4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลือง สกัด/มอลต์เดกซ์ตริน	61
รูปที่ 4.25 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลาติน /มอลต์ เดกซ์ตริน	61
รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน /มอลต์ เดกซ์ตริน	62
รูปที่ 4.27 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อร้อยละของโปรตีนบนผิวของผง โซเดียมคาร์ซิเนต/มอลต์เดกซ์ตริน	63
รูปที่ 4.28 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลา ต่างๆของมอลต์เดกซ์ตรินบริสุทธิ์	64
รูปที่ 4.29 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลา ต่างๆของโซเดียมคาร์ซิเนต.....	65
รูปที่ 4.30 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลา ต่างๆของโปรตีนถั่วเหลือง	65
รูปที่ 4.31 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลา ต่างๆของเจลาติน	66
รูปที่ 4.32 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นในผงโปรตีน /มอล ต์เดกซ์ตริน.....	66
รูปที่ 4.33 อิทธิพลจากอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้าย แก้ว.....	68
รูปที่ 4.34 อิทธิพลจากอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับ อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิว.....	68

รูปที่ 4.35 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/ โซเดียมคาร์ซิเนต	69
รูปที่ 4.36 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	70
รูปที่ 4.37 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน /เจลาติน	70
รูปที่ 4.38 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโซเดียมคาร์ซิเนต /มอลโต เดกซ์ตริน	71
รูปที่ 4.39 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลืองสกัด /มอล โตเดกซ์ตริน.....	71
รูปที่ 4.40 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลาติน/มอลโตเดกซ์ ตริน.....	72
รูปที่ 4.41 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ ตริน.....	73
รูปที่ 4.42 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อร้อยละของโปรตีนบนผิวของผงโปรตีน /มอล โตเดกซ์ตริน.....	73
รูปที่ 4.43 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของ โซเดียมคาร์ซิเนต.....	74
รูปที่ 4.44 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	74
รูปที่ 4.45 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของเจ ลาติน	75
รูปที่ 4.46 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ ตริน.....	75
รูปที่ 4.47 อิทธิพลจากอัตราการป้อนสารที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว ...	76
รูปที่ 4.48 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิ การเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (T-Tg).....	77

รูปที่ 4.49 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน / โซเดียมคาร์ซิเนต	78
รูปที่ 4.50 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/ โพรตีนถั่วเหลืองสกัด	78
รูปที่ 4.51 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/เจลาติน	79
รูปที่ 4.52 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโซเดียมคาร์ซิเนต/มอลโตเดกซ์ตริน.....	79
รูปที่ 4.53 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลืองสกัด /มอลโตเดกซ์ตริน	80
รูปที่ 4.54 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน ...	80
รูปที่ 4.55 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน ...	81
รูปที่ 4.56 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อร้อยละของโปรตีนบนผิวของผงโปรตีน /มอลโตเดกซ์ตริน	82
รูปที่ 4.57 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของโซเดียมคาร์ซิเนต.....	82
รูปที่ 4.58 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	83
รูปที่ 4.59 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของเจลาติน	83
รูปที่ 4.60 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน.....	84
รูปที่ 4.61 อิทธิพลจากปริมาณลมร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว	85
รูปที่ 4.62 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (T-Tg).....	85
รูปที่ 4.63 การเคลื่อนที่ของโปรตีนที่เคลื่อนที่จากของเหลวไปยังผิวของอนุภาค.....	86

รูปที่ 4.64 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เดกซ์ตริน87



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารหล่อหุ้มที่ถูกนำมาใช้ในการกักเก็บสาร	16
ตารางที่ 2.2 สารหล่อหุ้มที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2.3 แสดงมวลโมกุลของโปรตีนหมู่ย่อยในโซเดียมคาร์ซิเนต	23
ตารางที่ 2.4 แสดงมวลโมกุลของโปรตีนหมู่ย่อยในโปรตีนถั่วเหลืองสกัด	24
ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบที่ผิวของอนุภาคนมผงชนิดต่างๆหลังจากสกัดไขมันที่ผิวออกด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง.....	26
ตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและค่าการแพร่ขององค์ประกอบในนม.....	27
ตารางที่ 2.8 แสดงค่าร้อยละการปกคลุมของโปรตีนบนผิวของอนุภาค.....	32
ตารางที่ 3.1 ชนิดของโปรตีนและอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย	34
ตารางที่ 3.2 สภาวะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ในการผลิตอนุภาค	35
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผงมอลโตเดกซ์ตรินต่อโปรตีนที่อัตราส่วนและชนิดต่างๆ.....	43
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ ตริน.....	51
ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วและความแตกต่างความจุความร้อน จำเพาะของสารประกอบ	55
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวของผงโซเดียมคาร์ซิเนต/มอลโต เดกซ์ตรินที่อุณหภูมิต่างๆ	63
ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าต่างๆ	67
ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศที่อัตราการป้อนต่างๆ.....	76
ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศที่ปริมาณลมร้อนต่างๆ	84
ตารางที่ 4.8 แสดงสัดส่วนของโปรตีนที่ผิวและภายในของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมอาหารนั้นได้มีการแปรรูปวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลปริมาณสูงให้อยู่ในรูปของผงเพื่อให้ผู้บริโภคนั้นสามารถใช้ได้สะดวกมากขึ้น[1] แต่ในการผลิตผงจากวัตถุดิบที่มีปริมาณของน้ำตาลสูงโดยตรงนั้นสามารถทำได้ยาก เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านั้นโดยส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยน้ำตาลฟรุคโตส กลูโครส หรือ ซูโครสในปริมาณสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเพราะมีความเหนียวเหนอะสูง ยกตัวอย่างเช่นน้ำผลไม้หรือน้ำผึ้ง อีกทั้งสารประกอบจำพวกน้ำตาลนั้นยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีอีกด้วย[2]

วิธีการเปลี่ยนสารละลายของเหลวให้กลายเป็นอนุภาคของแข็งมี 2 วิธีหลัก คือ การทำให้แห้ง(drying) และการตกผลึก(crystallization) โดยคุณสมบัติต่างๆของอนุภาคนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ผลิตและสถานะในระหว่างการก่อตัวของอนุภาค เช่น ขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาค ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของอนุภาค และความหนาแน่นของอนุภาค ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อคุณสมบัติของอนุภาคที่นำไปใช้งาน เช่นความสามารถในการไหลตัว ความสามารถในการกอดอัด ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาค ความหนาแน่นของผงเมื่อบรรจุในบรรจุภัณฑ์ และความง่ายต่อการจัดการในการขนส่ง เป็นต้น โดยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหล่านี้จะถูกทำให้แย่งลง เมื่อผงผลิตภัณฑ์นั้นดูดความชื้นมากขึ้น[3]

วิธีการตกผลึกนั้นเป็นอีกหนึ่งวิธีในการผลิตผลิตภัณฑ์แบบผง แต่วิธีการตกผลึกไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตนั้นต้องทำการเตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้นที่อิมิตัวยิ่งยวด พร้อมทั้งลดอุณหภูมิหรือระเหยตัวทำละลายออก[3, 4] แต่ท้ายที่สุดรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นของของแข็งผสมกับของเหลวซึ่งปัญหานี้เกิดจากความหนืดและความเหนียวเหนอะของวัตถุดิบนั้นสูงมาก[5, 6] ดังนั้นวิธีการอบแห้งจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ โดยในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ในการผลิตอนุภาคของแข็งจากสารละลายเนื้อเดียว สารแขวนลอย หรือ อิมัลชันได้ โดยเทคนิคนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมอาหาร ยา หรือเวชภัณฑ์ต่างๆ

การกักเก็บสาร (Encapsulation) เป็นทางแก้ปัญหาทางหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบผงจากวัตถุดิบที่มีปริมาณของน้ำตาลสูงได้โดยผงผลิตภัณฑ์นั้นจะถูกผลิตจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการกักเก็บสารนั้น คือ การนำสารประกอบชนิดหนึ่งห่อหุ้มอีกชนิดหนึ่งไว้เพื่อทำการกักเก็บสารที่ต้องการเก็บรักษาไว้ภายในอนุภาคเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น [7] โดยสารที่ใช้ในการห่อหุ้ม (Wall Material) นั้นจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถูกห่อหุ้ม (Core Material) โดยสารห่อหุ้มจะเป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน หรือแม้กระทั่งไขมันก็สามารถนำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มได้ โดยส่วนใหญ่นิยมเลือกคาร์โบไฮเดรตมาใช้เป็นสารห่อหุ้ม

มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้มที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร [8-10] โดยมอลโตเดกซ์ตรินนั้นสามารถที่จะช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดปริมาณความชื้นภายในอนุภาคได้และเมื่อเพิ่มปริมาณของมอลโตเดกซ์ตรินก็ยังมีประสิทธิภาพมากขึ้น [11] แต่ในการกักเก็บสารให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นต้องใช้มอลโตเดกซ์ตรินในปริมาณที่มากซึ่งอาจจะทำให้มีผลกระทบต่อรสชาติ [12, 13] และมอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีความสามารถในการดูดซับความชื้นในอากาศ (Hygroscopicity) ได้ดี ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของมอลโตเดกซ์ตรินให้มากขึ้นก็ทำให้ผงนั้นสามารถดูดซับความชื้นในอากาศได้มากขึ้น [14] ทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นเสื่อมสภาพได้ง่าย และในการเลือกใช้มอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE) สูงๆ จะพบว่าปริมาณผงของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นจะมีค่าร้อยละผลได้ต่ำลงและอนุภาคมีปริมาณน้ำสูงขึ้น [2] ซึ่งคุณสมบัติของมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE สูงๆ ค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นในอากาศนั้นจะสูงขึ้นด้วยซึ่งผลที่ตามมาคืออนุภาคจะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและเหนียวเหนอะ ซึ่งจะเป็นปัญหาสำหรับการจัดเก็บและอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่สั้นลง

ในปัจจุบันสารประกอบจำพวกโปรตีนถูกนำมาใช้เพื่อช่วยให้การผลิตอนุภาคนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและลดปริมาณของมอลโตเดกซ์ให้ลดลง [9] จากงานวิจัยพบว่าโซเดียมเคสเนต (Sodium Caseinate) [12] โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolate) [15] และเจลาติน (Gelatin) [16, 17] รวมถึงโปรตีนชนิดอื่นๆ นั้นมีความสามารถในการห่อหุ้มสารได้ดี สามารถช่วยลดปัญหาของความเหนียวเหนอะได้ [18] อีกทั้งเมื่อทำการผลิตอนุภาคโปรตีนผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โปรตีนในสารละลายนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าระหว่างน้ำและอากาศโดยอาศัยกระบวนการแพร่และ/หรือการพา โดยโปรตีนที่เคลื่อนที่และแทรกตัวไปยังระหว่างชั้นของน้ำและอากาศซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และโปรตีนนั้นจะเกิดการคลายตัวและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้เกิดฟิล์มห่อหุ้มไว้โดยโปรตีนจะหันส่วนที่ชอบน้ำไปยังเฟสของน้ำและหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

ออกไปยังเฟสอากาศ และเมื่ออนุภาคแห้งสนิทก็จะพบว่าโปรตีนนั้นจะปกคลุมอยู่ที่บริเวณผิวของอนุภาค[19] ดังนั้นเมื่อโปรตีนนั้นปกคลุมผิวของอนุภาคทำให้สามารถเอาชนะความเหนียวเหนอะได้ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จึงมีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณโปรตีนที่ใช้อยู่ในช่วง 0.5-30% ของสารละลายทั้งหมด[12] โดยปริมาณของโปรตีนที่ใช้จะถูกใช้ในปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสารประกอบที่ต้องการห่อหุ้ม และในการผลิตผงผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับอาหารนั้นอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า อัตราการป้อนสาร ปริมาณของอากาศร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นก็เป็นปัจจัยที่ถูกนำมาวิเคราะห์ โดยอุณหภูมิที่ใช้นั้นก็จะอยู่ในช่วง 120-200 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิของอากาศขาเข้านั้นมีความสัมพันธ์โดยกับความสามารถในการดูดซับความชื้นในอากาศ[17] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของโปรตีนที่ผิวของผงมอลโตเดกซ์ตรินโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตอนุภาค

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของโปรตีน สภาวะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินหลังผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อผลการกระจายตัวของโปรตีนที่ผิวของอนุภาคดังต่อไปนี้

1.3.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของโปรตีนทั้ง 3 ชนิด โซเดียมคาร์ซีเนต (Sodium Caseinate) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolate) และเจลาติน (Gelatin)

1.3.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของสารละลายระหว่าง Maltodextrin และโปรตีน ที่ 99.5:0.5 99:1 95:5 90:10 และ 80:20

1.3.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเท่ากับ 140 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส

1.3.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราเร็วเท่ากับ 3 6 และ 12 มิลลิตรต่อนาที (10 20 และ 40% ตามลำดับ)

1.3.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ปริมาณเท่ากับ 20 28 และ 34 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (50 70 และ 90% ตามลำดับ)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ คือสามารถช่วยในการเลือกชนิดของโปรตีนและสภาวะที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของอนุภาคของมอลโตเดกซ์ตรินให้ดีขึ้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกักเก็บสาร (Encapsulation)

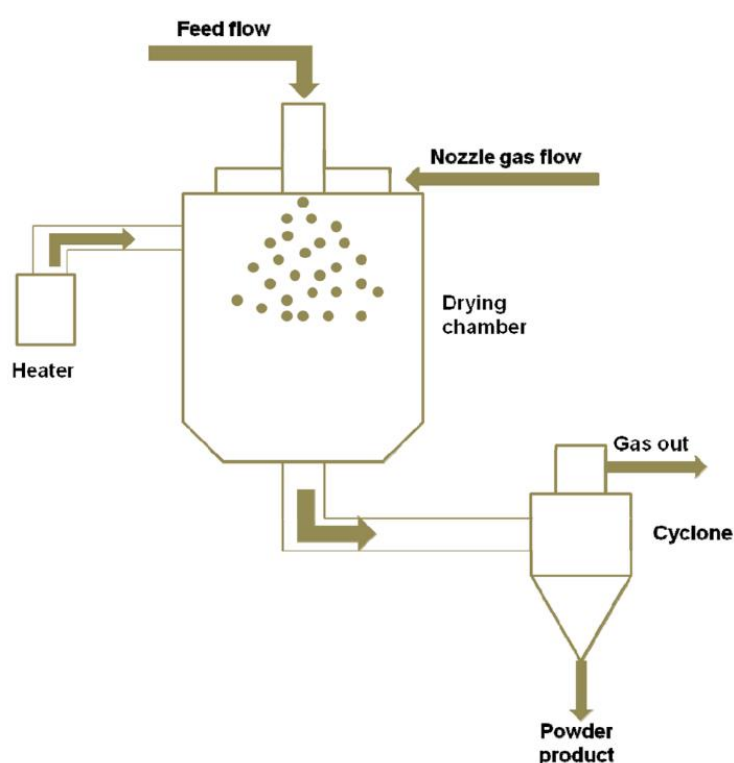
การกักเก็บสารหรือการห่อหุ้มสารนั้นเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆให้อยู่ในรูปแบบของอนุภาคของแข็งโดยสารสำคัญจะถูกกักเก็บไว้ในอนุภาค ไม่ว่าจะเป็นตัวยาที่ใช้ในการรักษาโรค สารหอมระเหย หรือวัตถุติดที่เกี่ยวข้องกับอาหาร เป็นต้น การห่อหุ้มสารสามารถช่วยให้ผู้บริโภคนั้นใช้งานได้อย่างสะดวกมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถยืดอายุการใช้งานได้อีกด้วย โดยการกักเก็บสารนั้นสามารถทำได้หลายเทคนิค เช่น การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) สเปรยซิลลิ่ง และคูลลิ่ง (spray cooling/chilling) การอบแห้งแบบแชเยือกแข็ง (freeze drying) เอ็กชทรูชัน (extrusion) และการเคลือบโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดสเบด (fluidized bed coating) เป็นต้น [20] โดยการเลือกกระบวนการผลิตนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ต้องการ สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารที่ถูกห่อหุ้มและสารห่อหุ้ม เป้าหมายในการห่อหุ้มสาร การปลดปล่อยสาร ความสามารถในการขยายกระบวนการและค่าใช้จ่ายของกระบวนการที่ยอมรับได้ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดนั้นคือ spray drying และ freeze drying เนื่องจาก 2 เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย สามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการได้มากมาย ประโยชน์ที่สำคัญของการเปลี่ยนสารละลายให้กลายเป็นอนุภาคของแข็งคือ การลดพื้นที่การจัดเก็บสินค้าและค่าใช้จ่ายการขนส่ง อีกทั้งสะดวกในการจัดการ มีเสถียรภาพสูง และผงผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมานั้นสามารถนำไปใช้ได้อย่างสะดวกมากขึ้นและสามารถสลายตัวหรือละลายได้ง่ายขึ้น [21]

2.2 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ใช้ในการผลิตอนุภาคของแข็งจากสารละลาย โดยการระเหยน้ำออกจากหยดสารละลาย ไม่ว่าสารละลายนั้นจะเป็นสารเนื้อเดียว สารแขวนลอย หรืออิมัลชัน ซึ่งเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายและรวดเร็วในการผลิตอนุภาคและยังถูกนำมาใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมยา อาหาร สารเคมี หรือแม้กระทั่งเวชสำอางค์ เช่น นมผง น้ำผลไม้ผง ผงซักฟอก ผงปรุงรส เป็นต้น

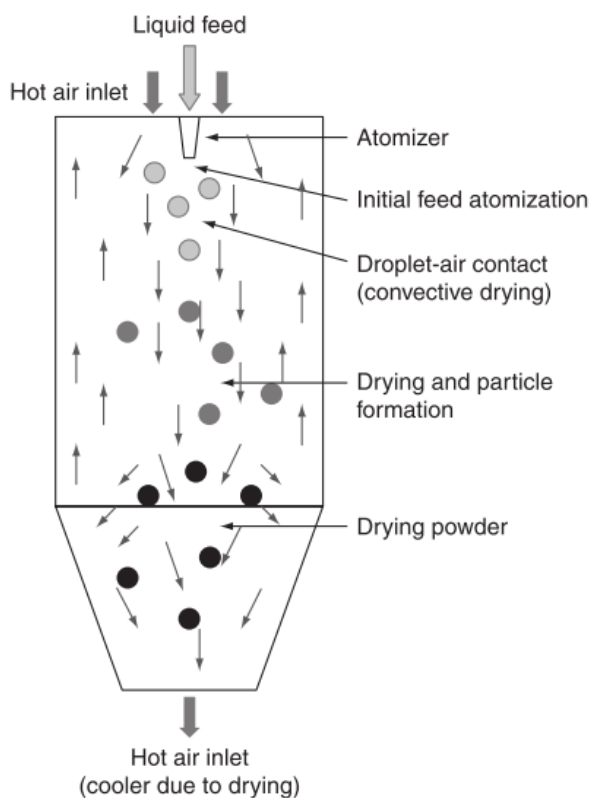
2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เริ่มจากการป้อนสารละลายโดยใช้ปั๊มส่งไปยังหัวฉีด (Atomizer) จากนั้นหัวฉีดจะทำหน้าที่เปลี่ยนสารละลายให้อยู่ในรูปของละอองฝอยผ่านเข้าไปเจอกับอากาศร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลายโดยอนุภาคที่แห้งจะอยู่ในรูปของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กส่งผ่านไปยังไซโคลนพร้อมกับอากาศ ซึ่งไซโคลนจะทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็งออกจากอากาศ อนุภาคที่ถูกแยกออกจากอากาศจะตกลงไปอยู่ในภาชนะ ส่วนอากาศร้อนก็จะไปผ่านตุ้กรองอีกหนึ่งชั้นเพื่อดักเอาอนุภาคที่ติดไปด้วยนั้นออกก่อนปล่อยอากาศออกสู่บรรยากาศภายนอกดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) [8]

การอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ การขจัดน้ำออกจากหยดสารละลายที่ถูกพ่นออกมาจากหัวฉีด จากรูปที่ 2.2 แสดงการขั้นตอนของการขจัดน้ำจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยกลไกของกระบวนการการขจัดน้ำออกนั้นคือกลไกการถ่ายโอนความร้อนและมวล[8]

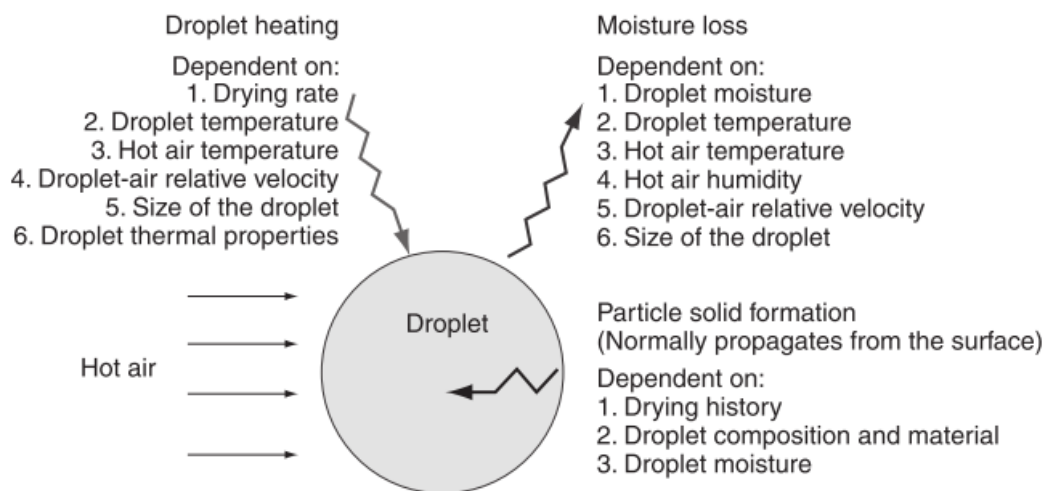


รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย[8]

2.2.2 การถ่ายโอนความร้อนและมวล

ในรูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายโอนความร้อนและมวลที่เกี่ยวข้องในการอบแห้งแบบพ่นฝอย ส่วนที่น่าสนใจคือการแสดงพารามิเตอร์ที่กระทบต่อการถ่ายโอนความร้อนและมวลจากหยดสารละลาย และนี่คือสิ่งสำคัญในการตีความผลกระทบของพารามิเตอร์ในการปรับปรุงคุณภาพของอาหารที่เป็นผง

การถ่ายโอนโดยทั่วไปที่ใช้ในดำเนินการ คือ อากาศร้อน การเพิ่มความร้อนของหยดสารละลายนั้นจะถูกขับเคลื่อนด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของหยดสารละลายกับอากาศร้อน [8]



รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายโอนความร้อน มวล และกระบวนการแข็งตัวในการอบแห้งแบบพ่นฝอย [8]
โดยสมการที่ 2.1 แสดงถึงการทำความร้อนของหยดสารละลาย

$$\frac{dT}{dt} = hA(T_{air} - T_{droplet}) - \frac{dm}{dt} \Delta H_{evap} \quad (2.1)$$

โดยที่ dT/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ($K s^{-1}$)

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ($Wm^{-2}K^{-1}$)

A คือ พื้นที่ผิวของหยดสารละลาย (m^2)

$(T_{air}-T_{droplet})$ คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับหยดสารละลาย (K)

dm/dt คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา ($kg s^{-1}$)

ΔH_{evap} คือ ความร้อนแฝงของการระเหย ($kJ kg^{-1}$)

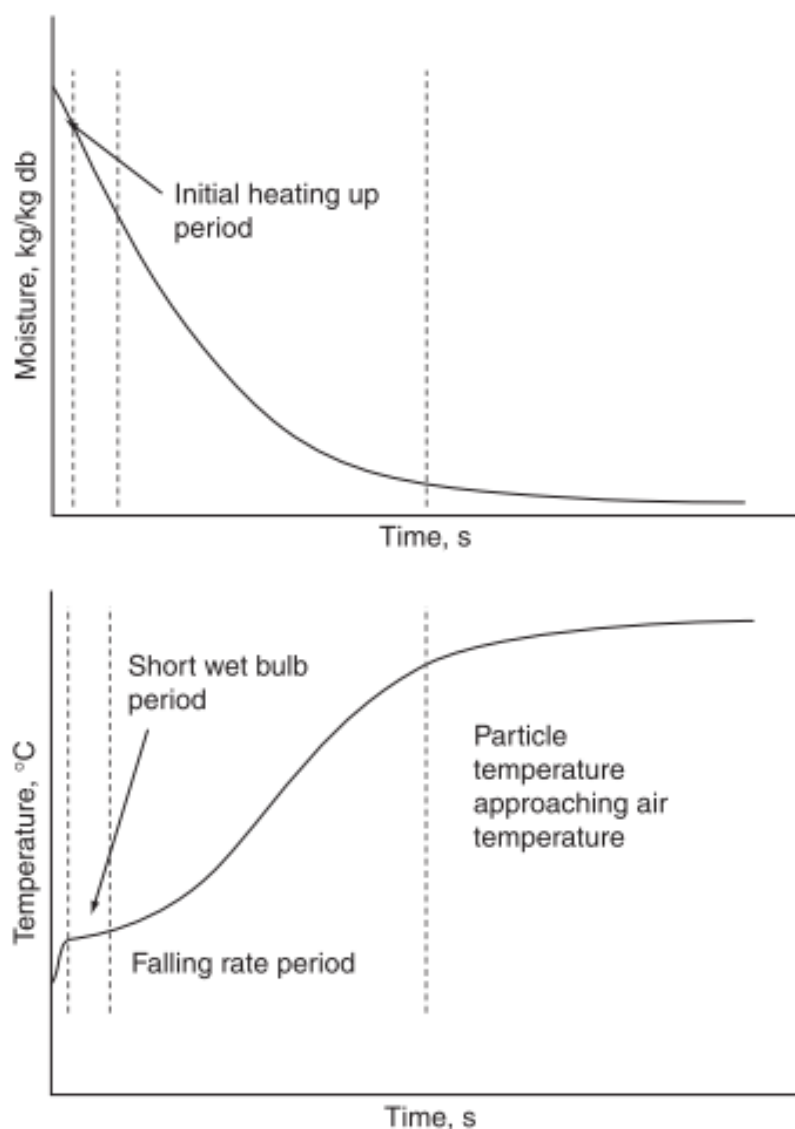
การถ่ายโอนมวลของการขจัดน้ำออกจากหยดสารละลาย อาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของไอที่ผิวของหยดสารละลายกับความเข้มข้นของไอโดยรอบ ดังนั้นความชื้นของอากาศร้อนนี้มีผลต่อการหายไปของความชื้นในหยดสารละลายอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากสมการที่ 2.2 แสดงการถ่ายโอนมวล

$$\frac{dm}{dt} = h_m A (\rho_{droplet.surface} - \rho_{air}) \quad (2.2)$$

โดยที่ h_m คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($m s^{-1}$)

$(\rho_{droplet.surface}-\rho_{air})$ คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของไอ ($kg m^{-3}$)

การถ่ายโอนมวลนั้นจะไม่มีที่ตั้งสมมุติฐานว่าความชื้นภายในและนอกของหยดสารละลาย หรืออนุภาคนั้นเท่ากัน โดยการกระจายตัวของความชื้นเกิดจากการที่มีอัตราการสูญเสียความชื้นสูงซึ่ง เกี่ยวข้องกับการแพร่ภายในของความชื้นภายในหยดสารละลาย จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 เมื่อ อนุภาคได้รับความร้อนสูงขึ้นและความชื้นที่ผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง แรงขับเคลื่อนจะเปลี่ยนและลดลง ไปเรื่อย ยิ่งไปกว่านั้นขนาดของหยดสารละลายนั้นจะเล็กลงเนื่องจากการสูญเสียความชื้นไป อัตรา การถ่ายโอนความร้อนและมวลของกระบวนการเหล่านี้จะถูกทำให้ช้าลง



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา

พารามิเตอร์ที่สำคัญคืออุณหภูมิการระเหยของหยดสารละลาย แสดงในรูปที่ 2.4 อุณหภูมิที่อยู่ระยะเวลาที่พลังงานได้รับด้วยความร้อนเท่ากับการสูญเสียความร้อนแฝงเนื่องจากการระเหยของ

ความชื้น ซึ่งอุณหภูมินี้จะมักจะถูกตีความว่าเป็นอุณหภูมิกระเปาะเปียก โดยจะมีการระเหยความชื้นออกไปเล็กน้อย ต่อมาเมื่อหยดสารละลายมีอุณหภูมิกึ่งที่ ก็จะเริ่มสูญเสียความชื้นไปและผิวของหยดสารละลายจะเริ่มแข็งตัว ความชื้นก็เริ่มเคลื่อนออกมาที่ผิวเพื่อรักษาความสมดุลเอาไว้ และช่วงอัตราการอบแห้งนั้นลดลง เนื่องจากการที่มีการสูญเสียความชื้นต่ำลง ทำให้อุณหภูมิกึ่งของอนุภาคนั้นสูงขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ โดยรอบ และเมื่อความชื้นภายในอนุภาคนั้นสมดุลกับความชื้นในอากาศจึงกลายเป็นอนุภาคที่แห้ง

อัตราการทำให้แห้ง (drying rate) คืออัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง จากสมการที่ 2.3 จะพบว่า อัตราการระเหยของน้ำนั้นจะขึ้นกับพื้นที่

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (2.3)$$

โดยที่ R คือ อัตราการแห้งหรืออัตราการระเหย , (kg/m²·hr)

dm/dt คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา (kg s⁻¹)

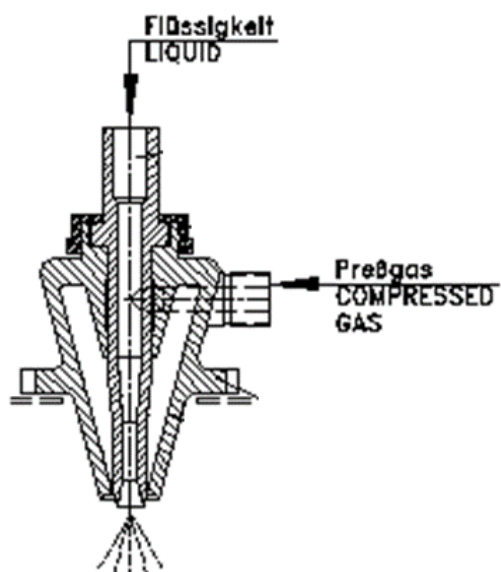
A คือ พื้นที่ผิวของหยดสารละลาย (m²)

2.2.3 หัวฉีด (Atomizer)

หัวฉีดทำหน้าที่เปลี่ยนสารละลายที่ถูกป้อนเข้าไปในห้องอบให้เป็นละอองฝอยเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้สารละลายนั้นสามารถสัมผัสอากาศร้อนได้มากขึ้น โดยหัวฉีดที่นิยมใช้นั้นมี 3 แบบ ได้แก่ Two-fluid atomizer หัวฉีดแรงดันสูง (Pressure atomizer) และ หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง (Centrifugal atomizer)[21]

2.2.3.1 Two - fluid atomizer

หัวฉีดแบบ Two - fluid atomizer นี้ทำงานโดยการผสมสารละลายเข้ากับอากาศที่ถูกอัดเข้ามาด้วยความเร็วสูงดังรูปที่ 2.5 จึงทำให้สารละลายนั้นกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้ โดยหัวฉีดประเภทนี้จะเหมาะกับสารละลายที่มีความหนืดสูงหรือสารละลายที่มีอนุภาคผสมอยู่ และขนาดของอนุภาคที่ได้จากหัวฉีดแบบนี้จะมีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.5 Two-fluid atomizer

2.2.3.2 หัวฉีดแรงดันสูง (Pressure atomizer)

หัวฉีดแรงดันสูง หรือ Pressure atomizer แสดงในรูปที่ 2.6 หลักการทำงานคือ การป้อนสารละลายไหลผ่านแผ่นออริฟิส (orifice) ในหัวฉีดภายใต้สภาวะความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดกระจายเป็นละอองฝอยได้โดยไม่ต้องใช้อากาศ โดยขนาดอนุภาคขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสาร ความหนืด และความดัน



รูปที่ 2.6 Pressure atomizer

2.2.3.3 หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง (Centrifugal atomizer)

หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง (Centrifugal atomizer) จะป้อนสารละลายให้ไหลลงบนจานหมุน ใกล้กับจุดศูนย์กลาง โดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบประมาณ 5,000-10,000 รอบต่อนาที สารละลายที่ถูกป้อนที่ตกลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองฝอยดังในรูปที่ 2.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 30-120 ไมครอน ซึ่งขนาดอนุภาคที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของการป้อนสารละลาย ความหนืด อัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน



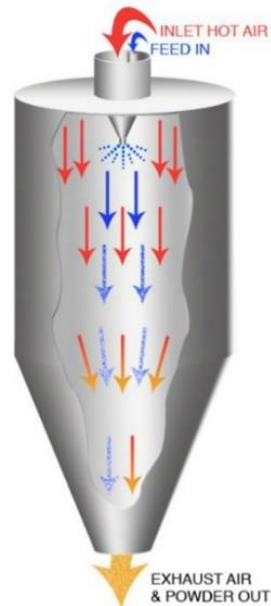
รูปที่ 2.7 Centrifugal atomizer

2.2.4 ทิศทางการไหลของอากาศร้อน

ทิศทางการไหลของอากาศร้อนที่จะสัมผัสกับละอองฝอยของสารละลายก็เป็นเรื่องที่มีความสำคัญต่อการระเหยของตัวทำละลาย ซึ่งรูปแบบทิศทางการไหลของอากาศสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current flow) การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow) และ การไหลแบบผสม (Mixed flow) [21] ดังที่แสดงในรูป 2.8 2.9 และ 2.10

2.2.4.1 การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current flow)

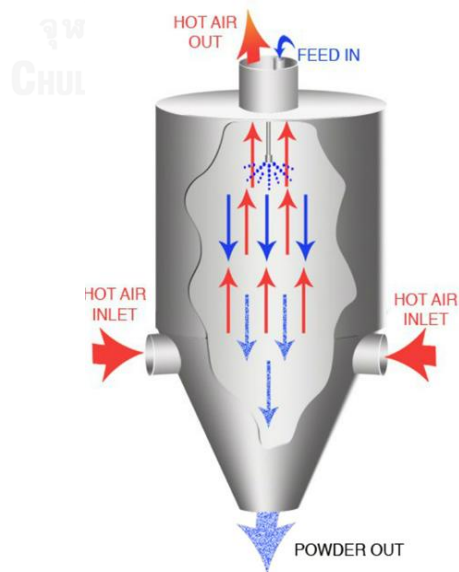
การไหลแบบทางเดียวกันคือ การฉีดสารละลายไปในทิศทางเดียวกันกับอากาศร้อนเข้าทางด้านบนของห้องอบแห้ง โดยการไหลแบบทางเดียวกันนั้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อนเนื่องจากละอองของสารละลายที่ป้อนเข้าไปนั้นจะสัมผัสกับอากาศร้อนในขณะที่ยังมีความชื้นสูง ซึ่งตัวทำละลายนั้นจะถูกระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งผลิตภัณฑ์จะไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานานเพื่อเลี่ยงการสลายตัวของสารสำคัญนั้นๆ



รูปที่ 2.8 การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current flow)

2.2.4.2 การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow)

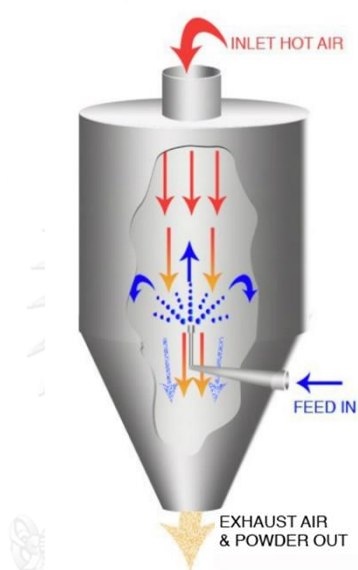
การไหลผ่านสวนทางกัน มีทิศทางการฉีดละอองฝอยของสารละลายเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของอากาศร้อน โดยสารละลายจะถูกฉีดลงมาจากด้านบนของห้องอบในขณะที่อากาศร้อนจะไหลสวนทางขึ้นมาจากด้านล่าง ส่วนผลิตภัณฑ์จะออกมาจากส่วนล่างของห้องอบซึ่งรูปแบบการไหลลักษณะนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนสูงเท่านั้น



รูปที่ 2.9 การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow)

2.2.4.3 การไหลแบบผสม (Mixed flow)

การไหลแบบผสมนั้นละอองฝอยของสารละลายและอากาศจะมีการเคลื่อนที่ทั้งในแบบการไหลแบบทางเดียวกัน และการไหลผ่านสวนทางกัน วิธีนี้เหมาะสำหรับทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงหยาบ และทนความร้อนได้สูงมาก โดยจะฉีดสารละลายจากภายในเครื่องโดยหัวฉีดขึ้นด้านบนและป้อนอากาศร้อนทางด้านบนของห้องอบ ส่วนผลิตภัณฑ์ก็จะออกมาพร้อมกับอากาศทางด้านล่างของห้องอบ



รูปที่ 2.10 การไหลแบบผสม (Mixed flow)

2.2.5 ข้อจำกัดของการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับการกักเก็บอาหาร

ในการกักเก็บอาหาร โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิต ซึ่งข้อจำกัดข้อแรกในการกักเก็บนั้นคือสารห่อหุ้มซึ่งเลือกใช้ได้ไม่หลากหลายนัก เนื่องจากโดยส่วนใหญ่กระบวนการทำให้แห้งในอุตสาหกรรมอาหารนั้นจะถูกผลิตออกมาจากสารละลายของเหลว ดังนั้นสารห่อหุ้มต้องสามารถละลายในน้ำได้ดี

ข้อจำกัดที่สอง คือ ผงสารระเหยได้ง่ายจะมีผงขนาดเล็กจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นมาช่วยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผงที่จะนำไปใช้งาน เช่น การนำรวมกันเป็นกลุ่มก้อน

ข้อจำกัดที่สาม คือ การอบแห้งแบบพ่นฝอยอาจจะไม่เหมาะกับการกักเก็บรสชาติที่ประกอบไปด้วยกลิ่นที่ระเหยได้ง่าย ซึ่งกลิ่นนั้นอาจจะหายไปในช่วงกระบวนการ

ข้อจำกัดที่สี่ คือ การกักสารด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นไม่สามารถที่จะผลิตวัตถุดิบที่มีน้ำตาลในปริมาณสูง เช่น น้ำผึ้ง น้ำผลไม้ และ พอลิฟินอลที่สกัดจากผลไม้ เพราะน้ำตาลมวลโมเลกุลต่ำนั้นมีค่าอุณหภูมิ Glass transition ที่ต่ำ ซึ่งเป็นที่มาของปัญหาความเหนียวเหนอะที่ซึ่งจะนำไปสู่การเกาะรวมกันเป็นก้อนระหว่างอนุภาคหรือเกาะติดตามผนังของห้องอบทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ำ เพื่อเอาชนะความเหนียวเหนอะนั้น มอลโตเดกซ์ตรินนั้นถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนน้ำตาลที่มีน้ำตาลมวลโมเลกุลต่ำสูงให้กลายเป็นผงได้โดยที่ต้องใช้มอลโตเดกซ์ตรินในปริมาณที่เยอะแม้ว่าการใช้วิธีนี้ในการผลิตอาจจะเสี่ยงต่อความไม่พอใจของลูกค้า

อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นไม่สามารถที่จะกักเก็บสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ 100% ดังนั้น องค์ประกอบที่ยังไม่ได้กักเก็บนั้นมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพในขณะที่เก็บได้ ในบางผลิตภัณฑ์นั้นได้ถูกเติมแต่งด้วยสารหล่อลื่นที่ทำให้มีอายุในการเก็บรักษาผงได้ยาวนานมากขึ้น[21]

2.3 คุณสมบัติของผง

คุณสมบัติของผงนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ[3]

1. คุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ความชื้น รูปร่าง องค์ประกอบบนผิวของอนุภาค ลักษณะผิวของอนุภาค ขนาดและการกระจายตัว มุมทรงตัว อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว และการละลาย

2. คุณสมบัติที่นำไปใช้งาน ได้แก่ การไหลตัว ความสามารถในการกวดอัด

3. คุณสมบัติที่บกพร่อง ได้แก่ ความเป็นฝุ่น ความเหนียวเหนอะ การจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

โดยคุณสมบัติที่นำไปใช้งานนั้นได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการรวมกันของคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติที่บกพร่องนั้นเป็นคุณสมบัติที่ผงดต้องการและบ่อยครั้งที่คุณสมบัติที่บกพร่องนี้กลายเป็นข้อจำกัดของการนำไปใช้งาน

2.3.1 ความเหนียวเหนอะ (Stickiness)

เนื่องจากผงที่ผลิตได้นั้นมีพื้นที่ผิวสัมผัสเยอะซึ่งหมายถึงพื้นที่ที่ผิวของผงนั้นจะสัมผัสกับอากาศหรือแม้แต่อุณหภูมิด้วยตัวเอง โดยคุณสมบัติของผงนั้นจะได้รับอิทธิพลมาจากกระบวนการผลิตและองค์ประกอบของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) และ การหลอมเหลว เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการควบคุมความเหนียวเหนอะ การ

เกาะเป็นกลุ่มก้อน (Caking) และแม้กระทั่งการเสื่อมสลายทางกายภาพและเคมีของผง ดังนั้นการเลือกสารห่อหุ้มที่เหมาะสมนั้นจะสามารถแก้ปัญหาคุณสมบัติที่บกพร่องได้

2.3.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g)

การเปลี่ยนสถานะของวัสดุให้มีความแข็งเปราะหรือเหนียวขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) โดยเมื่อวัสดุนั้นถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g จะพบว่า วัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างทำให้คุณสมบัติอื่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในขณะที่นำวัสดุไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g วัสดุนั้นก็จะคงรูป มีความแข็งเปราะ ดังนั้นสารประกอบที่นำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มควรมี T_g สูง เพื่อที่จะทำให้ T_g ของสารผสมมีค่าสูงขึ้น

2.4 สารห่อหุ้ม (Wall Material)

ในการเลือกใช้สารห่อหุ้มจะขึ้นอยู่กับสารที่ต้องการห่อหุ้มและวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และโดยทั่วไปการห่อหุ้มสารที่เกี่ยวข้องกับอาหารนั้นจะมีตัวทำละลายเป็นน้ำ ดังนั้นสารห่อหุ้มที่ใช้ก็จะต้องเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [21, 22] ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารห่อหุ้มที่ถูกนำมาใช้ในการกักเก็บสาร

วัสดุห่อหุ้ม	ตัวอย่าง
คาร์โบไฮเดรต	Hydrolyzed starches: corn syrup solids, maltodextrins, etc. Modified starches: acetylated starch, monostarch phosphate, etc. Cyclodextrins: α -, β -, γ -cyclodextrins. Gums: agar, Acacia (Arabic), xanthan, alginates, etc.
โปรตีน	Milk proteins: whey proteins, caseinates, skim milk powders, etc. Other proteins: soy proteins, egg proteins, gelatin, etc.
ไบโอพอลิเมอร์ อื่นๆ	Soluble soy polysaccharides, chitosan, Maillard reaction products, modified celluloses, etc.

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นได้ว่ามีงานวิจัยมากมายเลือกใช้สารห่อหุ้มที่เป็นสารประกอบของคาร์โบไฮเดรต แต่อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงถึงสารที่ต้องการห่อหุ้มและวัตถุประสงค์ในการใช้อนุภาคที่ผลิตได้เป็นสำคัญเพื่อที่เลือกใช้สารห่อหุ้มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ตารางที่ 2.2 สารห่อหุ้มที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ[1]

Encapsulated ingredient	Wall material	Reference
Anhydrous milk fat	Whey protein/lactose	Young et al. (1993)
Soya oil	Sodium caseinate/carbohydrate	Hogan et al. (2001)
Calcium citrate calcium lactate	Cellulose derivatives/ Polymethacrylic acid	Oneda and Ré (2003)
Lycopene	Gelatin/sucrose	Shu et al. (2006)
Fish oil	Starch derivatives/glucose syrup	Drusch et al. (2006)
Cardamom essential oil	Mesquite gum	Beristain et al., (2001)
Arachidonyl L-Ascorbate	Maltodextrin/gum arabic/soybean polysaccharides	Watanabe et al. (2004)
Cardamom oleoresin	Gum arabic/modified starch/maltodextrin	Krishnan et al. (2005)
Bixin	Gum arabic/ maltodextrin/sucrose	Barbosa et al., (2005)
D-Limonene	Gum arabic/maltodextrin/ modified starch	Soottitantawat et al. (2005a)
Cumin oleoresin	Gum arabic/maltodextrin/ modified starch	
Caraway essential oil	Milk proteins/whey proteins/maltodextrin	Bylaite et al. (2001)
Short chain fatty acid	Maltodextrin/ Gum arabic	Teixeira et al. (2004)

2.4.1 มอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin)

มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ได้มาจากการตัดสายโซ่ของสตาร์ช (starch) ให้เป็นสายสั้นๆของน้ำตาลกลูโคส มีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ดสีขาวไม่มีรส หรือ มีรสหวานเล็กน้อยสามารถละลายในน้ำได้ดี โดยค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE) ของมอลโตเดกซ์ตรินจะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 – 20

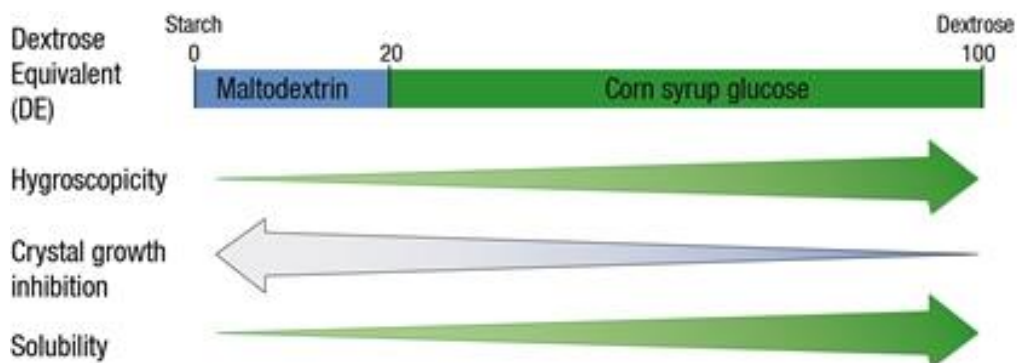
โดยมอลโตเดกซ์ตรินนั้นถูกนำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มในการผลิตผงที่เกี่ยวข้องกับอาหาร เนื่องจากมอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีความสามารถในการกักเก็บสารได้ดี ซึ่งช่วยให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์นั้นสูงขึ้นแต่ข้อเสียของมอลโตเดกซ์ตรินก็คือเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้นานๆจะพบว่าเกิดการเกาะกันเป็นก้อนเพราะมอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศได้ดี (Hygroscopic material) นั้นเอง

2.4.1.1 คุณสมบัติในการดูดความชื้นในอากาศได้ดี (Hygroscopicity)

คุณสมบัติในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีนั้นทำให้ผงผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นจับตัวกันเป็นก้อน อนุภาคของแข็งที่ผลิตจากสารประกอบจำพวกน้ำตาล ส่วนใหญ่จะมีการเติมมอลโตเดกซ์ตรินลงไปเพื่อช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์[23] แต่อย่างไรก็ตามมอลโตเดกซ์ตรินนั้นเป็นวัสดุที่มีความสามารถดูดความชื้นในอากาศได้ดี (Hydroscopic material)เช่นกัน เนื่องจากมอลโตเดกซ์ตรินมีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) โมเลกุลในสภาวะอสัณฐานนั้นมีการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบและมีรูพรุนจึงทำให้สามารถดูดซับน้ำจากภายนอกได้ ซึ่งค่าการดูดความชื้นในอากาศของมอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีค่าตั้งแต่ 72 – 83 กรัม/น้ำ/100 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก[17]

2.4.1.2 ค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE)

ค่าสมมูลเดกซ์โทรส คือ ปริมาณร้อยละของน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) คิดเป็นปริมาณน้ำตาลเดกซ์โทรส (dextrose) ที่มีอยู่ในคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ค่า dextrose equivalent (DE) แสดงถึงระดับการย่อยแป้ง (flour) หรือ สตาร์ช (starch) ให้เป็นน้ำตาลกลูโคสหรือเดกซ์โทรส โดยสตาร์ช (starch) มีค่า DE เท่ากับ 0 ขณะที่น้ำตาลกลูโคสมีค่า DE เท่ากับ 100 โดยมอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin) มีค่า DE น้อยกว่า 20



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่า DE กับคุณสมบัติอื่นๆ[24]

โดยที่ถ้ามีค่า DE สูง จะมีการเกิดสีน้ำตาลได้ง่าย สามารถในการดูดความชื้นได้ดีขึ้น ละลายน้ำได้มากขึ้น อีกทั้งยังมีรสชาติความหวานที่มากขึ้นด้วย ในขณะเดียวกัน ถ้าค่า DE ต่ำนั้น โมเลกุลจะสูงขึ้น เมื่อละลายน้ำความหนืดจะมากขึ้น จับตัวกันเป็นก้อนได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.11

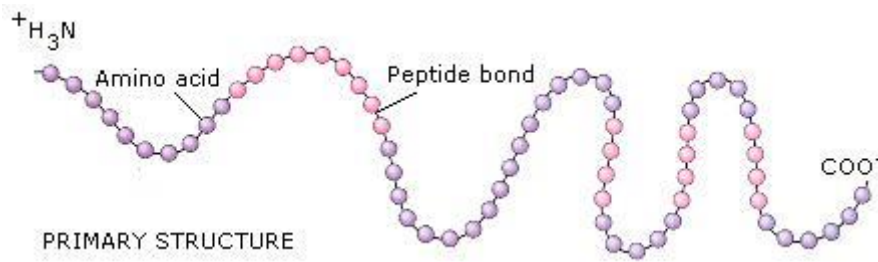
2.4.2 โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยพอลิเพปไทด์หนึ่งสายหรือมากกว่า ซึ่งพอลิเพปไทด์เป็นพอลิเมอร์สายยาวของกรดอะมิโน (amino acid) โดยพืชนั้นสามารถสังเคราะห์โปรตีนได้จากไนโตรเจน ส่วนคนและสัตว์สามารถรับโปรตีนได้โดยอาศัยกรดอะมิโนที่ได้รับจากอาหาร ซึ่งแหล่งอาหารโปรตีน ได้แก่ เนื้อสัตว์ น้านม ไข่ ถั่ว เป็นต้น

2.4.2.1 โครงสร้างของโปรตีน

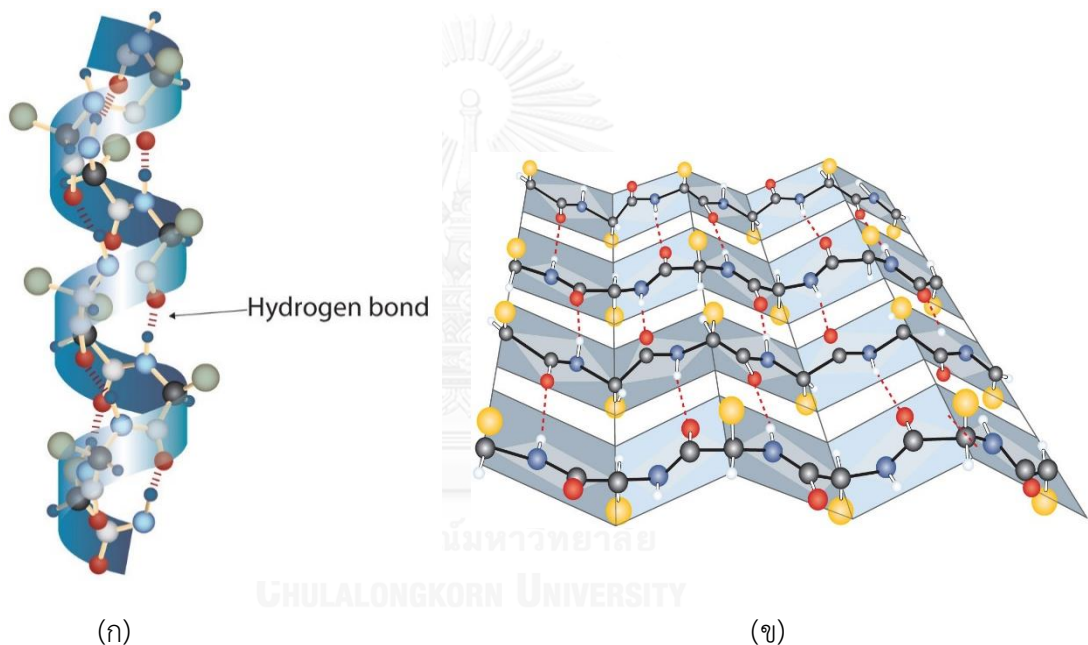
โปรตีนมีโครงสร้างสามมิติสี่ระดับโดยลำดับของกรดอะมิโนจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างและการทำงานของโปรตีนนั้นๆ[24]

1. โครงสร้างปฐมภูมิ เป็นโครงสร้างหลักพื้นฐานของโปรตีน เกิดจากการเชื่อมต่อกันของกรดอะมิโน (amino acid) เป็นสายยาว ชนิดและการเรียงลำดับของกรดอะมิโนในสายของพอลิเพปไทด์มีความเฉพาะเจาะจง ทำให้เกิดเป็นโปรตีนชนิดต่างๆ มากมาย การย่อยสลายโครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีน จะทำให้ได้กรดอะมิโน (amino acid) และ โปรตีนสายสั้นๆ เช่น dipeptide แต่ความร้อนระดับการหุงต้ม ไม่สามารถทำลายโครงสร้างปฐมภูมิได้ ดังรูปที่ 2.12



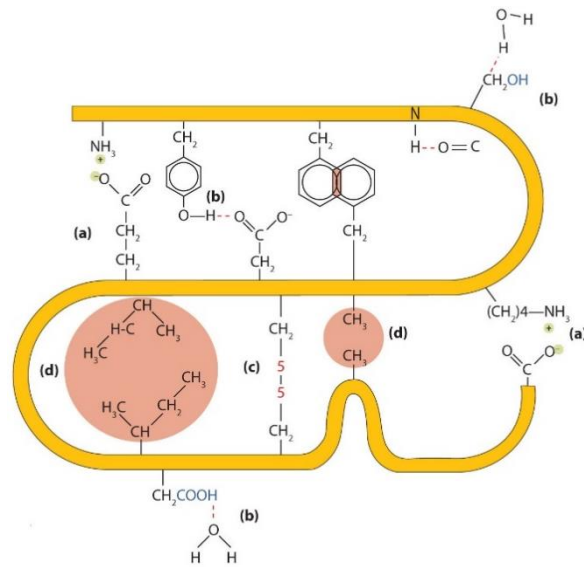
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีน

2. โครงสร้างทุติยภูมิ เป็นโครงสร้างที่แสดงการจัดเรียงตัวของกรดอะมิโนที่อยู่ใกล้กัน โปรตีนทุกชนิดจะมีโครงสร้างระดับนี้ โดยทั่วไปมีสองแบบคือ แบบอัลฟาเฮลิก สายเพปไทด์ขดเป็นเกลียวกับแบบเบตา สายเพปไทด์อยู่ในรูปซิกแซก ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน (ก) แบบอัลฟาเฮลิก (ข) แบบเบตา

3. โครงสร้างตติยภูมิ แสดงการจัดตัวของกรดอะมิโนตลอดทั้งสาย พบในโปรตีนที่เป็นก่อนการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของสายโพลีเพปไทด์นั้นขึ้นกับลำดับกรดอะมิโนและสารอื่นๆที่เข้ามาจับ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างตติยภูมิของโปรตีน

4. โครงสร้างจตุยภูมิ แสดงการจับตัวระหว่างสายโพลีเพปไทด์ พบในโปรตีนที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย (subunit) โดยแต่ละหน่วยย่อยคือสายโพลีเพปไทด์หนึ่งเส้น การจับตัวขึ้นกับลำดับกรดอะมิโนและสารอื่นๆที่เข้ามาจับเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.15

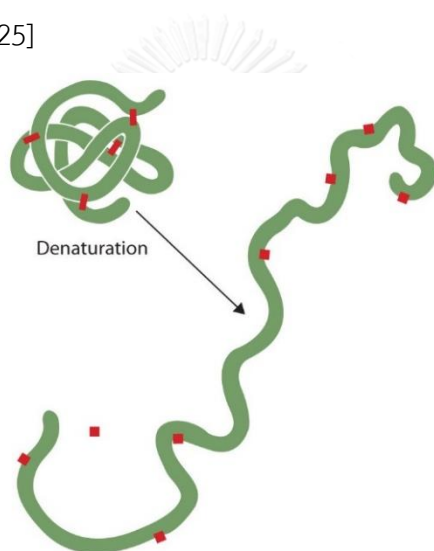


รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างจตุยภูมิของโปรตีน

2.4.2.2 การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Denaturation of Proteins)

การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนที่ใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผงนั้น ซึ่งอุณหภูมิที่สูงกลายเป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้โครงสร้างตติยภูมิของโปรตีนนั้นเกิดการสูญเสียสภาพ ไปดังรูปที่ 2.16 และถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นจะดำเนินงานในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิที่ทำให้โปรตีนนั้นเสื่อมสภาพแต่เวลาที่โปรตีนนั้นสัมผัสกับความร้อนนั้นสั้นมาก ซึ่งในการ

สัมผัสกับอากาศร้อนในช่วงแรกนั้น หยตสารละลายจะยังคงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการระเหยซึ่งจะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเนื่องจากหยตสารละลายมีปริมาณความชื้นสูงและสุดท้ายอนุภาคที่ได้นั้นจะมีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิขาออกของอากาศที่ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิขาเข้า แต่การที่หยตสารละลายนั้นมีปริมาณของน้ำสูงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งนั้นก็ต้องสูงขึ้นไปด้วย กล่าวคืออุณหภูมิการระเหยนั้นจะสูงขึ้นด้วยแต่ถ้าอุณหภูมิการดำเนินงานต่ำ อนุภาคที่ได้นั้นก็จะยังคงมีปริมาณความชื้นดังนั้นวิธีการป้องกันการสูญเสียสภาพของโปรตีนคือการทำให้ปริมาณความชื้นในอนุภาคหรือหยตสารละลายกับอุณหภูมิดำเนินการของเครื่องอบแห้งแบบฟลอยสมดุลกัน [8] โดยโปรตีนที่ผิวเหลืองสกัดและเจลาตินนั้นจะเกิดการสูญเสียสภาพไปที่อุณหภูมิเท่ากับ 64 และ 40 องศาเซลเซียสโดยประมาณ [19, 25]



รูปที่ 2.16 แสดงการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน

2.4.2.3 โซเดียมคาร์ซีเนต (Sodium Caseinate)

โซเดียมคาร์ซีเนตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากเคซีน (Casein) กับสารละลายแอลคาไลน์ที่สามารถบริโภคได้ โดยเคซีนเป็นชื่อของกลุ่มฟอสโฟโปรตีน คือ α_1 , α_2 , β , κ โปรตีนเหล่านี้พบโดยทั่วไปในนมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งสามารถพบในโปรตีนในนมวัวได้ถึง 80% และโปรตีนในนมมนุษย์ประมาณ 20%-45% โซเดียมคาร์ซีเนตนั้นมีลักษณะผงเนื้อละเอียดมีสีเหลืองสว่าง ดังรูปที่ 2.17 มีความสามารถในการละลายน้ำ 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และโซเดียมคาร์ซีเนตถูกใช้เป็นตัวเติมเจือปนอาหาร (food additive) ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เครื่องดื่มโปรตีนผง ครีมเทียม ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) โดยมวลโมเลกุลของโซเดียมคาร์ซีเนตนั้นมีค่าประมาณ 91.7 กิโลดาลตัน โดยมวลโมเลกุลของโปรตีนหมู้อยู่ในโซเดียมคาร์ซีเนตแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.17 โซเดียมคาร์ซีเนต

ตารางที่ 2.3 แสดงมวลโมกุลของโปรตีนหมู่ย่อยในโซเดียมคาร์ซีเนต

โปรตีนหมู่ย่อย	มวลโมเลกุล(kDa)
α -S1	23.7
α -S2	25
β	24
κ	19

2.4.2.4 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (Soy Protein Isolate)

โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองเป็นโปรตีนถั่วเหลืองอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้จากการนำถั่วเหลืองมาสกัดและทำให้บริสุทธิ์ โดยโปรตีนถั่วเหลืองสกัดนั้นมีโปรตีนประมาณ 90% มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหลืองเข้ม ดังรูปที่ 2.18 มีกลิ่นค่อนข้างแรง เมื่อละลายในน้ำ สารละลายมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ โดยโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองนั้นจะมีโปรตีนหมู่ย่อยได้แก่ α' α β A และ B โดยมีมวลโมเลกุลของโปรตีนหมู่ย่อยเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.18 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด

ตารางที่ 2.4 แสดงมวลโมกุลของโปรตีนหมู่อ้อยในโปรตีนถั่วเหลืองสกัด[26]

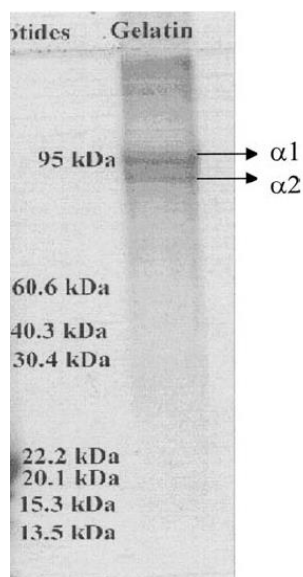
โปรตีนหมู่อ้อย	มวลโมเลกุล(kDa)
α'	67
α	71
β	50
A	35
B	20

2.4.2.5 เจลาติน (Gelatin)

เจลาตินเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ซึ่งเป็นโปรตีน (protein) ที่ได้จากการเสียดสภาพธรรมชาติและสกัดได้จากคอลลาเจน (collagen) โปรตีนธรรมชาติชนิดนี้มีอยู่ในกระดูกหรือหนังของสัตว์ เช่น ควาย หมู วัว เป็นต้น เจลาตินจะถูกแบ่งเป็น 2 ชนิด โดยแบ่งจากกระบวนการผลิตและแหล่งที่มา ชนิด A เป็นเจลาตินที่สกัดได้จากส่วนของกระดูกหมู โดยกรรมวิธีย่อยด้วยกรด และชนิด B เป็นเจลาตินที่ได้จากหนังและกระดูกวัว ลูกวัว โดยกรรมวิธีย่อยด้วยด่าง[26] ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และในรูปที่ 2.20 แสดงองค์ประกอบและมวลโมกุลของเจลาติน



รูปที่ 2.19 เจลาติน



รูปที่ 2.20 องค์ประกอบและมวลโมกุลของเจลาติน[27]

2.4.2.6 การใช้โปรตีนในการกักเก็บสาร

ในปัจจุบันนี้มีการลดปัญหาเรื่องความเหนียวเหนอะด้วยการปรับปรุงคุณสมบัติที่ผิวของอนุภาคด้วยโปรตีนปริมาณ 1% โดยการเคลื่อนของโมเลกุลของโปรตีนที่บริเวณจุดชั้นระหว่างน้ำและอากาศ ซึ่งเมื่ออนุภาคแห้งจะพบว่าโปรตีนสามารถเอาชนะความเหนียวเหนอะที่ผิวของสารละลายที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลสูง ดังนั้น สำหรับการกักเก็บสารประกอบที่มีน้ำตาลสูง โปรตีนหรือโปรตีนผสมคาร์โบไฮเดรต จึงได้รับความนิยมในการทำมาเป็นสารห่อหุ้ม[21]

โซเดียมคาร์ซิเนตนั้นถูกนำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มซึ่งเมื่อทำการเติมโซเดียมคาร์ซิเนตที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 % พบว่าสามารถเพิ่มร้อยละผลได้ในการผลิตน้ำตาลซูโครสจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 80 ได้ ปริมาณของโซเดียมคาร์ซิเนตเพียงเล็กน้อยสามารถที่จะเอาชนะความเหนียวเหนอะได้[12] ในขณะที่ฟรุคโตรสนั้นจะต้องใช้โซเดียมคาร์ซิเนตถึง 30% จึงจะชนะความเหนียวเหนอะได้[28] ดังนั้นปริมาณของโปรตีนที่ใช้ในการห่อหุ้มนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการห่อหุ้มด้วยเช่นเดียวกัน

2.5 โพรตีนบนผิวของอนุภาคหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

จากการศึกษาองค์ประกอบที่ผิวของอนุภาคนมทำให้ทราบว่าเมื่อทำการสกัดเอาไขมันที่ผิวของอนุภาคออก ร้อยละของโปรตีนที่ผิวของอนุภาคนั้นเพิ่มขึ้นในขณะที่แลคโตสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากดังในตารางที่ 2.6 โดยชั้นของสารประกอบที่อยู่ถัดจากชั้นของไขมันนั้นก็คือโปรตีนและแลคโตสตามลำดับ เนื่องจากความแตกต่างของขนาดของโมเลกุลและชนิดขององค์ประกอบทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ในน้ำไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบที่ผิวของอนุภาคนมชนิดต่างๆหลังจากสกัดไขมันที่ผิวออกด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

		Surface composition (%)		
		lactose	Protein	fat
Skim milk protein	Original	36	46	18
	Fat extracted	45	54	1
Whey protein concentrate	Original	6	41	53
	Fat extracted	9	90	1

ในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย หยดสารละลายจะสูญเสียความชื้นที่ผิวไป ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวนั้นเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้สารละลายนั้นเกิดการแพร่เข้าไปด้านในของหยดสารละลาย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซึ่งแลคโตส โปรตีนและไขมันนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แตกต่างกัน เนื่องจากขนาดของโมเลกุลไม่เท่ากัน โดยแลคโตสนั้นมีค่าการแพร่สูงที่สุด ดังนั้นแลคโตสจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในอนุภาคได้เร็วที่สุด ตามด้วยโปรตีน และไขมัน [8, 29]

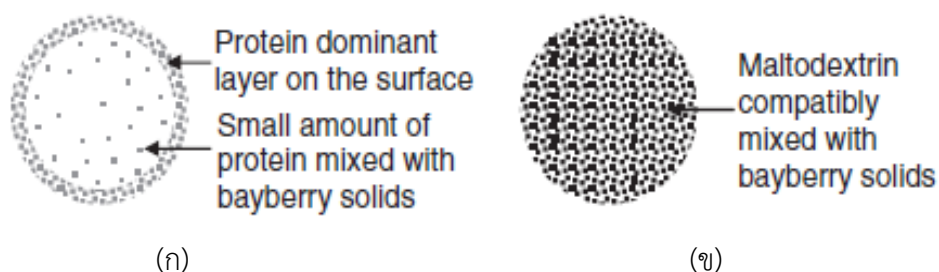
ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบขนาดและค่าการแพร่ขององค์ประกอบในนม[8]

Component	Component	Diffusivity ratio		
particle	Diameter (m)	(difference in order of magnitude relative to lactose)		
		Assumption:	Assumption:	Assumption:
		$D \propto R^{-1}$	$D \propto R^{-2}$	$D \propto R^{-3}$
Free fat	$>10^{-5}$	$>10^{-4}$	$>10^{-8}$	$>10^{-12}$
Fat globules	$10^{-5}-10^{-6}$	10^{-4}	10^{-8}	10^{-12}
Casein micelles	$10^{-7}-10^{-8}$	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}
Casein subunits	$10^{-8}-10^{-9}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
Whey proteins	$10^{-8}-10^{-9}$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
Lactose	$10^{-9}-10^{-10}$	1	1	1

D – ค่าการแพร่ของของผสม 2 ชนิดในของเหลว

R – รัศมีของโมเลกุล

จากงานวิจัยในการกักเก็บน้ำบ๊วย (bayberry juice)[9] พบว่า มอลโตเดกซ์ตรินและน้ำบ๊วยนั้นจะมีกระจายอยู่ทั่วทั้งผิวของอนุภาคแต่ในขณะที่โปรตีนนั้นสามารถที่จะห่อหุ้มนั้นสามารถที่จะกักเก็บน้ำบ๊วยไว้ได้มากที่สุดที่สุดจากรูปที่ 2.20 โดยการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนบนผิวของอนุภาคนั้นถูกเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)



รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของโปรตีนและมอลโตเดกซ์ตรินบนผิวของอนุภาค

(ก) โปรตีน (ข) มอลโตเดกซ์ตริน [9]

2.6 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) หรือมีอีกชื่อที่เรียกว่า Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) รูปที่ 2.22 โดย XPS [29] เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผิวของอนุภาคซึ่งเทคนิคนี้สามารถที่จะระบุชนิดและปริมาณสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ โดยสามารถวิเคราะห์ที่ผิวได้ที่มีความลึกถึง 10 นาโนเมตรจากพื้นผิว

XPS เป็นเครื่องมือที่สำคัญและถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เซรามิก ไฟเบอร์ แก้ว โลหะ แร่ธาตุ ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น และเมื่อไม่นานมานี้ก็เริ่มมีการใช้ XPS ในการวิเคราะห์อนุภาคที่เกี่ยวข้องกับอาหารแต่ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากอาหารนั้นประกอบไปด้วยสารอาหารและแร่ธาตุมากมายทำให้ยากต่อการวิเคราะห์



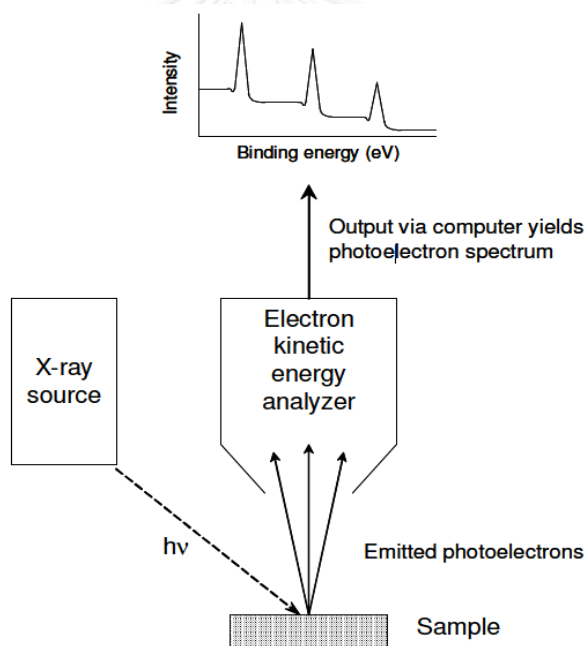
รูปที่ 2.22 X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS

2.6.1 หลักการทำงาน

XPS นั้นอยู่บนพื้นฐานของการสังเกตของอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาภายใต้การฉายรังสีจากโฟตอน โดยกระบวนการในการอธิบายแผนผังในรูปที่ 2.22 กลุ่มตัวอย่างจะอยู่ในสุญญากาศจากนั้นก็ถูกฉายรังสีด้วยโฟตอนจากแหล่งเอ็กซ์เรย์อ่อน เพื่อการกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนและเน้นที่การวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด แหล่งที่มาของรังสีนั้นมาจาก

อลูมิเนียม $K\alpha$ X-rays (1486.6 eV) หรือแมกนีเซียม $K\alpha$ X-rays (1253.6 eV) โฟตอนเหล่านี้จะมีปฏิสัมพันธ์กับอะตอมและโมเลกุลในพื้นผิวของตัวอย่าง

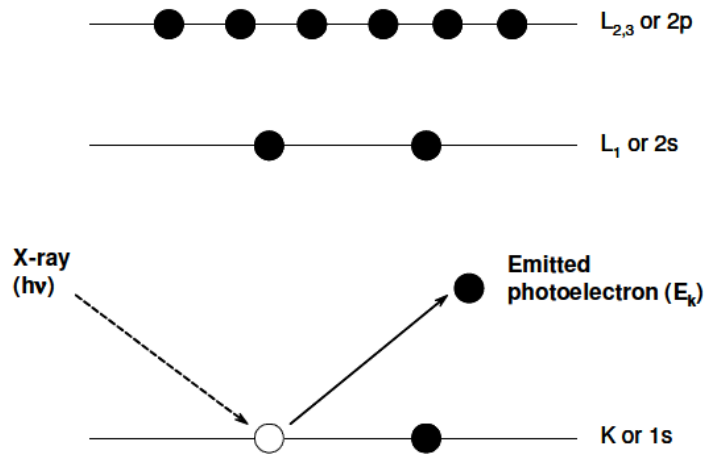
เทคนิคการทดลองสามารถทำได้โดยฉายแสงที่มีค่าพลังงานหรือความยาวคลื่นค่าเดียว (mono-energetic) ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในย่านของ UV ถึง X-ray ลงบนพื้นผิวของวัสดุหรือตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ หากแสงที่ฉายมีค่าพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy : E_b) ของอิเล็กตรอนในอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง จะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากอะตอมและพื้นผิวของวัสดุจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจวัดค่าพลังงานจลน์ (kinetic energy : E_k) ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Electron Energy Analyzer โดยค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2.3



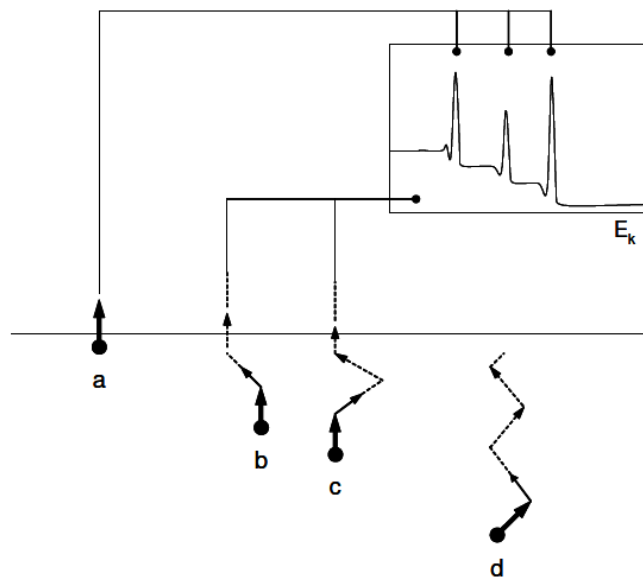
รูปที่ 2.23 แผนผังกระบวนการทำงานของ XPS

$$E_k = h\nu - E_b - \Phi \quad (2.4)$$

โดยที่ $h\nu$ คือค่าพลังงานของแสงที่ใช้และ Φ คือค่า Work Function ของ Electron Energy Analyzer



รูปที่ 2.24 ภาพจำลองการปฏิสัมพันธ์ของรังสีเอ็กซ์กับอิเล็กตรอนในอะตอม โดยโฟโตอิเล็กตรอนที่อยู่ไกลจากผิวของอนุภาคนั้นก็จะสูญเสียพลังงานจลน์มากทำให้ไม่ปรากฏเป็นพีคของกราฟดัง b c และ d ในขณะที่ a นั้นอยู่ในบริเวณใกล้ผิวของอนุภาคทำให้โฟโตอิเล็กตรอนนั้นสูญเสียพลังงานจลน์น้อยทำให้ปรากฏพีคของกราฟขึ้นดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.25 ภาพการสูญเสียพลังงานจลน์ของโฟโตโฟโตอิเล็กตรอน

2.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่อง XPS

Faldt [29, 30] ได้ทำการสร้างสมการเมตริกซ์เพื่อนำมาใช้ในการหาปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่ปกคลุมบนพื้นผิวของอนุภาคโดยประมาณ ดังสมการที่ 2.4

โดย i คือ องค์ประกอบต่างๆของอนุภาค

n คือ ธาตุที่ปรากฏในองค์ประกอบต่างๆในอนุภาค

γ_i คือ ค่าการปกคลุมที่ผิวขององค์ประกอบ i

$I_{comp.i}^n$ คือ ความเข้มข้นของอะตอม n ในองค์ประกอบ i บริสุทธิ์

I_{sample}^i คือ ความเข้มข้นของอะตอม n ในองค์ประกอบ i ของตัวอย่าง

$$\begin{pmatrix} I_{comp.1}^1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & I_{comp.i}^1 \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ I_{comp.1}^n & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & I_{comp.i}^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{sample}^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{sample}^i \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

ยกตัวอย่างเช่น ในนมผงนั้นมียังมีองค์ประกอบหลักๆ 3 ชนิด ได้แก่ แลคโตส (Lactose) โปรตีน (Protein) และ ไขมัน (Fat) ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมการเมตริกซ์ดังสมการที่ 2.5

$$\begin{pmatrix} I_{lactose}^C & I_{protein}^C & I_{fat}^C \\ I_{lactose}^O & I_{protein}^O & I_{fat}^O \\ I_{lactose}^N & I_{protein}^N & I_{fat}^N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \gamma_{lactose} \\ \gamma_{protein} \\ \gamma_{fat} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{sample}^C \\ I_{sample}^O \\ I_{sample}^N \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

จากนั้นก็ทำการแก้สมการและได้สมการที่ 2.6-2.8 เพื่อหา γ_i ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคที่ต้องการทราบได้ ภายใต้สมมติฐานว่าสารละลายเป็นสารละลายอุดมคติ (ideal solution) โดยคุณสมบัติของสารละลายในอุดมคติสามารถคำนวณได้โดยผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของคุณสมบัติของส่วนประกอบของมัน และเนื่องจากโปรตีนเป็นสารประกอบเพียงชนิดเดียวที่มีไนโตรเจนดังนั้นการปกคลุมของโปรตีนบนพื้นผิวจึงสามารถคำนวณได้จากสมดุลไนโตรเจน

$$I_{sample}^C = I_{lactose}^C \cdot \gamma_{lactose} + I_{protein}^C \cdot \gamma_{protein} + I_{fat}^C \cdot \gamma_{fat} \quad (2.7)$$

$$I_{sample}^O = I_{lactose}^O \cdot \gamma_{lactose} + I_{protein}^O \cdot \gamma_{protein} + I_{fat}^O \cdot \gamma_{fat} \quad (2.8)$$

$$I_{sample}^N = I_{protein}^N \cdot \gamma_{protein} \quad (2.9)$$

2.6.3 ปริมาณการปกคลุมของโปรตีนบนผิวของอนุภาค

จากสมการที่ 2.8 นั้นสามารถหาค่าร้อยละการปกคลุมขององค์ประกอบต่างๆที่ผิวของอนุภาคได้ ซึ่งพบว่าสารละลายที่มีส่วนผสมของโปรตีนหลังจากผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีโปรตีนปกคลุมอยู่ที่คิดเป็นร้อยละประมาณ 50-70% [5, 9, 12] ดังตารางที่ 2.8 ได้แสดงค่าร้อยละการปกคลุมของโปรตีนบนผิวของอนุภาคที่ผลิตมาจากสารละลายซูโครสและโปรตีนซึ่งพบว่าเมื่อชนิดของโปรตีนและปริมาณโปรตีนที่เติมต่างกันก็ได้ผลที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณโปรตีนนั้นต่างกันไม่มาก[12, 13]

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าร้อยละการปกคลุมของโปรตีนบนผิวของอนุภาค[12]

Samples	Carbon (%)	Oxygen (%)	Nitrogen (%)	Protein on surface (%)
Sucrose	53.66±2.37	46.34±2.37	0.00±0.00	-
Sodium Caseinate (Na-C)	67.87±0.42	16.87±0.31	14.92±0.59	-
Sucrose:Na-C (99.0:1.0)	62.98±0.01	28.52±0.14	8.32±0.36	55.76±4.33
Sucrose:Na-C (99.5:0.5)	63.82±0.03	28.84±0.17	7.34±0.20	50.51±2.72
Whey Protein Isolate (WPI)	71.94±0.58	17.10±0.38	10.28±0.05	-
Sucrose:WPI (99.0:1.0)	58.17±1.52	35.66±1.28	6.01±0.39	58.46±6.49
Sucrose:WPI (99.5:0.5)	58.15±0.42	35.85±0.56	5.81±0.44	56.52±7.57

2.6 กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

โมเดลการแพร่ Intra-particle นั้นได้บันทึกไว้อย่างชัดเจนว่าความสัมพันธ์ที่พบมากที่สุดต่อขั้นตอนการดูดซับโดยการดูดซับนั้นแปรผันตามเวลายกกำลัง 0.5 เป็นส่วนใหญ่มากกว่าที่จะแปรผันตามเวลา ตามทฤษฎีจะได้สมการ

$$q_t = K_{id}t^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

โดย q_t คือ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ หน่วยเป็น กรัม

K_{id} คือ อัตราการแพร่ intra-particle

t คือ เวลา หน่วยเป็น ชั่วโมง

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_t$ กับ $0.5 \log t$ นั้นจะได้เส้นตรงพร้อมกับจุดตัดแกนค่าบวก สำหรับการแพร่ Intra-particle ควบคุมขั้นตอนการดูดซับ โดยจุดตัดแกนนั้นเป็นบอกลถึงความหนาของชั้นขอบเขต ยกตัวอย่างเช่น ถ้าค่าของจุดตัดแกนมีค่ามากแสดงว่าชั้นขอบเขตมีผลกระทบต่อ การดูดซับมาก

แต่ทว่าจากค่าคงที่ของการแพร่ Intra-particle สามารถพบว่าชั้นขอบเขตมีอิทธิพลต่อกลไก การแพร่ของน้ำบนแข็งที่เป็นสารดูดซับนั้นมีผลกระทบน้อยมาก ดังนั้นความเคลื่อนจากจุดเริ่มต้น ตำแหน่ง (0,0) อาจเกิดจากความแตกต่างกันในอัตราของการถ่ายเทมวลในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้าย ของการดูดซับ [31]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 โซเดียมเคอซีเนต (Sodium Caseinate) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศอเมริกา

3.1.2 โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolate)

3.1.3 เจลาติน (Gelatin) Type A (Bloom 170)

3.1.4 มอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin) DE 11 จากบริษัท ไทยฟู้ด แอนด์ เคมีคอลจำกัด

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมสารละลายมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

เตรียมสารละลาย 200 มิลลิลิตร โดยมีปริมาณของแข็งอยู่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของสารละลาย ซึ่งมอลโตเดกซ์ตรินและโปรตีนชนิดต่างๆในสัดส่วนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำไปละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) 160 มิลลิลิตร กวนโดยใช้เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 3.1 ชนิดของโปรตีนและอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

ตัวแปร	ส่วนประกอบ
ชนิดของโปรตีน	โซเดียมเคอซีเนต (Sodium Caseinate) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolate) เจลาติน (Gelatin) Type A (Bloom 90-110)
ปริมาณร้อยละโดยมวลของโปรตีน	0.5, 1, 5, 10, 20

3.2.2 การเตรียมอนุภาคจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เมื่อสารละลายกลายเป็นสารละลายเดี่ยวเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Mini Spray Dryer B-290, สวิตเซอร์แลนด์) ดังรูปที่ 3.1 เมื่อสารละลายถูกป้อนผ่านหัวฉีด สารละลายจะถูกกระจายเป็นละอองฝอย จากนั้นเมื่อละอองสัมผัสอากาศที่มีอุณหภูมิสูงทำให้น้ำที่อยู่ในละอองนั้นระเหยออกไปกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งสภาวะที่ใช้ในการผลิตอนุภาคนั้นแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น B-290

ตารางที่ 3.2 สภาวะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ในการผลิตอนุภาค

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
อัตราการไหลของอากาศร้อน	20, 28, 34, 38 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลของสายป้อน	3, 6, 9, 12 มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของอากาศอัด	357 ลิตรต่อชั่วโมง
อุณหภูมิขาเข้า	140, 160, 180, 200 องศาเซลเซียส

3.3 การวิเคราะห์สาร

3.3.1 ร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

ร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนหลังจากผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถหาได้จาก

$$\text{Product recovery (\%)} = \frac{\text{obtained spray dried powder (g)}}{\text{maltodextrin (g) + sodium caseinate (g)}} \times 100$$

3.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักมวลโมเลกุลของโปรตีน

การแยกทางไฟฟ้าโดยใช้เจล (Gel Electrophoresis) โดย Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) แสดงในรูปที่ 3.2 เป็นวิธีที่ใช้ในการแยกขนาดของโปรตีน โดยมีการเตรียมสารเคมีที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. Acrylamide/Bisacrylamide เตรียมโดยการละลาย Acrylamide 30 กรัม และ Bisacrylamide 0.8 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. สารละลายทริส-ไฮโดรคลอไรด์บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ พีเอช 8.8 โดยการละลาย Tris-base 18.5 กรัม/ 80 มิลลิลิตร DI water และปรับ pH 8.8 ด้วย HCl และปรับปริมาตรจนได้ 100 มิลลิลิตร
3. สารละลายทริส-ไฮโดรคลอไรด์บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พีเอช 6.8 โดยการละลาย Tris-base 6 กรัม/ 80 มิลลิลิตร DI water และปรับ pH 6.8 ด้วย HCl และปรับปริมาตรจนได้ 100 มิลลิลิตร
4. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยการละลาย SDS 10 กรัม/ 100 มิลลิลิตร
5. Stock sample buffer (SDS-Reducing buffer) ประกอบด้วย SDS 10% 1.6 มิลลิลิตร สารละลายทริส-ไฮโดรคลอไรด์บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พีเอช 6.8 1 มิลลิลิตร เบต้า-เมอแคปโตเอทานอล (β - Mercaptoethanol) 0.4 มิลลิลิตร กลีเซอรอล 0.8 มิลลิลิตร โบรโมฟีนอลบลู 0.4 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 3.8 มิลลิลิตร
6. Running buffer ประกอบด้วย Tris-base 3 กรัม ไกลซีน (Glycine) 14 กรัม SDS 1 กรัม และน้ำ DI 1,000 มิลลิลิตร
7. ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ Ammonium persulfate และ TEMED (N,N,N',N'- tetra-methylethylenediamine)
8. Staining solution ประกอบด้วย เมทานอล 450 มิลลิลิตร กรดอะซิติก 90 มิลลิลิตร Coomassie Brilliant blue 2.5 กรัม น้ำ DI 450 มิลลิลิตร
9. Destaining solution ประกอบด้วย เมทานอล 450 มิลลิลิตร กรดอะซิติก 90 มิลลิลิตร น้ำ DI 450 มิลลิลิตร

วิธีการทำอิเล็กโตรโฟรีซิสแบบ SDS-PAGE

1. การเตรียมตัวอย่าง โดยทำการผสมสารละลายตัวอย่างกับ SDS-Reducing buffer 1:4 และนำสารละลายที่ได้ไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ก่อนนำตัวอย่างไปใส่ลงในเจล

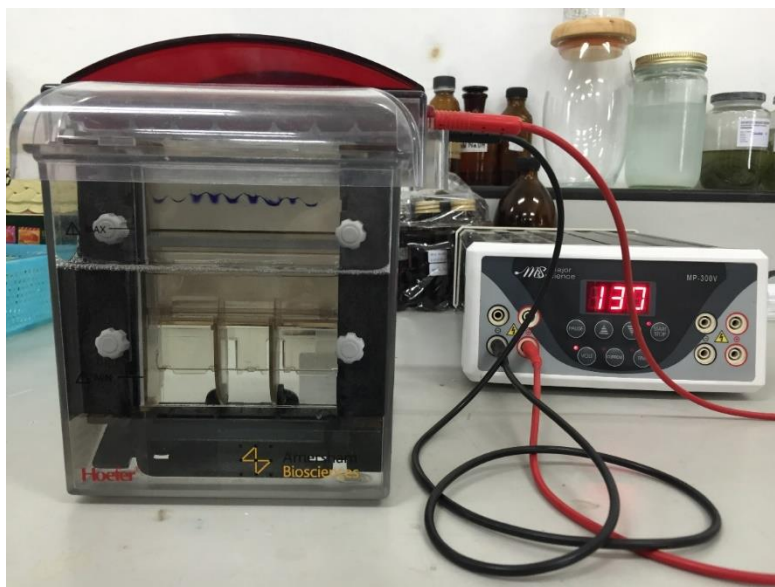
2. การเตรียมองค์ประกอบของเจลในการทำอิเล็กโตรโฟรีซิสแบบ SDS-PAGE โดยเจลที่ทำการเตรียมมี 2 ชนิด

ชนิดที่ 1 Running Gel ประกอบด้วย น้ำ DI 1.42 มิลลิลิตร สารละลายทริส-ไฮโดรคลอไรด์ บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ พีเอช 8.8 1.5 มิลลิลิตร SDS 10% 60 ไมโครลิตร Acrylamide/Bisacrylamide 30 มิลลิลิตร Ammonium persulfate 10% 60 ไมโครลิตร และ TEMED 20 ไมโครลิตร

ชนิดที่ 2 Stacking Gel ประกอบด้วย น้ำ DI 1.26 มิลลิลิตร สารละลายทริส-ไฮโดรคลอไรด์ บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พีเอช 6.8 0.5 มิลลิลิตร SDS 10% 20 ไมโครลิตร Acrylamide/Bisacrylamide 320 ไมโครลิตร Ammonium persulfate 10% 20 ไมโครลิตร และ TEMED 5 ไมโครลิตร

3. วิธีการทำอิเล็กโตรโฟรีซิสเจล

ทำความสะอาดกระจกทั้งสองด้านด้วยเอทานอล จากนั้นประกอบกระจกเข้ากับแท่นเจลให้มีความห่างประมาณ 1.5 mm จากนั้นเทสารละลาย Running Gel ลงในแท่นเจลด้วยไมโครปิเปตอย่างรวดเร็ว ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ เทปิดทับด้วยเอทานอล 200 ไมโครลิตรเพื่อไล่ฟองอากาศและทำให้หน้าเจลเรียบ ทิ้งไว้ไว้นาน 30 นาที เพื่อให้เจลแข็งตัว จากนั้นทำเทสารละลายลงในแท่นเจลด้วยไมโครปิเปตอย่างรวดเร็ว ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศเช่นเดิม เมื่อทำการเทสารละลายเรียบร้อยแล้วจึงสอดหัวเข้าไประหว่างกระจก ปลดยทิ้งไว้ให้จนแข็งตัวประมาณ 30 นาทีก่อนการใช้งาน เมื่อเจลแข็งตัวเรียบร้อยแล้วก็ทำแท่นเจลไปแช่ไว้ลงใน Running buffer จากนั้นทำการเติมสารมาตรฐานและโปรตีนที่ต้องการทราบขนาดลงไปในหลุมต่างๆที่ทำการเอาหัวเสียบเอาไว้ โดยตัวอย่างนั้นจะถูกย้อมด้วย Staining solution จากนั้นต่อเครื่องเข้ากับแหล่งให้กระแสไฟฟ้า โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 150 โวลต์ โดยจะให้กระแสไฟฟ้าจนกระทั่งตัวอย่างนั้นเคลื่อนที่ลงมาด้านล่างสุดของเจล และสุดท้ายนำเจลไปล้างด้วย Destaining solution เพื่อทำการล้างสีย้อมออกจกแผ่นเจลใส



รูปที่ 3.2 SDS-Page

3.3.3 การวิเคราะห์ความหนืดของสารละลาย

ทำการวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายด้วยเครื่องวัดความหนืด รุ่น SV-10 ดังรูปที่ 3.3 โดยเทสารละลายประมาณ 35-45 มิลลิลิตร ลงในภาชนะ จากนั้นนำไปวางไปบนโต๊ะ ปรับหัววัดให้พอดีกับระดับสารละลาย จากนั้นทำการเก็บค่าความหนืด 3 ครั้ง ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 55-60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหนืด รุ่น SV-10

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของอนุภาค

นำผงปริมาณ 0.2 กรัม โดยประมาณ ไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Halogen moisture balance (Mettler Toledo® - HR83, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ดังรูปที่ 3.4 โดยตักผงใส่ในภาดอลูมิเนียม จากนั้นใส่เข้าไปในเครื่อง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 120 องศาเซลเซียส ทำซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 3.4 Halogen moisture balance

3.3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบบนผิวของอนุภาค

การวิเคราะห์องค์ประกอบบนผิวของอนุภาคจะวิเคราะห์จากเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์หรือ X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS (AXIS Ultra DLD, ประเทศอังกฤษ) รูปที่ 3.5 โดยทำการอัดผงให้เป็นเม็ด ตัวอย่างจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และไม่หนาเกิน 1.5 มิลลิเมตร ติดตัวอย่างลงบนเทปกาวคาร์บอน จากนั้นนำเข้าไปในเครื่องและทำการลดความดันลงต่ำกว่า 10^{-8} ปาสคาล โดยทำการวิเคราะห์ 1 ตำแหน่ง ขนาด 1x1 เซนติเมตร แหล่งที่มาของรังสีนั้นมาจากอลูมิเนียม $K\alpha$ X-rays (1486.6 eV)



รูปที่ 3.5 X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS

3.3.6 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศ (Hygroscopicity)

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศจะทำการวิเคราะห์โดยใช้ผงที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย 1 กรัม ใส่ไว้ในภาชนะ นำไปไว้ในตู้อบ รูปที่ 3.6 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 76 เปอร์เซ็นต์โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก ชั่วโมงที่ 3 5 8 11 14 17 20 24 28 และ 36 [17]



รูปที่ 3.6 Oven

3.3.7 การวิเคราะห์รูปร่างและพื้นผิวของอนุภาค

ติดผงตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยลงบนเทปกาวคาร์บอนจากนั้นนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope, SEM (JEOL JSM-6610LV, ประเทศอังกฤษ) รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Scanning Electron Microscope, SEM

3.3.8 การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค

ซึ่งผงปริมาณ 10 mg ใส่ลงในไอโซโพรพานอล (Isopropanol) 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer (Partica LA-950V2, Horiba, ประเทศญี่ปุ่น) ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นได้ทำการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นชนิดของโปรตีนซึ่งได้แก่ โซเดียมคาร์ซิเนต (Na-C) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) และ เจลาติน โดยทำการเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนในอัตราส่วนต่างๆ และผลิตผงภายใต้สภาวะการดำเนินงานต่างๆ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยทำการศึกษาอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า อัตราการป้อนสารและปริมาณอากาศร้อนซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลต่อ ปริมาณของโปรตีนที่ผิวของอนุภาค อัตราเร็วในการดูดซับความชื้น ร้อยละผลได้ของอนุภาค ขนาดและรูปร่างของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

4.1 อิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของโปรตีนที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

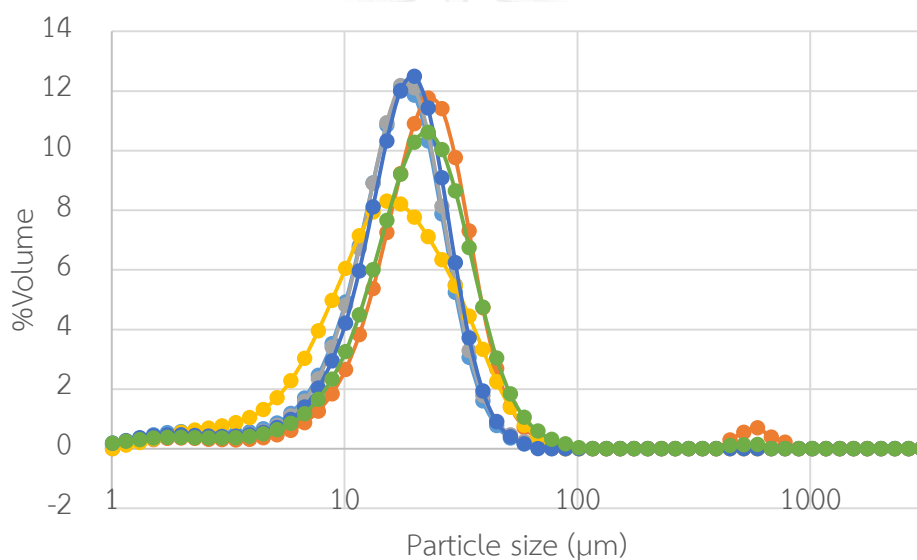
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานิตของโปรตีนทั้งหมด 3 ชนิด โดยมีโปรตีน 2 ชนิดที่ผลิตจากสัตว์ ได้แก่ โซเดียมคาร์ซิเนตและเจลาติน โปรตีนที่ผลิตจากพืช ได้แก่ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยทำการศึกษาโปรตีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 1 5 10 และ 20 ที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารเท่ากับ 9 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณลมร้อนเท่ากับ 38 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

4.1.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

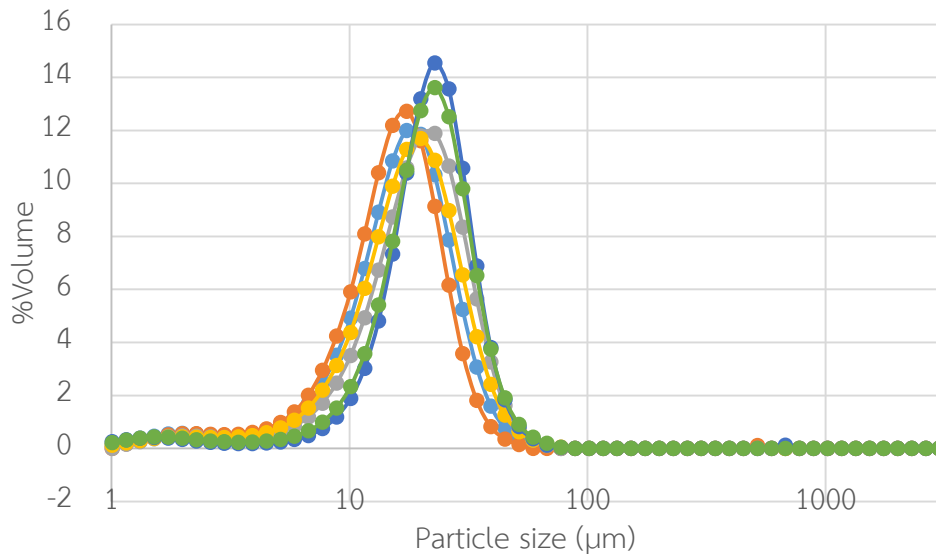
ขนาดของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนที่ได้นั้นมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการวิเคราะห์ทำให้พบว่าไม่ว่าจะทำการเปลี่ยนชนิดของโปรตีนหรือเพิ่มปริมาณของโปรตีนไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคที่ได้[32] โดยขนาดของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับหัวฉีด[33] สภาวะการอบแห้ง และขนาดของหยดสารละลายที่ถูกพ่นออกมา[34] โดยรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคของมอลโตเดกซ์ตรินต่อโปรตีนที่อัตราส่วนและชนิดต่างๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์พบว่าผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าและที่ความเข้มข้นของโปรตีนสูงๆ ขนาดของอนุภาคก็จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากความหนืดของสารละลาย เมื่อสารละลายที่มีความหนืดสูงขึ้น หยดสารละลายที่ถูกพ่นนั้นก็จะมีขนาดให้ขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผงมอลโตเดกซ์ตรินต่อโปรตีนที่อัตราส่วนและชนิดต่างๆ

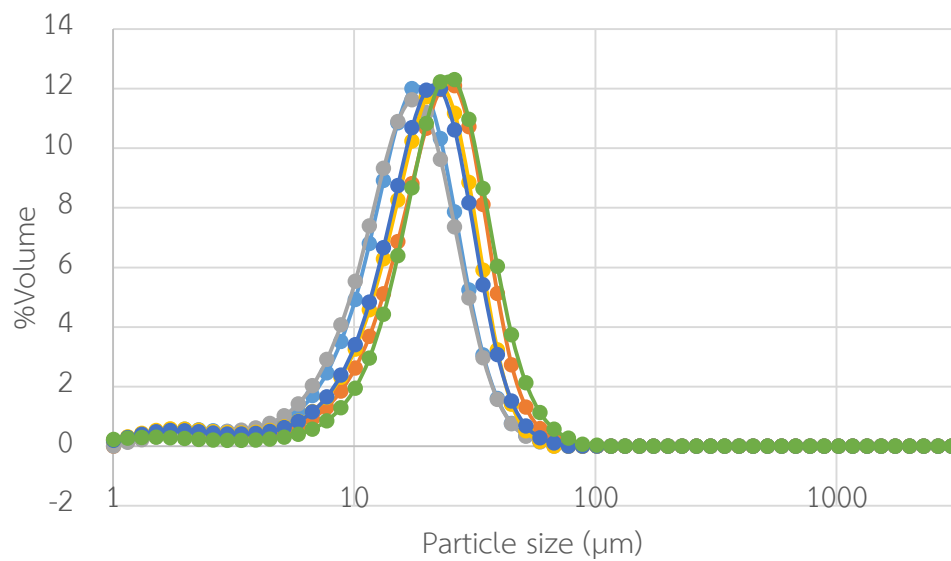
อัตราส่วนระหว่าง มอลโตเดกซ์ตรินต่อ โปรตีน	ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (μm)			
	มอลโตเดกซ์ตริน	โซเดียมคาร์ซีเนต	ถั่วเหลืองสกัด	เจลาติน
100:0	16 \pm 0.27	-	-	-
99.5:0.5	-	20 \pm 0.03	15 \pm 0.19	21 \pm 0.23
99:1	-	16 \pm 0.13	18 \pm 0.25	15 \pm 0.09
95:5	-	15 \pm 0.26	17 \pm 0.31	18 \pm 0.20
90:10	-	17 \pm 0.12	20 \pm 0.13	18 \pm 0.11
80:20	-	19 \pm 0.09	20 \pm 0.18	22 \pm 0.15



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการกระจายของตัวของผงโซเดียมคาร์ซีเนต /มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ● แทน MD ● แทน MD:Na-C=99.5:0.5 ● แทน MD:Na-C=99:1 ● แทน MD:Na-C=95:5 ● แทน MD:Na-C=90:10 และ ● แทน MD:Na-C=80:20

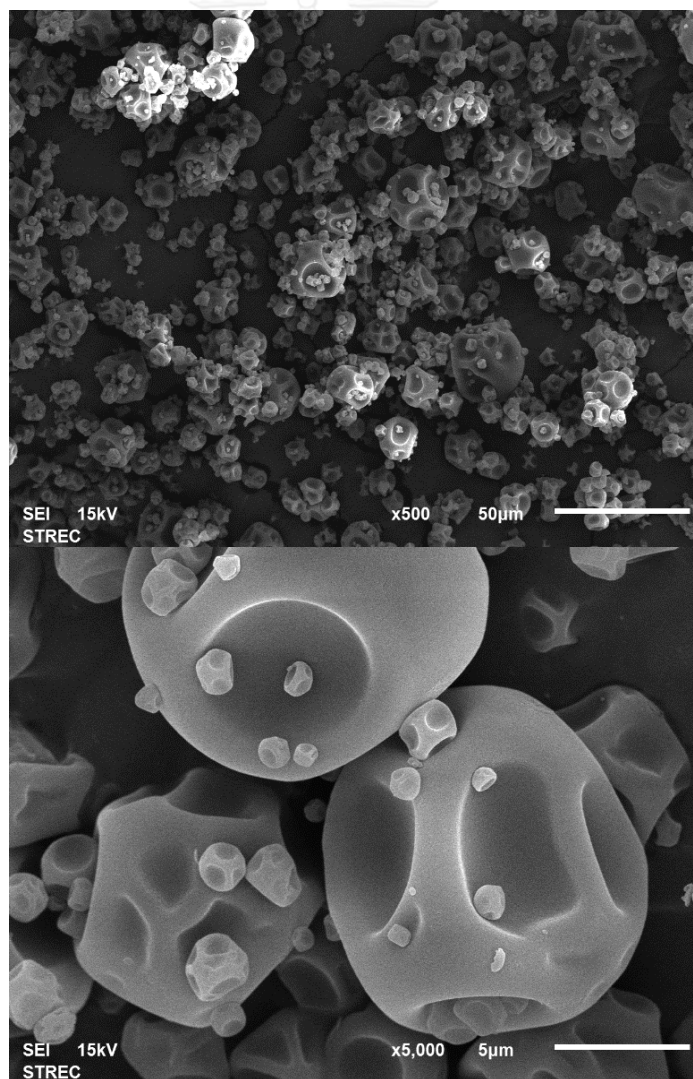


รูปที่ 4.2 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการกระจายของตัวของผงโปรตีนถั่วเหลืองสกัด/มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ● แทน MD ● แทน MD:SPI=99.5:0.5 ● แทน MD:SPI =99:1 ● แทน MD:SPI =95:5 ● แทน MD:SPI =90:10 และ ● แทน MD:SPI =80:20

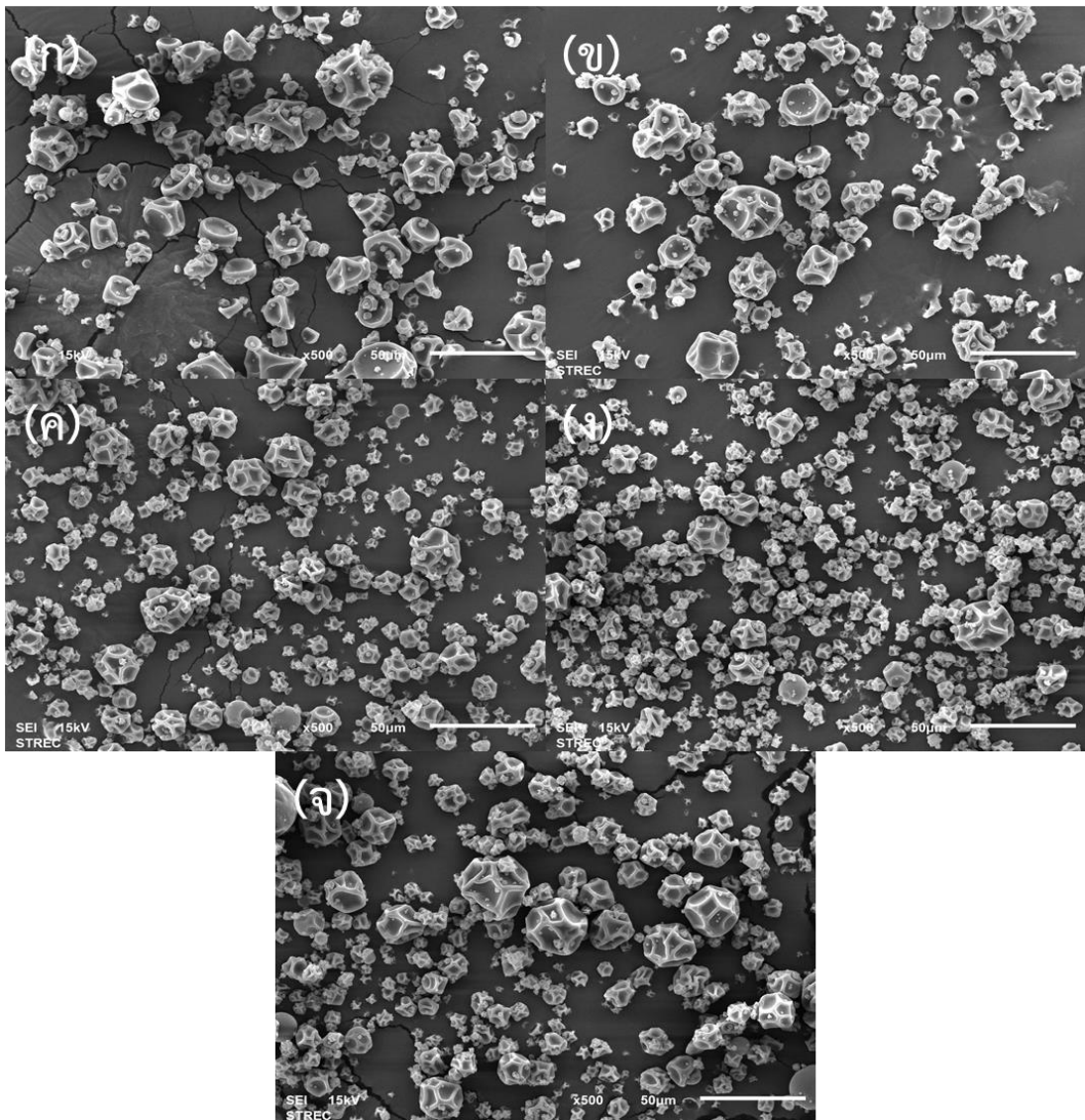


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการกระจายของตัวของผงเจลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ● แทน MD ● แทน MD:G=99.5:0.5 ● แทน MD:G =99:1 ● แทน MD:G =95:5 ● แทน MD:G =90:10 และ ● แทน MD:G =80:20

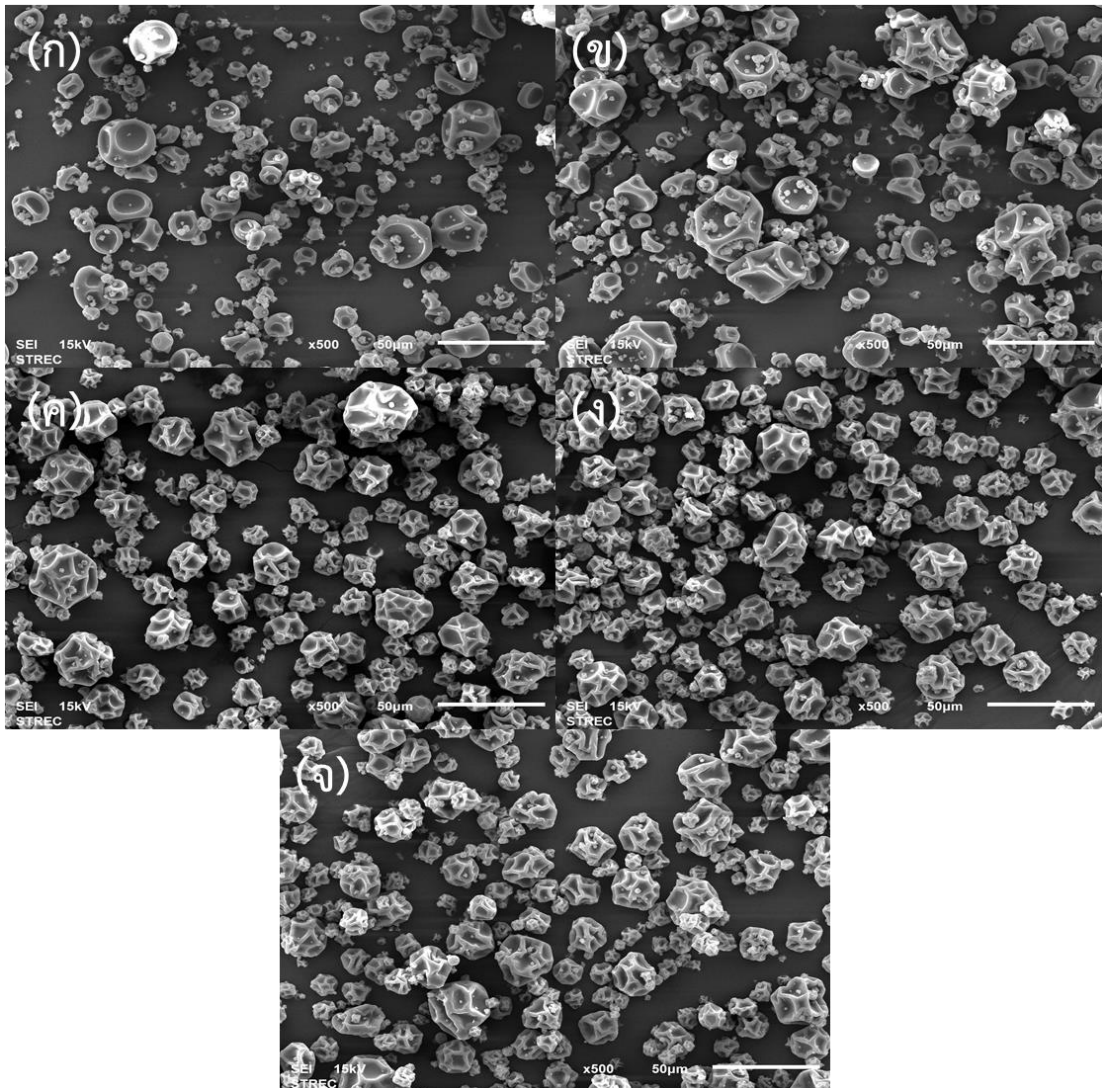
ในส่วนของรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์นั้น อนุภาคนั้นจะมีลักษณะกลมเป็นส่วนใหญ่ ผิวมีลักษณะค่อนข้างเรียบ บางอนุภาคนั้นมีรอยบุ๋มเล็กน้อยและกลวงเนื่องจากการดันของไอน้ำที่อยู่ภายในอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และเมื่อทำการเติมโปรตีนชนิดต่างๆลงไปผสมกับมอลโตเดกซ์ตรินพบว่าที่ผิวของผงที่มีโปรตีนผสมนั้นอนุภาคนั้นจะเสีรูปร่างไป และบริเวณผิวของอนุภาคนั้นมีรอยบุ๋มเกิดขึ้นมากมายเมื่อเปรียบเทียบกับผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ โดยรอยบุ๋มที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากการระเหยออกมาจากภายในตรงบริเวณที่ยังแห้งไม่สนิทและการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอของผิวของอนุภาคในระหว่างขั้นตอนสุดท้ายของการอบแห้งหรือในระหว่างการระบายความร้อนของอนุภาคนั้นเอง[19] ซึ่งรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 แสดงถึงชนิดและอัตราส่วนของโปรตีนต่างๆซึ่งพบว่าชนิดของโปรตีนไม่ได้ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกันมากนัก[35]แต่อัตราส่วนความเข้มข้นของโปรตีนนั้นส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นของโปรตีนที่มากขึ้นทำให้ที่ผิวของอนุภาคนั้นมีรอยย่นและบุ๋มมากขึ้น



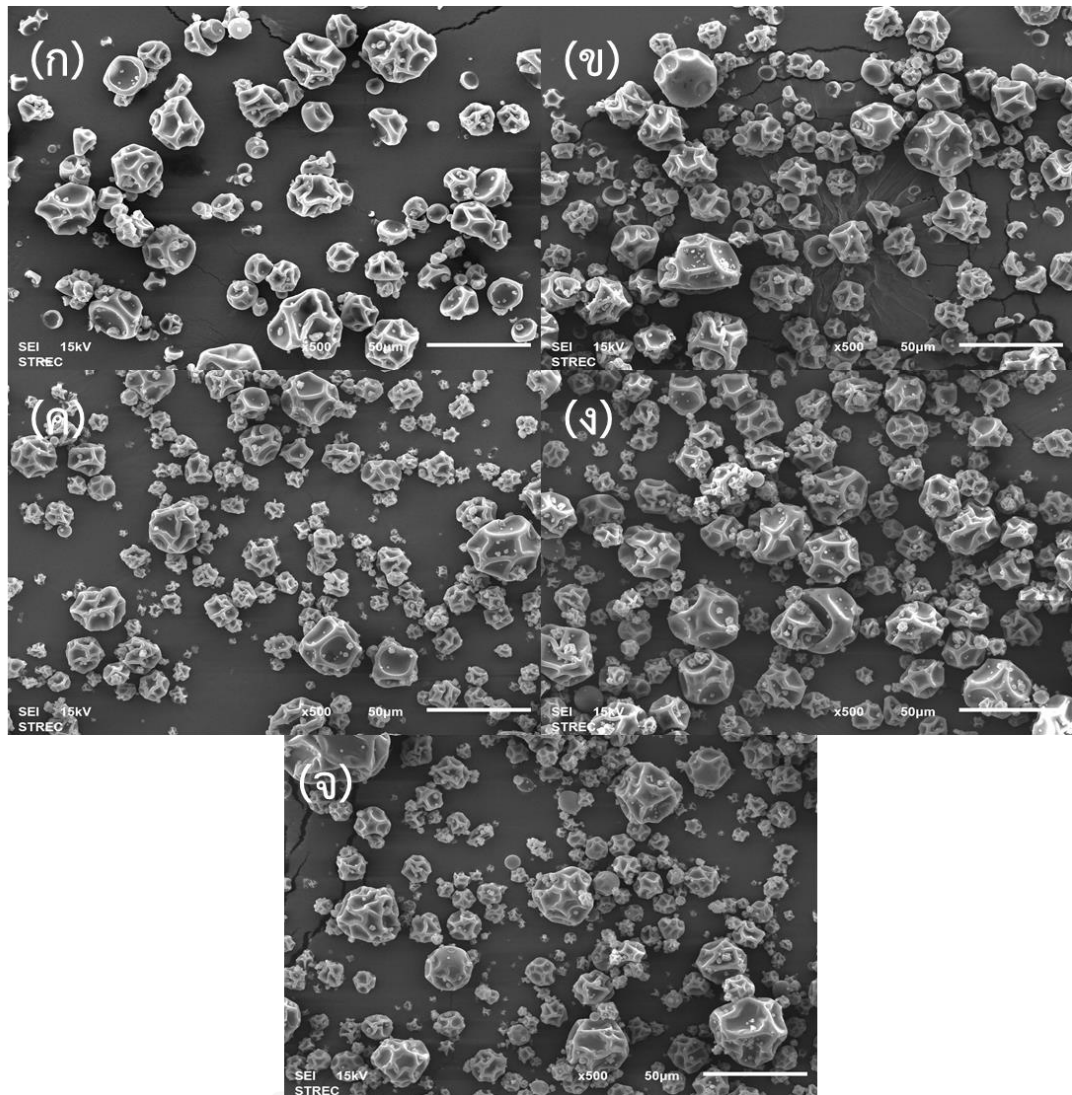
รูปที่ 4.4 รูปร่างของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโซเดียมคาร์ซิเนต/มอลโตเดกซ์
 ทรินที่ผสม MD:Na-C โดย (ก) 99.5:0.5 (ข) 99:1 (ค) 95:5 (ง) 90:10 และ (จ) 80:20



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลืองสกัด/มอลโต
 เดกซ์ตรินที่ผสม MD:SPI โดย (ก) 99.5:0.5 (ข) 99:1 (ค) 95:5 (ง) 90:10 และ (จ) 80:20



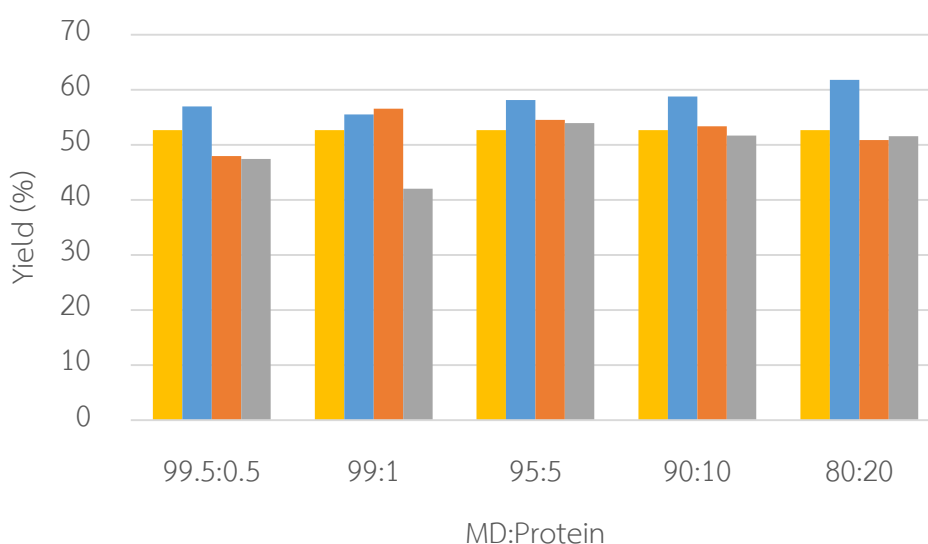
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณของโพรตีนที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลลาติน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผสม MD:G โดย (ก) 99.5:0.5 (ข) 99:1 (ค) 95:5 (ง) 90:10 และ (จ) 80:20

4.1.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโพรตีนที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโพรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

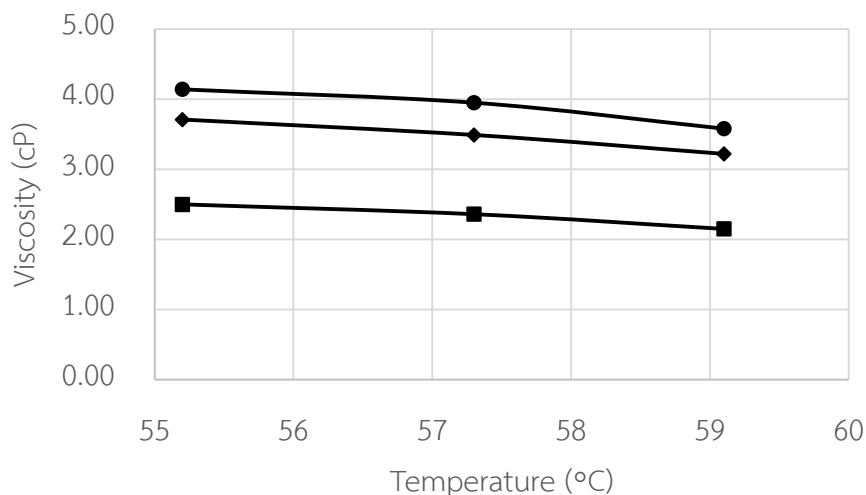
จากการศึกษาร้อยละผลได้ของผงโพรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินโดยการเปลี่ยนชนิดและปรับความเข้มข้นความเข้มข้น พบว่าโพรตีนนั้นสามารถเพิ่มร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตรินได้ โดยโพรตีนที่เติมลงไปนั้นจะทำหน้าที่ลดความเหนียวเหนอะของผงมอลโตเดกซ์ตรินได้ เนื่องจากสารละลายมอลโตเดกซ์ตรินที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดผ่านอากาศร้อนจนแห้งกลายเป็นผงนั้นไปเกาะติดตามผนังของห้องอบ[17]และมีบางส่วนหลุดจากไซโคลนเข้าไปติดในถุงกรอง แต่เมื่อทำการเติมโพรตีนลงไปผสมกับมอลโตเดกซ์ตริน โดยโพรตีนนั้นจะปกคลุมที่ผิวของอนุภาค เมื่อหยดของสารละลายที่ผสมโพรตีนนั้นเมื่อถูกความร้อน ผิวของอนุภาคนั้นก็จะมีลักษณะคล้ายแก้ว[12, 13] เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยน

สถานะคล้ายแก้วที่ผิวของอนุภาคมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนจึงทำให้อนุภาคที่ผลิตได้นั้นไปเกาะตามผนังของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยลดลง[5]และติดกันเองน้อยลง

โดยร้อยละผลได้สามารถแสดงถึงการมีอยู่ของโปรตีนบนผิวของอนุภาคได้อีกทางหนึ่งซึ่งจะเห็นว่าโซเดียมคาร์ซิเนตนั้นให้ร้อยละผลได้นั้นมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีน เนื่องจากการมีโปรตีนอยู่ที่ผิวมากขึ้นทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงขึ้นทำให้สามารถเก็บผลผลิตได้มากขึ้น ในขณะที่ถั่วเหลืองสกัดและเจลาตินนั้นต้องทำการเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนลงไปจึงสามารถทำให้ได้ร้อยละผลได้ที่มีความสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โซเดียมคาร์ซิเนตนั้นให้ค่าร้อยละผลได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ SPI และเจลาติน เนื่องจากปริมาณร้อยละผลได้ที่เกิดขึ้นนั้นได้รับอิทธิพลมาจากความหนืดมาจากความหนืดของสารละลายที่พ่นออกมาจากหัวฉีด โดยจากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าโซเดียมคาร์ซิเนตนั้นมีความหนืดที่ต่ำสุด ในขณะที่เจลาตินนั้นมีความหนืดที่สูงที่สุด จึงส่งผลให้เจลาตินนั้นให้ค่าร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินน้อยที่สุด



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD ■ แทน MD:Na-C ■ แทน MD:SPI และ ■ แทน MD:G



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อค่าความหนืดของสารละลายของมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนทั้ง 3 ชนิด โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C ◆ แทน MD:SPI ● แทน MD:G

4.1.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

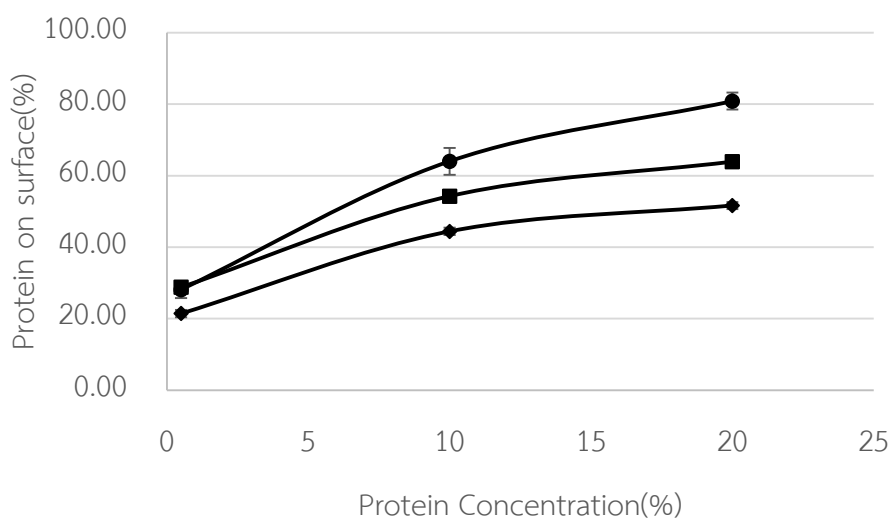
จากการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่วัดได้จากเครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy หรือ XPS พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนจากร้อยละ 0.5 ไปจนถึงร้อยละ 20 นั้นทำให้ที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวเพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำค่าปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวไปคิดเป็นร้อยละการปกคลุมของโปรตีนบนผิวของผง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมคาร์ซิเนตร้อยละ 0.5 นั้นจะมีโซเดียมคาร์ซิเนตปกคลุมอยู่ที่ผิวอยู่ร้อยละ 28.78 ในขณะที่ความเข้มข้นของโซเดียมคาร์ซิเนตร้อยละ 20 นั้นมีโซเดียมคาร์ซิเนตปกคลุมถึงร้อยละ 63.92 โดยปริมาณของโซเดียมคาร์ซิเนตที่ผิวเพิ่มขึ้นนั้น แต่ในขณะเดียวกันเจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 นั้นมีปริมาณของเจลาตินปกคลุมที่ผิวมากที่สุดคือ ร้อยละ 80.85 และ โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองนั้นมีร้อยละบนผิวของผบน้อยที่สุด จากการหามวลโมเลกุลขององค์ประกอบต่างๆของโปรตีนทั้ง 3 ชนิดจะพบว่าโซเดียมคาร์ซิเนตและเจลาตินมีองค์ประกอบของโปรตีนและมวลโมเลกุลไม่มากเท่ากับโปรตีนถั่วเหลืองสกัด แต่สามารถบอกได้แค่เพียงแนวโน้มว่าโซเดียมคาร์ซิเนตและเจลาตินนั้นจะสามารถที่จะแพร่ได้ดีกว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

โปรตีนนั้นเคลื่อนที่จากภายในหยดสารละลายไปยังที่ผิวของหยดสารละลายแต่ระหว่างการแพร่ของโปรตีนนั้นก็ไม่สามารถที่จะแพร่ออกมาได้ทั้งหมดเนื่องจากการแพร่ของสารขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่อีกด้วย และเมื่อปริมาณโปรตีนในสารละลายนั้นมีปริมาณที่น้อยประกอบกับโปรตีนมีขนาดของโมเลกุลใหญ่กว่าโมเลกุลของมอลโตเดกซ์ทรินจึงสามารถแพร่ออกมาที่ผิวได้น้อยแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีน ปริมาณของโปรตีนที่มีมากขึ้นจึงทำให้มีโอกาสที่โปรตีนจะแพร่ไปยังที่ผิวนั้นจึงมีมากขึ้น แต่โปรตีนนั้นไม่ได้เคลื่อนที่มายังผิวโดยการแพร่เพียงอย่างเดียว โปรตีนบางส่วนนั้นจะถูกพาออกมาที่บริเวณผิวของอนุภาคพร้อมกันไอน้ำ

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ทริน

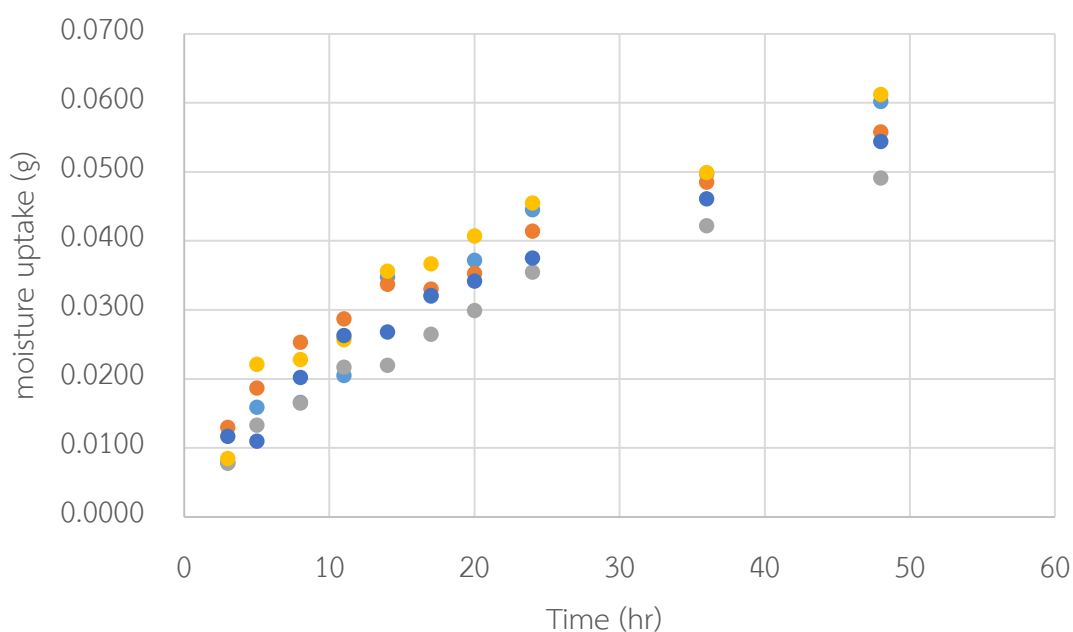
ความเข้มข้นของโปรตีน (%)	ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิว (%)		
	Na-C	SPI	Gelatin
0.5	3.67±0	2.96±0.14	4.64±0.40
10	6.92±0	6.13±0.10	10.57±0.33
20	8.15±0	7.13±0.17	13.34±0.39
100	12.75±0	13.8±0	16.5±0



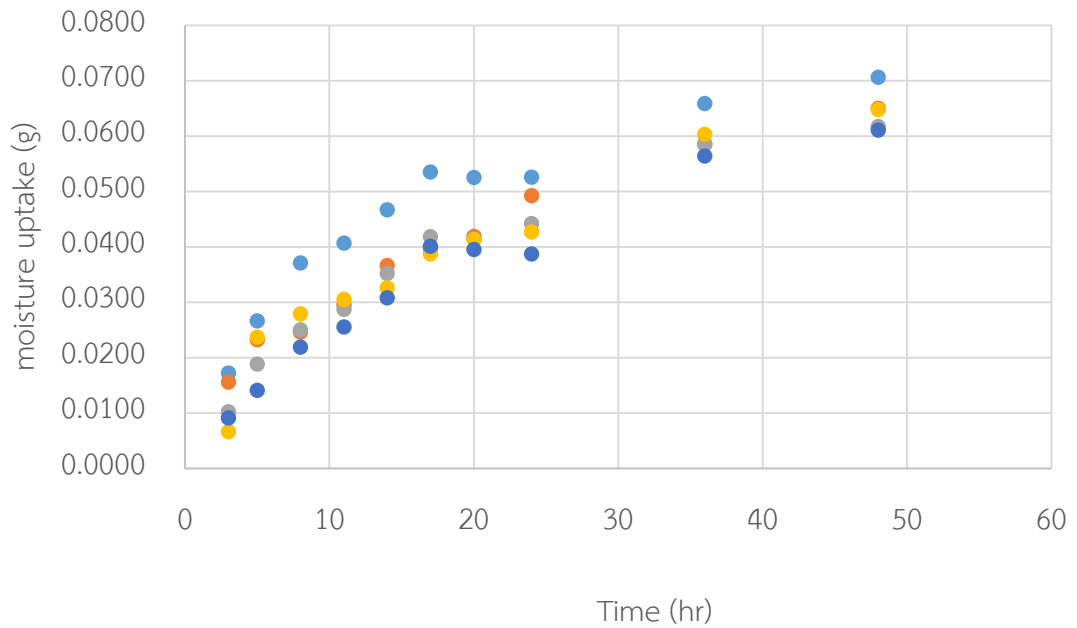
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนบนผิวของอนุภาค โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C ◆ แทน MD:SPI และ ● แทน MD:G

4.1.4 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

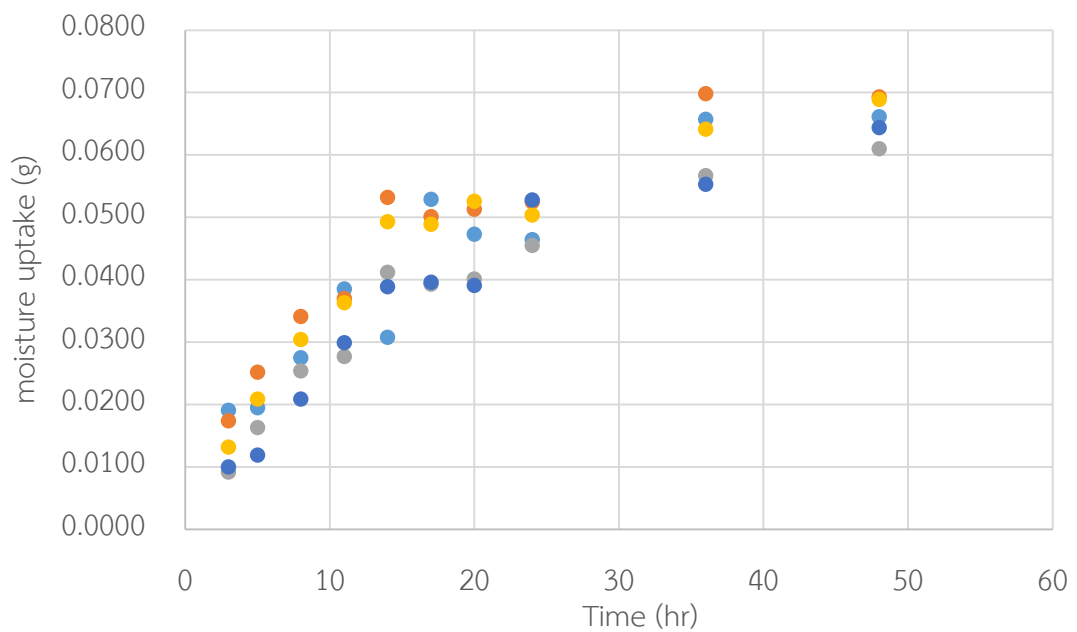
จากผลการทดลองพบว่าโปรตีนทั้ง 3 ชนิดแสดงในรูปที่ 4.11 4.12 และ 4.13 ที่ความเข้มข้นสูงสามารถลดอัตราเร็วในการดูดความชื้นได้โดยการเพิ่มความเข้มข้น จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการดูดซับน้ำกับปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนที่แตกต่างกับพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนนั้นอัตราการดูดความชื้นนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง โดยความเข้มข้นของโปรตีนที่สูงขึ้นนั้นทำให้มีปริมาณของโปรตีนที่ผิวมากขึ้นซึ่งโปรตีนนั้นเป็นสารที่ช่วยให้ผนังของอนุภาคแข็งตัวได้เร็วขึ้นจึงทำให้น้ำที่ระเหยอยู่ภายในอนุภาคสามารถทะลุผิวที่แข็งตัวของโปรตีนออกมาได้น้อย ทำให้มีปริมาณน้ำที่ถูกขังภายในมากขึ้นซึ่งปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ภายในนั้นมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการดูดความชื้นโดยตรง จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าเมื่อผงนั้นมีปริมาณน้ำที่คงอยู่ภายในปริมาณมาก อนุภาคนั้นจะมีอัตราเร็วในการดูดความชื้นในอากาศที่ลดลง เนื่องจากการดูดซับความชื้นนั้นเกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของความชื้นที่อยู่ภายในและภายนอก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณโปรตีนนั้นทำให้อัตราเร็วในการดูดซับความชื้นมีค่าลดลง



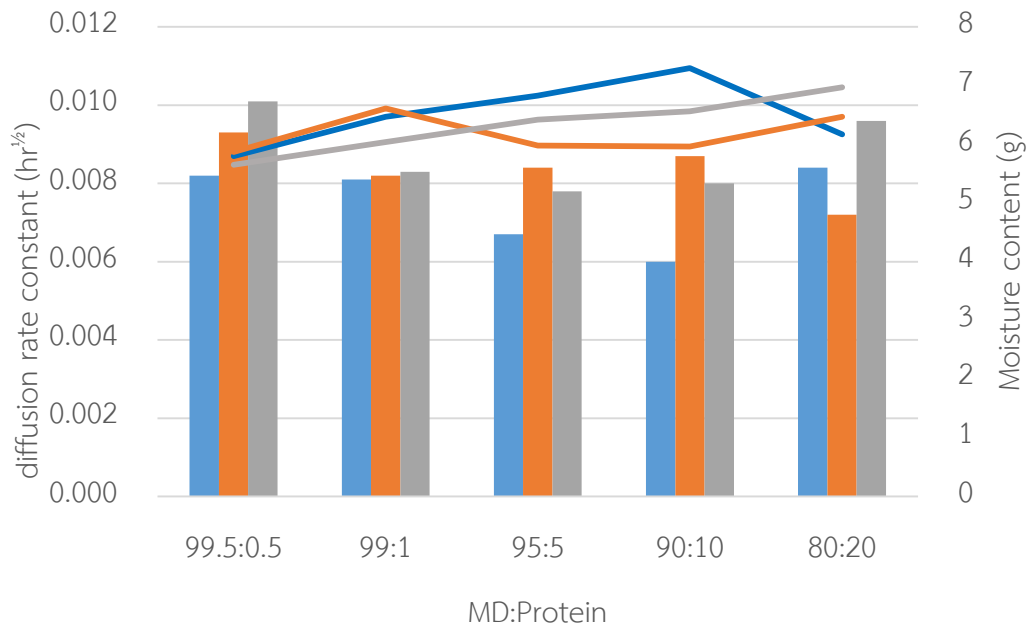
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาของ MD:Na-C โดยสัญลักษณ์ ● แทน 99.5:0.5 ● แทน 99:1 ● แทน 95:5 ● แทน 90:10 และ ● แทน 80:20



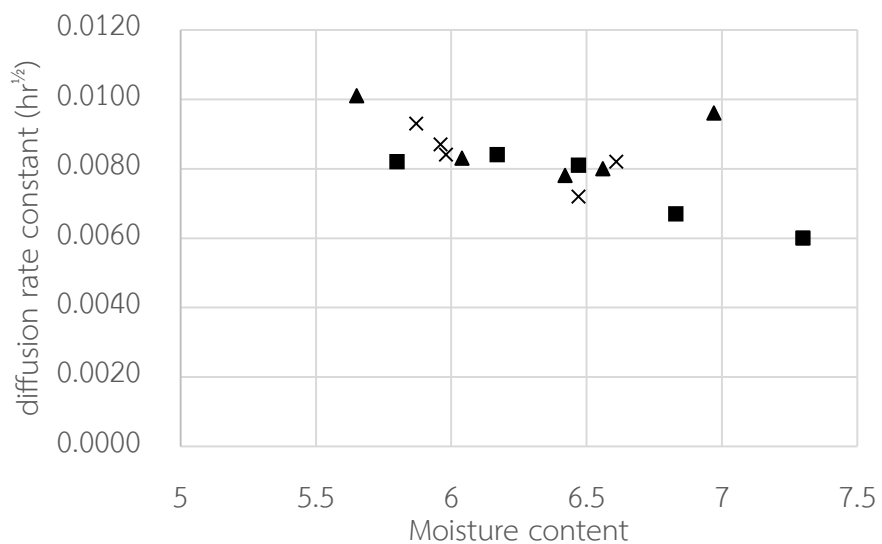
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาของ MD:SPI โดยสัญลักษณ์ ● แทน 99.5:0.5 ● แทน 99:1 ● แทน 95:5 ● แทน 90:10 และ ● แทน 80:20



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาของ MD:G โดยสัญลักษณ์ ● แทน 99.5:0.5 ● แทน 99:1 ● แทน 95:5 ● แทน 90:10 และ ● แทน 80:20



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดความชื้นและความชื้นต่างๆ โดยสัญลักษณ์ ■ แทนค่าคงที่ของการอัตราแพร่ของผงMD:Na-C ■ แทนค่าคงที่ของการอัตราแพร่ของผงMD:SPI ■ แทนค่าคงที่ของการอัตราแพร่ของผงMD:G และ — แทน ปริมาณความชื้นของ MD:Na-C — แทนปริมาณความชื้นของ MD:SPI — แทนปริมาณความชื้นของ MD:G



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับความชื้นกับความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C × แทน MD:SPI และ ▲ แทน MD:G

4.1.5 อิทธิพลของชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการเติมโปรตีนลงไปในการละลายมอลโตเดกซ์ตรินนั้นจะช่วยในเรื่องของการลดอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นได้ไม่ได้ แต่กลับพบว่า การเติมโปรตีนลงไปนั้นสามารถช่วยลดการเกาะกันของอนุภาคได้โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว

จากการวิเคราะห์ที่ผิวของผงอนุภาคโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินพบว่าโปรตีนนั้นไม่ได้มีเพียงโปรตีนอย่างเดียวดังนั้นจึงต้องคำนวณอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของสารผสมโดยใช้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วและความแตกต่างความจุความร้อนจำเพาะของสารประกอบของส่วนผสมทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4.3 ลงในสมการดังต่อไปนี้

$$T_{g(\text{mixture})} = \frac{W_1\Delta C_{p1}T_{g1} + W_2\Delta C_{p2}T_{g2} + W_3\Delta C_{p3}T_{g3}}{W_1\Delta C_{p1} + W_2\Delta C_{p2} + W_3\Delta C_{p3}}$$

โดยที่ T_g = อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว

w = สัดส่วนโดยมวล

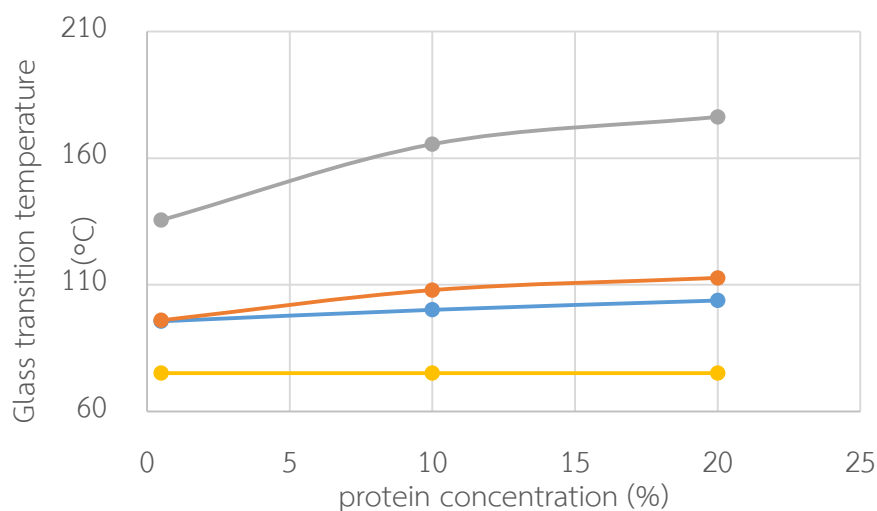
ΔC_p = ความแตกต่างความจุความร้อนจำเพาะ (differential specific heat capacity)

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วและความแตกต่างความจุความร้อนจำเพาะของสารประกอบ

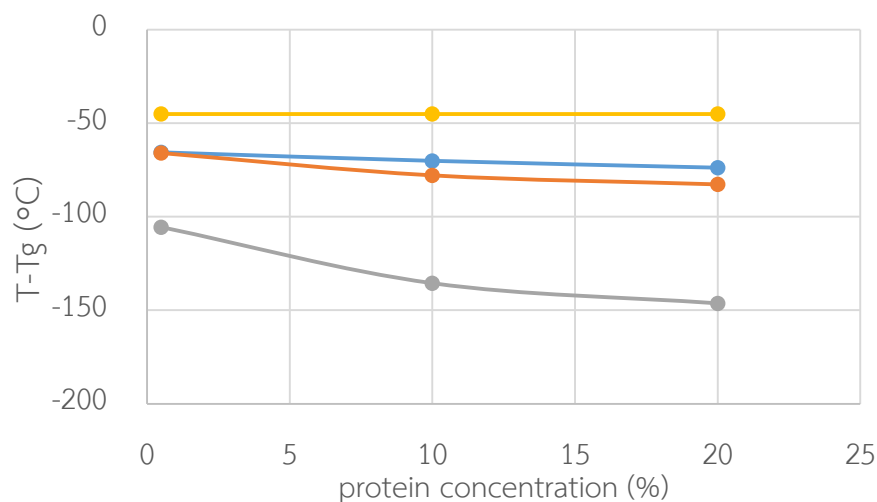
สารประกอบ	อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (°C)	ความแตกต่างความจุความร้อนจำเพาะ (J·K ⁻¹ ·g ⁻¹)
มอลโตเดกซ์ตริน	138	0.44
น้ำ	-139	1.94
โซเดียมคาร์ซีเนต	130	1.47
โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	172	0.85
เจลาติน	217	1.4

จากการคำนวณพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนนั้นทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วมีค่าสูงขึ้น [36] โดยจากรูปที่ 4.16 พบว่า การเพิ่มโปรตีนนั้นสามารถลดอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนที่ร้อยละ 0.5 10 และ 20 นั้นจะสามารถเห็นความแตกต่างของ T_g ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินและผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด โดยเจลาตินนั้นมีค่า T_g ที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด เนื่องจากเจลาตินนั้นมีปริมาณที่ผิวมากที่สุดอีกทั้ง T_g ของเจลาตินนั้นมีค่ามากที่สุดด้วย และจากรูปที่ 4.17 แสดงถึงผลต่างระหว่างอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิ

การเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (T-Tg) โดยพบว่า การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนนั้นทำให้ T-Tg นั้นมีค่าต่ำลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงที่มีความเข้มข้นของโปรตีนสูงนั้นจะมีความสามารถในการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนได้น้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิห้องนั้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว ดังนั้นผงที่ได้นั้นจะประพุดิตัวคล้ายแก้ว



รูปที่ 4.16 อิทธิพลจากความเข้มข้นของโปรตีนที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิว โดยสัญลักษณ์ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ ● แทนผงโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตริน ● แทนผงโปรตีนถั่วเหลืองสกัด/มอลโตเดกซ์ตริน และ ● แทนผงเจลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน



รูปที่ 4.17 อิทธิพลจากความเข้มข้นของโปรตีนที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิว โดยสัญลักษณ์ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ ● แทนผงโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตริน ● แทนผงโปรตีนถั่วเหลืองสกัด/มอลโตเดกซ์ตริน และ ● แทนผงเจลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยที่ T เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

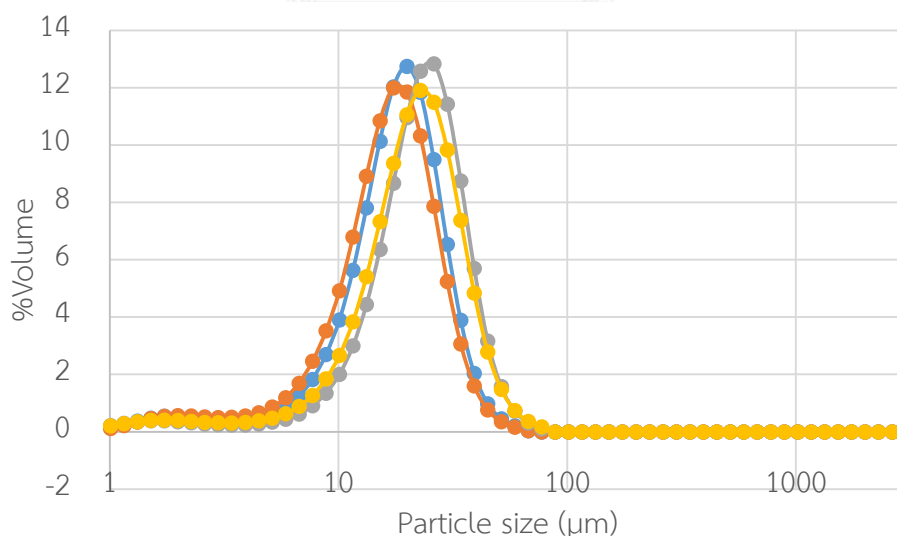
4.2 อิทธิพลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าศึกษาจากปรับอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเท่ากับ 140 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและโปรตีนเท่ากับ 99:1 อัตราการป้อนสารและปริมาณลมร้อนคงที่ เท่ากับ 9 มิลลิลิตรต่อนาที และ 38 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

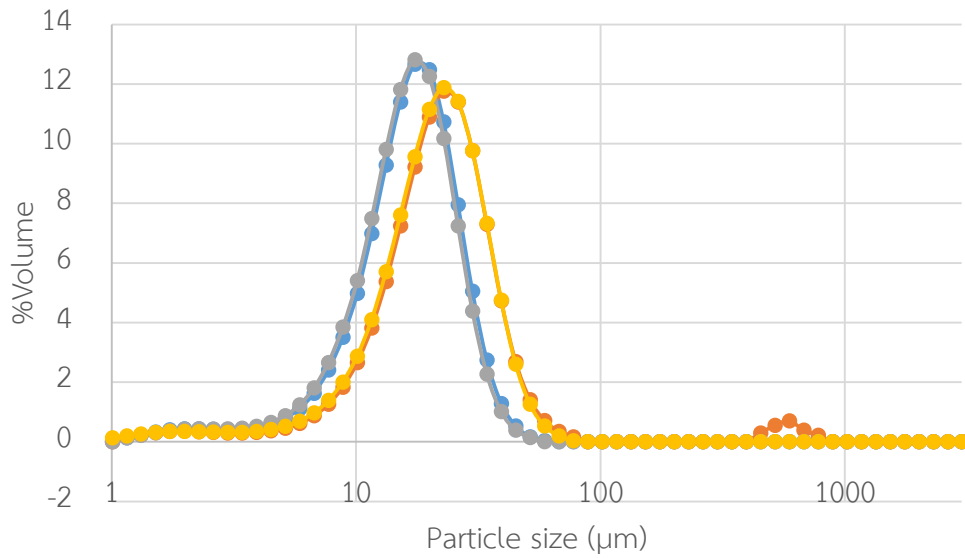
4.2.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4.18 4.19 4.20 และ 4.21 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้านั้นเพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคนั้นก็มีแนวโน้มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนที่สูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ภายในหยดสารละลายนั้นเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำมากขึ้น แต่ที่ผิวของหยดสารละลายนั้นเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากโปรตีนจึงทำให้น้ำที่ไอน้ำไม่สามารถที่จะทะลุออกมาจากผิวได้ทั้งหมด ดังนั้นไอน้ำที่อยู่ภายในอนุภาคนั้นเกิดการขยายตัวจึงทำให้อนุภาคนั้นใหญ่ขึ้น

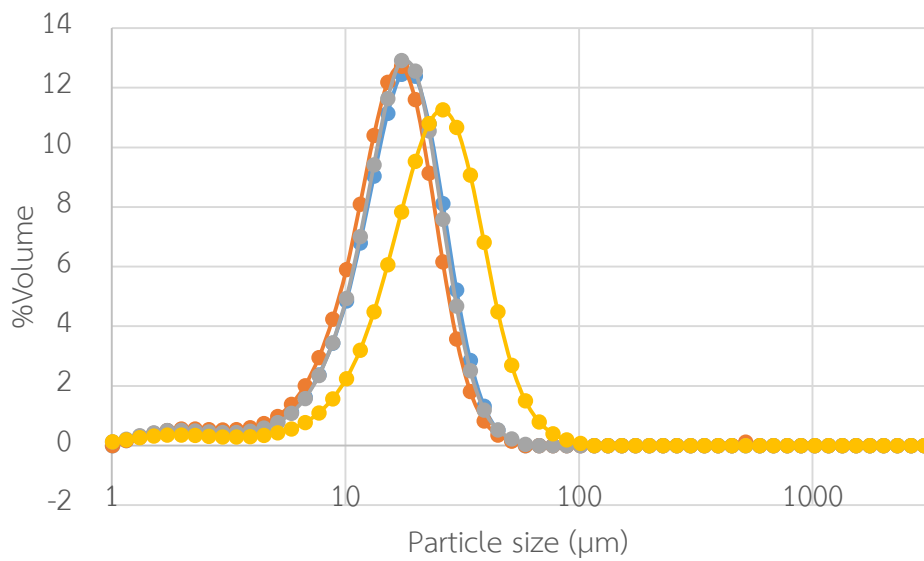


รูปที่ 4.18 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส

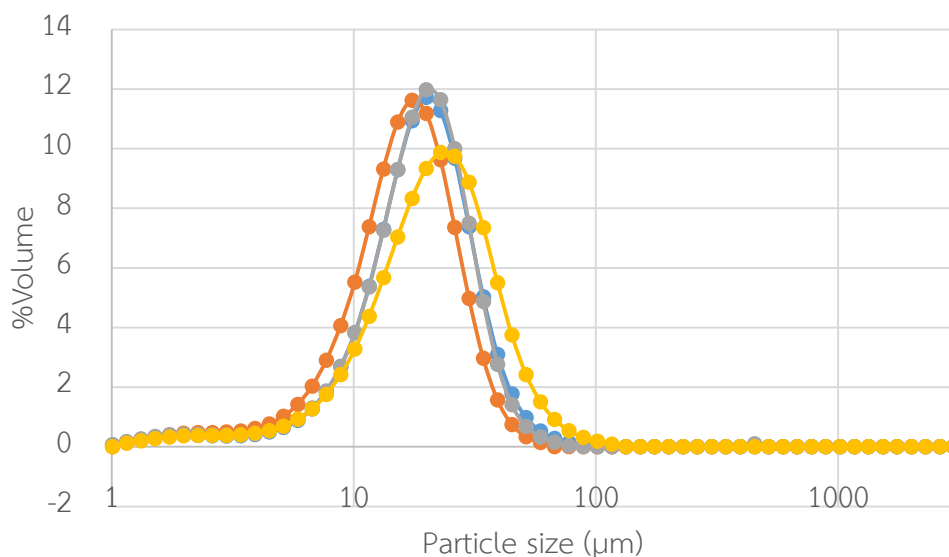
● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/ไซเตียมคาร์ซิเนต โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส ● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส

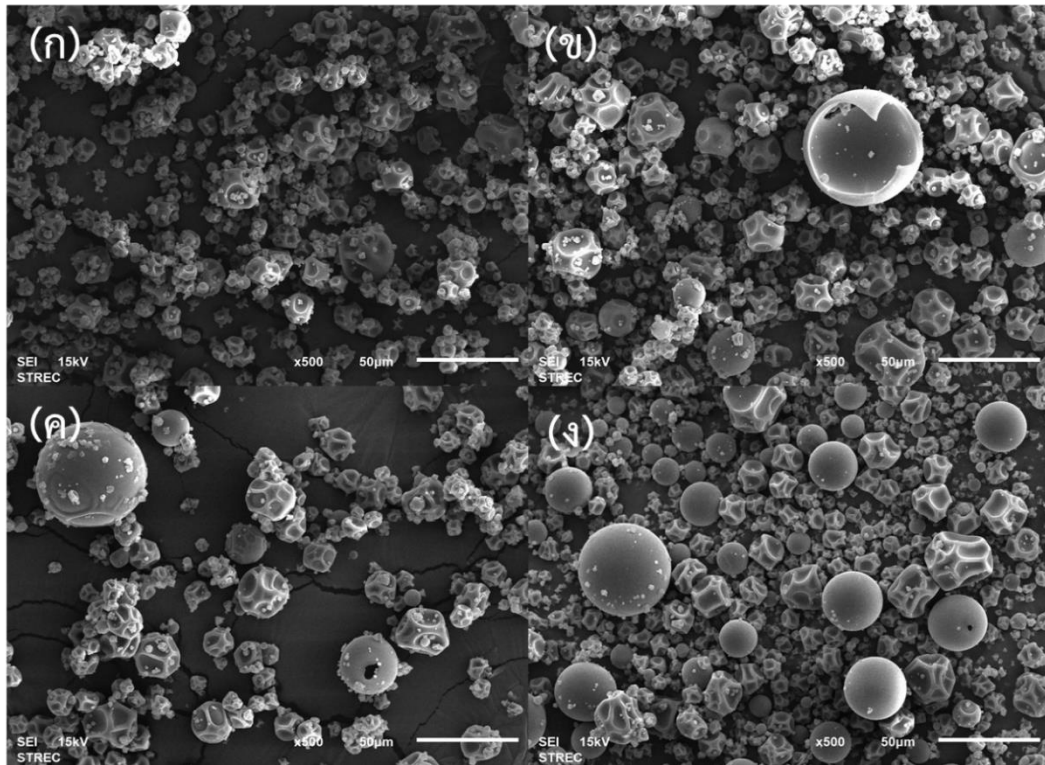


รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส ● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส

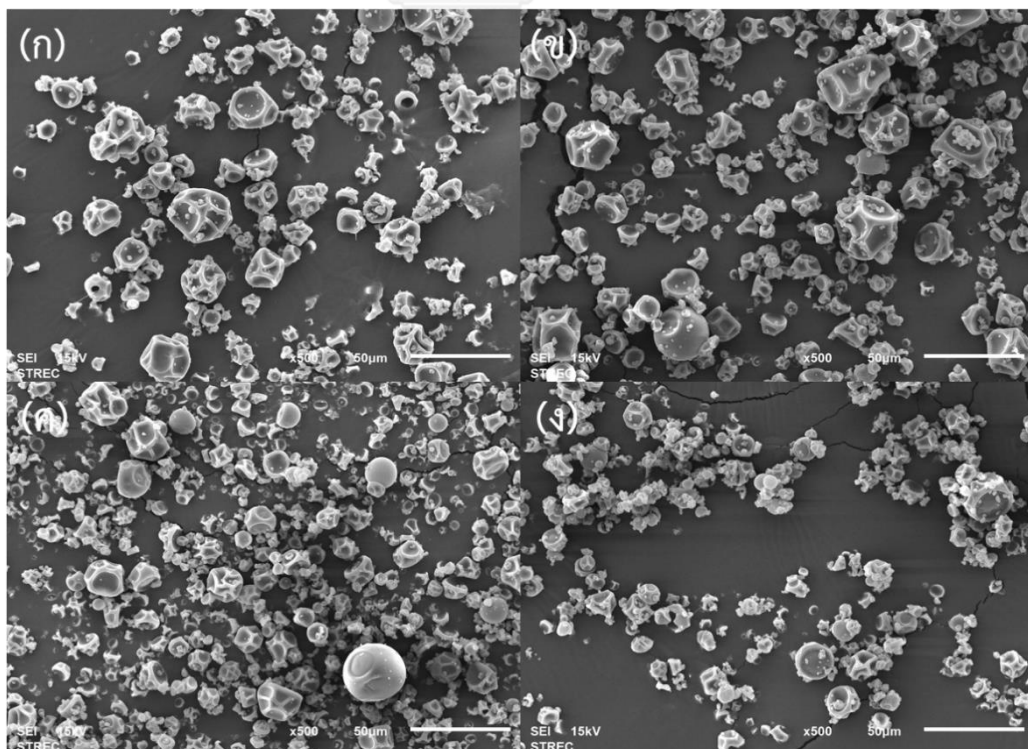


รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/เจลาติน โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส ● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส

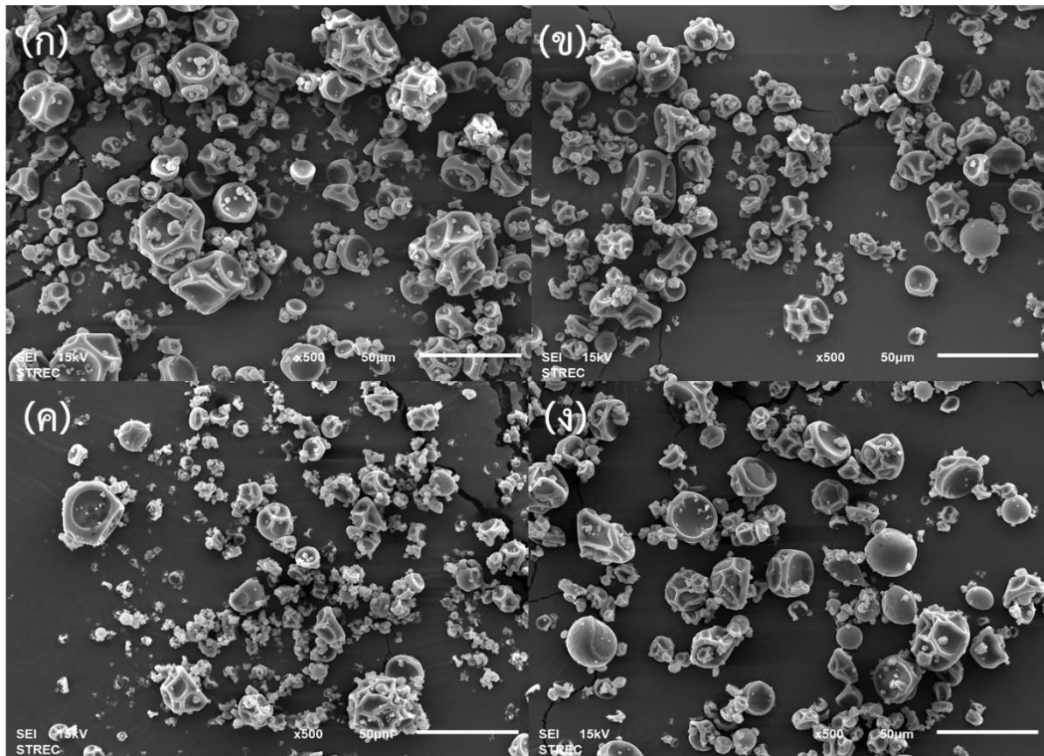
จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงรูปร่างและพื้นผิวของผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ 140 องศาเซลเซียส ในรูป ก อนุภาคที่ได้จะมีรูปร่างบวม ไม่เป็นทรงกลม แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิลึกลับพบว่าในรูป ข และ ง อนุภาคมีลักษณะกลม มีผิวเรียบมากขึ้น และมีจำนวนอนุภาคที่กลมมากขึ้นซึ่งผิวที่เรียบของอนุภาคนั้นเกิดจากการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วทำให้ผิวของอนุภาคนั้นแห้งและแข็ง และเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วอนุภาคนั้นจะไม่สามารถยุบและบวมได้ [37] แต่อนุภาคของโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีลักษณะของอนุภาคที่แตกต่างจากอนุภาคมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์เล็กน้อย โดยอนุภาคที่มีส่วนผสมของโปรตีนนั้นจะมีรอยยุบและรอยบวมบนผิวของอนุภาคมากมายเนื่องจาก โปรตีนที่ปกคลุมอยู่บนผิวของอนุภาคนั้นจะทำให้ผิวของอนุภาคแข็งตัวเร็วขึ้นแต่อย่างไรก็ตามโปรตีนนั้นไม่สามารถที่จะปกคลุมบนผิวของอนุภาคได้ทั้งหมดดังนั้นส่วนที่ยังไม่แข็งตัวมากนั้นจะถูกไอน้ำที่อยู่ภายในดันทะลุออกมาแล้วก็การหดตัวกลับเข้าไปกลายเป็นรอยบวมขึ้นมา และเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอนุภาคนั้นก็มีรอยบวมน้อยลงและมีความเรียบมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามที่อธิบายข้างต้นและเป็นเช่นเดียวกันทั้งในโปรตีนทั้ง 3 ชนิด แสดงในรูปที่ 4.23 4.24 และ 4.25



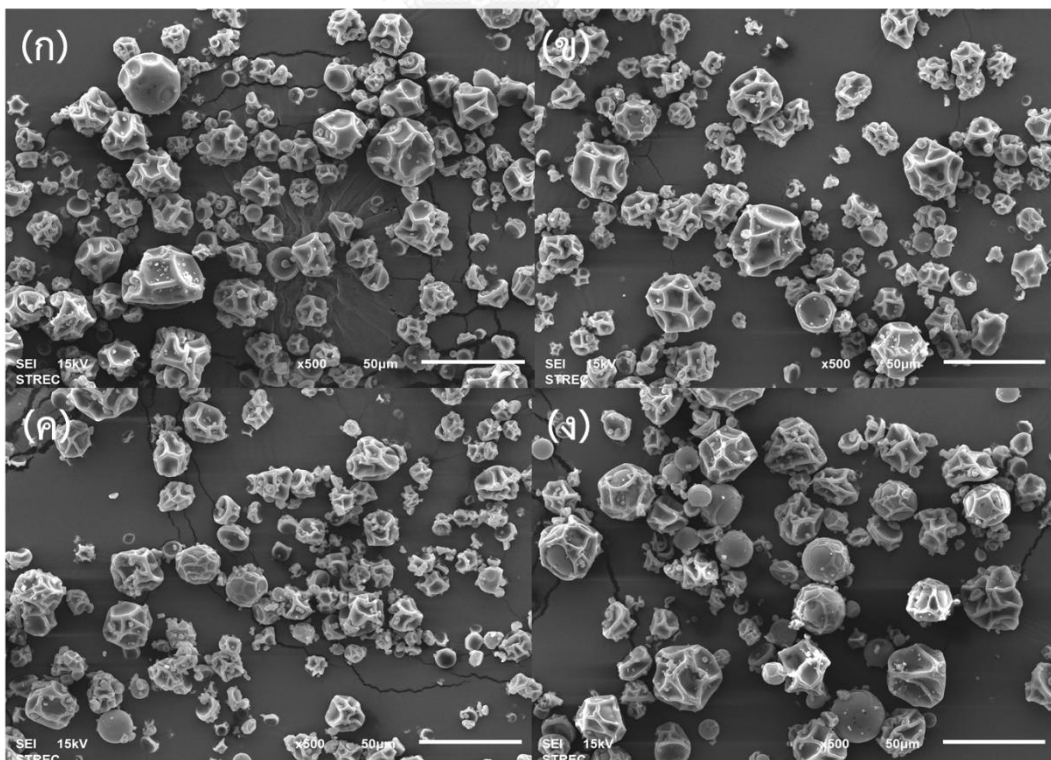
รูปที่ 4.22 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน
 บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าต่างๆ ก) 140 ข) 160 ค) 180 และ ง) 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโพลีเอทิลีนคาร์ซีเนต
 /มอลโตเดกซ์ตริน ก) 140 ข) 160 ค) 180 และ ง) 200 องศาเซลเซียส



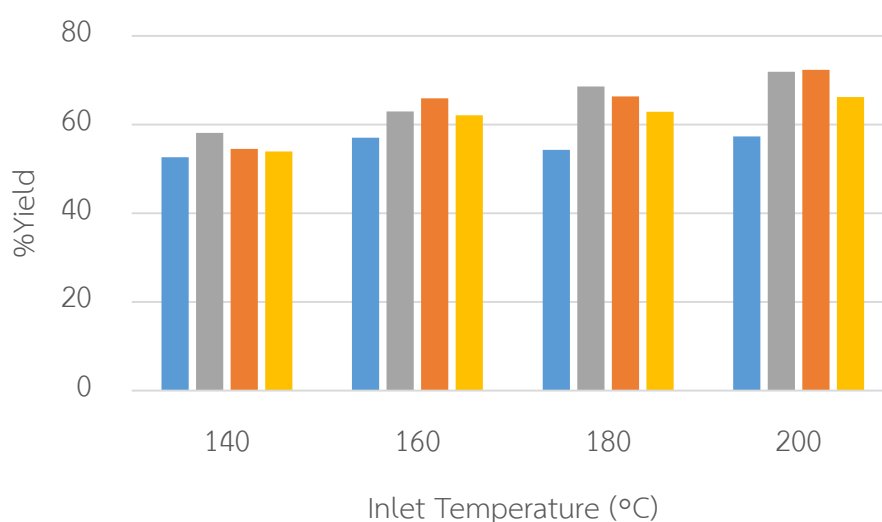
รูปที่ 4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโพรพิลีนถั่วเหลืองสกัด/
มอลโตเดกซ์ตริน ก) 140 ข) 160 ค) 180 และ ง) 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลลาดิน
/มอลโตเดกซ์ตริน ก) 140 ข) 160 ค) 180 และ ง) 200 องศาเซลเซียส

4.2.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

เมื่อนำเอาโปรตีนและอุณหภูมิในการดำเนินงานต่างๆมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินอย่างเห็นได้ชัด เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 140 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 200 องศาเซลเซียสพบว่าที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/ไซเดียมคาร์ซิเนต โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และเจลาตินนั้นจะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 58.13% 54.53% และ 53.93% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละผลได้มากกว่าผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นถึงแม้ว่าจะถูกกำหนดไว้ที่ 140 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ปะทะกับหยดสารละลายนั้นจะมีอุณหภูมิจริงอยู่ที่ประมาณอุณหภูมิอากาศขาออก ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้านั้นจะมีอุณหภูมิอากาศขาออกเท่ากับ 78.4 องศาเซลเซียส ทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศโดยรอบอนุภาคกับอุณหภูมิของหยดสารละลายต่ำ อัตราการการระเหยจึงลดลง ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำที่อยู่ในหยดสารละลายหรือที่ผิวผนังระเหยออกไปได้น้อยลงแต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าเป็น 160 และ 180 องศาเซลเซียส จะพบว่าร้อยละผลได้นั้นมีค่าสูงขึ้นและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจนถึง 200 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผงนั้นมีค่าสูงที่สุดเพราะมีอัตราการระเหยสูงที่สุดและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองและเจลาตินก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



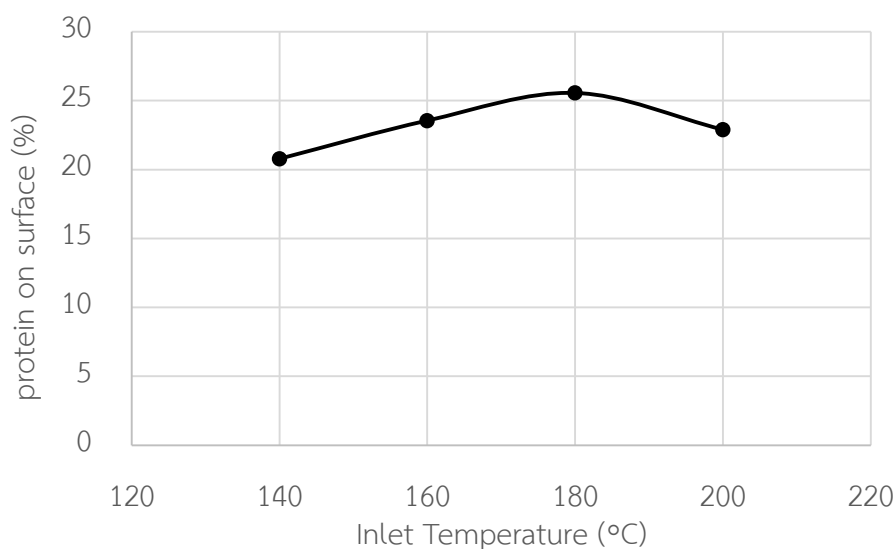
รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ■ MD ■ Na-C ■ SPI และ ■ Gelatin

4.2.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

จากตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวของผงโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตรินที่อุณหภูมิต่างๆและเมื่อคิดร้อยละโปรตีนบนผิวของผงนั้นจะพบว่าโปรตีนที่ผิวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.27 เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศร้อนที่สูงขึ้นทำให้ผิวของหยดสารละลายนั้นเสียดูดไปและดึงน้ำที่อยู่ภายในหยดสารละลายออกมาแทนที่เพื่อทำให้น้ำที่ผิวนั้นกลับมาสู่ความสมดุล ในขณะเดียวกันอัตราการระเหยของน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าสูงขึ้นทำให้มีปริมาณของน้ำที่ระเหยออกไปที่ผิวก็มีปริมาณที่มากขึ้นด้วย ดังนั้นจุดแบ่งระหว่างน้ำและอากาศนั้นจึงแคบลง เนื่องจากขนาดของหยดสารละลายที่เล็กลงและสามารถที่จะเข้าใกล้โปรตีนที่อยู่ภายในหยดสารละลายมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิวของผงโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตรินที่อุณหภูมิต่างๆ

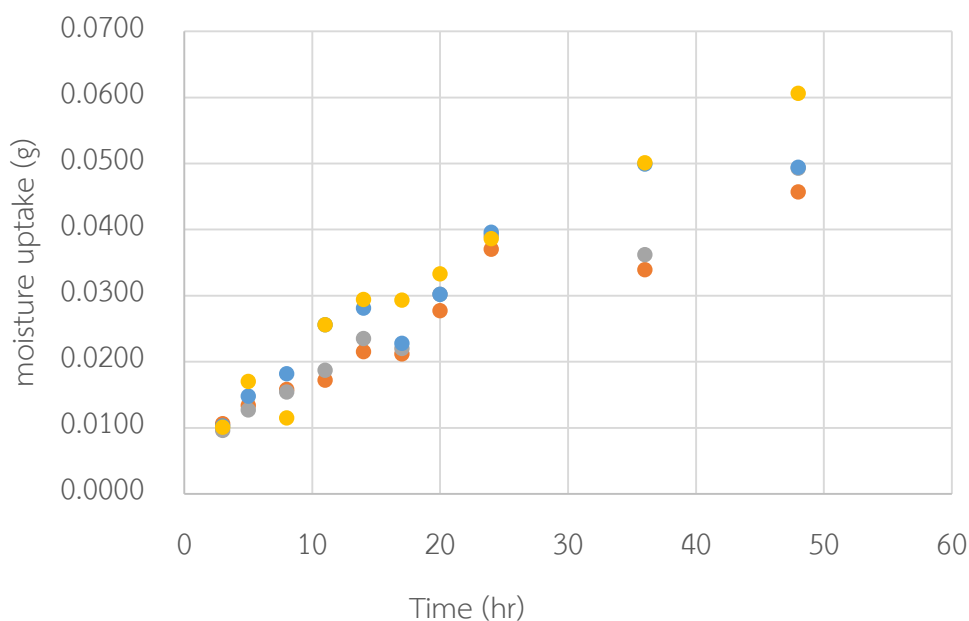
อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนบนผิว (%)
140	2.73
160	3.1
180	3.36
200	3.01



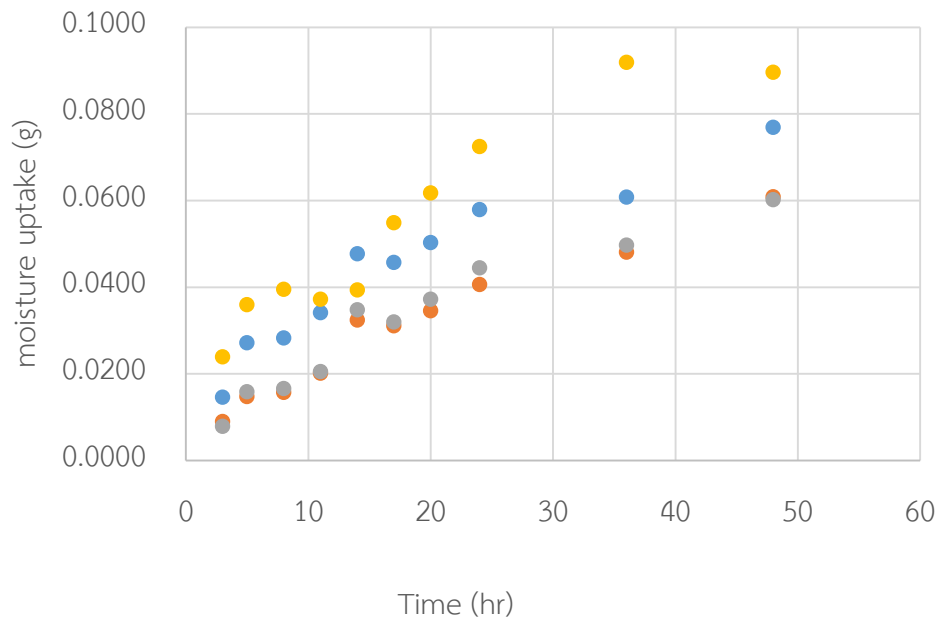
รูปที่ 4.27 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อร้อยละของโปรตีนบนผิวของผงโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตริน

4.2.1.4 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

จากรูปที่ 4.28 4.29 4.30 และ 4.31 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเพิ่มขึ้นจาก 140 จนถึง 200 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณความชื้นที่ดูดซับจากอากาศนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเพิ่มขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดทั้งในกรณีของผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์และผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ เนื่องจากด้วยอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าที่สูงขึ้นนั้นทำให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งจากสมการที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนมวลนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น[10, 11] และเมื่ออัตราการระเหยของน้ำสูงขึ้นส่งผลให้มีปริมาณความชื้นคงเหลือในผงต่ำลงทำให้ผงนั้นสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างความชื้นที่ผิวและความชื้นภายในอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.32

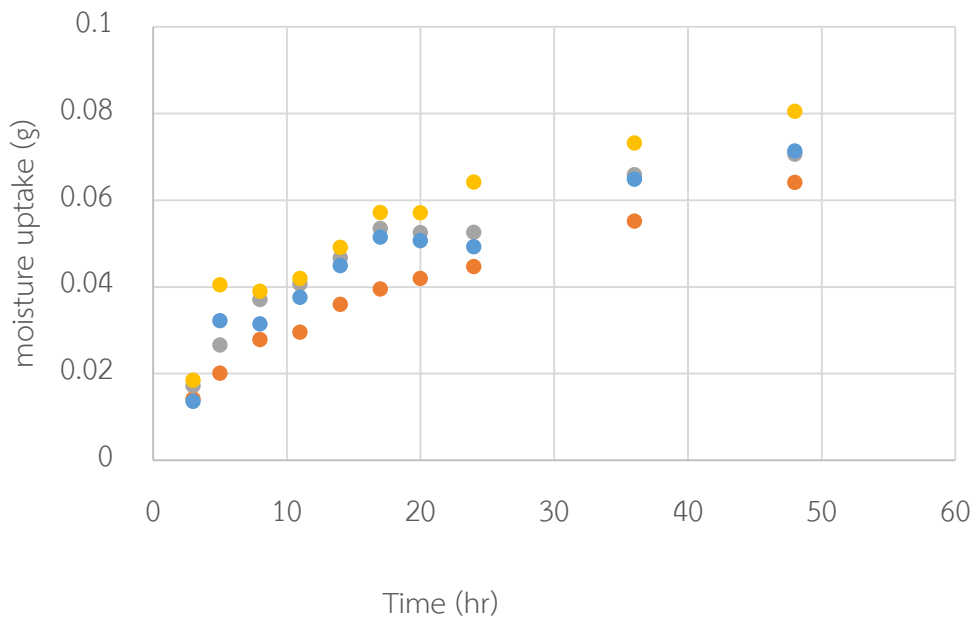


รูปที่ 4.28 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตามเวลาต่างๆ ของมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส ● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส



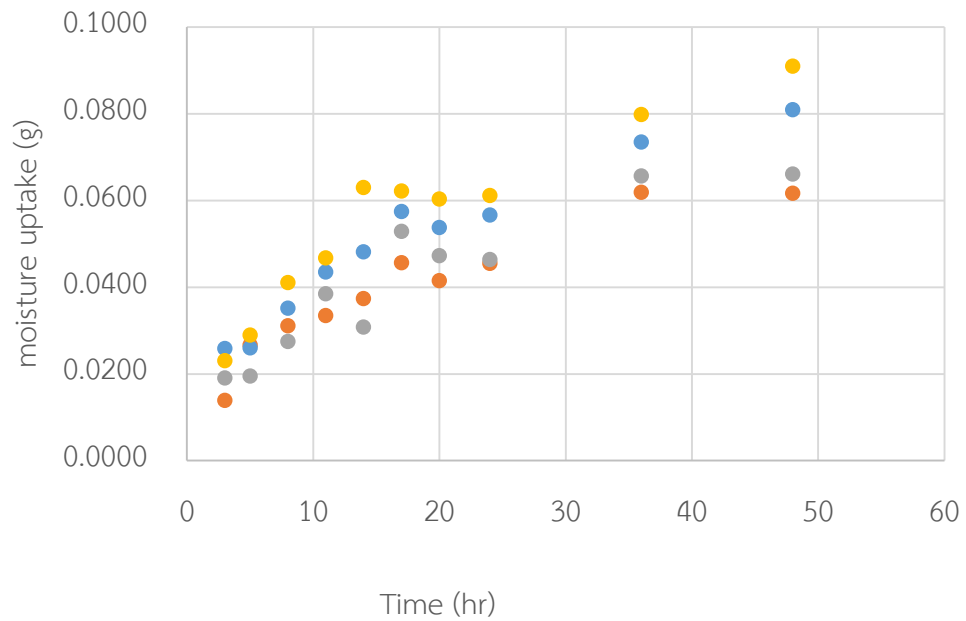
รูปที่ 4.29 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆ ของโซเดียมคาร์ซิเนต โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส

● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส

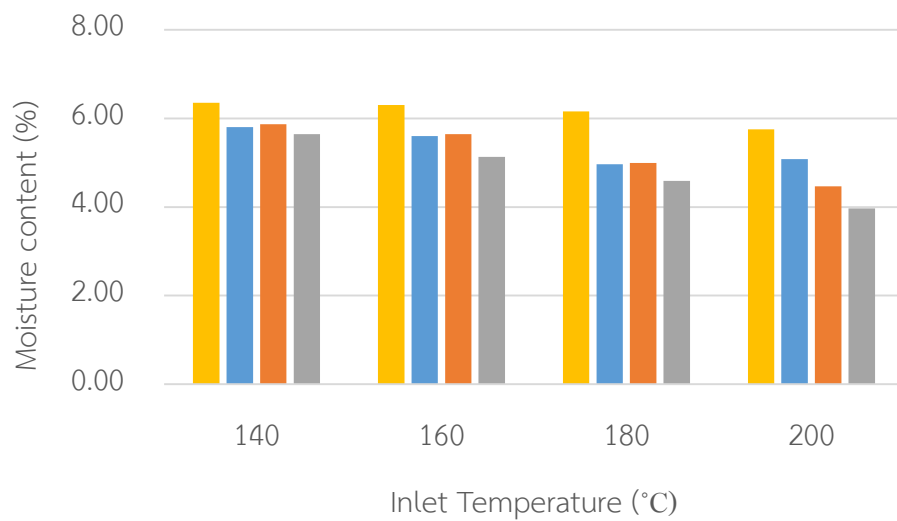


รูปที่ 4.30 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆ ของโปรตีนถั่วเหลือง โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส

● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.31 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆ ของเจลลาติน โดยสัญลักษณ์ ● แทน 140 องศาเซลเซียส ● แทน 160 องศาเซลเซียส ● แทน 180 องศาเซลเซียส และ ● แทน 200 องศาเซลเซียส



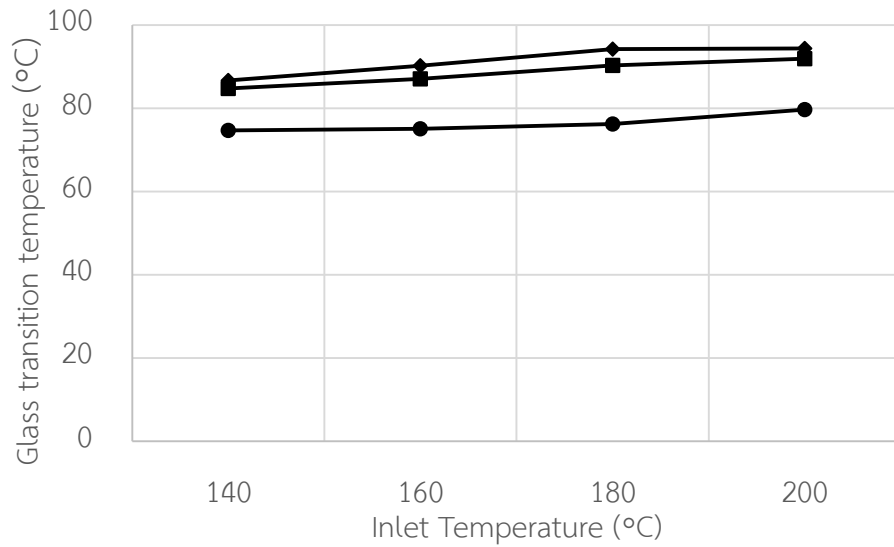
รูปที่ 4.32 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นในผงโปรตีน /มอลโตเดกซ์ตริน โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD ■ แทน MD:Na-C ■ แทน MD:SPI และ ■ แทน MD:Gelatin

เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นพบว่าที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าสูงขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับความชื้นก็จะสูงขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นต่ำลง ทำให้อัตราการดูดซับความชื้นสูงขึ้น ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าต่างๆ

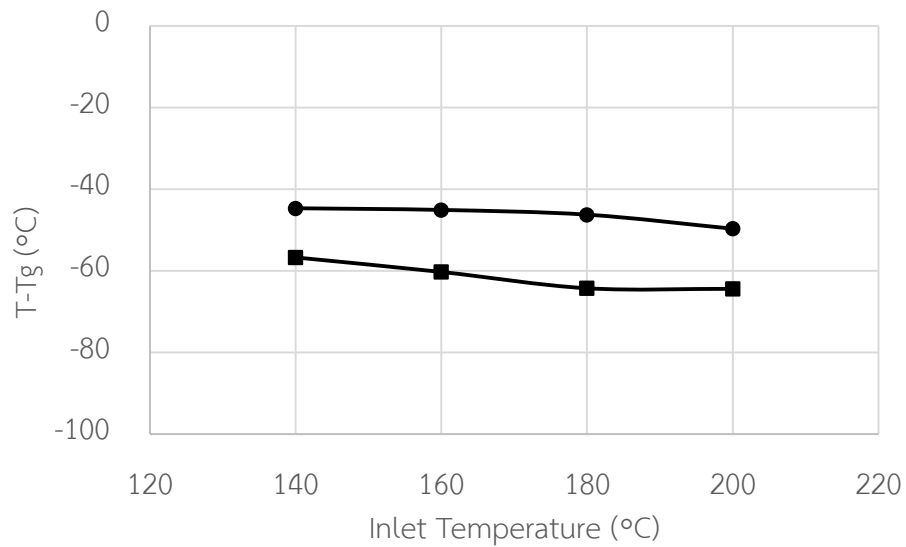
อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (°C)	มอลโตเดกซ์ตริน		โซเดียมคาร์ซิเนต (Na-C)		โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI)		เจลาติน (Gelatin)	
	k	R ²	k	R ²	k	R ²	k	R ²
140	0.0059	0.9560	0.0081	0.9798	0.0082	0.9897	0.0083	0.9357
160	0.0063	0.9459	0.0082	0.9850	0.0096	0.9889	0.0114	0.9839
180	0.0075	0.9571	0.0092	0.9894	0.0114	0.9841	0.0115	0.9892
200	0.0080	0.9659	0.0096	0.9806	0.0117	0.9772	0.0131	0.9704

4.2.1.5 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

จากรูปที่ 4.33 พบว่าอุณหภูมิของของอากาศร้อนขาเข้านั้นส่งผลค่า T_g ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นสูงขึ้นทั้งในก้อนและที่ผิวซึ่งมีค่าสูงกว่า T_g ของมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ เนื่องจากปริมาณน้ำในผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ลดลง ดังนั้นจากรูปที่ 4.34 แสดงค่า T-T_g ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นจะพบว่า T-T_g ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผิวนั้นมีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกาะกันของอนุภาคลดลงด้วย



รูปที่ 4.33 อิทธิพลจากอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว โดยสัญลักษณ์ ■ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้งก้อน ◆ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผิว ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ โดยที่ T เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส



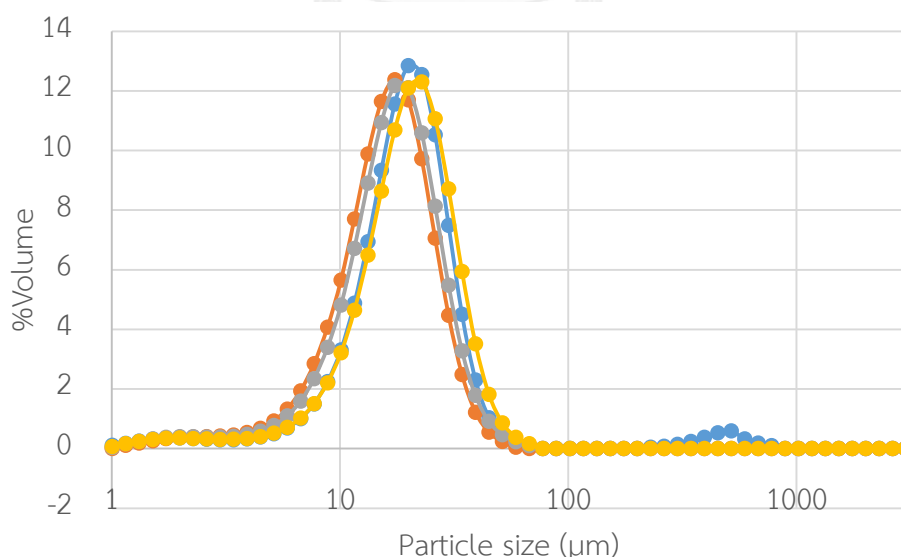
รูปที่ 4.34 อิทธิพลจากอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิว โดยสัญลักษณ์ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ และ ■ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน โดยที่ T เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

4.2.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

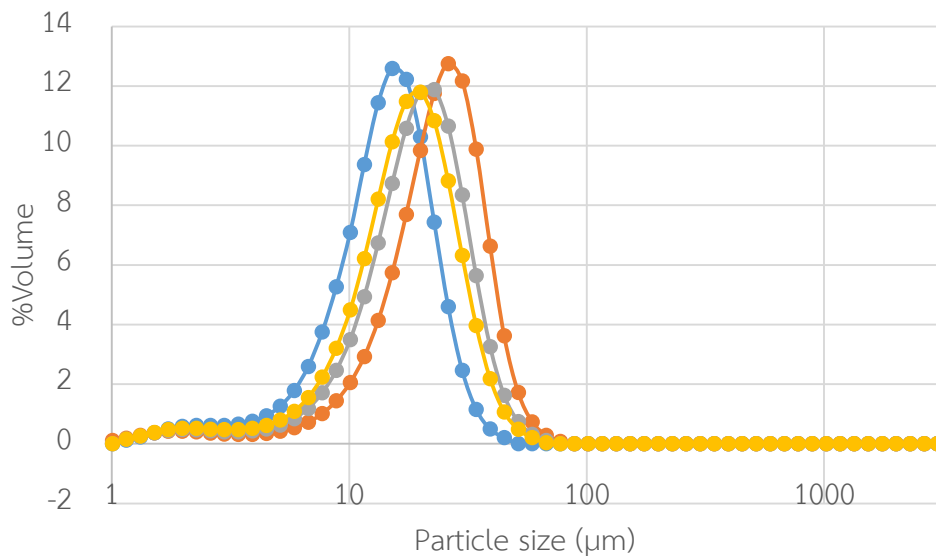
อิทธิพลของอัตราการป้อนสารศึกษาจากปรับอัตราการป้อนสารที่อัตราเร็วเท่ากับ 3 6 และ 12 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและโปรตีนเท่ากับ 99:1 อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและปริมาณลมร้อนคงที่ เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และ 38 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

4.2.2.1 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

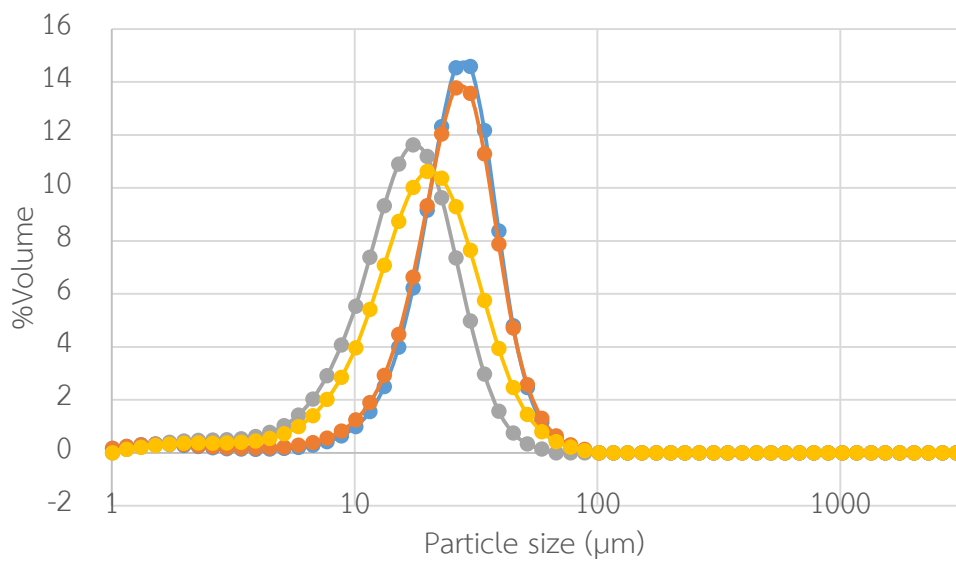
จากการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารจะพบว่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.35 4.36 และ 4.37 โดยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากถึงแม้ว่าจะปรับอัตราการป้อนสารให้สูงก็ตามเนื่องจากสารละลายโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตรินนั้นมีค่าความหนืดที่ต่ำ แต่ในขณะที่โปรตีนถั่วเหลืองสกัดและเจลาตินมีการกระจายตัวของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการป้อนสาร เนื่องจากทั้งโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและเจลาตินนั้นมีค่าความหนืดที่สูงดังนั้นเมื่อทำการป้อนสารที่อัตราเร็วต่ำหยดสารละลายที่ถูกพ่นออกมานั้นจะมีขนาดใหญ่ ทำให้เมื่อผ่านการอบแห้ง ขนาดของอนุภาคที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารให้เร็วขึ้นก็จะพบว่าขนาดของอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.35 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/โซเดียมคาร์ซีเนต โดยสัญลักษณ์ ● แทนอัตราการป้อน 3 ml/min ● แทนอัตราการป้อน 6 ml/min ● แทน แทนอัตราการป้อน 9 ml/min และ ● แทนอัตราการป้อน 12 ml/min

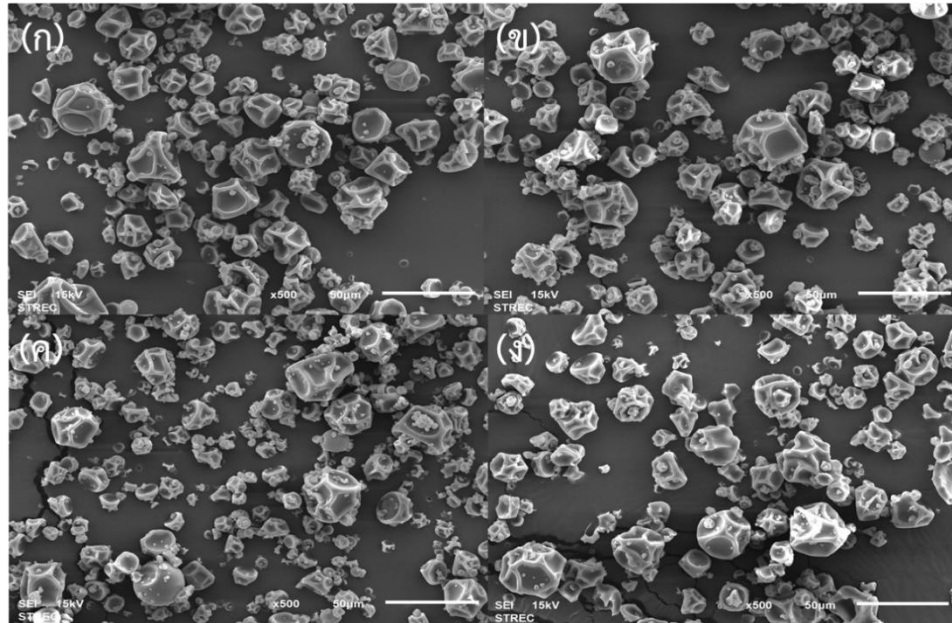


รูปที่ 4.36 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ทริน/โพรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยสัญลักษณ์ ● แทนอัตราการป้อน 3 ml/min
● แทนอัตราการป้อน 6 ml/min ● แทนอัตราการป้อน 9 ml/min และ
● แทนอัตราการป้อน 12 ml/min

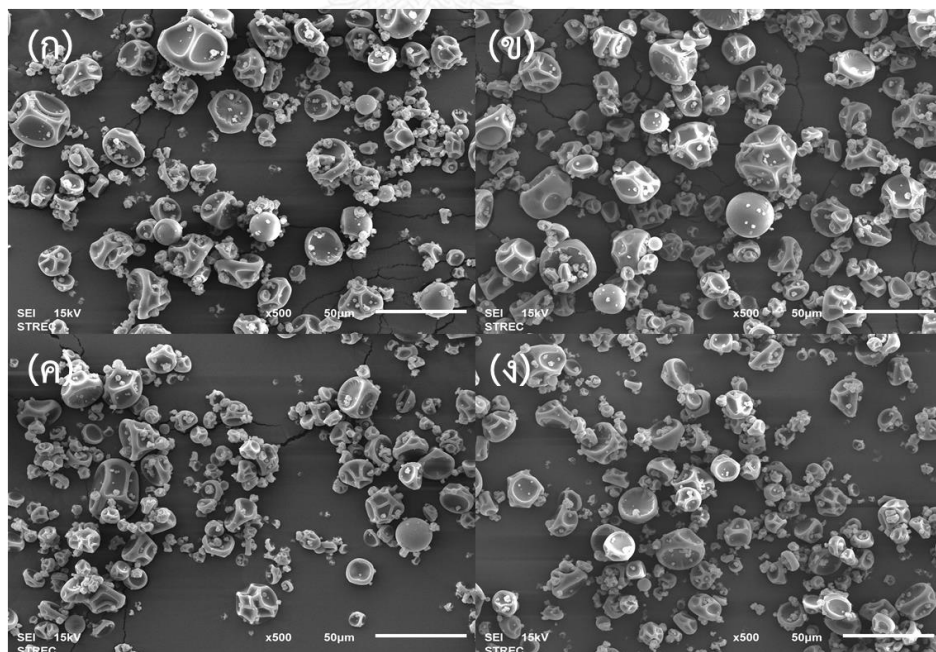


รูปที่ 4.37 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ทริน/เจลาติน โดยสัญลักษณ์ ● แทนอัตราการป้อน 3 ml/min ● แทนอัตราการป้อน 6 ml/min
● แทนอัตราการป้อน 9 ml/min และ ● แทนอัตราการป้อน 12 ml/min

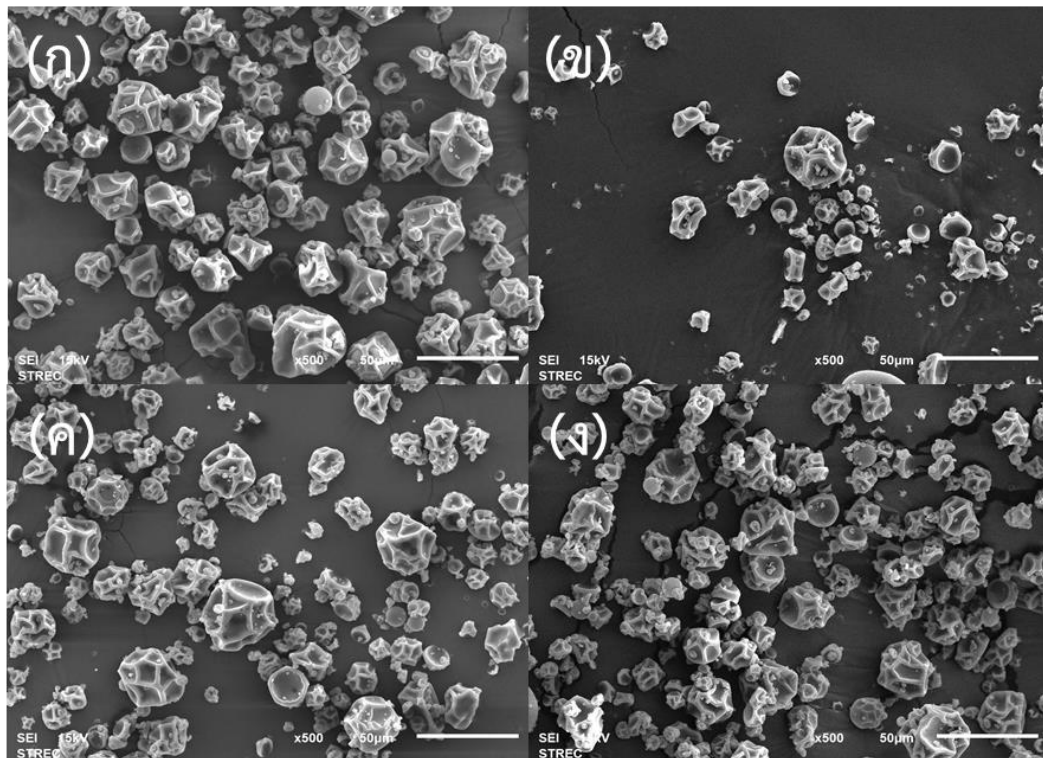
จากรูปที่ 4.38 4.39 และ 4.40 แสดงรูปร่างของอนุภาคโปรตีน/มอลโตเดกซ์ทรินชนิดต่างๆที่ อัตราการป้อนสารต่างๆ พบว่าอัตราการป้อนไม่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาค



รูปที่ 4.38 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคไซเตียมคาร์ซีเนต /มอลโตเดกซ์ทริน (ก) อัตราการป้อน 3 ml/min (ข) อัตราการป้อน 6 ml/min (ค) อัตราการป้อน 9 ml/min และ (ง) อัตราการป้อน 12 ml/min



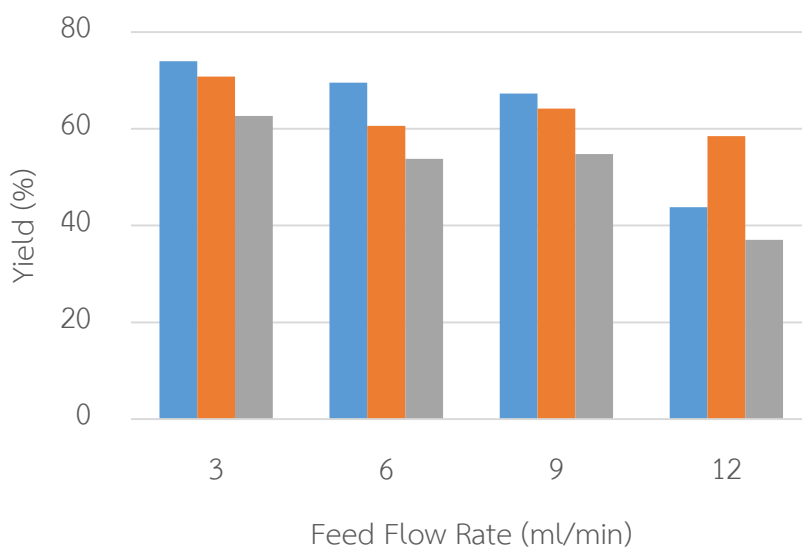
รูปที่ 4.39 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลืองสกัด /มอลโตเดกซ์ทริน (ก) อัตราการป้อน 3 ml/min (ข) อัตราการป้อน 6 ml/min (ค) อัตราการป้อน 9 ml/min และ (ง) อัตราการป้อน 12 ml/min



รูปที่ 4.40 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน
 (ก) อัตราการป้อน 3 ml/min (ข) อัตราการป้อน 6 ml/min (ค) อัตราการป้อน 9 ml/min
 และ (ง) อัตราการป้อน 12 ml/min

4.2.2.2 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

จากรูปที่ 4.41 แสดงร้อยละผลได้เมื่อทำการปรับอัตราการป้อนสารจะพบว่าร้อยละผลได้มีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนที่สูงขึ้นทำให้หยดสารละลายที่ถูกพ่นออกจากรันมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดของหยดสารละลายที่ใหญ่ขึ้นนั้นทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างผิวสารละลายกับอากาศลดน้อยลง ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำต่ำลงทำให้ผงที่ได้นั้นยังคงมีความชื้นมากกว่าที่อัตราการป้อนต่ำ ซึ่งทำให้ผงที่ได้นั้นเกาะอยู่ตามผนังห้องอบหรือตกลงมายังด้านล่างของห้องอบไม่ถูกดูดเข้าไปในไซโครน

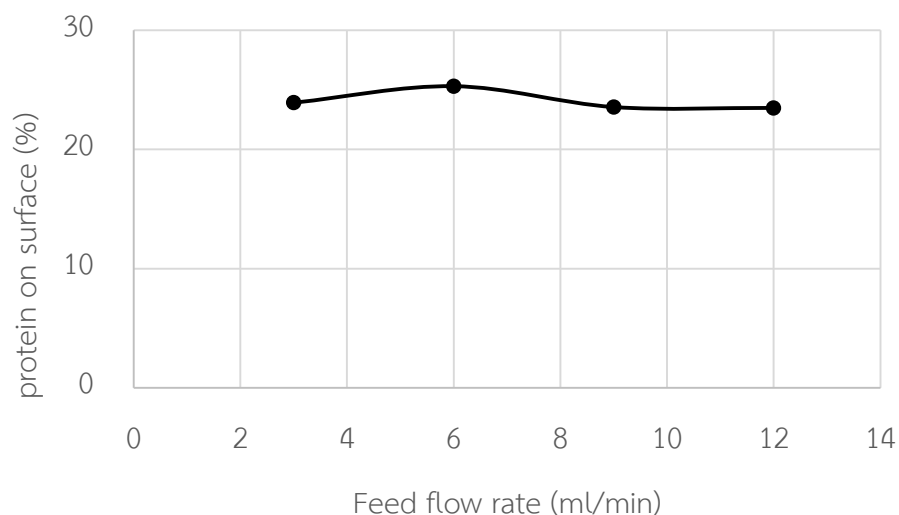


รูปที่ 4.41 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C ■ แทน MD:SPI และ ■ แทน MD:Gelatin

4.2.2.3 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

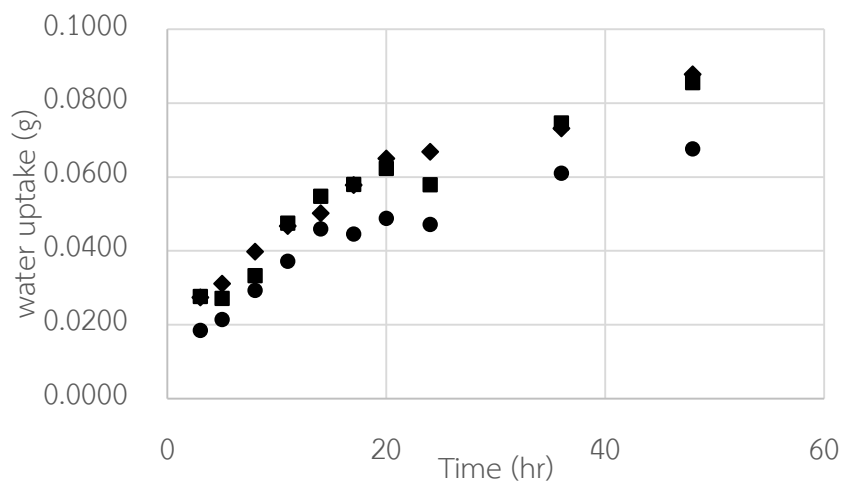
เมื่อทำการปรับอัตราการป้อนสารพบว่าทั้งการปรับอัตราการป้อนสารนั้นไม่ได้ส่งผลต่อการเคลื่อนของโปรตีนมาที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินให้เห็นได้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.42



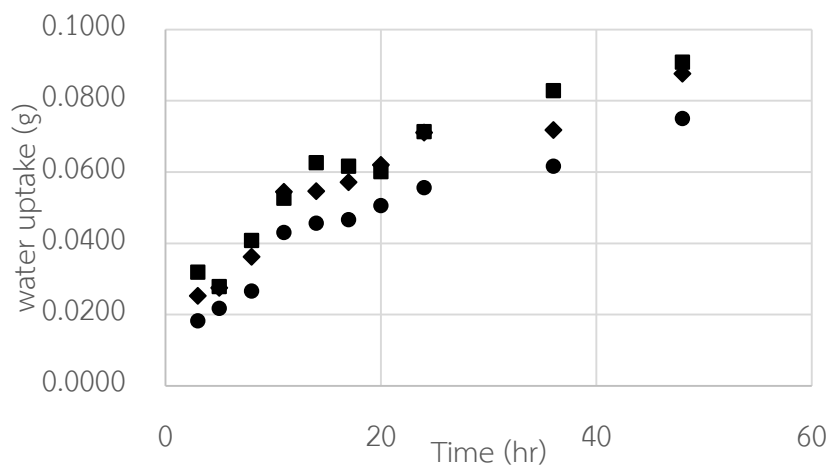
รูปที่ 4.42 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อร้อยละของโปรตีนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

4.2.2.4 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

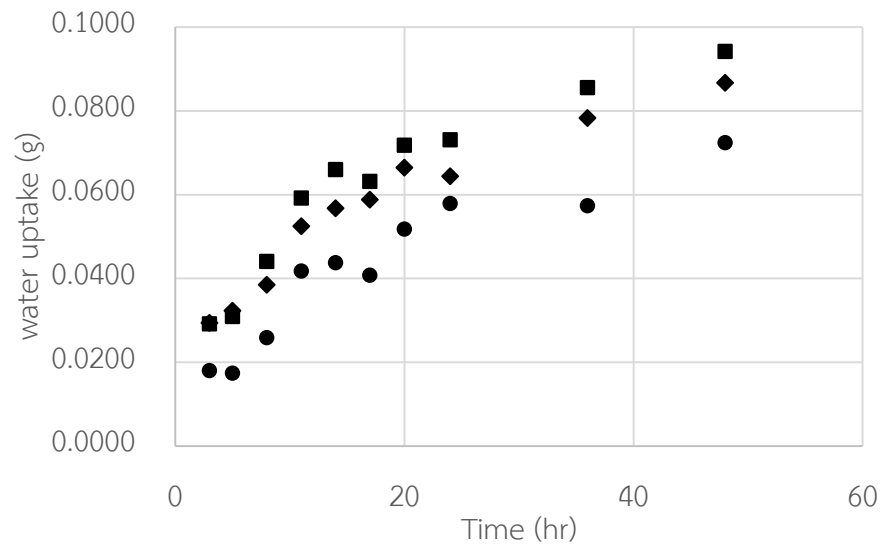
จากรูปที่ 4.43 4.44 และ 4.45 แสดงให้เห็นว่าผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินชนิดต่างๆที่อัตราการป้อนสารเพิ่มขึ้นนั้น ปริมาณน้ำที่ดูดซับจากอากาศจะลดลง เนื่องจากความเร็วในการป้อนสารที่สูงขึ้นนั้นทำให้ระยะเวลาที่หยดสารละลายอยู่ในห้องอบสั้นลงทำให้ยังคงปริมาณน้ำที่อยู่ภายหยดสารละลายอยู่มากจึงทำให้สามารถดูดซับน้ำในอากาศได้น้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4.46



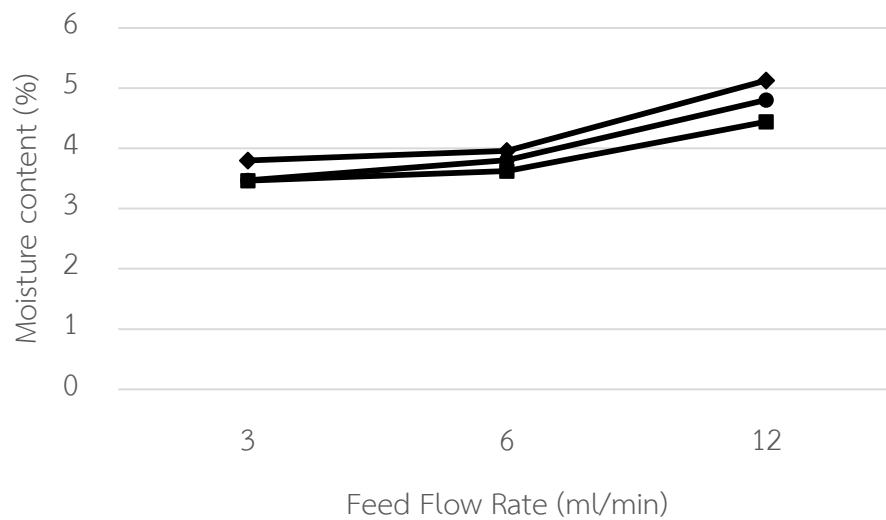
รูปที่ 4.43 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของโซเดียมคาร์ซิเนต โดยสัญลักษณ์ ■ แทนอัตราการป้อน 3 ml/min ♦ แทนอัตราการป้อน 6 ml/min และ ● แทนอัตราการป้อน 12 ml/min



รูปที่ 4.44 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยสัญลักษณ์ ■ แทนอัตราการป้อน 3 ml/min ♦ แทนอัตราการป้อน 6 ml/min และ ● แทนอัตราการป้อน 12 ml/min



รูปที่ 4.45 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของเจลลาติน โดยสัญลักษณ์ ■ แทนอัตราการป้อน 3 ml/min ◆ แทนอัตราการป้อน 6 ml/min และ ● แทนอัตราการป้อน 12 ml/min



รูปที่ 4.46 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C ◆ แทน MD:SPI ● แทน MD:Gelatin

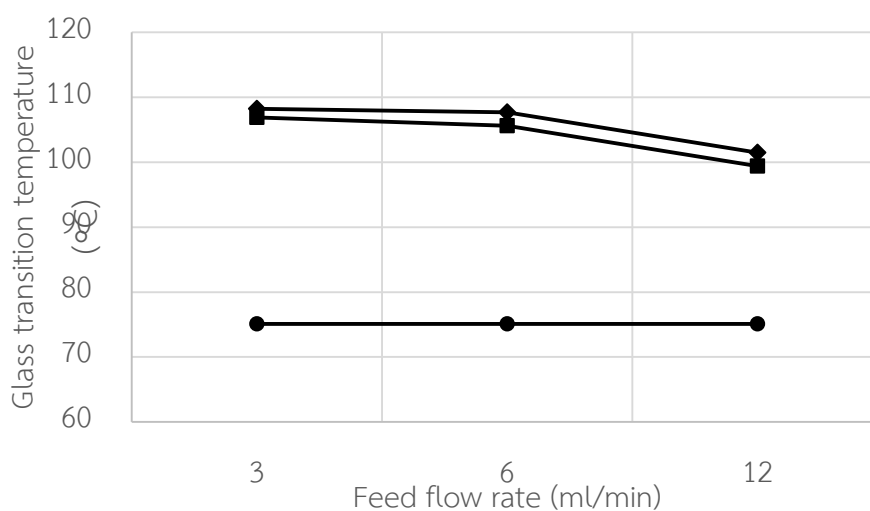
ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการดูดซับความชื้นในอากาศที่อัตราการป้อนต่างๆพบว่าที่อัตราการป้อนเท่ากับ 12 มิลลิลิตรต่อนาทีนั้นจะมีอัตราการดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับที่ 3 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากสาเหตุที่กล่าวไว้ในข้างต้น

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศที่อัตราการป้อนต่างๆ

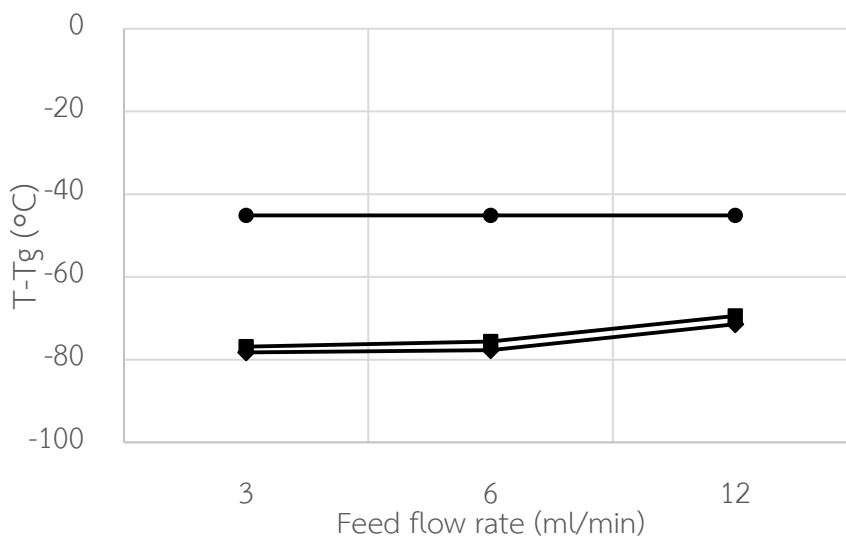
ชนิดของโปรตีน	อัตราการป้อนสาร (มิลลิลิตร/นาท)	k (กรัม/ชั่วโมง ^{-1/2})
โซเดียมคาร์ซิเนต	3	0.0134
	6	0.0133
	12	0.0103
โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	3	0.0140
	6	0.0135
	12	0.0109
เจลาติน	3	0.0146
	6	0.0132
	12	0.0108

4.2.2.5 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

จากรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนสาร ค่า T_g ของทั้งก้อนและที่ผิวนั้นมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณที่คงเหลือมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยแต่อย่างไรก็ตาม ค่า T_g ที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินก็ยังมีค่าสูงกว่า T_g ของมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ และจากรูปที่ 4.48 นั้นแสดงให้เห็นว่าค่า T-T_g ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินยังคงมีค่าต่ำกว่ามอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์



รูปที่ 4.47 อิทธิพลจากอัตราการป้อนสารที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วโดยสัญลักษณ์ ■ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้งก้อน ◆ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผิว และ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์



รูปที่ 4.48 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว ($T-T_g$) โดยสัญลักษณ์ ■ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้งก้อน

◆ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผิว และ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์

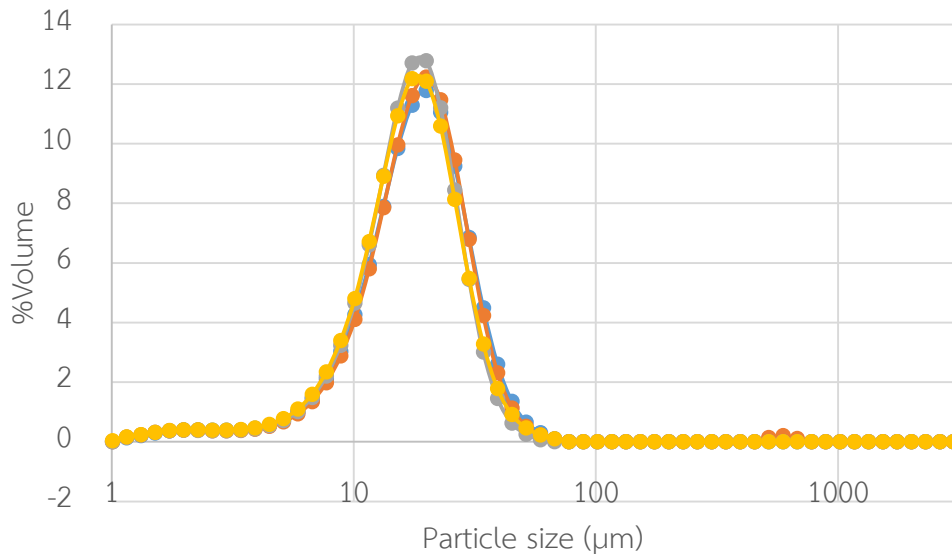
โดยที่ T เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

4.2.3 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีส่งผลต่อผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

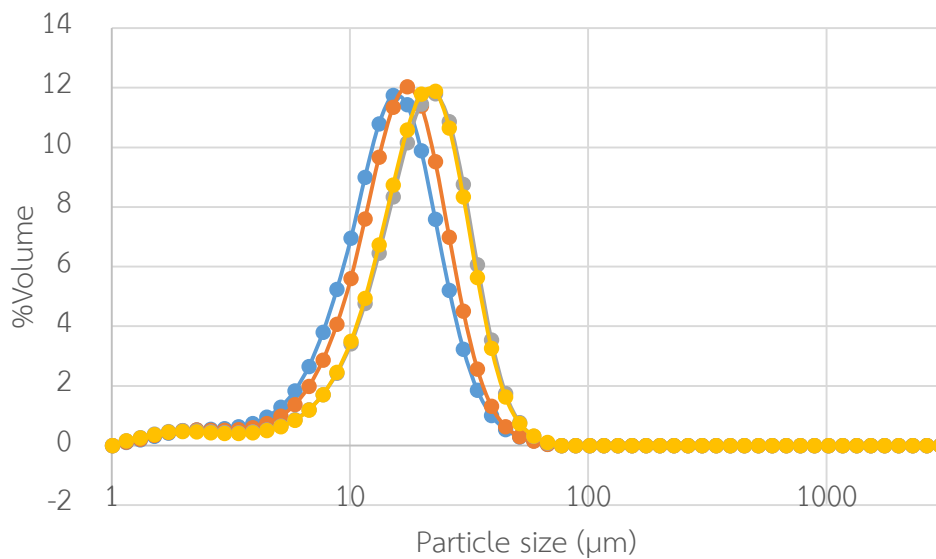
อิทธิพลของปริมาณลมร้อนศึกษาจากปรับปริมาณลมร้อนเท่ากับ 20 28 และ 34 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและโปรตีนเท่ากับ 99:1 อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและอัตราการป้อนสารคงที่ เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

4.2.3.1 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

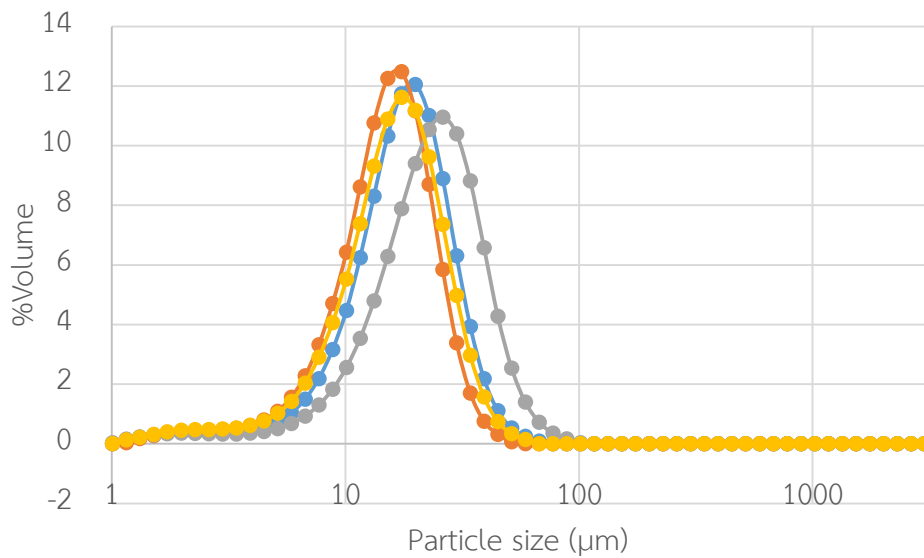
จากรูปที่ 4.49 4.50 และ 4.51 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ปริมาณลมร้อนแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าขนาดของอนุภาคโซเดียมคาร์ซิเนต/มอลโตเดกซ์ตรินไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณลมร้อน ในขณะที่โปรตีนถั่วเหลืองสกัดและเจลาตินมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณลมร้อนเปลี่ยนไป โดยความหนืดของสารละลายนั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อขนาดของอนุภาค



รูปที่ 4.49 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน /ไซเตียมคาร์ซิเนต โดยสัญลักษณ์ ● แทนปริมาณลมร้อน 20 m³/hr ● ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr ● ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr และ ● ปริมาณลมร้อน 38 m³/hr

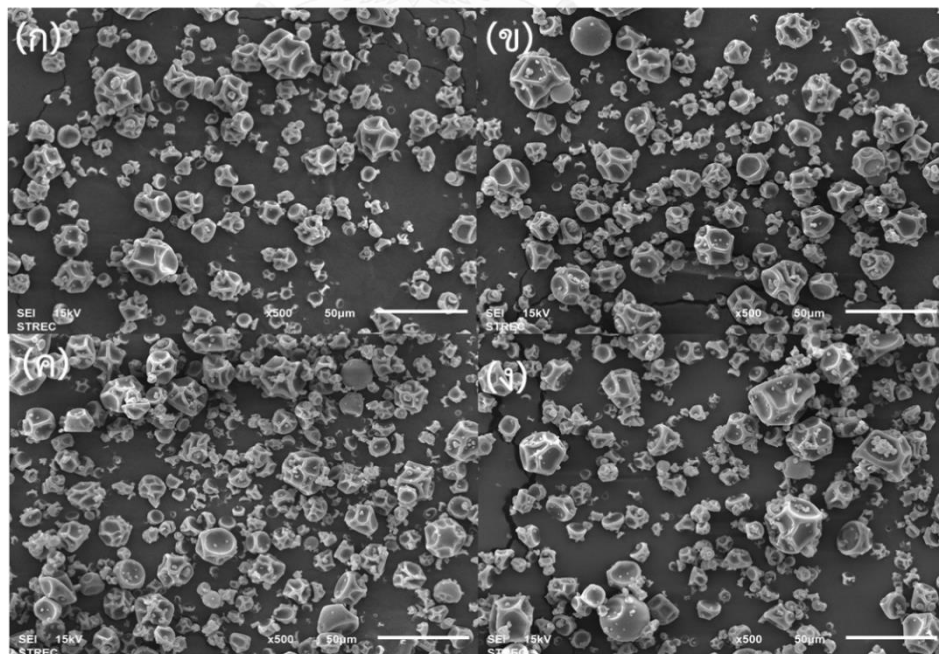


รูปที่ 4.50 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน ถั่วเหลืองสกัด โดยสัญลักษณ์ ● แทนปริมาณลมร้อน 20 m³/hr ● ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr ● ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr และ ● ปริมาณลมร้อน 38 m³/hr

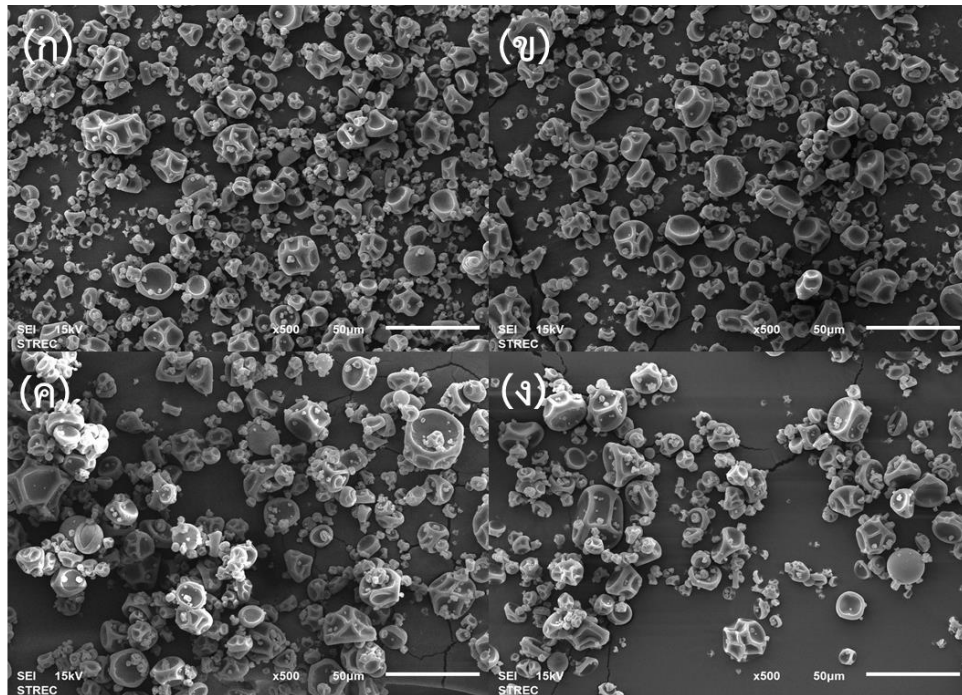


รูปที่ 4.51 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดผงมอลโตเดกซ์ตริน/เจลาติน โดยสัญลักษณ์ ● แทนปริมาณลมร้อน 20 m³/hr ● ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr
● ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr และ ● ปริมาณลมร้อน 38 m³/hr

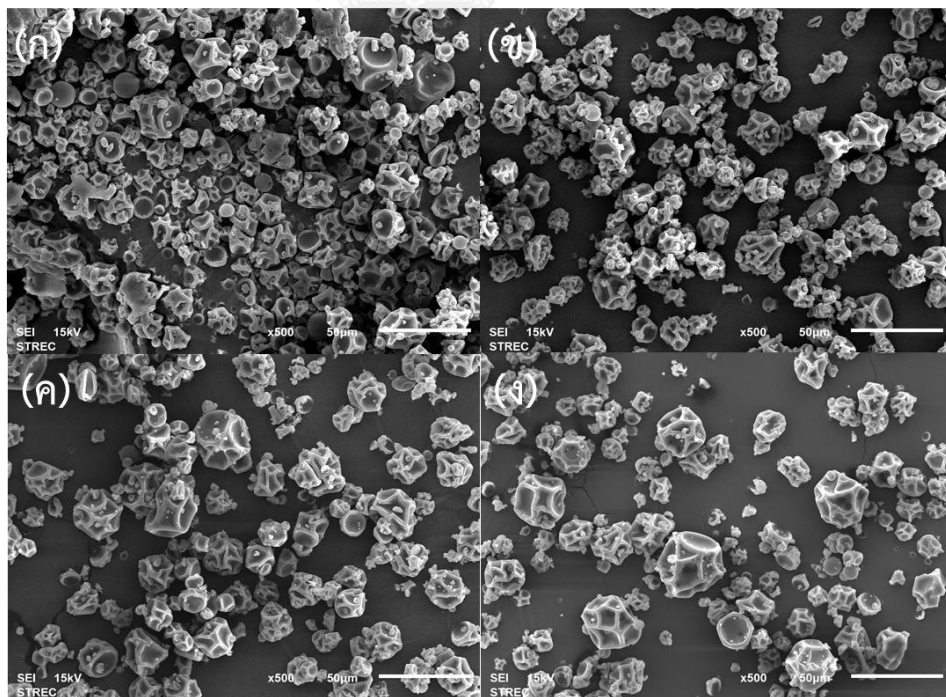
จากรูปที่ 4.52 4.53 และ 4.54 แสดงรูปร่างของอนุภาคโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินชนิดต่างๆ ที่ปริมาณลมร้อนต่างๆ พบว่าปริมาณลมร้อนนั้นไม่ได้ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคโดยอนุภาคที่ได้นั้นยังคงมีลักษณะบวมเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 4.52 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโซเดียมคาร์ซีเนต/มอลโตเดกซ์ตริน (ก) ปริมาณลมร้อน 20 m³/hr (ข) ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr (ค) ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr และ (ง) ปริมาณลมร้อน 38 m³/hr



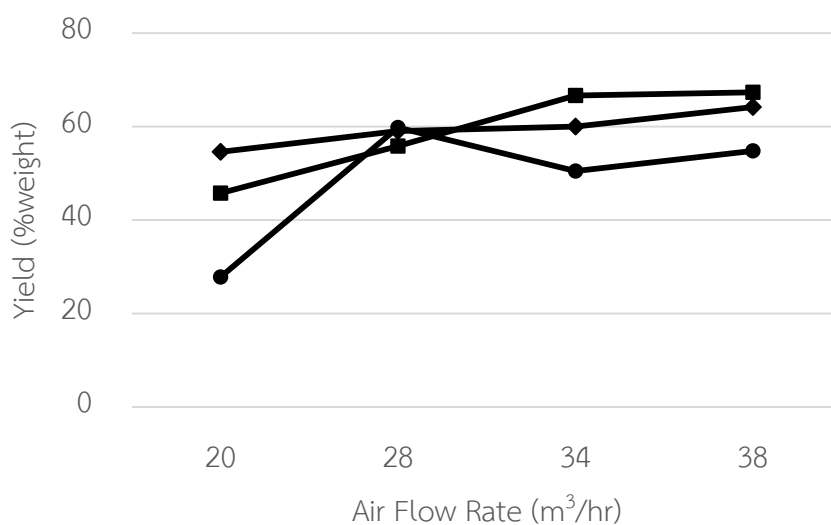
รูปที่ 4.53 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคโพรตีนถั่วเหลืองสกัด /มอลโตเดกซ์ตริน (ก) ปริมาณลมร้อน 20 m³/hr (ข) ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr (ค) ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr และ (ง) ปริมาณลมร้อน 38 m³/hr



รูปที่ 4.54 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคเจลาติน/มอลโตเดกซ์ตริน (ก) ปริมาณลมร้อน 20 m³/hr (ข) ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr (ค) ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr และ (ง) ปริมาณลมร้อน 38 m³/hr

4.2.3.2 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของอนุภาคมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

การปรับปริมาณลมร้อนนั้นให้ผลในทิศทางตรงกันข้ามกับการปรับอัตราการปนสาร ซึ่งจากรูปที่ 4.55 พบว่าการเมื่อปริมาณลมร้อนเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อร้อยละผลได้ ทำให้ร้อยละผลได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณลมร้อนที่มากขึ้นทำให้อัตราการระเหยของน้ำสูงขึ้น เนื่องจากอากาศมีความเร็วที่สูงขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

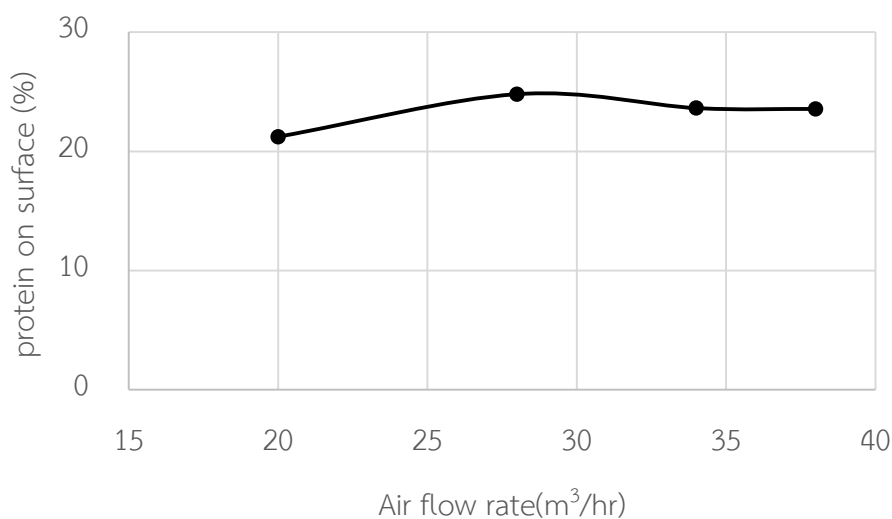


รูปที่ 4.55 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C ◆ แทน MD:SPI ● แทน MD:Gelatin

4.2.3.3 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

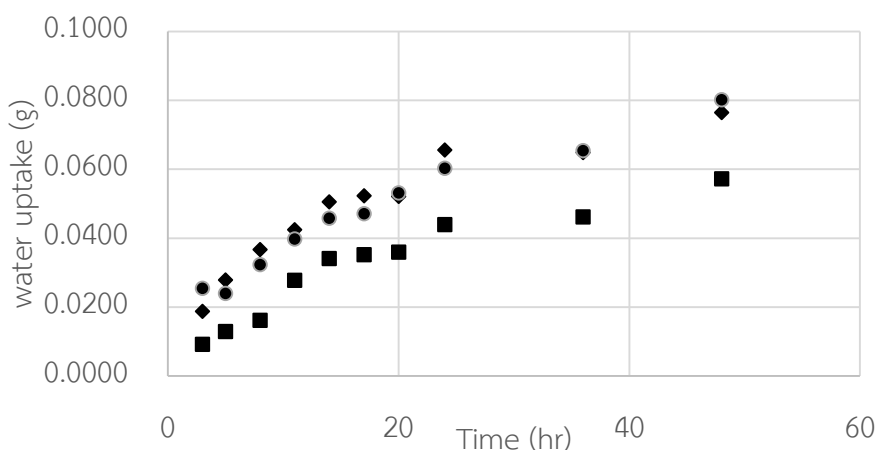
การปรับปริมาณลมร้อนพบว่าปริมาณลมร้อนนั้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโปรตีนมายังที่ผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำที่สูงขึ้นทำให้รอยต่อของอากาศและน้ำนั้นสามารถที่จะเข้าไปใกล้โปรตีนที่อยู่ในหยดสารละลายได้เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.56



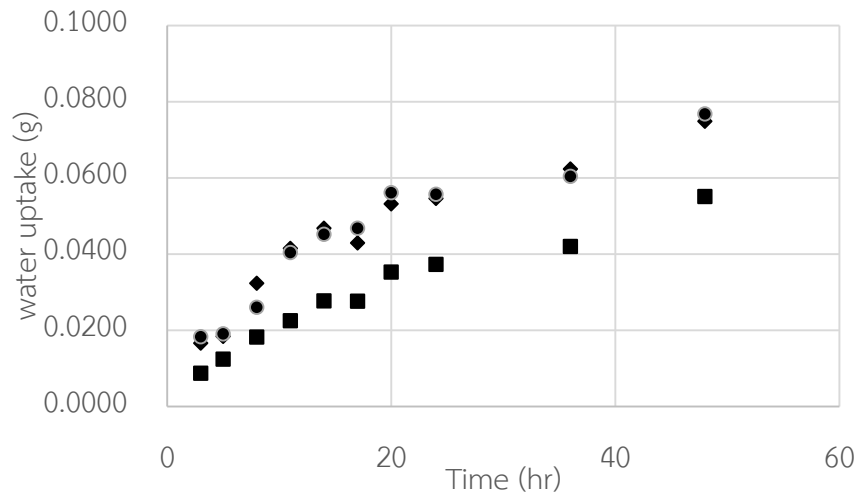
รูปที่ 4.56 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อร้อยละของโปรตีนบนผิวของผงโปรตีน /มอลโตเดกซ์ตริน

4.2.3.4 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

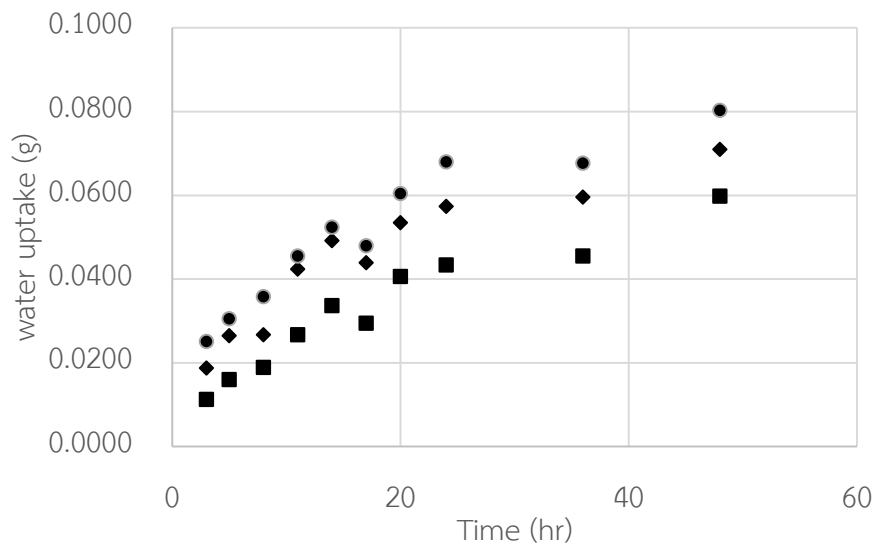
เมื่อทำการเปลี่ยนปริมาณลมร้อนจะพบว่าเมื่อปริมาณลมร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจากอากาศนั้นจะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.57 4.58 และ 4.59 เนื่องจากลมร้อนปริมาณที่มากขึ้นนั้นสามารถดึงเอาความชื้นที่อยู่บริเวณผิวของหยดสารละลายออกไปได้มากขึ้นทำให้ไอน้ำที่อยู่ภายในอนุภาคนั้นเคลื่อนออกมาอยู่ที่ผิวของสารละลายเพื่อรักษาสมดุลภายในของอนุภาคจึงมีปริมาณความชื้นน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.60



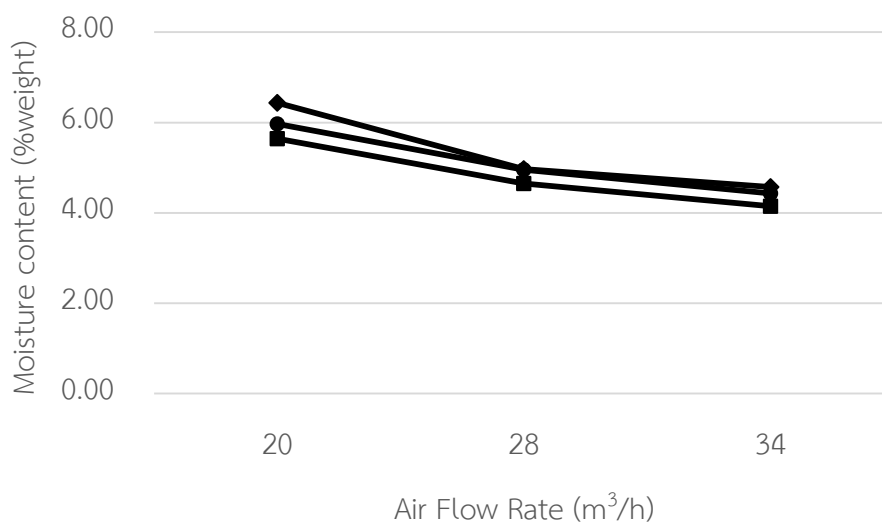
รูปที่ 4.57 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของโซเดียมคาร์ซีเนต โดยสัญลักษณ์ ■ แทนปริมาณลมร้อน 20 m³/hr ◆ ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr และ ● ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr



รูปที่ 4.58 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยสัญลักษณ์ ■ แทนปริมาณลมร้อน 20 m³/hr ◆ ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr และ ● ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr



รูปที่ 4.59 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่เวลาต่างๆของเจลาติน โดยสัญลักษณ์ ■ แทนปริมาณลมร้อน 20 m³/hr ◆ ปริมาณลมร้อน 28 m³/hr และ ● ปริมาณลมร้อน 34 m³/hr



รูปที่ 4.60 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

โดยสัญลักษณ์ ■ แทน MD:Na-C ◆ แทน MD:SPI ● แทน MD:Gelatin

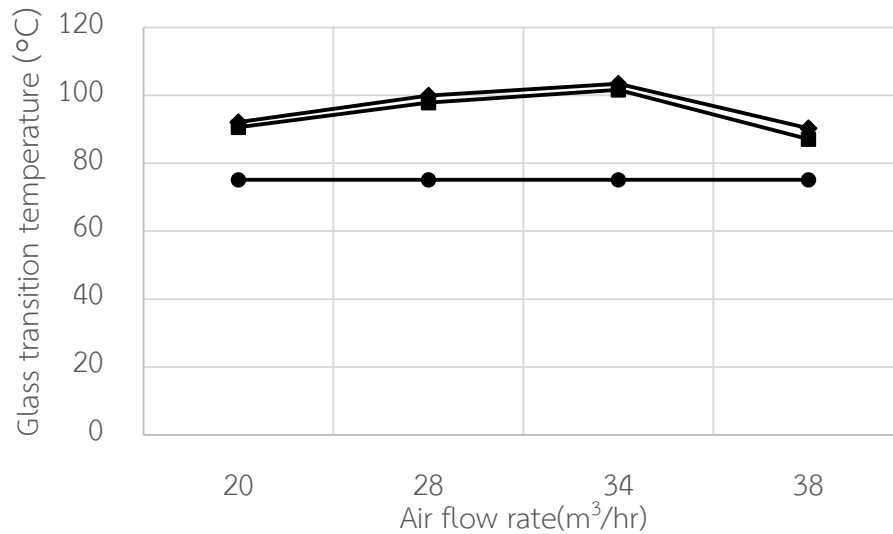
ตารางที่ 4.6 นั้นแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่าอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นของผงโปรตีนทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศที่ปริมาณลมร้อนต่างๆ

ชนิดของโปรตีน	ปริมาณลมร้อน (ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง)	k (กรัม/ชั่วโมง ^{-1/2})
โซเดียมคาร์ซีเนต	20	0.0082
	28	0.0115
	34	0.0117
โปรตีนถั่วเหลืองสกัด	20	0.0073
	28	0.0110
	34	0.0116
เจลาติน	20	0.0082
	28	0.0107
	34	0.0128

4.2.3.5 อิทธิพลของอัตราการป้อนสารของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

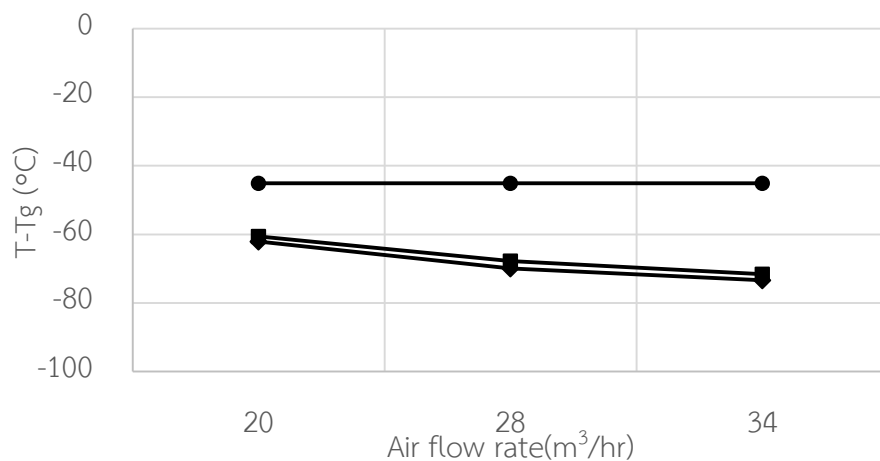
จากรูปที่ 4.61 แสดงให้เห็นว่าปริมาณลมร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า T_g ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีผลมาจากค่าความชื้นที่ลดลง ดังนั้นรูปที่ 4.62 แสดงให้เห็นว่าค่า $T-T_g$ ของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินมีค่าลดลงและต่ำกว่าผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์



รูปที่ 4.61 อิทธิพลจากปริมาณลมร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว

โดยสัญลักษณ์ ■ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้งก้อน

◆ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผิว และ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์



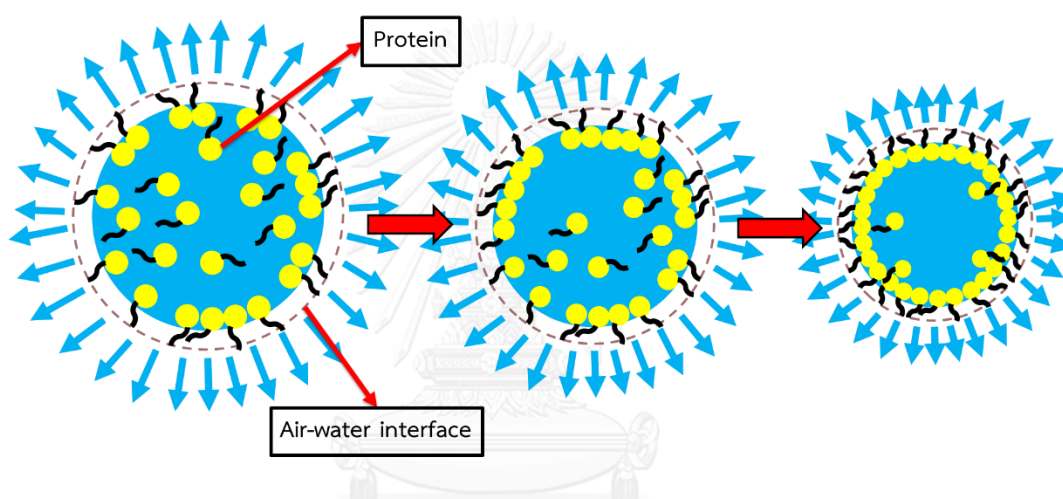
รูปที่ 4.62 อิทธิพลของปริมาณลมร้อนที่มีผลต่อผลต่างระหว่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว ($T-T_g$) โดยสัญลักษณ์ ■ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินทั้งก้อน

◆ แทนผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตรินที่ผิว และ ● แทนผงมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์

โดยที่ T เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

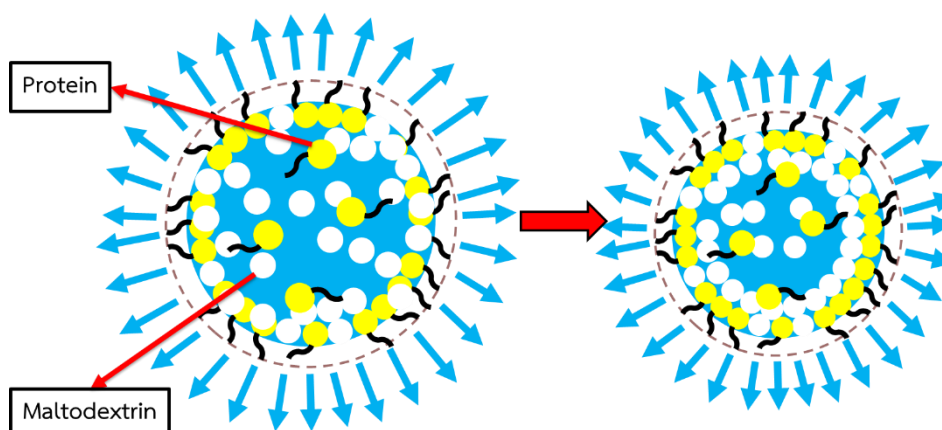
4.3 การเคลื่อนที่ของโปรตีนไปยังผิวของอนุภาคโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

เนื่องจากโปรตีนเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ดังนั้นโปรตีนนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำ โดยส่วนที่ชอบน้ำ(สีเหลือง)นั้นจะหันเข้าของเหลว และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ(สีดำ)นั้นจะหันออกไปยังอากาศรอบๆหยดน้ำ ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตีนนั้นจะเคลื่อนที่จากเฟสของของเหลวไปยังรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำและจัดเรียงตัวใหม่[1] เมื่อน้ำที่ผิวเกิดการระเหยออกไปทำให้รอยต่อระหว่างน้ำและอากาศกับโปรตีนจะมีระยะห่างที่แคบลงดังนั้นโปรตีนจึงเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างน้ำและอากาศได้มากขึ้น และเมื่ออนุภาคแห้งเรียบร้อยแล้วจะพบว่าโปรตีนจะกระจายตัวอยู่บนผิวของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4.63



รูปที่ 4.63 การเคลื่อนที่ของโปรตีนที่เคลื่อนที่จากของเหลวไปยังผิวของอนุภาค

ในขณะที่มอลโตเดกซ์ตรินนั้นจะเคลื่อนที่เข้าไปในด้านในของผิวของหยดสารละลาย เนื่องจากการระเหยของน้ำทำให้ที่ผิวของหยดสารละลายนั้นมีความเข้มข้นที่สูงขึ้นจึงเกิดการแพร่เข้าไปยังด้านในของผิวดังแสดงในรูปที่ จากการวิเคราะห์จะพบว่าปริมาณของมอลโตเดกซ์ตรินที่ผิวนั้นมีมอลโตเดกซ์ตรินน้อยลง และเมื่อความเข้มข้นของโปรตีนเพิ่มขึ้นก็จะพบว่าปริมาณโปรตีนที่ผิวจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.64 การเคลื่อนที่ของมอลโตเดกซ์ตริน

ตารางที่ 4.8 แสดงสัดส่วนของโปรตีนที่ผิวและภายในของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

สารตัวอย่าง	โปรตีน		มอลโตเดกซ์ตริน	
	ที่ผิว (%)	ภายใน (%)	ที่ผิว (%)	ภายใน (%)
MD:Na-C = 99.5:0.5	24.13	0.47	70.27	93.93
MD:Na-C = 90:10	48.89	9.37	44.84	84.36
MD:Na-C = 80:20	58.95	18.81	35.08	75.22
MD:SPI = 99.5:0.5	17.57	0.47	76.79	93.89
MD:SPI = 90:10	38.39	9.41	55.68	84.66
MD:SPI = 80:20	45.32	18.84	48.87	75.35
MD:G = 99.5:0.5	23.28	0.47	71.59	94.40
MD:G = 90:10	52.88	9.44	41.53	84.97
MD:G = 80:20	72.12	18.78	21.77	75.11

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานิตของโปรตีน ความเข้มข้นของโปรตีน อุณหภูมิของอากาศร้อน หนาวเข้า อัตราการป้อนและปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน ปริมาณความชื้นของอนุภาค ขนาดและรูปร่างของอนุภาค ปริมาณโปรตีนที่ผิวของอนุภาคและอัตราการดูดความชื้นของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

5.1.1 อิทธิพลที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดและรูปร่างของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

ชนิดและปริมาณของโปรตีนไม่ได้ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างมากนัก แต่อิทธิพลจากสภาวะดำเนินงานส่งผลต่อการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค ซึ่งการกระจายตัวของขนาดและรูปร่างนั้นสามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการปรับอุณหภูมิอากาศร้อนหนาวเข้า

5.1.2 อิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

จากผลการทดลองพบว่าโปรตีนนั้นสามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนได้ โดยโซเดียมคาร์ซิเนตนั้นให้ร้อยละผลได้มากที่สุด เนื่องจากโซเดียมคาร์ซิเนตนั้นมีค่าความหนืดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและเจลาติน ส่วนความเข้มข้นของโปรตีนที่เพิ่มขึ้นนั้นก็สามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ให้สูงขึ้นได้แต่สารละลายที่มีความหนืดสูงนั้นก็ยังคงได้ร้อยละผลได้ต่ำ แต่เมื่อทำการปรับสภาวะการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นก็จะพบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนหนาวเข้า อัตราการป้อนและปริมาณลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีนอย่างเห็นได้ชัด

5.1.3 อิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละโปรตีนบนผิวของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

ชนิดและปริมาณของโปรตีนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณโปรตีนบนผิว เนื่องจากโปรตีนมีการเคลื่อนที่ออกไปยังบริเวณฟิล์มกั้นระหว่างน้ำและอากาศ ดังนั้นโปรตีนที่มีขนาดเล็กนั้นจะสามารถแพร่หรือถูกพามาอยู่บนผิวได้ง่ายกว่าโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อมีปริมาณของโปรตีนมากขึ้นโอกาสที่โปรตีนจะเคลื่อนที่ไปผิวนั้นจึงมีมากขึ้นด้วย และอัตราการระเหยก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณโปรตีนบนผิว โดย

5.1.4 อิทธิพลที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับความชื้นในอากาศของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

ชนิดของโปรตีนนั้นไม่ได้ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับมากนักแต่ปริมาณของโปรตีนเป็นปัจจัยที่เห็นได้ชัด โดยปริมาณของโปรตีนที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราเร็วในการดูดซับความชื้นลดลงได้ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่คงเหลือภายในผงด้วย ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อปรับอุณหภูมิอากาศร้อนเข้า อัตราการป้อนสารและปริมาณมากมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

5.1.5 อิทธิพลที่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงมอลโตเดกซ์ตริน/โปรตีน

ชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ผิวเพิ่มขึ้นจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่ผิวได้ซึ่งสามารถช่วยให้อนุภาคยึดเกาะกันได้น้อยลง แต่เมื่ออัตราการระเหยลดลงทำให้ปริมาณความชื้นของอนุภาคเพิ่มขึ้น T_g จึงมีค่าต่ำลง ทำให้โอกาสที่อนุภาคจะเกาะติดกันเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้

ในการเลือกโปรตีนนั้นควรเลือกใช้โปรตีนที่มีขนาดเล็ก มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี และมีความหนืดต่ำ และที่ความเข้มข้นของโปรตีนสูง น่าจะช่วยอัตราการดูดความชื้นให้ต่ำลงได้ และช่วยให้อนุภาคยึดเกาะกันน้อยลง

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งถัดไป

ควรศึกษาการห่อหุ้มด้วยโปรตีนด้วยสารที่ถูกห่อหุ้มชนิดอื่นๆเช่น น้ำผึ้งหรือน้ำผลไม้ และควรศึกษาสภาวะของสารละลายที่ใช้ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. Jayasundera, M., et al., *Surface modification of spray dried food and emulsion powders with surface-active proteins: A review*. Journal of Food Engineering, 2009. **93**(3): p. 266-277.
2. Fazaeli, M., et al., *Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder*. Food and Bioproducts Processing, 2012. **90**(4): p. 667-675.
3. Bhandari, B., *Introduction to food powders*. 2013: p. 1-25.
4. B., K.S.B., *Physicochemical Properties of Spray Dried Honey Preparation*. Zeszyty Problemowe Postępow Nauk Rolniczych, 2013. **575**: p. 91-105.
5. Shi, Q., Z. Fang, and B. Bhandari, *Effect of Addition of Whey Protein Isolate on Spray-Drying Behavior of Honey with Maltodextrin as a Carrier Material*. Drying Technology, 2013. **31**(13-14): p. 1681-1692.
6. Fang, Z. and B. Bhandari, *Effect of spray drying and storage on the stability of bayberry polyphenols*. Food Chem, 2011. **129**(3): p. 1139-47.
7. Bergenstahl, P.F.B., *Changes in Surface Composition of Spray-Dried Food Powders due to Lactose Crystallization*. 1996. **29**: p. 438-446.
8. Woo, M.W. and B. Bhandari, *Spray drying for food powder production*. 2013: p. 29-56.
9. Fang, Z. and B. Bhandari, *Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice*. Food Research International, 2012. **48**(2): p. 478-483.
10. Goula, A.M. and K.G. Adamopoulos, *Effect of Maltodextrin Addition during Spray Drying of Tomato Pulp in Dehumidified Air: II. Powder Properties*. Drying Technology, 2008. **26**(6): p. 726-737.
11. Shishir, M.R.I., et al., *Physical Properties of Spray-dried Pink Guava (Psidium Guajava) Powder*. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2014. **2**: p. 74-81.

12. Adhikari, B., et al., *Effect of addition of proteins on the production of amorphous sucrose powder through spray drying*. Journal of Food Engineering, 2009. **94**(2): p. 144-153.
13. Adhikari, B., et al., *The effect of low molecular weight surfactants and proteins on surface stickiness of sucrose during powder formation through spray drying*. Journal of Food Engineering, 2009. **94**(2): p. 135-143.
14. Samborska, K., P. Gajek, and A. Kamińska-Dwórznička, *Spray Drying of Honey: The Effect of Drying Agents on Powder Properties*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2015. **65**(2).
15. Noshad, M., et al., *Microencapsulation of vanillin by spray drying using soy protein isolate-maltodextrin as wall material*. Flavour and Fragrance Journal, 2015. **30**(5): p. 387-391.
16. Cassia Roberta Malacridaa, V.R.N.T., *Effect of different ratios of maltodextrin/gelatin and ultrasound in the microencapsulation efficiency of turmeric oleoresin*.
17. Castro-Muñoz, R., B.E. Barragán-Huerta, and J. Yáñez-Fernández, *Use of gelatin-maltodextrin composite as an encapsulation support for clarified juice from purple cactus pear (Opuntia stricta)*. LWT - Food Science and Technology, 2015. **62**(1): p. 242-248.
18. Jayasundera, M., et al., *The effect of protein types and low molecular weight surfactants on spray drying of sugar-rich foods*. Food Hydrocolloids, 2011. **25**(3): p. 459-469.
19. Xu, Y.Y., et al., *Investigation of Relationship between Surface Tension of Feed Solution Containing Various Proteins and Surface Composition and Morphology of Powder Particles*. Drying Technology, 2012. **30**(14): p. 1548-1562.
20. บัณฑิต พรหมรักษา, จ.ด., เตือนจิต คำพิทักษ์, ประณีติ หงสประภาส, พัชรี บุญศิริ, เทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชันและบทบาททางการแพทย์. ศรีนครินทร์เวชสาร, 2557. **29**(1): p. 90-97.
21. Fang, Z. and B. Bhandari, *Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation*. 2012: p. 73-109.

22. Gharsallaoui, A., et al., *Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview*. Food Research International, 2007. **40**(9): p. 1107-1121.
23. Adhikari, B., et al., *Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid-rich foods during convective drying: experiments and modelling*. Journal of Food Engineering, 2004. **62**(1): p. 53-68.
24. Scott, D.W.B.J.W.H.R.J., *Introduction to Chemistry: General, Organic, and Biological (v. 1.0)*. 2011: Unnamed Publisher.
25. Paulsson, M.D., P., *Thermal denaturation of whey proteins in mixtures with caseins studies by differential scanning calorimetry*. Journal of Dairy Science, 1990. **73**: p. 590-600.
26. พรเฉลิมพงศ์, พ. and น. รัตนาปนนท์. *Gelatin / เจลาติน*. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1008/gelatin-เจลาติน>.
27. Kaur, M., et al., *Improved SDS-PAGE Molecular Weight Determination of a Succinylated Limes Ossein Gelatin*. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2010. **7**(3): p. 195-209.
28. Jayasundera, M., et al., *Surface protein coverage and its implications on spray-drying of model sugar-rich foods: Solubility, powder production and characterisation*. Food Chemistry, 2011. **128**(4): p. 1003-1016.
29. Kim, E.H.-J., *Surface Composition of Industrial Spray Dried Dairy Powders and Its Formation Mechanisms*. 2008.
30. Faldt P, B.B., Carlsson G. , *The surface coverage of fat on food powders analyzed by ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis)*. Food Structure, 1993. **12**: p. 225-234.
31. Okewale, A.O., Etuk, B.R*, and Igbokwe, P.K., <ADSORPTION AND KINETIC MODELLING OF THE UPTAKE OF WATER FROM ETHANOL – WATER SYSTEMS USING STARCHY ADSORBENTS.pdf>. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, 2011. **11**: p. 81-91.
32. Wang, W., Y. Jiang, and W. Zhou, *Characteristics of soy sauce powders spray-dried using dairy whey proteins and maltodextrins as drying aids*. Journal of Food Engineering, 2013. **119**(4): p. 724-730.

33. Abdul-Fattah, A.M., D.S. Kalonia, and M.J. Pikal, *The challenge of drying method selection for protein pharmaceuticals: product quality implications*. J Pharm Sci, 2007. **96**(8): p. 1886-916.
34. Schuck, P., *Dairy powders*. 2013: p. 437-464.
35. Rajabi, H., et al., *Retention of saffron bioactive components by spray drying encapsulation using maltodextrin, gum Arabic and gelatin as wall materials*. Food Hydrocolloids, 2015. **51**: p. 327-337.
36. MONICA T. KALICHEVSKY, J.M.V.B. and P.F. TOKARCZUK, *Effect of water content and sugars on the glass transition of casein and sodium caseinate*. International Journal of Food Science and Technology, 1993. **28**: p. 139- 151.
37. เขียววีร์ อิ่มสุทธิ, การกักเก็บสารลิโมนีนและเมทิลินบลูในผงแห้งที่ไม่ละลายน้ำด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 156.





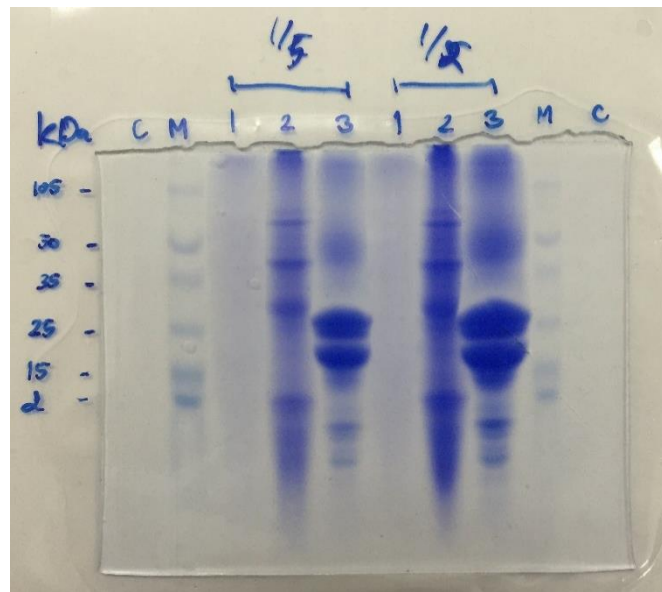
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผนวก ก

ก.1 ตัวอย่างการคำนวณมวลโมเลกุลของโปรตีน

เมื่อทำการทดลอง SDS-Page เรียบร้อย จากนั้นนำเจลดังกล่าวแสดงในรูปที่ ก.1 วัดระยะทางที่โปรตีนเคลื่อนที่ จากนั้นนำระยะทางที่โปรตีนเคลื่อนที่หารด้วยระยะทางที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่ จะได้ Rate of flow (Rf) โดยเจลนี้มีระยะของตัวทำละลายเคลื่อนที่เท่ากับ 7 เซนติเมตร

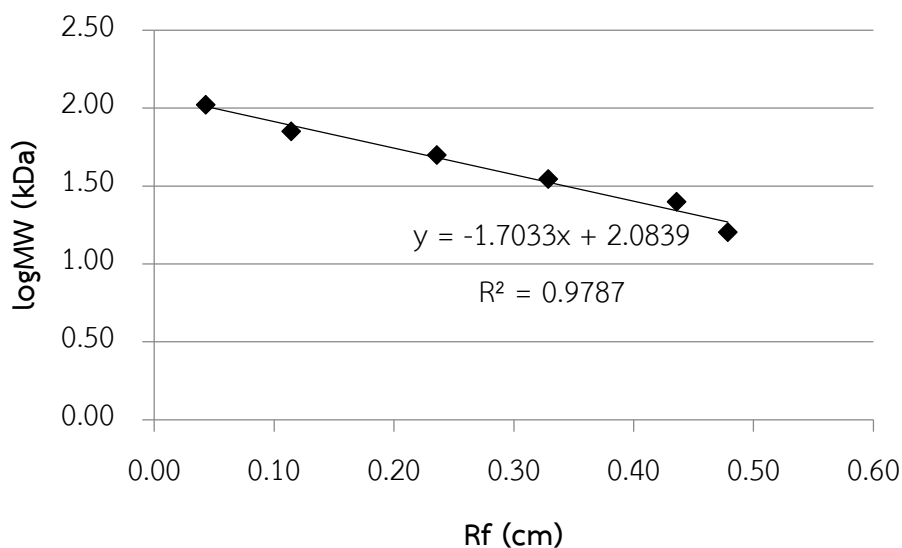


รูปที่ ก.1 เจลที่ได้จากการทำ SDS-Page

ตารางที่ ก.1 ระยะทางของการเคลื่อนที่ของโปรตีนที่มีมวลโมเลกุลต่างๆ

CHULALONGKORN UNIVERSITY			
marker			
MW (kDa)	logMW	ระยะทางที่โปรตีนเคลื่อนที่ (cm)	Rf
105	2.02	0.3	0.04
71	1.85	0.8	0.11
50	1.70	1.65	0.24
35	1.54	2.3	0.33
25	1.40	3.05	0.44
16	1.20	3.35	0.48
2	0.30	4.3	0.61

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ ก.1 สร้างกราฟมาตรฐานของโปรตีนมาตรฐาน ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แสดงกราฟมาตรฐานของโปรตีนมาตรฐาน

จากกราฟจะได้สมการของกราฟโปรตีนมาตรฐาน จากนั้นนำระยะของการเคลื่อนที่ของโปรตีนมาแทนในตำแหน่ง x ในสมการ และจะได้ ค่า y ซึ่งเท่ากับ logMW เพื่อให้ได้มวลโมเลกุลของโมเลกุลของโปรตีนโดย 10 ยกกำลัง logMW

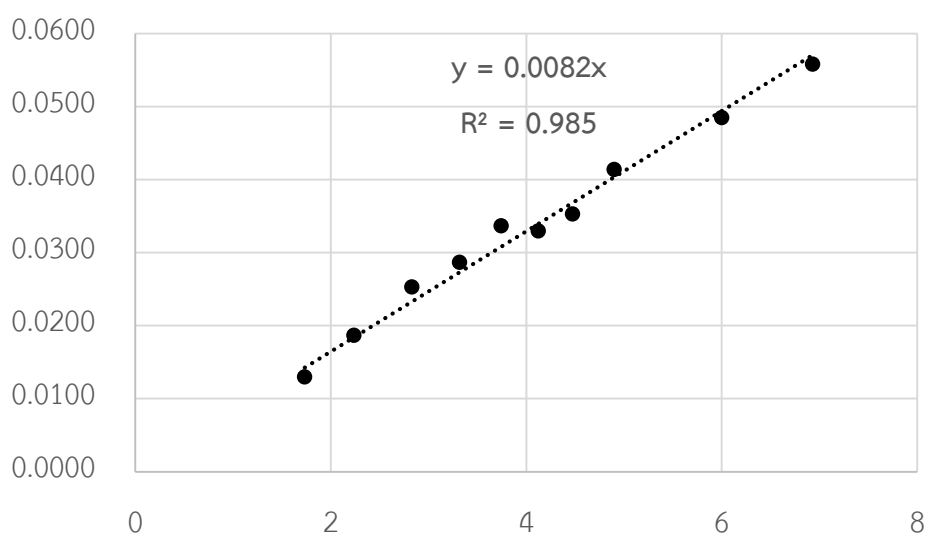
ก.2 ตัวอย่างการคำนวณ Pore diffusion model

นำข้อมูลในตารางที่ 2 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ดูดซับกับเวลายกกำลัง 0.5

ตารางที่ ก.2 ปริมาณน้ำที่ดูดซับที่เวลาต่างๆ

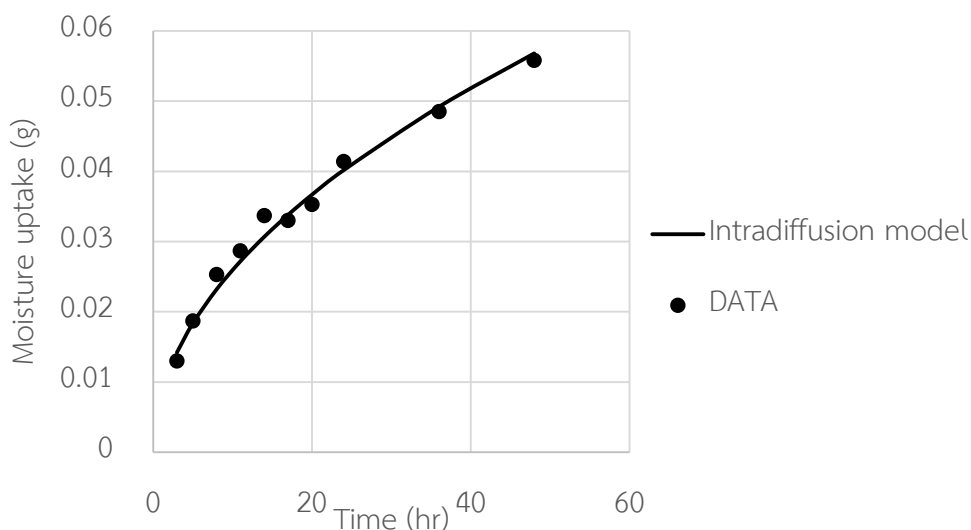
เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม)
3	0.0130
5	0.0187
8	0.0253
11	0.0287
14	0.0337
17	0.0330
20	0.0353
24	0.0414
36	0.0485
48	0.0558

จากนั้นจะได้กราฟดังรูปที่ ก.3 โดยค่าความชันที่ได้คืออัตราเร็วในการดูดซับน้ำในอากาศ



รูปที่ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับกับเวลายกกำลัง 0.5

จากนั้นนำค่าความชื้นและเวลา แทนค่ากลับเข้าไปในสมการดั้งเดิม และสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลองและจากการคำนวณ จะได้กราฟดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองและการคำนวณ

ก.3 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณของโปรตีนบนผิวและภายในของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

นำมวลของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของมอลโตเดกซ์ตรินหักมวลของน้ำออกจากนั้นทำการปรับมวลของมอลโตเดกซ์ตรินที่ไม่รวมน้ำให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากข้อมูลจากเครื่อง XPS นั้นไม่ได้แสดงปริมาณของไฮโดรเจนมาดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงตัดเอาปริมาณของไฮโดรเจนออกและทำให้เป็น 100% อีกครั้งดังแสดงในตาราง ก.3

ตารางที่ ก.4 ปริมาณขององค์ประกอบของมอลโตเดกซ์ตริน

ธาตุ	(%mass) with water	(%mass) without water	normalize	ไม่คิด H	normalize แบบไม่คิด H
C	40.48	40.48	43.06	43.06	45.96
H	6.59	5.93	6.31	0.00	0.00
N	0	0	0.00	0.00	0.00
O	52.93	47.6	50.63	50.63	54.04
	100	94.01	100.00	93.69	100

จากข้อมูลปริมาณไนโตรเจนของโปรตีนบริสุทธิ์จากเครื่อง XPS ดังแสดงในตารางที่ ก.4 ตารางที่ ก.4 องค์ประกอบของโปรตีนที่ผิวของโซเดียมคาร์ซิเนต

element	Na-C
O	18.9
C	65.56
N	13.71

จากนั้นทำปริมาณของธาตุจากตารางที่ ก.3 และ ก.4 มาคำนวณในสมการดังต่อไปนี้

$$I_{sample}^C = I_{maltodextrin}^C \cdot \gamma_{maltodextrin} + I_{protein}^C \cdot \gamma_{protein}$$

$$I_{sample}^N = I_{protein}^N \cdot \gamma_{protein}$$

โดย I_{sample}^C คือ ปริมาณคาร์บอนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

$I_{maltodextrin}^C$ คือ ปริมาณคาร์บอนบนผิวของผงโปรตีนบริสุทธิ์

$\gamma_{maltodextrin}$ คือ สัดส่วนของมอลโตเดกซ์ตรินที่อยู่บนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

I_{sample}^N คือ ปริมาณไนโตรเจนบนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

$I_{protein}^{C,N}$ คือ ปริมาณคาร์บอนหรือไนโตรเจนบนผิวของผงโปรตีนบริสุทธิ์

$\gamma_{protein}$ คือ สัดส่วนของโปรตีนที่อยู่บนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน

ยกตัวอย่างเช่น ผงที่อัตราส่วนของ MD:Na-C เท่ากับ 99.5:0.5 มีปริมาณออกซิเจน 40.61% คาร์บอน 55.56% และ ไนโตรเจน 3.8% ที่ผิวของผง เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

สมการของคาร์บอน :

$$55.56 = (0.4596) \cdot \gamma_{maltodextrin} + (0.6556) \cdot \gamma_{protein}$$

สมการของไนโตรเจน : $3.8 = 0.1371 \cdot \gamma_{protein}$

ดังนั้นจะได้ ค่า $\gamma_{protein} = 27.86\%$ และ $\gamma_{maltodextrin} = 81.14\%$ โดยประมาณ

เมื่อได้ปริมาณโปรตีนที่อยู่บนผิวของผงโปรตีน/มอลโตเดกซ์ตริน จากนั้นทำการคิดเป็น 100% จะได้ $\gamma_{protein} = 25.56\%$ และ $\gamma_{maltodextrin} = 74.44\%$ และทำการคิดที่ผิวอนุภาคเป็น 100% โดยหักความชื้นที่คงอยู่ในอนุภาคออก 5.6% เท่ากับมีของแข็งเหลืออยู่ 94.4% ดังนั้นจะมีโปรตีนอยู่ที่ผิวของอนุภาคเป็นสัดส่วนเท่ากับ $0.2556 \times 94.4 = 24.13\%$ และมีมอลโตเดกซ์ตรินที่ผิวเท่ากับ $0.7444 \times 94.4 = 70.27\%$ และเมื่อคิดสัดส่วนของโปรตีนภายในอนุภาคจะสามารถคิดได้จากการนำเอาสัดส่วนของโปรตีนเท่ากับ $0.005 \times 94.4 = 0.47\%$ และมีปริมาณของมอลโตเดกซ์ตรินเท่ากับ $0.995 \times 94.4 = 93.93\%$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว สุทธิลักษณ์ ศิริพรเลิศ เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

